# TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO



# UNITECH 2022 GABROVO

## INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

## SELECTED PAPERS

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ГАБРОВО**




# МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ

# УНИТЕХ 2022 ГАБРОВО

# ИЗБРАНИ ДОКЛАДИ

**18 – 19 НОЕМВРИ 2022**
**ГАБРОВО**

**ISSN:** 2603-378X

## ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ

**Председател:** Доц. Пламен Цанков
*Зам.-ректор НИР*

**Членове:** Проф. дтн Йордан Максимов
Проф. Анатолий Александров
Доц. Тодор Тодоров

**Технически организатор:**
Петя Пенева

## ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

**Председател**: Проф. Илия Железаров
*Технически университет – Габрово, България*

**Членове:**
Акад. Чавдар Руменин, България
Акад. Драголюб Мирянич, Република Сръбска, Босна и Херцеговина
Акад. Томислав Павлович, Република Сръбска
Чл. Кор. Димитър Димитров, България
Чл. Кор. Тони Спасов, България
Проф. дн. Юрий Кузнецов, ДХК, Украйна
Проф. Николай Ганев, ДХК, Република Чехия
Проф. Хелмут Хоп, Германия
Проф. Лутер Отто, Германия
Проф. Емил Колев, Германия
Проф. Лудвиг Хилмер, Германия
Проф. Елена Коваленко, Украйна
Проф. дн Юрий Ярменчук, Украйна
Проф. Михаил Прокофиев, Украйна
Проф. дн Игор Сазонов, Беларус
Проф. дн Васил Каварджиков, България
Проф. Иван Янчев, България
Проф. дтн Васил Каварджиков, България
Проф. дтн Райчо Иларионов, България
Проф. дн Галя Дунчева, България
Проф. Ирина Александрова, България
Проф. Звездица Ненова, България
Проф. Николай Маджаров, България
Проф. Димитър Дичев, България
Проф. Тошко Ненов, България
Доц. Росен Иванов, България
Доц. Ангел Анчев, България
Доц. Хилми Куску, Турция

# ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ГАБРОВО
# МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ УНИТЕХ'22

**И З Б Р А Н И  Д О К Л А Д И**

Адрес: 5300, Габрово, ул. „Хаджи Димитър" 4
Университетско издателство "Васил Априлов" – Габрово

**Издател: Технически университет – Габрово, 2022**
**Университетско издателство "Васил Априлов" – Габрово, 2022**

**TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO**




# INTERNATIONAL
# SCIENTIFIC CONFERENCE

# UNITECH 2022 GABROVO

# SELECTED PAPER

**18 - 19 NOVEMBER 2022**
**GABROVO**

**ISSN:** 2603-378X

## ORGANIZING COMMITTEE

**Chairman:** Assoc. Prof. Plamen Tsankov, PhD
*Vice-Rector in charge of Research and Development*

**Members**: Prof. Jordan Maximov, DSc
Prof. Anatoliy Aleksandrov, PhD
Prof. Todor Todorov, PhD

**Technical Assistant:**
Petya Peneva, MA

## PROGRAM COMMITTEE

**Chairman**: Prof. Iliya Zhelezarov, PhD
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Members:**

Acad. Chavdar Rumenin, Bulgaria
Acad. Dragoljub Mirjanić, Rep. Srpska, B&H
Acad. Tomislav Pavlović, Serbia
Acad. Dimitar Dimitrov, Bulgaria
Corr. Mem. Prof. Tony Spassov, Bulgaria
Prof. DHC Yuriy Kuznetsov, DSc, Ukraine
Prof. DHC Nikolay Ganev, PhD, Czech Republic
Prof. DHC Helmut Hopp, PhD, Germany
Prof. Lothar Otto, PhD, Germany
Prof. Emil Kolev, PhD, Germany
Prof. Ludwig Hilmer, PhD, Germany
Prof. Elena Kovalenko, PhD, Ukraine
Prof. Iurii Iaremchuk, DSc, Ukraine
Prof. Mikhail Prokofiev, PhD, Ukraine
Prof. Igor Sazonov, DSc, Belarus
Prof. Ivan Yachev, DSc, Bulgaria
Prof. Vasil Kavardjikov, DSc, Bulgaria
Prof. Raycho Ilarionov, DSc, Bulgaria
Prof. Galya Duncheva, DSc, Bulgaria
Prof. Irina Aleksandrova, PhD, Bulgaria
Prof. Zvezditsa Nenova, PhD, Bulgaria
Prof. Nikolay Madzharov, PhD, Bulgaria
Prof. Dimitar Dichev, DSc, Bulgaria
Prof. Toshko Nenov, PhD, Bulgaria
Prof. Stanimir Sadinov, PhD, Bulgaria
Assoc. Prof. Rosen Ivanov, PhD, Bulgaria
Assoc. Prof. Angel Anchev, PhD, Bulgaria
Assoc. Prof. Hilmi Kuscu, PhD, Turkey


# TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE UNITECH'22

**S E L E C T E D  P A P E R**


Address: 5300, Gabrovo, "H. Dimitar" 4 street
University Publishing House "V. Aprilov" – Gabrovo



**© TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 2022**
**© UNIVERSITY PUBLISHING HOUSE "V. APRILOV" – GABROVO, 2022**

# THEMATIC SESSIONS

- **Electrical Engineering**
- **Electronics and Sensors Technics**
- **Communication Engineering and Technologies**
- **Computer Systems, Computer Technologies and Information Security**
- **Automation**
- **Technologies in Mechanical Engineering and Design of Machines and Instruments**
- **Hydraulics, Pneumatics and Heat Engineering and Mechatronics, Metrology and Quality Management**
- **Social Sciences and Humanities, Organization and Management, Entrepreneurship and Economy**
- **Educational Technologies**
- **Chemistry, Physics and Ecology**

# C O N T E N S

*PLENARY REPORT*

**MODERN LASERS AND THEIR APPLICATIONS IN INDUSTRY** ..... 17
**Stanislav Němeček,**
*University of West Bohemia, Czech Republic*

## ELECTRICAL ENGINEERING

**ANALYSIS OF THE SHADING EFFECT OF THIN LAYER CADMIUM TELLURIDE PHOTOVOLTAIC PANELS ON THEIR ELECTRICAL PERFORMANCE** ..... 25
**Emil Stanev, Ivaylo Stoyanov**
*Department of Electric Power Distribution and Electrical Equipment*
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**STUDY OF THE LED LIGHTING FLICKER FOR INDOOR APPLICATION** ..... 30
**Milko Yovchev**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**CONSIDERATION OF BIOMEDICAL FACTORS WHEN CALCULATING ARCHITECTURAL AND ARTISTIC LIGHTING** ..... 36
**Pylyp Hovorov[1], Plamen Tsankov[2], Anastasiia Kindinova[1]**
*[1]OM Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv*
*[2]Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**THEORETICAL MODEL OF A HALL ELEMENT INTELLIGENT SENSOR USING VIRTUAL INSTRUMENTS** ..... 42
**Dimitar Georgiev, Anatoliy Aleksandrov, Dobroslav Dankov, Prodan Prodanov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**TEMPERATURE ANA FREQUENCY CHARACTERISTICS OF FERROCERAMICS $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$** ..... 47
**Ivaylo Lazarov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**ELECTRICAL SIZING OF A RECIPROCATING COMPRESSOR** ..... 51
**Svilen Rachev, Lyubomir Dimitrov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**PHOTOVOLTAIC MODULES SOILING DURING HEATING SEASON IN NIŠ, SERBIA** ..... 56
**Ivana Radonjić[1], Lana Pantić[1], Tomislav Pavlović[1], Dragoljub Mirjanić[2], Darko Divnić[2]**
*[1]University of Niš, Faculty of Sciences and Mathematics, Department of Physics, Višegradska 33, 18000 Niš, Serbia*
*[2]Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Bana Lazarevića 1, 78000 Banja Luka, Republic of Srpska*

**A REVIEW OF IoT BASED PHOTOVOLTAIC MONITORING SYSTEM APPLICATIONS** ..... 61
**Stefan Đorđević[1], Marko Krstić[1], Lana Pantić[1], Ivana Radonjić[1], Tomislav Pavlović[1]**
*[1]University of Niš, Faculty of Sciences and Mathematics, Department of Physics, Višegradska 33, 18000 Niš, Serbia*

**DETERMINATION OF THE MAXIMUM POWER OF POWER PLANTS FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES IN 35 KV NETWORKS** ..... 67
**Krasimir Marinov Ivanov, Peter Kolev Petrov, Georgi Tsonev Velev**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**ANALYSIS OF THE ANNUAL PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH MonoSi, CdTe AND CIGS PV MODULES** ..... 73
**Plamen Tsankov, Ivaylo Lazarov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**LOW POWER ELECTRIC MOTORS - DIRECTIONS OF DEVELOPMENT AND COMPARATIVE ANALYSIS** ..... 78
**Dimitrina Koeva**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**GRAPHICAL REPRESENTATION OF BASIC ELECTRICAL POWER QUANTITIES MEASURED WITH POWER LOGIC PM5000 SERIES** ..... 83
**Marko Rosić, Uroš Pešović**
University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia

**LARGE HYDROPOWER PLANTS IN THE VLASINA MICROREGION** ..... 88
**Anđelina V. Marić Stanković[1], Tomislav M. Pavlović[1], Ivana S. Radonjić[1]**
*[1]University of Niš, Faculty of Sciences and Mathematics, Višegradska 33, 18000 Niš, Serbia*




**A SIMPLE LOW COST FUNCTION GENERATOR CONTROLLED BY ANDROID APPLICATION** ..... 95
**Nikola Žorić[1], Aleksandar Žorić[1], Siniša Ilić[1], Bojan Jovanović[2]**
*[1]Faculty of technical sciences - University of Priština, Serbia*
*[2]Kosovo and Metohija Academy of applied studies-Department Uroševac, Serbia*

**CLARIFICATION OF UTILIZED MEASUREMENT CIRCUITS FOR PIEZOELECTRIC VIBRATIONAL HARVESTERS** ..... 100
**Rumyana Stoyanova, Dimo Kolev, Velimira Todorova**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**RADIOMETRIC METHOD OF RESEARCHING THE EMISSION PROPERTIES OF BIO-OBJECTS** ..... 106
**Oleksiy Yanenko[1], Kostiantyn Shevchenko[1], Vasyl Kuz[2], Mikhail Prokofiev[3], Sergey Peregudov[1]**
*[1] Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
*[2] Ternopil Ivan Puluj National Technical University*
*[3]Vasyl Stus Donetsk National University*

**MAXIMUM POWER POINT TRACKING BASED ON PERTURB AND OBSERVATION ALGORITHM COMBINED WITH AQUILIA OPTIMIZER ALGORITHM FOR THERMOELECTRIC GENERATORS** ..... 110
**Mehmet Ali Üstüner[1], Hayati Mamur[1], Sezai Taşkın[1]**
*[1]Manisa Celal Bayar University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Manisa, Turkey*

**EFFECT OF LOAD VARIATIONS ON MAXIMUM POWER POINT TRACKING WITH INCREMENTAL CONDUCTANCE METHOD FOR NON-ISOLATED BOOST CONVERTERS IN THERMOELECTRIC GENERATORS** ..... 114
**Mehmet Ali Üstüner[1], Hayati Mamur[2], Sezai Taşkın[3]**
*[1,2,3]Manisa Celal Bayar University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Manisa, Turkey*

**IMPLEMENTATION OF THE HARDWARE MODULE FOR IMAGE SKELETONIZATION SYSTEM** ..... 118
**Jana Janković**
*Faculty of Technical Sciences University of Novi Sad*

**PROCESSING OF THE PULSE SIGNALS PERIODS** ..... 124
**Perišić Đurđe, Željko Gavrić, Vanja Mišković**
*Faculty of Information Technology, Slobomir P University, Slobomir, BiH*

**APPLICATION OF SiC AND GaN TRANSISTORS IN HIGH-FREQUENCY INVERTER CIRCUITS FOR INDUCTION HEATING** ..... 129
**Petko Stefchov Marinov**
*Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering and Electronics Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A TRIAXIAL INTERPOLATION FOR A CNC MACHINE IMPLEMENTED IN CONTROL SOFTWARE** ..... 136
**Petar Panayotov, Goran Goranov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**CONVERTERS WITH ENERGY DOSING BY INDUCTANCE** ..... 141
**Desislav Iliev, Nikolay Madzharov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**ENERGY STORAGE CHARGING MODULE WITH DIGITAL CONTROL** ..... 145
**Ivan Stefanov, Dimitar Arnaudov**
*Technical University of Sofia, Bulgaria*

**MOBILE CONTACTLESS AMMETER** ..... 150
**G.N. Velichkov, S.V. Lozanova**
*Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences"Acad. G. Bonchev" Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria*

**SENSOR SYSTEM FOR DETERMINING THE DEFORMATION STATE OF ROCK MASSIVES** ..... 155
**M. L. Ralchev, S. V. Lozanova**
*Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences"Acad. G. Bonchev" Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria*

# COMMUNICATION ENGINEERING AND TECHNOLOGIES

**TRAFFIC INFORMATION ANALYSIS USING DEEP LEARNING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS** ..... 163
**Ivelina Stefanova Balabanova, Teodora Valentinova Zhorova**
*Department of Communications Equipment and Technologies*
*Technical University of Gabrovo*

**TESTING THE EFFECTIVENESS OF THE CANNY ALGORITHM FOR EDGE** ..... 169
**Bojan Prlincevic[1], Zoran Milivojevic[2], Dijana Kostic[2]**
*[1]Kosovo and metohy academy of Applied studies, Leposavic, Serbia*
*[2]Academy of Applied Technical and Preschool Studies Nis, Serbia*

**THE EVALUATION QUALITY OF THE SPEECH INTELLIGIBILITY IN THE ORTHODOX CHURCH "HOLI GREAT MARTYR PROCOPIUS" IN KATUN** ..... 174
**Zoran Milivojević[1], Violeta Stojanović[2]**
*[1,2] The Academy of Applied Technical and Preschool Studies - Department Niš, Serbia*

**STATE AND DEVELOPMENT OF TELECOMMUNICATION SERVICES IN BULGARIA** ..... 180
**Aysun Ahmed[1], Stanimir Sadinov[1]**
*[1]Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**FILTER SIMULATION FOR MULTI-PHASE CURRENT SENSOR WITH INTEGRATED NOISE COMPENSATION FOR ELECTRIC VEHICLES** ..... 186
**Ivaylo Stoyanov[1], Teodor Iliev[2], Grigor Mihaylov[3]**
*[1]University of Ruse, Department of Electrical Power Engineering, Ruse, Bulgaria*
*[2]University of Ruse, Department of Telecommunication, Ruse, Bulgaria*
*[3]University of Telecommunications and Post, Department of Telecommunication, Sofia, Bulgaria*

**EXAMPLE DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATIONAL MEASUREMENTS OF A PASSIVE OPTICAL NETWORK USING LOG TECHNOLOGY** ..... 190
**Stanimir Sadinov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**SURVEY AND ASSESSMENT OF THE RANGE AND QUALITY OF WIRELESS RADIO COVERAGE IN A LORAWAN COMMUNICATION NETWORK** ..... 196
**Nikolay Manchev**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**ANALYSIS OF SC, EGC AND MRC MACRO DIVERSITY SYSTEMS** ..... 202
**Borivoje Milosevic[1], Dusan Regodic[1], Slobodan Obradovic[2]**
*[1]University MB, Belgrade, Serbia*
*[2]ITS, Belgrade, Serbia*

**RECOGNITION OF FINGERPRINTS BY DISCRETE COSINE TRANSFORM AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE** ..... 207
**Ivelina Stefanova Balabanova, Kristina Maksimova Sidorova**
*Department of Communications Equipment and Technologies*
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**MODELING AND RELIABILITY ASSESSMENT OF LORAWAN NETWORKS**.....212
**Krasen Angelov[1], Plamen Tashev[1], Panagiotis Kogias[2]**
*[1]Technical University of Gabrovo, Bulgaria*
*[2]International Hellenic University - Kavala Campus, Greece*

**APPLICATION OF LORA IN IOT HOME AUTOMATION PLATFORM**.....218
**Krasen Angelov, Nikolay Manchev, Stanimir Sadinov, Michail Angelakis**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**COMPARATIVE ANALYSIS OF PRECISION OF SINE SIGNALS INTERPOLATION USING OF THE FIFTH AND SEVENTH ORDER POLYNOMIAL INTERPOLATION KERNELS**.....224
**Nataša Savić[1], Zoran Milivojević[1], Bojan Prlinčević[2]**
*[1]Academy of Applied Technical and Preschool Studies, Niš, Serbia*
*[2]Kosovo and Metohija Academy of Applied Studies, Leposavić, Serbia*

**SIMULATION MODEL OF A RADIO FREQUENCY AMPLIFIER FOR OPERATING FREQUENCIES OVER 1 GHz**.....229
**Miroslav Tomov[1], Panagiotis Kogias[2], Michail Malamatoudis[2]**
*[1]Technical University of Gabrovo, Bulgaria*
*[2] Department of Physics International Hellenic University, Kavala, Greece*

**USING GEOSERVER AND POSGRESQL FOR CHANGE DETECTION OF SATELITE IMAGES**.....234
**Denis Byalev[1], Egnar Özdikililer[1,2]**
*[1]University of Telecommunications and Post, Sofia, Bulgaria*
*[2]Istanbul Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Istanbul, Turkey*

**DEVELOPMENT A TAG TEMPLATE ENGINE EXTENTION WITH PHP**.....239
**Egnar Ozdikililer**
*Istanbul Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Istanbul, Turkey*




**GENETIC ALGORITHMS PERFORMANCE IMPROVEMENT IN SLOWLY-CALCULATED FITNESS FUNCTIONS**.....245
**Todor Balabanov**
*Institute of Information and Communication Technologies*
*Bulgarian Academy of Sciences*

**LIBRE CALC PERFORMANCE IN OPTIMIZATION OF MULTIDIMENSIONAL NON-LINEAR FUNCTIONS**.....250
**Todor Balabanov**
*Institute of Information and Communication Technologies*
*Bulgarian Academy of Sciences*

**EVALUATION OF ELECTRIC VEHICLES USING THE SIMPLIFIED WISP METHOD**.....255
**Branislav Ivanov, Dragisa Stanujkic**
*University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Serbia*

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE QUALITY OF DATA OBTAINED FROM INTERNET SEARCH ENGINES** ..... 261
**Živković Miloš[1], Blagojević Marija[2], Stanišević Ilja[1]**
*[1]Western Serbia Academy of Applied Studies, department Valjevo, Serbia*
*[2]Faculty of Technical Science Čačak, Serbia*

**MEASUREMENT OF THE INTERNET IMPACT ON DBMS RESPONSE SPEED** ..... 267
**Živković Miloš[1], Stanišević Ilja[1], Obradović Slobodan[2], Petrović Đorđe[1]**
*[1]Western Serbia Academy of Applied Studies, department Valjevo, Serbia*
*[2]Information Technology School Belgrade, Serbia*

**A WEB-BASED SYSTEM FOR REMOTE ACCESS TO FPGA DEVELOPMENT HARDWARE** ..... 274
**Ivan Panayotov, Petar Minev**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**MICROSERVICE FOR CREATING GEOFENCES** ..... 280
**Victoria Velkova**, **Rosen Ivanov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**MODELING DIALOGUE IN AUTOMATED DESIGN SYSTEMS** ..... 285
**V. Kukenska, P. Minev, I. Varbov, M. Dinev**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**CONTROLLER FOR ULTRASONIC MEASUREMENT OF WIND SPEED AND DIRECTION** ..... 290
**Hristo Kilifarev**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**COMPARATIVE ANALYSIS OF VIDEO EFFECTS IN AUDIO-VISUAL PRODUCTION** ..... 296
**Ivanka Valova**
*Faculty of Journalism and Mass Communication Educational Television Studio*
*Sofia University "St. Kliment Ohridski", Bulgaria*

**LORA AND ZIGBEE SENSOR NETWORK DATA STORING SYSTEM** ..... 302
**Diyan Dinev, Aydan Haka**
*Technical University of Varna, Bulgaria*

**USING THE PRINCIPLE OF DECOMPOSITION IN FUNCTIONAL AND STRUCTURAL DESIGN** ..... 308
**V. Kukenska, M. Dinev, P. Minev, I. Varbov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**PROGRAMMING FOR TOUCH-SCREEN DISPLAYS USING RASPBERRY PI AND KIVY LIBRARY** ..... 314
**Delyan Genkov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**CREATING A VIRTUAL PRIVATE NETWORK USING WIREGUARD** ..... 319
**Delyan Genkov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**DETERMINING AN EFFECTIVE SET OF TIME SERIES DATA PARAMETERS SUITABLE FOR IDENTIFYING SECURITY INCIDENTS** ..... 324
**Vasyl Komarov, Dmitrii Chernov, Vladimir Krizhanovski**
Vasyl' Stus Donetsk National University

# AUTOMATION

**A SYSTEM FOR GATHERING AND VISUALIZATION OF AIR QUALITY DATA FROM A GEO-REFERENCED MULTI-SENSOR GAS-SENSING HEAD** ..... 331
**Kamen Boyadzhiev, Stefan Ivanov**
*Department of Automation, Information and Control Systems*
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE INFLUENCE ON THE CHARACTERISTICS OF HUMIDITY SENSOR ELEMENTS BASED ON Ti-Si-O-Ce-Zn-Cu THIN FILMS** ..... 336
**Nedyu Nedev[1], Zvezditza Nenova[1], Stephan Kozhukharov[2], Toshko Nenov[1]**
*[1] Technical University of Gabrovo, Bulgaria*
*[2] University of Chemical Technology and Metallurgy, Bulgaria*

**ACQUIRING DATA FOR CHEESE AGING USING GAS SENSORS** ..... 340
**Stefan Ivanov, Todor Todorov, Elena Monova**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR CLASSIFICATION OF CHEESE** ..... 344
**Stefan Ivanov, Todor Todorov, Elena Monova**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**ANALYSIS OF PID CONTROL SYSTEM USING EXPERIMENT SET FOR UNDERGRADUATE ENGINEERING STUDENTS** ..... 349
**Ozgur Mercanlı, Hilmi Kuscu**
*Trakya University, Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Edirne/Turkey*

**DEVELOPMENT OF A PLC BASED EXPERIMENTAL SETUP FOR UNDERSTANDING CONTROL AND AUTOMATION APPLICATIONS** ..... 354
**Figan DALMIŞ**
*Namik Kemal University, Vocational School of Technical Sciences, Turkey*

**DESIGN OF SYNCHRONIZATION SCHEME FOR TWO NON-IDENTICAL CHAOTIC SYSTEMS** ..... 358
**Dragomir Chantov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**SYNCHRONIZATION OF WANG CHAOTIC MODEL BY MEANS OF ONE-VARIABLE COUPLING** ..... 364
**Dragomir Chantov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**LABORATORY MULTI-AGENT TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM** ..... 370
**Stanimir Yordanov, Georgi Mihalev, Hristina Stoycheva, Valentin Vladimirov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

## TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING AND DESIGN OF MACHINES AND INSTRUMENTS

**PROCESSING EFFICIENCY RESEARCH ON CNC LATHES** ..... 379
**Kalin Krumov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**PROCESSING OF COMPLEX DETAILS WITH VARIABLE CUTTING MODES IN THE CONDITION OF PARTIAL AUTOMATION** ..... 384
**Kalin Krumov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**3D SIMULATION AND RESIDUAL STRESS ANALYSIS OF JOINING AA7075 ALLOY SHEET WITH LASER WELDING METHODS** ..... 391
**Cenk MISIRLI, Isik CETINTAV**
*Trakya University, Turkey*

**ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES FOR REDUCING ENVIRONMENTAL POLLUTION THROUGH THE USE OF BIOPLASTICS** ..... 396
**Emil Velev**
*Paisii Hilendarski University of Plovdiv, Bulgaria*

**ANALYSIS OF TAPPING TORQUE STUDIES WITH DIFFERENT TYPES OF TAPS** ..... 402
**Hristo Radev, Hristian Mitev, Hristo Yakimov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**VECTOR-MATRIX APPROACH IN ANALYSIS OF RAPIER LOOM** ..... 407
**Marin Jordanov Marinov**
*Department of Industrial Design and Textile Engineering*
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

## HYDRAULICS, PNEUMATICS AND HEAT ENGINEERING AND MECHATRONICS, METROLOGY ANG QUALITY MANAGEMENT

**CHANGING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF FIRE HOSES WHEN THEY TRANSPORT WATER** ..... 413
**Stas S. V., Kolesnikov D. V., Bychenko A. O., Horenko L. M.**
*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Defence of Ukraine*

**EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR RESEARCHING THE EFFICIENCY OF THE COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE SYSTEM** ..... 419
**Oleksandr Haletskyi**
*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

**GEROTOR PUMP OF VARIABLE PERFORMANCE** ..... 422
**Oleksandr Haletskyi, Oleksandr Yukhymchuk**
*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

**EFFECTS OF THE PROJECTILE POSITION INSIDE THE CARTRIGE AND CARTRIDGE THICKNESS ON THE COOK-OFF** ..... 425
**Çiğdem Susantez, Kamil Kahveci, Oktay Hacıhafızoğlu, Hilmi Kuşçu**
*Trakya University Engineering Faculty Mechanical Engineering Department, Turkey*

**VALVES AND DRIVE METHODS OF VALVES USED IN THE HYDRAULIC INDUSTRY** ..... 430
**Hilmi KUSCU, Umut EREN**
*Trakya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Edirne, Turkey*

**FULLY AUTOMATIC SAMPLING AND DATA MONITORING AUTOMATION FOR WASTEWATER TREATMENT PLANTS** ..... 435
**Aydin GULLU[1], Emir OZTURK[2], Mustafa ARDA[2]**
*[1]Ipsala Vocatonal School Trakya University Edirne, Turkey*
*[2]Engineering Faculty Trakya University Edirne, Turkey*

**INVESTIGATION OF SWARM ROBOT APPLICATIONS AND SWARM ROBOT EXPERIMENT PLATFORMS** ..... 439
**Aydin GULLU[1], Gurkan TUNA [2], M. Ozan AKI [1], Ozcan CETINKAYA[3], Hilmi KUSCU[4]**
*[1]Ipsala Vocatonal College Trakya University Edirne, Turkey*
*[2] Edirne Vocational School of Technical Sciences Trakya University Edirne, Turkey*
*[3] Kesan Vocatonal College Trakya University Edirne, Turkey*
*[4] Engineering Faculty Trakya University Edirne, Turkey*

**IMPROVED RELIABILITY OF PSEUDORANDOM OPTICAL ROTARY ENCODER** ..... 443
**Goran Miljković, Ivana Ranđelović, Dragan Denić, Milan Simić**
*University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia*

## SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES, ORGANIZATION AND MANAGEMENT, ENTREPRENEURSHIP AND ECONOMY, MATHEMATICS

**EVALUATION OF THE INTELLECTUAL CAPITAL IMPACT ON THE COMPANY'S ATTRACTIVENESS** ..... 449
**Rima Tamošiūnienė[1], Monika Sajavičiūtė[2]**
*[1,2] Vilnius Gediminas Technical University, Financial Engineering Department, Saulėtekio ave. 11,*
*LT-10223, Vilnius, Lithuania*

**DYNAMICS OF DEMOGRAPHIC INDICATORS AND MORBIDITY OF SOCIALLY SIGNIFICANT DISEASES IN GABROVO REGION** ..... 455
**Ivanka Stoyanova - Todorova**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

## EDUCATION TECHNOLOGIES

**IMPROVING THE STUDENTS' LEARNING OF OPTICS AND ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS BY COMPUTER-ASSISTED SCHOOL EXPERIMENTS**.....467
**Fabien Kunis[1], Konstantin Ilchev[2], Milena Stoyanova[3], Vesela Dimova[3], Tsanislava Genova[4], Stefan Valkov[4,5], Christina Andreeva[3,4]**
*[1]High School 125 Prof. Boyan Penev, Sofia, Bulgaria*
*[2]Private English Language School "Prof. Ivan Apostolov", Sofia, Bulgaria*
*[3]Faculty of Physics, Sofia University "St. Kliment Ohridski", Sofia, Bulgaria*
*[4]Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*
*[5]Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar Str., 5300 Gabrovo, Bulgaria*

## CHEMISTRY, PHYSICS AND ECOLOGY

**TRACE – TOXIC ELEMENT ACCUMULATIONS IN WATER OF ATİKHİSAR DAM LAKE (ÇANAKKALE, TÜRKİYE)** .....475
**Cem Tokatlı**
*Trakya University, Evrenos Gazi Campus, Laboratory Technology Program, İpsala, Edirne, Turkey*

**MACRO – MICRO ELEMENT CONCENTRATIONS IN WATER OF SAZLIDERE DAM LAKE (İSTANBUL, TÜRKİYE)** .....480
**Cem Tokatlı**
*Trakya University, Evrenos Gazi Campus, Laboratory Technology Program, İpsala, Edirne, Turkey*

**APPLICATION OF SONOCHEMISTRY FOR THE SYNTHESIS OF CAPRIC ALIPHATIC ESTERS**.....485
**Dragomir Vasilev[1], Nadezhda Petkova[2], Panteley Denev[2]**
*[1]Technical University of Gabrovo, Bulgaria*
*[2]University of Food Technologies, Plovdiv, Bulgaria*

**APPLICATION OF CAPRATE ALIPHATIC ESTER AS BIO-PLASTICIZER AND BIO-ADDITIVE IN PLASTICS**.....489
**Dragomir Vasilev[1], Nadezhda Petkova[2], Milka Atanasova[1], Panteley Denev[2]**
*[1]Technical University of Gabrovo, Bulgaria*
*[2]University of Food Technologies, Plovdiv, Bulgaria*

**ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEMS' EFFECTIVENESS OF ENTERPRISES IN DEVNYA MUNICIPALITY** .....492
**Elena Valkova**
*Technical University of Varna, Bulgaria*

**ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF PADINA SETTLING BASIN**.....499
**Elena Valkova**
*Technical University of Varna, Bulgaria*

**THE EFFECT ON INCOMPRESSIBLE STRIPS OF THE DISTANCE BETWEEN THE METALLIC GATES AND THE TWO-DIMENSIONAL ELECTRON SYSTEM** ..... 505
**Deniz Eksi**
*Vacational School of Health, Yeni Yuzyil University, Istanbul, 34010, Turkey*

**A RESONANT TUNNELLING STRUCTURE OF GaAs ALLOYS** ..... 510
**Sevket Erol OKAN[1], Abdullah BILEKKAYA[2], Saban AKTAS[1]**
*[1]Department of Physics, Trakya University, Edirne-Turkey*
*[2]Department of Electronics, Edirne Vocational College of Technical Sciences, Trakya University, Edirne-Turkey*

**SIZE EFFECT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF BCC TANTALUM NANOWIRES BY MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS** ..... 514
**Vildan GUDER**
*Department of Physics, Faculty of Science, Trakya University, 22030 Edirne, Turkey*

**THE OPTICAL ABSORPTION CHANGES IN TWO-STEP INFINITE SPHERICAL QUANTUM DOT** ..... 520
**Sevket Erol Okan[1,2], Hande Temel[2], Abdullah Bilekkaya[2,3], Figen Karaca Boz[1,2]**
*[1]Trakya University, Faculty of Science, Department of Physics, 22030 Edirne, Turkey*
*[2]Trakya University, Institute of Science, 22030 Edirne, Turkey*
*[3]Trakya University, Edirne Vocational College of Technical Sciences,22100 Edirne, Turkey*

**STRONTIUM UNDER HIGH PRESSURE AND DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS: A MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION STUDY** ..... 526
**Murat Celtek[1], Unal Domekeli[2], Sedat Sengul[2]**
*[1]Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*
*[2]Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COOLING RATE ON ATOMIC STRUCTURE OF LIQUID CALCIUM: A MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION STUDY** ..... 532
**Murat Celtek[1], Sedat Sengul[2], Unal Domekeli[2]**
*[1]Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*
*[2]Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*

**THERMAL PROPERTIES OF ZINC NANOCRYSTALS: A COMPARISON STUDY USING THEORETICAL MODELS** ..... 538
**Unal Domekeli[1], Murat Celtek[2], Sedat Sengul[1]**
*[1]Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*
*[2]Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*

**A MOLECULAR DYNAMICS STUDY OF STRUCTURAL AND DYNAMIC PROPERTIES OF GOLD NANOPARTICLES WITH PALLADIUM COATING** ..... 544
**Unal Domekeli[1], Sedat Sengul[1], Murat Celtek[2]**
*[1]Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*
*[2]Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*

**INVESTIGATION OF THE MELTING PROCESS OF BCC IRON USING DIFFERENT INTERATOMIC POTENTIALS** ..... 550
**Sedat Sengul[1], Unal Domekeli[1], Murat Celtek[2]**
*[1]Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*
*[2]Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*

**EVOLUTION OF THE ATOMIC STRUCTURE OF CADMIUM IN THE HEATING AND COOLING PROCESS** ..... 556
**Sedat Sengul[1], Murat Celtek[2], Unal Domekeli[1]**
*[1]Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*
*[2]Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – Turkey*

**VERIFYING THE REPEATABILITY OF AUTO MACH RESULTS WITH THE XVI SYSTEM** ..... 562
**Nikolay Mutkurov [1], Stanimir Radushev [1], Virginia Payakova [2]**
*[1]Complex Oncology Center – Burgas, Radiation oncology department, Bulgaria*
*[2] UMHAT" Dr. Georgi Stranski", Radiation oncology department, Bulgaria*

**ELECTRON BEAM WELDING OF DISSIMILAR METALS AND ALLOYS** ..... 566
**Darina Kaisheva[1,2], Georgi Kotlarski[1], Borislav Stoyanov[3], Vladimir Dunchev[3], Maria Ormanova[1], Stefan Valkov[1,3]**
*[1]Academician Emil Djakov Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 72 Tzarigradsko Chausse Blvd, 1784 Sofia, Bulgaria*
*[2] South-West University „Neofit Rilski “, 66 Ivan Michailov Str., 2700 Blagoevgrad, Bulgaria*
*[3] Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar Str., 5300 Gabrovo, Bulgaria*

**USE OF INTERPOLATION AND EXTRAPOLATION METHODS IN THE LABORATORY PRACTICUM IN PHYSICS** ..... 572
**Fatme Padikova, Daniela Nedeva, Nikolay Angelov**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**RADIOACTIVITY IN ACHILLEA MILLEFOLIUM L. COLLECTED FROM TWO REGIONS IN BULGARIA** ..... 576
**Nina Arhangelova[1], Seniha Salim[1], Daniela Nedeva[2], Zheni Dimitrova[1]**
*[1]Konstantin Preslavsky University of Shumen, Bulgaria*
*[2]Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**RADIOACTIVITY IN THREE HERBS COLLECTED FROM REGION IN SHUMEN, BULGARIA** ..... 581
**Nina Arhangelova[1], Seniha Salim[1], Daniela Nedeva[2], Zheni Dimitrova[1]**
*[1]Konstantin Preslavsky University of Shumen, Bulgaria*
*[2]Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

*PLENARY REPORT*

# MODERN LASERS AND THEIR APPLICATIONS IN INDUSTRY

**Stanislav Němeček,**
[1] *University of West Bohemia, Univerzitní 22, 301 00 Pilsen, Czech*

**Abstract**
*The laser is a universal tool for material processing in engineering. It can be used for cutting, welding, applying metal layers, locally hardening the surface of steel parts, and there are many other applications. A laser is a source of high energy density. Thanks to this, when the laser beam interacts with the material, different structural changes occur than we are used to from conventional technologies, for example, the phase composition or the distribution of residual stresses are different. The common advantages of laser treatment are minimal invasiveness and influence of the material around the treated area. It results in lower deformation, lower decrease of local mechanical properties, etc. In the article, conventional technologies are compared with laser technologies and the benefit is indicated in examples from engineering practice.*

**Keywords:** laser, welding, cladding, hardening, surface, properties, microstructure.

## INTRODUCTION

Laser technology is one of the fastest growing fields, especially thanks to new types of fiber, disc and diode lasers. At least 32 Nobel Prizes are associated with lasers. There is no doubt about dramatic growth of laser applications, as follow the literature. The prestigious magazine Fortune compiled a list of the fastest growing companies in 2013 [1]. On 9th place, right behind Apple, was IPG Photonics, the most important producer of fiber lasers on the world. Similarly, the number of professional publications is growing. New lasers have electrical efficiency several times higher compared to previous gas CO2 or solid-state Nd:YAG lasers. The quality of the beam is also improving, a few years ago it was not possible neither weld nor cut with diode lasers. Both are common today. The power of lasers is also growing practically exponentially – in 2005, diode lasers were around 1 kW (which is the lower limit for their application in industry). Today, they have outputs in the tens of kW, the most powerful fiber lasers are at 120kW. Such enormous power is enough to weld several tens of millimeters of steel or weld with speeds of over 40 m/min. The laser is therefore a high-quality and affordable tool, with a lot of benefits in applications.

The most frequently cited advantages of lasers are minimal deformation, little heat input, easy and precise power control, localization of the processing position, temperature control, and many others. Much less is said about universality. Regardless of which laser we have, the beam from the source is guided by an optical fiber (with the exception of CO2 lasers) whose diameter normally varies from 50 micrometers for cutting to 1 mm for welding. At the end of optical fiber transmitting beam is an optical head that allows the beam to be further modulated. In this contribution, we want to introduce the laser as an universal tool for a number of technologies. A beam with the smallest diameter of around 0.1mm is used for cutting. All the energy is focused into a small point, which allows melting and vaporization of the material [2]. The extension to a larger diameter (standard between 0.5 to 1 mm) is adjusted for welding. The areal energy density is in the order of tens of kilowatts per square millimeter. A further increase in the cross-section of the beam spot to a few millimeters square is intended for cladding, when the part of energy must be sufficient to melt the supplied powder and part remelt the coated surface to make metallic bond. A further increase in the area of the beam spot is used for surface hardening, when a surface temperature of above 1000°C is sufficient for austenitizing and subsequent phase hardening of the steels.



***Fig. 1.*** *Laser material processing workplace on University of West Bohemia (UWB)*

For the above-mentioned reasons, laser technologies are an interesting topic for mechanical engineering. The interaction of the laser beam with the material brings new knowledge about metallurgy and phase transformations associated with high heating and cooling rates to create non-equilibrium structures and giving to materials new properties. That is why the Department of Materials and Engineering Metallurgy at UWB is dedicated to the development of new technologies and laser material processes (see Fig. 1) as a part both of study programs and research projects.

## LASER HARDENING

Laser hardening offers short processing times and appreciable cost savings, as well as capabilities to accommodate almost any geometry, and control the depths and widths of the treated surfaces. In addition, laser processed surfaces exhibit additional beneficial properties when compared to conventionally hardened surfaces. These include improvement in tribological, fatigue, and corrosion behavior, specifically an improved wear life, fatigue and corrosion resistance [3, 4].

Sheet forming dies for automotive industry (Fig. 2) may serve as a good example in this context. The car body consists of about 300 components, which represent a demand for about 750 pairs of press dies (progressive dies, punching and trimming dies). Car manufacturers launch about 120 new car models every year. Based on that number, the cost estimate for die making is 12 billion euro every year. Laser hardening of rounded and shearing edges may double the number of parts formed.

### Differences in surface hardening technologies

In ***flame hardening***, the depth of heating is given by the relative speed of the flame movement across the surface. The efficiency of heat transfer to the material is poor and the surrounding surfaces become heated as well. As a result, the dwell time required for austenitizing increases, the grains in the material coarsen, and their boundaries may become burnt. The surface also develops a layer of oxides. In this process, the uniformity and control of temperature are limited and inaccurate. In **induction hardening**, the heat generated depends on electric resistance and current. The depth of austenitizing is given by the frequency of the power source. The lower the frequency, the shallower is the hardening depth. Even with high-frequency induction heating, however, heating takes several seconds.

In **flame hardening**, as well as in **induction hardening**, the heating stage must be followed by sufficiently rapid cooling (using a water spray or polymer solution). There is an ever-present risk that steam and a vapor blanket may form during cooling, which would retard the heat removal rate and prevent the surface from hardening. Similar to the heat-affected zone in weld joints, there is a deep transition zone beneath the hardened layer. This is the zone in which the elevated temperature, though insufficient for hardening, has caused some changes in the matrix of the parent metal. Unfortunately, these changes are typically for the worse.

In ***laser treatment***, the austenitizing temperature must be achieved in the surface, as with the other techniques. However, thanks to rapid heating rates of thousands of degrees per second, the resulting transitional heat-affected zone is very thin. The advantage of laser hardening lies in its ability to alter the microstructure, properties and residual stresses in a workpiece within a localized area. The nature of the laser beam allows even difficult-to-reach locations to be locally hardened within relatively short process times [3, 4]. Thanks to a rather small size of the spot being hardened at any given moment, the surrounding material acts as a cooler, thus eliminating the need for external cooling media. Laser hardening is characterized by high cooling rates reaching up to 1000 K/s [5]. Some researchers [6] report cooling rates as high as $10^4$ to $10^8$ K/s and thermal gradients between $10^5$ and $10^8$ K/m. At such values, metastable microstructures with novel properties are obtained. If cooling rates reach the above-mentioned high levels, almost all austenite in steel transforms to martensite. In

addition, the growth of crystallites within polycrystalline materials is severely limited during laser hardening [7].

The maximum laser hardened depth is approximately 2 mm, depending on the heat conductivity of the material. The hardening depth can be controlled by the speed of the beam movement and by the temperature. To improve control, the process is typically monitored using a pyrometer linked to the laser source and operated by robot. By regulating the power input, this control loop can maintain a fixed surface temperature, thus providing uniform hardness and preventing local melting.

In the heating step, austenitizing temperature, that is, a temperature above Ac3, must be achieved in the surface layer of steel. Rapid heating with a laser beam is one of the factors which minimize the distortion of the part heated. As the material around the laser spot remains cold, it does not expand, and the distortion does not occur. Another difference from the other surface hardening techniques lies in the heat removal mechanism which is based on self-quenching. It involves rates of several thousand °C/sec. There is no need for cooling the surface using a liquid supplied from outside because the interior of the part remains cold and absorbs the heat by conduction at a sufficient rate (i.e., cooling by convection). One can therefore assume that phase transformation begins from within the part and the surface is the last to cool down. It has at least one major effect - laser beam hardening is much more favorable to the material in terms of crack susceptibility than other techniques. The steep thermal gradient from quenching causes severe (tensile) stresses which lead to surface crack initiation. In laser hardening, however, the cooling process begins by heat removal to the cold interior of the workpiece. The temperatures thus equalize gradually from within the part. This minimizes the resulting stresses and eliminates cracking.

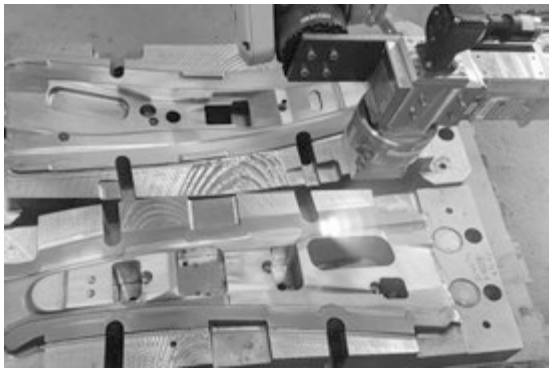




***Fig. 2.*** *A typical example of forming tools processing. Laser hardening can increase service life by up to 50%.*

## LASER CLADDING

The surface can be thought of as the most important part of every engineering component. Unlike the rest of the component's volume, the surface is exposed to wear and becomes the place where most cracks form and corrosion initiates. The surface's particular properties are dictated by its non-symmetric bonds. Whereas the neighborhoods of atoms within the material and their bonds with neighboring atoms are symmetric, the atoms on the surface are only bonded with the interior of the body. In terms of surface-altering techniques, perhaps the greatest rival of the laser cladding process is the ***high-velocity oxyfuel spraying process*** (HVOF). Fundamental differences between these processes arise from their different principles. Laser claddings are metallurgically bonded to the substrate. It means that some mixing of the substrate with the cladding material occurs. This provides high adhesion of the cladding layer. Coatings deposited by the HVOF process do not undergo such dilution and are only bonded through limited diffusion between the materials. The advantage of HVOF is that it produces coatings with compressive stress, unlike other thermally sprayed coating processes. ***Plasma transfer arc*** is one of the most frequently used weld cladding processes. Its relatively large power density, however, alters the substrate surface to the depth of several millimeters. In ***laser cladding*** (Fig. 3), the energy of the laser beam continues to have effect even at the moment the molten powder adheres to the substrate. The resulting layers are therefore dense with practically zero porosity. By contrast, HVOF coatings show high porosity and fail to provide corrosion protection. Once the molten powder impinges on the surface, no additional energy is supplied or available to facilitate perfect bonding of the molten particles and the substrate.

Over the last four years, the price of laser cladding services dropped to half and the process is becoming ever more widespread in industry. Today, the main applications are in the field of repair of forming molds and dies, the mining industry or turbine blades.

***Additive manufacturing*** (AM) is one of most popular technologies of today. The laser also

plays a major role in the production of metal parts with this technology. Both in the case of the SLM method (selective laser melting) and in the case of DLMD (direct laser metal deposition, Fig. 4), metal powder is sintered using a laser beam, as the name of both technologies implies [8,9]. Layer by layer is applied gradually until a new part is created. Basically, it is just an extension of laser cladding to a 3D dimension.

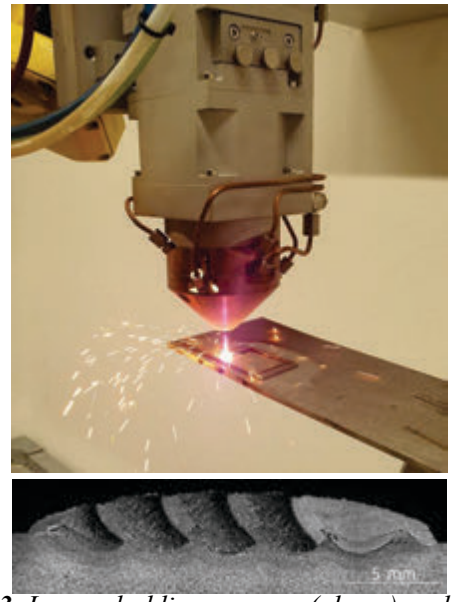


***Fig. 3.*** *Laser cladding process (above) and cross section of the cladded layer (below)*

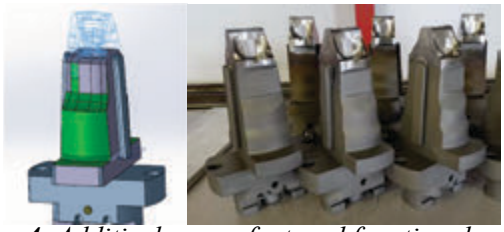


***Fig. 4.*** *Additively manufactured functional mold for aluminum die casting with internal channel structure*

## LASER WELDING

The main advantages of laser welding are low heat input and a different joint geometry. The energy of the laser beam is up to 4 orders of magnitude higher than that of arc methods, and the heat input is therefore several times smaller. Less heat in the join means less impact on the weld's surroundings, finer structure, less deformation and lower residual stresses. The different geometry of the joint (Fig.5), i.e. the ratio between the width and depth of the weld, brings additional profit with regard to deformations and process productivity. An example, susceptibility of stainless steels to intergranular corrosion increases, when staying at critical temperatures (around 450°C, 570°C and 600°C) after a time of more than 0,7 seconds, reaching the maximum with a delay longer than 2 seconds. When welding run at speeds above 2m/min, sufficient cooling speed (depending also on wall thickness) can leads to 2-3 times higher corrosion resistance of laser stainless steel welds compared to classic ones [10].

Faster cooling speed leads to the formation of non-equilibrium structures and a different phase composition than we are used to, resulting also to different mechanical properties [11]. High-strength steels are specific to their fine-grained and multiphase structure. Therefore, the arc fusion welding techniques these properties significantly degrade and welding methods must be properly improved, especially in terms of the heat input. One of the most appropriate ways is laser or electron beam welding. Although laser welding is mainly introduced in series production, thanks to the availability of technology and falling production costs, it is increasingly used in small-series and piece production.

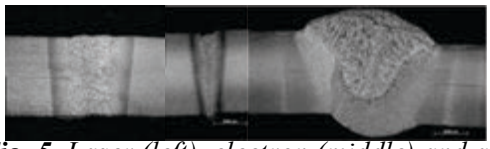


***Fig. 5.*** *Laser (left), electron (middle) and arc (right) welds on 5mm plate from S355 steel grade*

## CONCLUSION

We can list dozens of other applications of lasers in engineering production. From the main applications most often used in industrial production listed above, it is clear that even in these areas there are many unexplored places for research and development. There is also huge scope and potential in the search for the development and new applications of laser technologies in industry.

## REFERENCE


[1] Fortune´s top 10 fastest-growing companies 2013 [11.3.2013], http://www.money.cnn.com/magazines/fortune/fastest-growing/

[2] J. Powell, A. Kaplan: A comparison of fiber and CO2 laser cutting, Industrial Laser Solution 9-10, 2013, p. 6

[3] J. C. Ion, Surface Engineering 18 (2002) 14-31

[4] S. Němeček, LaRoux Gillespie ed.: Design for Advanced Manufacturing: Technologies and Processes, McGraw-Hill 2017, ISBN-13: 978-1259587450, ISBN-10: 1259587452

[5] N.S. Bailey, W. Tan, Y.C. Shin, Surface & Coatings Technology 203 (2009) 2003–2012

[6] A. Roy, I. Manna, Mat. Sci. Eng. A297 (2001) 85-93

[7] C. Soriano, J. Leunda, J. Lambarri, V. García Navas, C. Sanz, Applied Surface Science 257 (2011) 7101–7106

[8] Haghdadi, N., Laleh, M., Moyle, M. et al. Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges. J Mater Sci 56, 64–107 (2021). https://doi.org/10.1007/s10853-020-05109-0

[9] Ahn, DG. Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech. 8, 703–742 (2021). https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7

[10] Turňa M., Kovačocy P.: Zváranie laserovým lúčom, STU v Bratislave 2003.

[11] Kou S.: Welding Metallurgy, John Wiley New York 2003.

НАПРАВЛЕНИЕ 1

# ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

SESSION 1

# ELECTRICAL ENGINEERING

# АНАЛИЗ НА ЕФЕКТА НА ЗАСЕНЧВАНЕТО НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ С ПОКРИТИЕ ОТ ТЪНЪК СЛОЙ КАДМИЕВ ТЕЛУРИД ВЪРХУ ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ИМ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Емил Станев, Ивайло Стоянов**
*emostanev@gmail.com, ivo100v@gmail.com*

*Катедра Електроснабдяване и Електрообзавеждане*
*Технически Университет – Габрово, България*

# ANALYSIS OF THE SHADING EFFECT OF THIN LAYER CADMIUM TELLURIDE PHOTOVOLTAIC PANELS ON THEIR ELECTRICAL PERFORMANCE

**Emil Stanev, Ivaylo Stoyanov**
*emostanev@gmail.com, ivo100v@gmail.com*

*Department of Electric Power Distribution and Electrical Equipment*
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**
The paper presents the effects of shading on thin-film cadmium telluride (CdTe)-based frameless solar panels. The influence of different degrees of shading of CdTe PV panels on their performance is analyzed after measuring their I-V and power characteristics. The results show that even small shading significantly affects the efficiency of the panels.

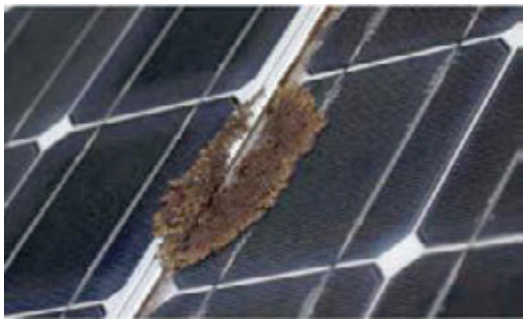
**Keywords:** photovoltaic panels, shading, photovoltaic efficiency, I-V curve measurement, thin layer cadmium telluride

## ВЪВЕДЕНИЕ

Енергийната криза и замърсяването на околната среда са проблем, който не може да бъде пренебрегван, затова се търсят начини за развитие и използване на възобновяемите източници на енергия по възможно най-ефективния начин с развитието на съвременните технологии и средства. Слънцето е най-големият източник на енергия на Земята. Използването на слънчева енергия и преобразуването ù в електричество с помощта на фотоволтаични панели нараства бързо през последните години и според публикувана информация и направена оценка в световен мащаб инсталираният капацитет до края на 2022 г. ще достигне 1000 GW [1, 2].

Соларните фотоволтаични системи се състоят от слънчеви панели, свързани в масиви. В зависимост от необходимата електроенергия, всеки от тези панели е съставен от много фотоволтаични клетки, които са основните единици, участващи в улавянето на енергията от слънцето и превръщането ù в електричество. При падане на сянка дори само на една част от слънчевия панел в масива, изходът от цялата система може да бъде потенциално компрометиран, това се нарича засенчване на фотоволтаичните панели. Когато слънчевият панел е частично засенчен, токът генериран от изцяло осветените клетки не може да протече през засечените и се разсейва в тях под формата на топлинно излъчване, причинявайки ефекта на горещата точка. Това може да доведе до тяхното прегряване и стопяване и е една от най-разпространените причини за повреда

на слънчевия панел или опасност от пожар. В резултат на това е важно да се използват байпасни диоди при конструирането на фотоволтаични системи, за да се гарантира, че токът може да протича като се шунтират неефективно работещите клетки и по този начин въздействието се намалява при различните ситуации на засенчване (Фиг. 1, Фиг. 2, Фиг. 3, Фиг. 4) [3].



***Фиг. 1**. Локално засенчване от натрупана мръсотия*



***Фиг. 2**. Засенчване от дървета*



***Фиг. 3**. Засенчване от прах и сажди*



***Фиг. 4**. Засенчване от сгради*

В настоящия доклад се разглежда ефекта на засенчване на фотоволтаичен панел с покритие от тънък слой кадмиев телурид (CdTe) върху електрическите му характеристики. Изследвани са волт-амперните и мощностните характеристики на фотоволтаичния панел, при хоризонтално и вертикално засенчване.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

При фотоволтаично производство на електроенергия дървета, паднали листа, сгради и облаци могат да блокират и засенчат слънчевата светлина върху фотоволтаичния панел, което води до понижаване стойностите на напрежението и тока на модулите, като това оказва негативно влияние върху изходната мощност [5, 6].

Несъответствието на напрежението, тока и намаляването на мощността зависи от различни фактори, например материалът на фотоволтаичната клетка, структурата и вътрешните свойства на материала, климатичните и метеорологични условия, както и местоположение на мястото за монтаж.

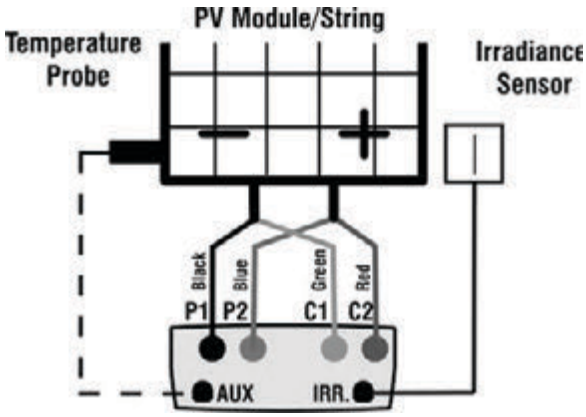
За изследване ефекта от засенчването, върху електрическите характеристики на фотоволтаични панели на базата на тънък слой CdTe е използван уреда I-V500W. С него може да се снеме волт-амперната крива и мощностната характеристика, както на един модул, така и на няколко модула свързани помежду си в PV инсталация до максимум 1500V и 10A или 1000V и 15A. За измерване на I-V кривата уреда I-V500W управлява вътрешна база данни на фотоволтаични модули, която може да бъде актуализирана по всяко време от потребителя.



***Фиг. 5**. Измервателен уред I-V500W*

Сравнението на измерените данни с номиналните стойности позволява незабавна оценка дали групата от модули или единичния модул, които се тестват, отговарят на заявените параметри на ефективност от производителя.

Уредът извършва измерване на I-V кривата на свързания към него фотоволтаичен модул, след което измерва в реално време слънчевата радиация и температурата на модула – Фиг. 6.



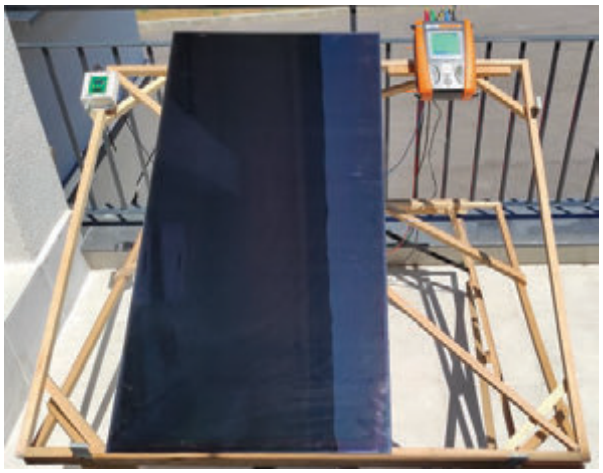

***Фиг. 6**. Свързване на фотоволтаичен модул с уреда I-V500W*

Резултатите от измерванията автоматично се привеждат към стандартните условия (STC) на излъчване при 1000 W/m$^2$ и температура 25°C. Таблица 1 представя техническа информация за обхватите и точността на измерванията, направени с помощта на инструмента за измерване на волт-амперни характеристики I-V500W [4].

*Таблица 1. Технически характеристики на уреда I-V500W*

| Измерван параметър | Обхват | Точност | Толеранс |
|---|---|---|---|
| DC Напрежение | 15.0 ÷ 99.9 V | 0.1 V | ±(0.5%rdg + 2dgt) |
| DC Ток | 0.10 ÷ 15.00 A | 0.01 A | ±(1.0%rdg + 2dgt) |
| DC Мощност | 50 ÷ 99999 W | 1 W | ±(1.0%rdg + 6dgt) |
| Радиация (с референтна клетка) | 1.0 ÷ 100.0 mV | 0.1 mV | ±(1.0%rdg + 5dgt) |
| Температура (с допълнителна сонда) | -20.0 ÷ 100.0 °C | 0.1 °C | ±(1.0%rdg + 1°C) |

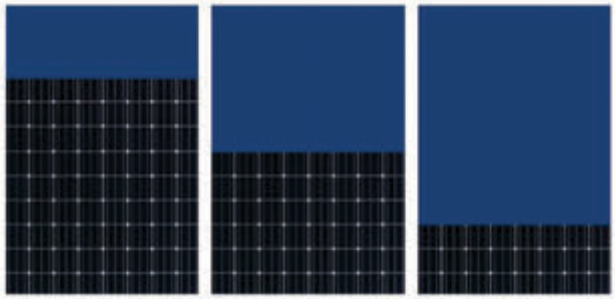
Проучени са необходимите каталожни данни на фотоволтаичните модули CdTe модел CdTe: CX4 10/3 100Wp на производителя Calyxo, Германия. Температурните коефициенти при STC са Alpha (Isc) = 0.03%/°C и Beta (Voc) = - 0.21 %/°C. Тези каталожни данни се задават в инструмента за измерване I-V500W преди започване на измерванията.



***Фиг. 7**. Опитна установка с фотоволтаичен панел с покритие от тънък слой кадмиев телурид*

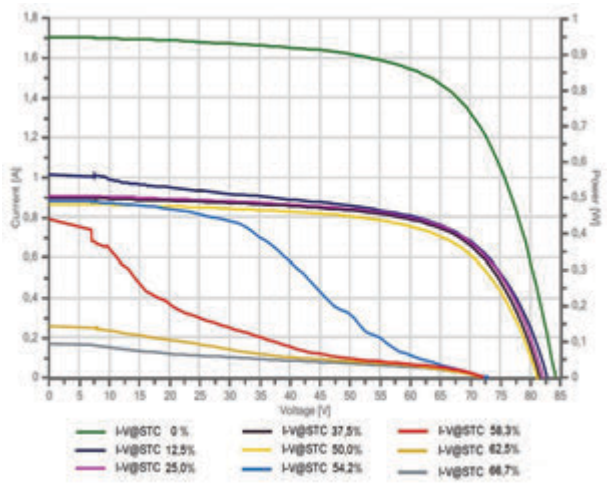
Извършени са измервания при различно хоризонтално и вертикално засенчване на фотоволтаичен панел, който е с размери 120x60 см. Измерванията са извършени съответно при следните стойности на засенчване от панела:

Хоризонтално засенчване (Фиг.8): 15см (12,5%), 30 см (25%), 45 см (37,5%), 60 см (50%), 65 см (54,2%), 70 см (58,3%), 75 см (62,5%), 80 см (66,7%). 105 см - След тази стойност се достига токовата граница на възможност за отчитане – current Lim.

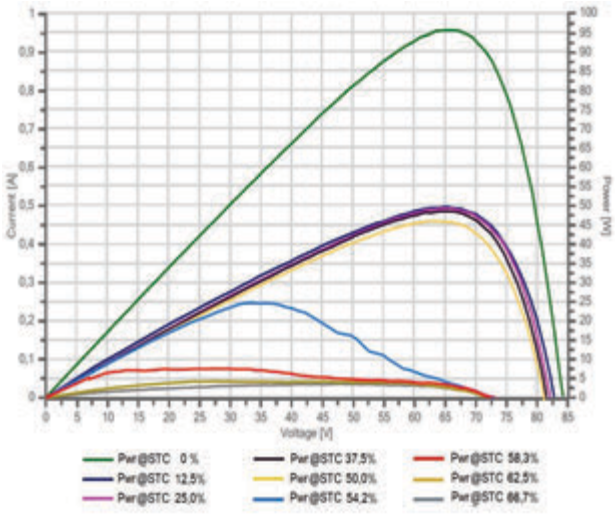


***Фиг. 8**. Хоризонтално засенчване*

Получените I-V и мощностни характеристики на хоризонтално засенчения панел от тънък слой CdTe са показани съответно на Фиг. 10 и Фиг. 11.

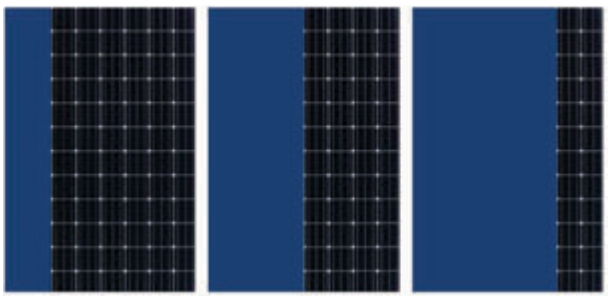


***Фиг. 10**. I-V характеристика на хоризонтално засенчен панел от тънък слой CdTe*



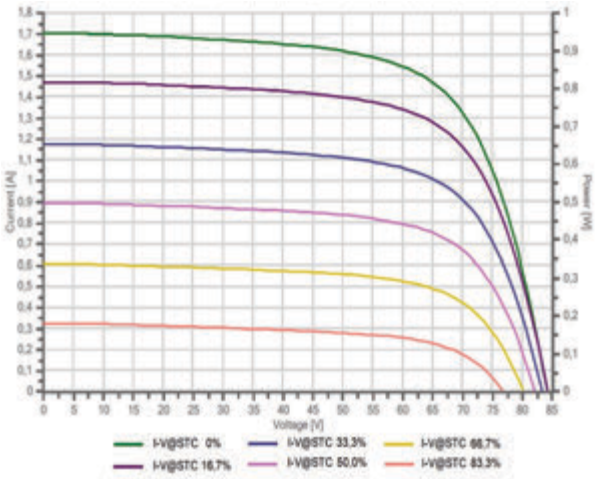
***Фиг. 11**. Мощностна характеристика на хоризонтално засенчен панел от тънък слой CdTe*

Вертикално засенчване (Фиг. 9): 10 см (16,7%), 20 см (33,3%), 30 см (50%), 40 см (66,7%), 50 см (83,3%), 60 см – пълно засенчване.

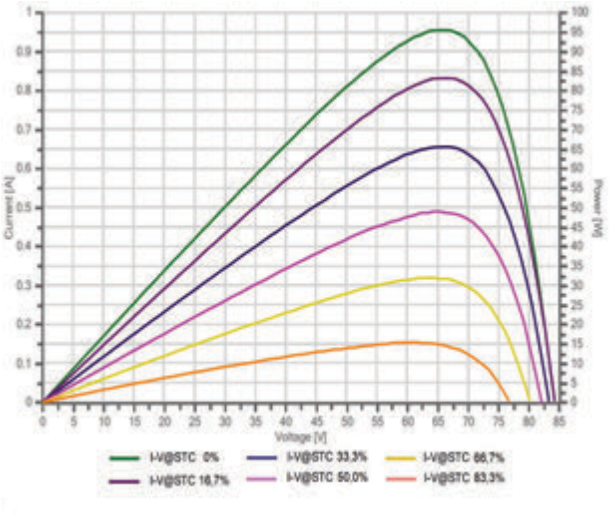


***Фиг. 9**. Вертикално засенчване*

Получените I-V и мощностни характеристики на вертикално засенчения панел от тънък слой CdTe са показани съответно на Фиг. 12 и Фиг. 13.



***Фиг. 12**. I-V характеристика на вертикално засенчен панел от тънък слой CdTe*



***Фиг. 13**. Мощностна характеристика на вертикално засенчен панел от тънък слой CdTe*

Резултатите от измерванията за тестванията панел с тънък слой CdTe са показани в Таблица 2 и Таблица 3, където:

- Толеранс - толеранса на Pmax спрямо предоставения от производителя на модула;
- Pmax - максимална номинална мощност на модула;
- Voc - напрежение на отворена верига;
- Vmpp - напрежение на точката на максимална мощност;
- Impp - ток на точката на максимална мощност;
- Isc - ток на късо съединение;
- FF - коефициент на запълване.

*Таблица 2. Хоризонтално засенчване*

| Засенчване % | Толеранс [%] | Pmax [W] | Voc [V] | Vmpp [V] | Impp [A] | Isc [A] | FF [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CdTe - 0 % | - 4.65% | 95.35 | 84.23 | 64.77 | 1.47 | 1.70 | 67.00 |
| CdTe – 12.5 | -50.66% | 49.34 | 82.81 | 65.18 | 0.76 | 1.01 | 59.00 |
| CdTe – 25.0 | -51.04% | 48.96 | 82.15 | 64.67 | 0.76 | 0.90 | 66.00 |
| CdTe – 37.5 | -51.04% | 48.31 | 81.59 | 64.16 | 0.75 | 0.89 | 66.00 |
| CdTe – 50.0 | -54.11% | 45.89 | 81.18 | 62.52 | 0.73 | 0.86 | 66.00 |
| CdTe – 54.2 | -75.49% | 24.51 | 72.97 | 33.76 | 0.73 | 0.88 | 38.00 |
| CdTe – 58.3 | -92.50% | 7.50 | 72.20 | 29.63 | 0.25 | 0.74 | 31.00 |
| CdTe – 62.5 | -95.75% | 4.25 | 71.63 | 27.60 | 0.15 | 0.25 | 24.00 |
| CdTe – 66.7 | -96.42% | 3.58 | 72.20 | 47.75 | 0.08 | 0.16 | 14.00 |
| Номинални стойности | ±10% | 100.00 | 92.10 | 72.60 | 1.38 | 1.53 | 71.00 |

*Таблица 3. Вертикално засенчване*

| Засенчване % | Толеранс [%] | Pmax [W] | Voc [V] | Vmpp [V] | Impp [A] | Isc [A] | FF [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CdTe - 0 % | - 4.65% | 95.35 | 84.23 | 64.77 | 1.47 | 1.70 | 67.00 |
| CdTe –16.7% | -16.94% | 83.06 | 84.22 | 67.74 | 1.23 | 1.46 | 67.00 |
| CdTe –33.3% | -34.57% | 65.43 | 83.33 | 65.76 | 1.00 | 1.17 | 67.00 |
| CdTe –50.0% | -51.27% | 48.73 | 82.05 | 64.71 | 0.75 | 0.89 | 67.00 |
| CdTe –66.7% | -68.15% | 31.85 | 80.17 | 64.21 | 0.50 | 0.60 | 66.00 |
| CdTe –83.3% | -84.73% | 15.27 | 76.72 | 61.33 | 0.25 | 0.32 | 62.00 |
| Номинални стойности | ±10% | 100.00 | 92.10 | 72.60 | 1.38 | 1.53 | 71.00 |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фиг. 10 показва, че дори при минимално хоризонтално засенчване в диапазона от 12,5% - 50%, I-V характеристиката се изменя значително и максималната мощност - Pmax спада наполовина. При по-нататъшно увеличаване на засенчването над 50%, се наблюдава рязко нарушаване на формата на графиката и възможността за производство на електрическа енергия от фотоволтаичния панел. В мощностните характеристики на Фиг. 11 се вижда изменението в положението на точката на максимална мощност при увеличаване на хоризонталното засенчване над 50%. Ефектът при вертикално засенчване на фотоволтаичен модул с тънък слой CdTe може да се види на Фиг. 12, Фиг. 13 и Таблица 3. Анализът показва, че вертикалното засенчване оказва по-малко негативно влияние върху ефективността на фотоволтаичния панел спрямо хоризонталното. При вертикалното засенчване се наблюдава равномерно изменение в I-V и P-V характеристиките. Разликата в получените резултати при хоризонтално и вертикално засенчване се дължи на структурата при свързване на отделните фотоволтаични клетки в изследвания панел с тънък слой от кадмиев телурид.

## REFERENCE


[1] https://www.infolink-group.com/en/solar/analysis-trends/Global-PV-demand-set-to-hit-143-7-G

[2] https://greentech.bg/archives/80783

[3] https://bg.dsisolar.com/info/shading-effect-on-output-of-solar-pv-system-50730909.html

[4] https://www.ht-instruments.com/en/products/photovoltaic-testers/i-v-curve-tracers/i-v500w

[5] Aramesh, M.; Kasaeian, A.; Pourfayaz, F. A detailed investigation of the walls shading e ect on the performance of solar ponds. Environ. Prog. Sustain. Energy 2018, 38, e13014. [CrossRef]

[6] Teo, J.; Tan, R.; Mok, V.; Ramachandaramurthy, V.K.; Tan, C. Impact of partial shading on the PV characteristics and the maximum power of a photovoltaic string. Energies 2018, 11, 1860. [CrossRef]

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПУЛСАЦИИТЕ НА СВЕТОДИОДНИ ОСВЕТИТЕЛИ ЗА ВЪТРЕШНО ПРИЛОЖЕНИЕ

**Милко Йовчев**[1]
[1]*Технически университет – Габрово*

# STUDY OF THE LED LIGHTING FLICKER FOR INDOOR APPLICATION

**Milko Yovchev**[1]
[1] *Technical University of Gabrovo*

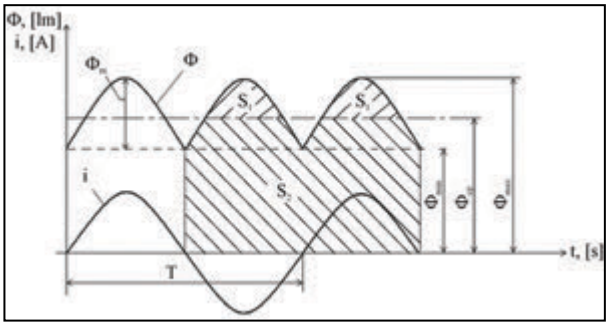
**Abstract**

*Comparative study of the LED luminaires flickering is done in this paper. The tested LED luminaires have different applications for indoor lighting. The influence of the different type of a LED luminaire, secondary optical system and the dimming level of the luminous flux on the degree flickering of the tested LED luminaires are study. An analysis and conclusion of the obtained results are done.*

**Keywords:** flicker, LED luminaire, modulated light, dimmable LED lamps, photodetector, photometry integrating sphere, luminous flux.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Всички светлинни източници, които се захранват с променливо напрежение, имат модулиран във времето светлинен поток, наричан пулсации на светлинния поток. Лампите, работещи с честота на електрическата мрежа $f = 50$ Hz, излъчват светлинен поток $\Phi$, който пулсира с удвоена честота - $f = 100$ Hz - фиг. 1 [1,2]. Пулсациите на светлинния поток с такава честота предизвикват неблагоприятни зрителни и неврофизиологични въздействия [1,2,3,4,5].




***Фиг. 1.*** *Пулсации на светлинния поток*

Основните показатели за количествена оценка на пулсациите на светлинния поток са коефициент на пулсации на светлинния поток $k_{\text{п}}$, индекс на пулсациите $J$ и равномерност на пулсациите $G$ [1,2,6,7,8]. Коефициентът на пулсации на светлинния поток се определя с израза:

$$k_{\text{п}} = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{2\Phi_{\text{ср}}}, \qquad (1)$$

където: $\Phi_{\text{ср}} = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} \Phi(t)dt$ - средната стойност на светлинния поток за период $T = 0{,}02$ s при честота на захранващата мрежа $f = 50$ Hz; $\Phi_{\max}$ - максимална моментна стойност на светлинния поток; $\Phi_{\min}$ - минимална моментна стойност на светлинния поток [1,2,4,5]. Максималната допустима граница на $k_{\text{п}}$ е , за която се счита, че пулсациите на светлинния поток няма да причинят вредни въздействия, е 20% [5].

Равномерността на пулсациите се определя със следния израз:

$$G = \frac{\Phi_{min}}{\Phi_{max}}. \quad (2)$$

След 2008 г. в луминесцентните осветители се използват високочестотни електронни пусково-регулиращи апаратури с работна честота $f \approx 30$ kHz - толкова висока, че не се проявяват неблагоприятни зрителни и неврофизиологични въздействия и се предполага, че проблемът с пулсациите на светлинния поток е решен. В резултат на това, през 2011 г. се възприе идеята в нормативните документи на повечето европейски страни, включително и у нас, коефициентът на пулсациите на светлинния поток да не се нормира, но в някои държави $k_п$ продължава да бъде нормиран [9]. В актуалния БДС EN 12464-1:2021 се дефинира качествения показател „фликер“ $P_{st}^{LM}$, представляващ периодични и непериодични колебания, причинени от светлинен източник, от източника на захранването или от други фактори на въздействие [10,11,12].

Повишените изисквания към енергийната ефективност в осветлението са причина да се използват осветители със светодиодни (LED) източници. Управлението на тока и напрежението към LED източниците се осъществява с драйвери. Съществуват различен тип драйвери, част от които работят на по-ниски честоти или съдържат компоненти с по-ниска работна честота, като причиняват забележими пулсации на светлинния поток и проблемът с пулсациите отново е актуален. Възниква необходимостта от измерване и нормиране на пулсациите на светлинния поток на LED осветителите [1].

В настоящия доклад се представят резултати от изследване на пулсациите на светлинния поток на LED осветители за вътрешно приложение при различно ниво на димиране и с отчитане на влиянието на елементите на вторичната оптична система.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследват се пулсациите на светлинния поток на 15 типа LED осветители за вътрешно приложение с отчитане както на влиянието на елементите на вторичната оптична система - матов разсейвател и леща, така и степента на димиране (намаляване) на светлинния поток.

В зависимост от наличието или без вторична оптична система и възможността за димиране, изследваните LED осветители се разделят на три групи:

- *първа група* - недимируеми LED осветители с вторична оптична система с матов разсейвател от дифузен полистирен (PS) (осветители № 1÷4), леща от поликарбонат (PC) (№5) и стъкло (№ 6 и 7), част от тях са показани на фиг. 2;

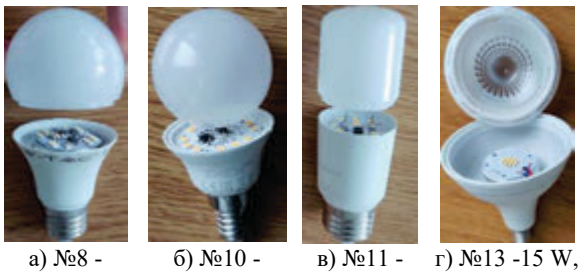
- *втора група* - недимируеми LED осветители без и с вторична оптична система с матов разсейвател (№ 8÷11) и леща (№ 13), част от тях са показани на фиг. 3;

- *трета група* - димируеми LED осветители с вторична оптична система, тип E27 (№ 12), плафон (№ 14) и линеен промишлен (№ 15), част от тях са показани на фиг. 4.



а) №1 - 8 W, 640 lm; б) №2 - 3,5W, 155 lm; в) №6 - 6 W, 480 lm; г) №7 - 5,5W, 470lm

***Фиг. 2.*** *Недимируеми LED осветители, тип E27, с вторична оптична система (първа група)*



а) №8 - 7 W, 470 lm; б) №10 - 5 W, 470 lm; в) №11 - 9 W, 850 lm; г) №13 -15 W, 1000 lm

***Фиг. 3.*** *Недимируеми LED осветители, тип E14 и E27, без и с вторична оптична система (втора група)*



а) №14 - Плафон, 20 W, 2000 lm; б) №15 - Линеен индустриален, 40 W, 40000 lm

***Фиг. 4.*** *Димируеми промишлени LED осветители с вторична оптична система (трета група)*

Техническите характеристики на изследваните за пулсации на светлинния поток 15 типа LED осветители са представени в табл. 1. Значението на величините е следното: $P_н$ - номинална активна мощност; $Φ_н$ - номинален светлинен поток; $0{,}5I_{max}$ - ъгъл на лъча в светлоразпределението от максималния интензитет на светлината $I_{max}$ до фотометричния ъгъл, в който интензитетът се понижава до 50% от $I_{max}$; $T_c$ – корелирана цветна температура. Номиналното захранващо напрежение на изследваните LED осветителите е $U_н = 230$ V с $f = 50$ Hz.

***Табл. 1.*** *Технически характеристики на изследваните LED осветители*

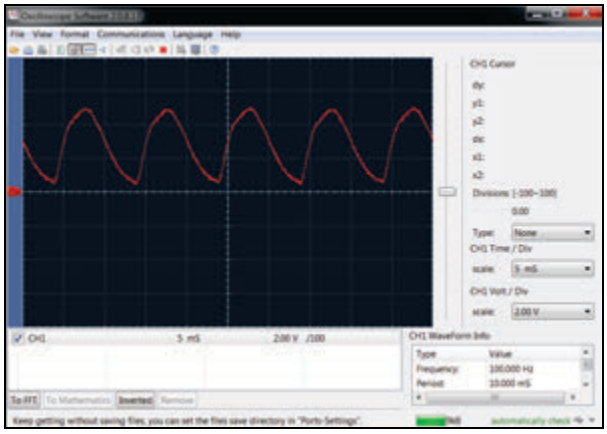
| LED осветител №-тип | $P_н$ [W] | $Φ_н$ [lm] | $0{,}5I_{max}$ [°] | $T_c$ [K] | Оптика | Димиране |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1-E27, V-Tac | 8 | 640 | 120 | 4000 | матов разсейвател (PS) | не |
| 2-E27, Toshiba | 3,5 | 155 | 200 | 2700 | | |
| 3-E27, Toshiba | 5,5 | 290 | 200 | 4000 | | |
| 4-E27, Livarno | 5,5 | 470 | 200 | 2700 | | |
| 5-E27, Toshiba | 7,9 | 670 | 60 | 2700 | леща (PC) | |
| 6-E27, Viaki | 6 | 480 | 200 | 4000 | стъкло | |
| 7-E27, Philips | 5,5 | 470 | 200 | 2700 | | |
| 8-E27, V-Tac | 7 | 470 | 200 | 4500 | матов разсейвател (PS) | |
| 9-E27, V-Tac | 9 | 725 | 200 | 3000 | | |
| 10-E14, Osram | 5 | 470 | 200 | 2700 | | |
| 11-E27, Tungsram | 9 | 850 | 240 | 4000 | | |
| 12-E27, V-Tac | 6 | 470 | 200 | 6400 | | да |
| 13-E27, V-Tac | 15 | 1000 | 40 | 4500 | леща (PC) | не |
| 14-плафон, ATPA | 20 | 2000 | 115 | 4000 | | да |
| 15-линеен, ATPA | 40 | 4000 | 110 | 4000 | | |

Лабораторната постановка за изследване на пулсациите на светлинния поток, разположена в лаборатория „Осветителна техника“ в Технически университет - Габрово, съдържащ следните модули: кълбов фотометър, в който се поставят изследваните LED осветителите; фотоприемник, реализиран с фотодиод, разположен от вътрешната страна на фотометъра; цифров осцилоскоп и компютърна конфигурация. Лабораторната постановка е показана на фиг. 5.



***Фиг. 5.*** *Лабораторна постановка за измерване на пулсации на светлинния поток*

Връзката между цифровия осцилоскоп и компютъра за мониторинг и съхраняване на графичните визуализации на пулсациите се осъществява със софтуер *Oscilloscope Software 2.0.8.17* през USB порт - фиг. 6.



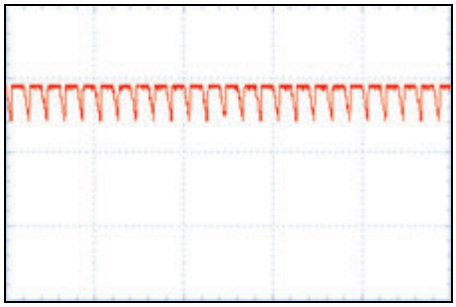
***Фиг. 6.*** *Лабораторна постановка за измерване на пулсации на светлинния поток*

Показателите на пулсациите на светлинния поток - коефициент на пулсациите $k_п$ и равномерност на пулсациите $G$ - на първата група LED осветители - недимируеми, с вторична оптична система (№ 1÷7), са представени в табл. 2.

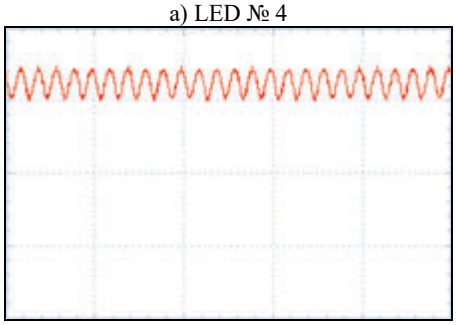
***Табл. 2.*** *Показатели на пулсации на светлинния поток на първа група LED осветители - недимируеми, с вторична оптична система*

| LED осветител - №, тип | $k_п$ [%] | $G$ [-] |
|---|---|---|
| 1-E27, V-Tac (фиг. 2-а) | 2,32 | 0,95 |
| 2-E27, Toshiba (фиг. 2-б) | 4,19 | 0,92 |
| 3-E27, Toshiba | 3,77 | 0,93 |
| 4-E27, Livarno | 9,18 | 0,82 |
| 5-E27, Toshiba | 8,71 | 0,84 |
| 6-E27, Viaki (фиг. 2-в) | 77,39 | 0,10 |
| 7-E27, Philips (фиг. 2-г) | 0,33 | 0,99 |

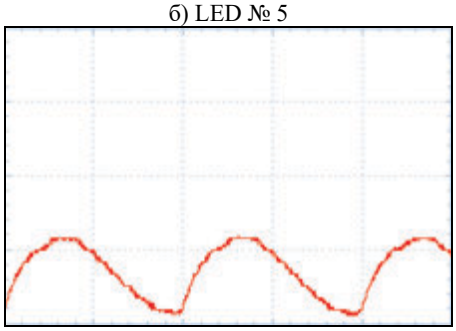
На фиг. 7 е показана графична визуализация на пулсациите на светлинния поток за част от първа група LED осветители - № 4÷7 (фиг. 2-в,г, табл. 2).



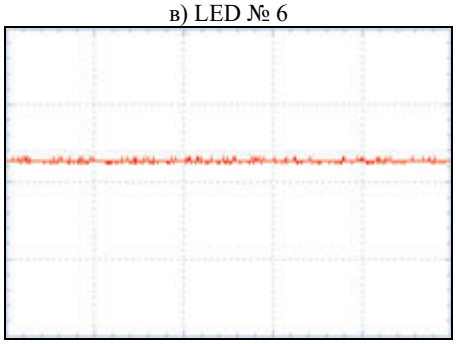
а) LED № 4



б) LED № 5



в) LED № 6



г) LED № 7

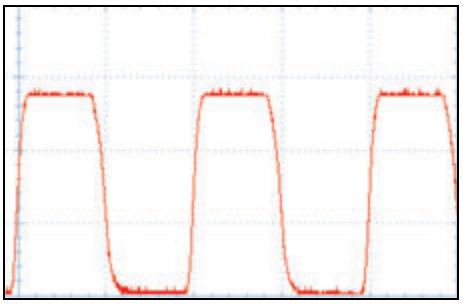
***Фиг. 7.*** *Пулсации на светлинния поток за част от LED осветителите от първа група*

Коефициентът на пулсациите на светлинния поток $k_п$ и равномерността на пулсациите $G$ на втората група LED осветители - недимируеми, без и с вторична оптична система (№ 8÷11 и 13), са представени в табл. 3.

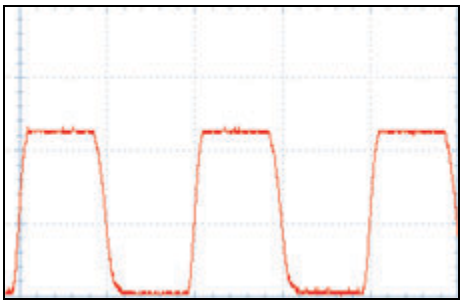
***Табл. 3.*** *Показатели на пулсации на светлинния поток на втора група LED осветители - недимируеми, без и с вторична оптична система*

| LED осветител - №, тип | Без вторична оптика | | С вторична оптика | |
|---|---|---|---|---|
| | $k_п$ [%] | $G$ [-] | $k_п$ [%] | $G$ [-] |
| 8-E27, V-Tac (фиг. 3-а) | 98,53 | 0,01 | 85,33 | 0,02 |
| 9-E27, V-Tac | 8,23 | 0,85 | 4,17 | 0,92 |
| 10-E14, Osram (фиг. 3-б) | 3,15 | 0,94 | 2,53 | 0,91 |
| 11-E27, Tungsram (фиг. 3-в) | 5,11 | 0,90 | 2,34 | 0,95 |
| 13-E27, V-Tac (фиг. 3-г) | 2,22 | 0,96 | 2,08 | 0,96 |

На фиг. 8 е показана графична визуализация на пулсациите на светлинния поток на LED осветител № 8, тип E27, без и с поставена вторична оптична система, реализирана с матов разсейвател (фиг. 3-а).



а) LED № 8-без разсейвател



б) LED № 8-с разсейвател

***Фиг. 8.*** *Пулсации на светлинния поток на LED осветител от втора група (недимируеми)*

Коефициентът на пулсациите на светлинния поток и равномерността на пулсациите на третата група - димируеми LED осветители - № 12, 14 и 15, са представени съответно в табл. 4÷6.

***Табл. 4.*** *Показатели на пулсации на светлинния поток при димиране на LED осветител №12-E27,6W,470lm*

| Димиране на светлинния поток - % от номиналния $Ф_н$ | $k_п$ [%] | $G$ [-] |
|---|---|---|
| $Ф = Ф_н$ (без димиране) | 3,65 | 0,93 |
| $Ф = 0,75Ф_н$ | 4,44 | 0,92 |
| $Ф = 0,50Ф_н$ | 6,69 | 0,88 |
| $Ф = 0,35Ф_н$ | 12,76 | 0,77 |

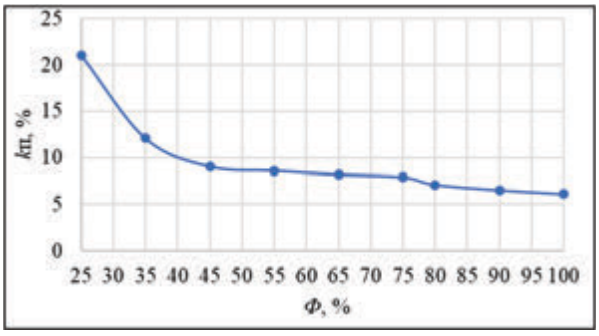
***Табл. 5.*** *Показатели на пулсации на светлинния поток при димиране на LED осветител №14-прафон,20W,2000lm*

| Димиране на светлинния поток - % от номиналния $Ф_н$ | $k_п$ [%] | $G$ [-] |
|---|---|---|
| $Ф = Ф_н$ (без димиране) | 10,07 | 0,95 |
| $Ф = 0,90Ф_н$ | 10,24 | 0,81 |
| $Ф = 0,80Ф_н$ | 12,03 | 0,79 |
| $Ф = 0,65Ф_н$ | 12,85 | 0,77 |
| $Ф = 0,50Ф_н$ | 13,56 | 0,76 |
| $Ф = 0,35Ф_н$ | 15,32 | 0,72 |
| $Ф = 0,20Ф_н$ | 19,08 | 0,68 |

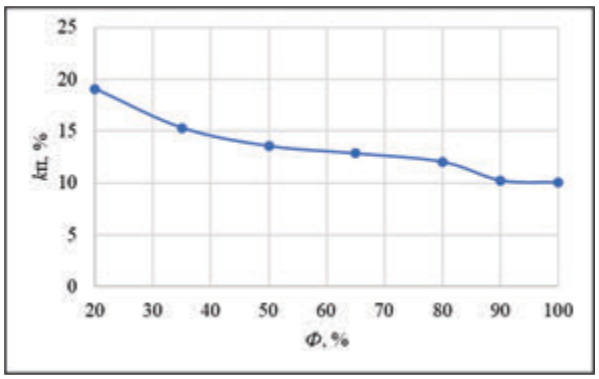
***Табл. 6.*** *Показатели на пулсации на светлинния поток при димиране на LED осветител №15-40W,4000lm*

| Димиране на светлинния поток - % от номиналния $Ф_н$ | $k_п$ [%] | $G$ [-] |
|---|---|---|
| $Ф = Ф_н$ (без димиране) | 6,13 | 0,88 |
| $Ф = 0,90Ф_н$ | 6,54 | 0,88 |
| $Ф = 0,80Ф_н$ | 7,12 | 0,87 |
| $Ф = 0,75Ф_н$ | 7,92 | 0,85 |
| $Ф = 0,65Ф_н$ | 8,21 | 0,82 |
| $Ф = 0,55Ф_н$ | 8,62 | 0,84 |
| $Ф = 0,45Ф_н$ | 9,06 | 0,83 |
| $Ф = 0,35Ф_н$ | 12,07 | 0,79 |
| $Ф = 0,25Ф_н$ | 21,07 | 0,65 |

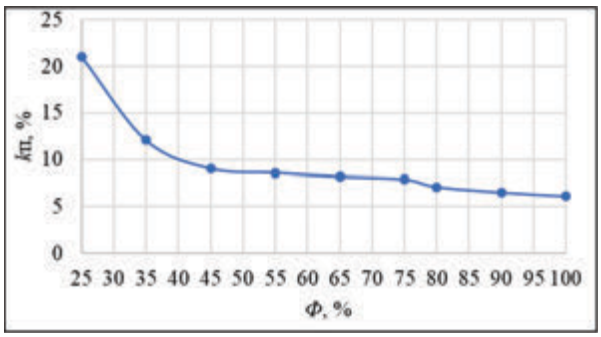
Зависимостта на коефициента на пулсации на светлинния поток $k_п$ във функция от степента на димиране на светлинния поток $Ф$ (като процент от номиналния, приет за 100%) за изследваните димируеми LED осветители № 12, 14 и 15 е представена в графичен вид на фиг. 9÷11.




***Фиг. 9.*** *Зависимост на $k_п = f(Ф)$ при димиране на LED осветител №12 - E27, 6 W, 470 lm*




***Фиг. 10.*** *Графична зависимост на $k_п = f(Ф)$ при димиране на LED осветител №14 - плафон, 20 W, 2000 lm*




***Фиг. 11.*** *Графична зависимост на $k_п = f(Ф)$ при димиране на LED осветител №15 - линеен, 40 W, 4000 lm*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От извършените изследвания на пулсациите на светлинния поток на LED осветители от различен тип и мощност, предназначени за вътрешно приложение, могат да се направят следните изводи:

1. Показателят за количествена оценка на пулсациите на светлинния поток - коефициент на пулсации $k_п$ - за 13 от общо 15 броя изследвани LED осветители е по-нисък от 10% при захранване с номинално напрежение от електрическата мрежа и без димиране. За два LED осветителя - № 6 и 8, коефициентът на пулсации е недопустимо висок за вътрешно осветление - над 75% (табл. 2 и 3).

2. Установява се, че поставянето на вторична оптична система с матов разсейвател и оптична леща в LED осветителите оказва благоприятно влияние върху степента на пулсации на светлинния поток, увеличавайки неговата инертност и коефициентът на пулсации намалява между 1% и 13% за различните осветители, като по-съществена е разликата при осветители с по-голяма активна мощност - табл. 3.

3. Регулирането на светлинния поток чрез димиране при димируемите LED осветители оказва съществено влияние върху степента на пулсации на светлинния поток. С увеличаване на степента на димиране, равномерността на пулсациите намалява, а коефициентът на пулсации се увеличава: за LED осветител № 12 увеличението на $k_п$ е с 9,11%; за LED осветител № 14 увеличението е с 9,01%; за LED осветител № 15 увеличението е с 14,94% - табл. 3 и фиг. 9÷11.

Обобщението на анализа на резултатите показва, че пулсациите на светлинния поток при различните LED осветители се различават съществено и зависят както от конструктивното им изпълнение, така и от наличието и вида на вторична оптична система и степента на димиране. Получените резултати доказват необходимостта от изследване на пулсациите на светлинния поток и актуалността на проблема.

## REFERENCE


[1] Bommel, W. Interior Lighting - Fundamentals, Technology and Application. Springer, 2019, pp. 234-236, ISBN 978-3-030-17195-7.

[2] Tsankov, P., S. Platikanov. Guide for Laboratory Exercises in Lighting and Installation Technology. Gabrovo, "Vasil Aprilov", 2013, pp. 42-43, ISBN 978-954-683-506-2. (in Bulgarian)

[3] Wilkins, A., J. Veitch, B. Lehman. LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PAR1789 Update. IEEE Xplore, 2010, DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618050.

[4] Batra, S., C. Pandav, S. Ahuja. Light Emitting Diode Lighting Flicker, its Impact on Health and the Need to Minimise it. Journal of Clinical and Diagnostic Research 2019/Ophthalmology Section, Vol-13(5), DOI: 10.7860/JCDR/2019/41491.12880.

[5] LightingEurope Position Paper on Flicker and Stroboscopic Effect - LightingEurope - Industry lighting association, 2016.

[6] Platikanov, S., P. Tsankov. Measuring the Pulsations of Light Sources with Computerized DAQ System. Balkan Light'99, Varna, Bulgaria, 1999.

[7] CIE TN 006:2016 - Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems - Definitions and Measurement Models, CIE Technical Notes.

[8] Vasilev, N. Industrial Lighting. Sofia, Technika, 1973, pp. 235-236.

[9] GOST EN 12464-1:2011 Light and lighting-Lighting of work places –Part 1: Indoor work places (in Russian).

[10] Tsankov, P. Electric Power Distribution. Gabrovo, "Vasil Aprilov", 2014, pp. 151-152, ISBN 978-954-683-514-7. (in Bulgarian)

[11] COMMISSION REGULATION (EU) 2019/2020 of 01.10.2019 laying down ecodesign requirements for light sources and separate control gears pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulations (EC) No 244/2009, (EC) No 245/2009 and (EU) No 1194/2012.

[12] BDS EN 12464-1:2021 - Light and lighting - Lighting of work places. Part 1: Indoor work places.

[13] EldoLED - Flicker performance in LED lighting (White paper). Learning Center, 2019.

# CONSIDERATION OF BIOMEDICAL FACTORS WHEN CALCULATING ARCHITECTURAL AND ARTISTIC LIGHTING

**Pylyp Hovorov[1], Plamen Tsankov[2], Anastasiia Kindinova[1]**
*[1]OM Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv*
*[2]Technical University of Gabrovo*

**Abstract**
*The work presents an assessment of the influence of architectural and artistic lighting on the general indicators of the human body, and developed methods of quantitative assessment of artistic lighting. Also, the effectiveness of the developed program and calculation methodology is shown on the example of the architectural and artistic lighting educational building of the Technical University of Gabrovo.*

**Keywords:** architectural lighting, artistic lighting, biomedical engineering.

## INTRODUCTION

Modern lighting technologies are based on the issues of saving fuel and energy resources, which is due to the wide development of lighting of the architectural and artistic system. One of the solutions to this problem is the transition to the use of energy-saving light sources, including their new generation - Light-emitting diodes (LEDs). This opens the possibility of introducing fundamentally new technologies in the field of architectural and artistic lighting, including, among other things, the generation of a wide spectrum of radiation and the high dynamics of its change. However, the use of such light sources requires, in turn, the development of a concept, models and principles for the construction and operation of lighting systems based on them, which are not currently available.

In our time, the following interrelated processes are observed in the field of lighting engineering:

- introduction of LED devices into installations of architectural and artistic lighting with a maximum demonstration of their lighting and colorimetric capabilities;
- aiming of developments in the direction of taking into account the influence of light space on the biological state of a person;
- development and implementation of dynamic color modes in lighting systems.

These processes require the definition of performance evaluation criteria and principles for constructing LED lighting installations.

As a criterion for the efficiency of lighting installations, only one is currently considered - the economic criterion. At the same time, in modern conditions around the world, a very urgent problem is the impact of the external environment on human health. In recent years, there has been a transition of short-term changes in the state of health under the influence of a negative environmental impact (acute diseases) into chronic relapsing forms. However, well-known publications practically do not present scientifically based economic criteria for assessing the impact of environmental factors on public health, including light and color pollution.

The researchers also found that the radiation of the optical spectrum provides not only the visual process, but also participates in the functioning of many other organs of the human body. Despite this, there is still no data on how to quantify this phenomenon and take this fact into account when designing lighting systems. The study of circadian rhythms has led to advances in lighting technology, specifically in the field of indoor lighting. But even it is imperfect, since only those properties that are perceived directly by sight are considered. Unfortunately, these studies are

not relevant for outdoor lighting. [1,2]

In addition, studies were carried out on the influence of lighting brightness on the development of myopia and erroneous myopia, as well as measures to minimize their impact. However, they do not take into account the dynamics of light and color modes of lighting installations.

That is, it can be said that all existing studies are more intended for indoor use and cannot fully take into account all aspects of external architectural and artistic lighting. This is superimposed by the complexity of visual perception, which requires a much more complete account of the impact of the light environment on the human body, and also requires focusing on taking into account the light-color effect of the environment, where an important role is played by colorimetric characteristics in the psychosomatic state of the organism. In addition, the introduction of LED emitters in lighting installations emphasized the particular importance of this factor in influencing the emotional and physical state of a person. [3,4]

The psychosomatic state of the body is very important, since the final recipient of information, its perception and transformation are precisely the neutrons of the brain, and, accordingly, taking into account the color of the light environment and, in general, taking into account its harmony are categorically necessary and are of great importance and influence on the human body.

All this confirms the high level of impact of the light environment on the general condition of the human body and the need for increased attention to more light characteristics of architectural and artistic lighting.

## EXPOSITION

The set of electrical networks and power sources designed to supply electrical energy to electrical consumers of lighting combines the system of power supply and lighting of cities. A feature of this combination is the integrated supply of consumers of electricity and lighting, which determines the unity of processes in them. Therefore, combining them within a single system with a single management allows you to optimize the processes in them. Moreover, the influence of lighting on processes in the living and plant world shows this system as a biotechnical type system, and the intellectualization of its individual control - its belonging to Smart-Light systems.

Thus, this concept of controlling the modes of lighting systems will allow taking into account their features related to taking into account the color and light effects on the animal and plant world, as well as the higher-level systems associated with them - electric power systems and networks. . Under such conditions, the presence of the noted features makes it necessary to separate urban lighting systems into an independent Smart-Light system of a higher level, which combines the Smart-Grid system and the life support system of the city as a whole. The structure of such a system is shown in Figure 2. It includes a power system, a power supply system, which is a complex of lighting installations with a control system, built on the basis of the Smart-Grid concept, as well as an electric lighting system as an integral part of the city.

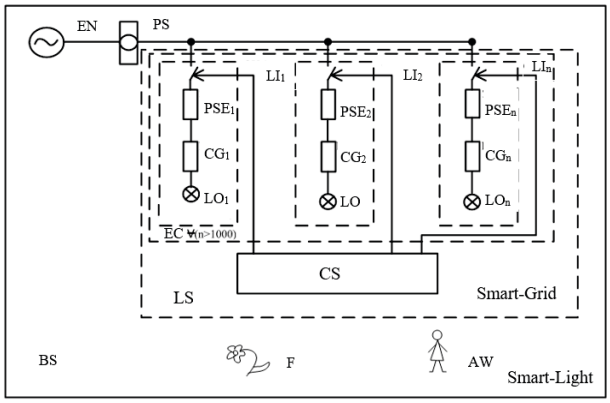



***Fig. 1.*** *Biotechnical lighting system.*

** EN - electrical network, I - power source, ZE - protective and switching equipment, control equipment ~ starting and control equipment, LO - light sources, LI - lighting installations, EC - electrical complex, SU - control system. LS - lighting system, F - flora, AB - wildlife, BS - biotechnical system.*

The quantitative assessment of the light-color effect of lighting on the human body belongs to the border areas of several scientific areas, which are characterized, on the one hand, by indicators that are difficult to directly diagnose, and on the other, by the functional transformation of these indicators. A characteristic feature of light-color exposure is

that its result is not point and static measurements of the state of the body, but dynamic characteristics of processes with their change in time.

The purpose of modeling is to develop a methodology and model for a comprehensive quantitative assessment of the impact of a light-and-color environment on a person, ensuring that its laws are taken into account when creating installations for architectural and artistic lighting. The color load was chosen as the main parameter of the light environment. Here the main role is played by the properties of the lighting installation, color reproduction, properties of the illuminated environment, color combinations, reproduction dynamics, transition effects and oscillation frequency.

The first step in assessing the light-color effect of lighting on the psychosomatic state of a person was color coding and the construction of a color space that maximally matches the range of color vision of the human visual analyzer.

The experiment used a setting with a digital description of the color space, which provides flexibility in the colorimetric capabilities of the system and the ability to create a software environment for reproducing a wide range of color modes. For this, the authors have developed an electrophysiological hardware-software complex that provides registration of the feedback of the main physiological parameters of the body to a light stimulus and reproduction of this stimulus. As part of this task, the following were developed:

– hardware part of the complex;

– algorithmic and software coding of color space;

- system of reproduction of color dynamic modes.

The installation includes a color-forming system based on a personal computer AMD Athlon 64 Processor 3000+, 1.81 GHz, 1.00 GB of RAM, an analog electroencephalograph EE84-2-05, a heart rate monitor, and a sphygmomanometer. The LCD monitor was selected as the initial color signals of the installation - Samsung SinkMaster 740n. The screen resolution used during the experiment was 1280 × 1024, the refresh rate was 75 Hz [6]. The color rendering unit was installed perpendicular to the observer's line of sight at a distance of 1–1.2 m.

The use of a setting with a digital description of the color space, which provides flexibility in the colorimetric capabilities of the system, made it possible to create a software environment for reproducing a wide range of color modes for experiments.

In well-known works [5,6], a computer monitor was also used as an element of visual influence, but this is a monitor of the “cathode ray tube” type. The choice of visualization system in the experiments conducted by the authors is due to the following main reasons:

1. When displaying an image on the screen, it is necessary to take into account the sharpness of the display system. In LCD monitors, the sharpness index depends on the size of the source (LCD backlight), the primary image receptor (screen), the secondary image receptor (screen matrix), and the movement of the reproduced object (light-colored figures). In relation to light, the matrix is a passive element that modulates the radiation passing through it.

2. The selected visualization system does not have such a disadvantage as geometric distortions typical for systems with cathode ray tubes.

3. The LCD monitor is devoid of screen flicker and electromagnetic radiation, provides a minimum effect of technical and optical parameters on the observer and allows you to create the highest quality light-color space during the experiment.

4. The visual evaluation of image reproduction is affected by the level of brightness, the sharpness of the border of the transition from dark to light, the complexity of the observed scene, the physical condition of the observer, etc. In the experimental setup, brightness and contrast are adjustable values, and the displayed image does not have a complex shape and is presented field color only.

5. The normalized time scale of the imaging system used is the monitor response time of 8 seconds. However, the visual tasks of the experiment do not require strict restrictions on this characteristic, and therefore, it is possible to include devices with a long response time in

the complex, which have little effect on the change in color modes over time.

The feedback recording system was assembled from the systems of the human body as a monitoring system. Electroencephalography (EEG) of four lobes of the brain pulp made it possible to register the primary reaction of the central nervous system to impulses caused by a color stimulus. The electrical activity of the brain was analyzed for each lobe of the brain in terms of frequency and amplitude. Registration was carried out on an analog electroencephalograph EE84-2-05.

To record instantaneous indicators of the body's reaction to a light stimulus by changing the work of the cardiovascular system, the pulse was recorded during the experiment.

In addition to the direct reaction of the body to any changes in the surrounding space, in particular the light and color environment, there are also such reactions that can be tracked only when a person stays in this space for a long time. In the course of research, to determine the reaction of the body during a long stay in the light-color space, changes in blood pressure were recorded as a feedback of the body.

The experimental technique provides for the registration of changes in the physiological parameters of the body depending on changes in the parameters of the light-color medium. Experimental studies focused on:

- assessment of the degree of influence of each factor on the human condition;
- determination of the area of the factor space, the most favorable for the human body.

In accordance with the goals and objectives set, a research algorithm was developed, according to which the following assessments were carried out:

- pulse rate
- changes in systolic and diastolic pressure;
- change in electroencephalogram parameters depending on the following colorimetric characteristics of the light space:
- characteristics of the total vector of colors, mixed, chromaticity coordinates (aR + bG + cB);
- brightness of the color field;
- color saturation.

At the same time, the estimates were also studied:

- time of color impact on a person;
- age of the person;
- gender of a person in response to a change in color space.

In the course of experimental studies, a software environment was developed for reproducing color modes, the coordinates of which lie in the chromaticity region of the radiation of modern LED light sources.

Mathematical models of statistical processing of research results made it possible to develop quantitative estimates of the impact of the light-color environment on the human body for different age groups of observers (for example, the range of 20-30 years is taken). , which take into account the influence of architectural and artistic lighting on impulse, pressure and observation systems. The general view of the pulse and pressure models of a group of observers is presented below (equations (1)-(3)):

$$Y1_{20\text{-}30years}(x_1,x_2,x_3)=1{,}4433x_1^2+0{,}7659x_2^2+0{,}4272x_3^2-5{,}6\times\times10^{-17}x_1x_2-5{,}6\times10^{-17}x_1x_3-5{,}6\times10^{-17}x_2x_3+11{,}728x_1-2{,}419x_2--5{,}642x_3+2{,}0016 \quad (1)$$

$$Y2_{20\text{-}30years}(x_1,x_2,x_3)=-0{,}4622x_1^2+0{,}520035x_2^2+1{,}061958x_3^2--1{,}11\times10^{-16}x_1x_2-1{,}11\times10^{-16}x_1x_3-1{,}1\times10^{-16}x_2x_3+2{,}474104x_1--0{,}82447x_2-3{,}18833x_3-0{,}75097 \quad (2)$$

$$Y3_{20\text{-}30years}(x_1,x_2,x_3)=-0{,}27173x_1^2-0{,}06851x_2^2+0{,}405669x_3^2++2{,}052052x_1+1{,}612425x_2-2{,}5282x_3-3{,}725566 \quad (3)$$

Where *Y1*-change in pulse rate Y2, Y3 - change in systolic and diastolic pressure, respectively;

The following are considered as variable parameters:

*x1*- chromaticity coordinate a;

*x2*- chromaticity coordinate b;

*x3*- chromaticity coordinate c;

The use of various models for controlling the operating modes of architectural and artistic lighting systems has made it possible to increase its efficiency by introducing feedback on the quality of lighting.

Based on these data, the concept of architectural lighting for the building of the Library of the University of Gabrovo was developed. A building model was developed and a lighting project was completed in the Dialux Evo program; to create such images in

software products, the methods of computer graphics Radiosity and Raytracing are used. The simulation results are shown in the Figures 2, 3 and 4.



***Fig. 2.*** *- Inspection point 1*



***Fig. 3.*** *– Inspection point 2*



***Fig. 4.*** *- Viewpoint 3*

On Figures 6 and 7 show images in fictitious colors for illumination, and in Fig. 7 for brightness.

After analyzing the given data, we can say that the levels of brightness and illumination that were accepted were met. It should also be noted that there is no glare at the viewpoints either.

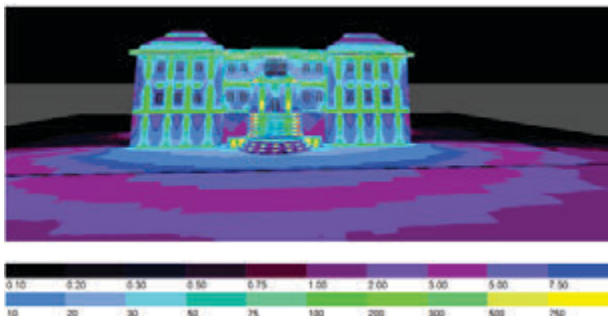
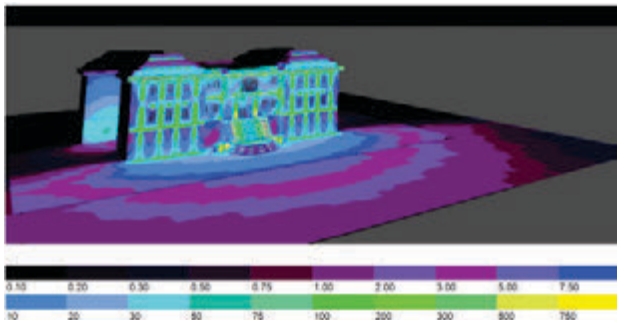
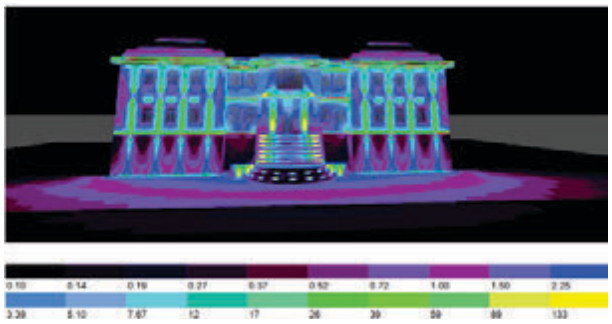


***Fig. 5.*** *- Fake colors of illumination, view 1*



***Rice. 6.*** *- Fake illumination colors, view 2*



***Rice. 7.*** *- Fake Luminance Colors*

When developing the concept, all the above was taken into account.

After analyzing the viewpoints, it was decided to illuminate the front of the building, as well as highlight the rear of the building, which will be visible from the selected points.

In detail, the need to focus on:

- three-dimensional elements of the main facades between the windows;
- eaves;
- columns;
- signs "UNIVERSITY LIBRARY";
- stairs;
- roofs.

It is these parts that need to be exhibited, but due to the geometry of the building, it was decided to place more emphasis primarily on the side and central facades, and reduce the

distance on intermediate accents. Concerning the side facades connecting the favorites, on the contrary, it was decided to hide them as much as possible, in order to create a larger volume of the building from all points of view. [6]

Since the facade of the building and the roof have warm colors, it is the lighting that should first of all be with a low color temperature, and its color should belong to the warm region of the spectrum. Considering that a third of the façade is rather dark, the roof is terracotta and the environment is also made of fairly dark materials, it was decided to use white fixtures with a color temperature of up to 3000 K to compensate for the dark and bright elements and to provide a spectacular effect. the image of the building and the creation of a comfortable atmosphere.

Therefore, we can say that the concept of creating soft and comfortable lighting has been adopted. This decision was made on the basis of a statistical study of human perception of the architectural environment.

Regarding lighting methods, it was decided to apply the spot method to the main facades, and the flood light method for the rear ones. Thus, it will be possible to focus on the architecture of the building and create a holistic image without separating individual parts of the building.

The entrance, framed by columns and topped with a golden inscription, was chosen as the main point of attraction for the eye. This is due to the fact that this is the central element of the building and at first glance it will be clear what kind of building it is. The focal points are the three-dimensional elements of the facade, cornices and stairs.

In addition, it was customary to create a rhythmic lighting of the main facades, which harmonizes with the columns and creates a single image of the architectural object.

## CONCLUSION

1. The conducted research allowed to develop models for the quantitative assessment of the light and color effects of architectural and artistic lighting on the psycho-somatic state of a person.

2. The application of the developed model in the design of the system of architectural and artistic lighting of the building of the Library of the Technical University of Gabrovo made it possible to create an architectural and artistic lighting system that meets the aesthetic, medical and biological requirements.

## REFERENCE


[1] V. Zhagan, Illumination of objects. EKOinform, 2006, 242 p.

[2] P. Hovorov, V. Chernets, “Accounting for the biomedical factor in the design of decorative and artistic lighting installations.” Proceedings of the international scientific and technical conference "SWYATLO 2006". Warsaw: Soma, September 21-25, 2006, pp. 32-38.

[3] Y. Eisenberg, The art of lighting the city. M.: Znak, 2002, p 112.

[4] Van Bommel, Van den Beld, Provides work: through visual and biological effects. Lighting Research & Technology, 2004.

[5] P. Hovorov, V. Chernets, “Electrophysiological complex for the correction of the psychosomatic state of a person.” Proceedings of the International Scientific and Technical Conference on Light Engineering and Energy, Gabrovo, October 23-25, 2006, pp. 152-158.

[6] D. Miloslavsky, A. Shushlyapin, O. Shushlyapin, “Complex magnetic and color therapy at the initial stages of hypertension.” Proceedings of the Second International Symposium "Biophysics of fields and radiation and bioinformation", Tula, 1999, p 25.

# ТЕОРЕТИЧЕН МОДЕЛ НА ИНТЕЛИГЕНТЕН СЕНЗОР С ЕЛЕМЕНТ НА ХОЛ ПОСРЕДСТВОМ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ВИРТУАЛНИ ИНСТРУМЕНТИ

**Димитър Георгиев[1], Анатолий Александров[2], Доброслав Данков[3], Продан Проданов[4]**

*[1] ТУ - Габрово, dimitar.g.georgiev@abv.bg*
*[2] ТУ - Габрово, alex@tugab.bg*
*[3] ТУ - Габрово, dankov@tugab.bg*
*[4] ТУ – Габрово, pprodanov@tugab.bg*

# THEORETICAL MODEL OF A HALL ELEMENT INTELLIGENT SENSOR USING VIRTUAL INSTRUMENTS

**Dimitar Georgiev[1], Anatoliy Aleksandrov[2], Dobroslav Dankov[3], Prodan Prodanov[4]**

*[1] TU - Gabrovo, dimitar.g.georgiev@abv.bg*
*[2] TU - Gabrovo, alex@tugab.bg*
*[3] TU - Gabrovo, dankov@tugab.bg*
*[4] TU - Gabrovo, pprodanov@tugab.bg*

**Abstract**

*The development of the electronic equipment, the circuit-technical base and the electronic components provide an opportunity to develop the corresponding software for them. Software for synthesizing and simulating theoretical models, both of single components and of entire systems, can be referred to the software. This, in turn, makes it possible to accelerate the development process and minimize subsequent undesirable results when implementing the model.*

*One of the modern and very relevant approaches for synthesizing and simulating theoretical models is through the use of virtual tools. Such specialized software is LabVIEW from the manufacturer National Instruments. On its basis, the theoretical model of an intelligent galvanomagnetic sensor with a Hall element, presented in this article, was synthesized.*

**Keywords:** intelligent sensor, magnetic field, LabVIEW, MLX91206 CAL-001, FIR, oversampling, low pass filter.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Използването на виртуални инструменти за синтез и симулация на теоретични модели предоставя съвременен инженерен подход за постигане на бързи и точни резултати във фазата на разработка. Този тип инструменти значително намаляват времето за разработка поради няколко причини – не изискват задълбочени знания в областта на програмни езици, предоставят предварително заложени библиотеки с елементи, функции и процеси, лесно представяне на входни и изходни данни под различна форма (графична, таблична) и т.н.

С оглед на изброените предимства и натрупани експериментални изследвания е избран подхода за синтезиране на теоретичен модел на интелигентен галваномагнитен сензор с елемент на Хол чрез специализиран софтуер LabVIEW. Целта на доклада е изследване и избор на филтри за премахване на периодичен и апериодичен шум при измерване и обработка на магнитно поле, както и оценка на тяхната ефективност.

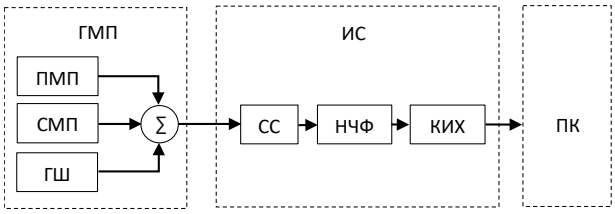
Представеният интелигентен сензор е част от проектна разработка и бъдеща реализация на система за събиране и обработка на информация от галваномагнитни сензори (ГМС).

## ИЗЛОЖЕНИЕ

От проведени експериментални изследвания в [2] е реализиран теоретичен модел в [1], реализиран в програмна среда OrCAD, представящ преобразувателните характеристики на интегрална схема с елемент на Хол тип MLX91206 CAL-001. На база получената единична линейна регресия и получените резултати от теоретичният модел се пристъпва към синтезиране на нов теоретичен модел на интелигентен галваномагнитен сензор с елемент на Хол в програмна среда LabVIEW [3].

Програмна среда LabVIEW на фирмата производител National Instruments има редица предимства, поради които е избрана. Като водещо при избора може да се посочи това, че теоретичният модел е динамичен и входните параметри могат да се променят във всеки един момент.

Общата блокова структура на симулационния на теоретичният модел на интелигентен ГМС с елемент на Хол е представена на фиг. 1.




***Фиг. 1**. Блокова структура на симулационният модел*

Както се вижда от фиг. 1, теоретичният модел има три основни блока – генератор на магнитно поле (ГМП), интелигентен сензор (ИС) и блок персонален компютър (ПК).

Блока за генериране на магнитно поле се състои от три подблока - блок за генериране на постоянно магнитно поле (ПМП), блок за генериране на синусоидално магнитно поле (СМП) и блок за генериране на шум (ГШ).

ПМП служи за генериране на постоянно (константно) магнитно поле. Съответно блок СМП служи за генериране на магнитно поле със синусоидална форма. Двата блока за генериране на магнитно поле притежават набор от инструменти за конфигуриране. Предвидено е ГПМ и СМП да не се използват паралелно.

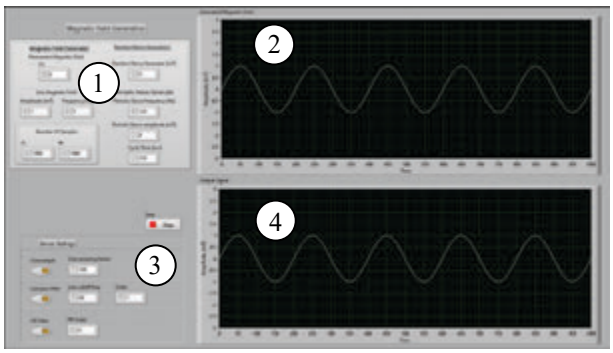
Блок ГШ има за цел да внесе шум към основният сигнал. Предвидено е да бъде генериран два типа шум – периодичен (с постоянна амплитуда) и апериодичен (променяща се амплитуда). Двата типа шум могат да бъдат прилагани едновременно.

След като бъде конфигуриран, блок ГМП, сигнала постъпва на входа на интелигентният сензор (ИС). Предвидено е той да обработва постъпилият сигнал посредством набор от три филтъра: филтър за свръх семплиране (СС)[4], нискочестотен филтър (НЧФ) [5] и филтър с крайна импулсна характеристика (КИХ) [6]. Филтрите се прилагат върху постъпилият сигнал последователно, като всеки от тях може да бъде включван или изключван. Филтрите разполагат с широк набор от параметри, които могат да се променят според вида на филтрирания сигнал.

Избрани са тези три метода за филтриране, като съответно СС е подходящ при филтриране на апериодични съставящи в измерваният сигнал, НЧФ е подходящ за премахване на перодични съставящи, а КИХ е приложим и при двата типа съставящи на обработвания сигнал.

След като сигнала бъде обработен от интелигентният сензор той се предава към персонален компютър (ПК) с цел визуализиране.

На фиг. 2 е представен общ вид на графичната част на съставеният симулационен модел в програмна среда LabVIEW.




***Фиг. 2**. Общ вид на съставения симулационен модел на ИС в програмна среда LabVIEW*

В областта, маркирана с 1 на фиг. 2 се извършва конфигурирането на ГМП - задаване на вида, параметрите на магнитното поле и генерирането на шум.

В поле 2 се визуализира в графичен вид формата на измереното магнитно поле постъпило от ГМП на входа на ИС.

В областта, маркирана с 3 се извършва въвеждане на параметрите на интелигентният сензор. В това поле се извършва параметризиране на филтрите и възможността за тяхното активиране и деактивиране.

В поле 4 се представя в графичен вид формата на филтрираният сигнал от ИС, който ще бъде предаван към ПК. В случая полето може да се разглежда и като блок ПК.

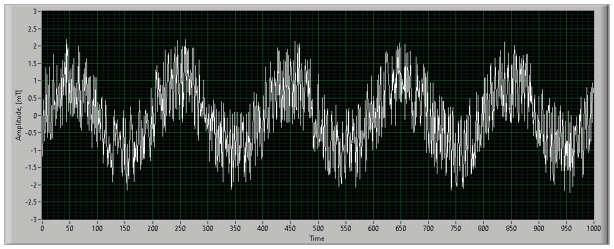
Приложени са следните теоретични изследвания – генериране на синусоидално магнитно поле и постоянно магнитно поле с периодичен, с апериодичен и смесен шум. За да се оцени функционалността на избраните филтри са представени теоретични изследвания на магнитно поле със синусоидална форма със следните параемтри – амплитуда 1mT и честота 5Hz.

На фиг. 3 е представена формата на синусоидално магнитно поле постъпващо на входа на ИС с апериодичен шум с коефициент К = 2,5. Коефициента К служи за изменение нивото на шума в апериодичната съставка.

Аперидичната съставка се получава според формулата:

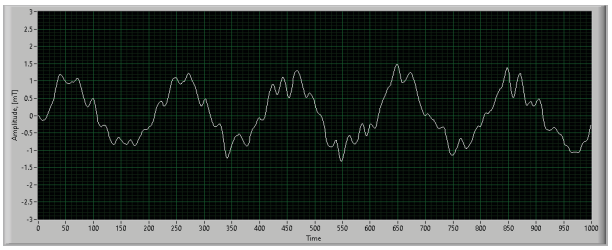
$$Y = (G - 0{,}5) \times K \qquad (1)$$

където: Y – изходният сигнал; G – случайно генерирано число в диапазона 0 – 1.

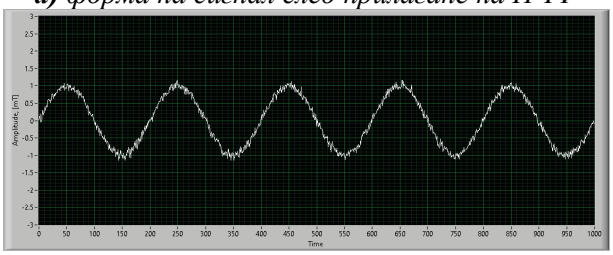


***Фиг. 3**. Синусоидално магнитно поле с апериодична съставка*

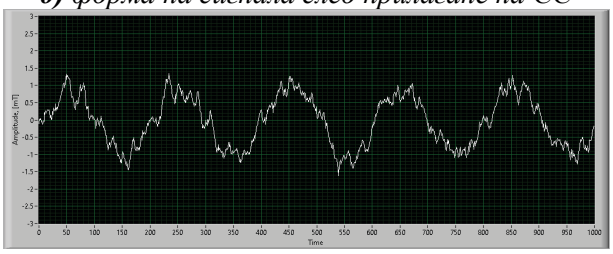
На фиг. 4а е представена изходната (филтрирана) форма на сигнал с приложен НЧФ от 3-ти ред и честота на филтриране 40Hz. На фиг. 4б е представен изходният сигнал с приложен СС филтър от 10-ти ред. На фиг. 4в е представен изходният сигнал с приложен КИХ филтър от 10-ти ред. На фиг. 4г е представен изходният сигнал с приложени всички филтри.



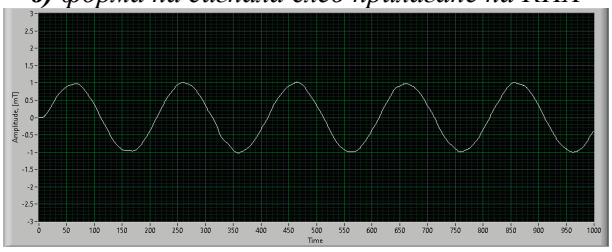
***а)** форма на сигнал след прилагане на НЧФ*



***б)** форма на сигнала след прилагане на СС*



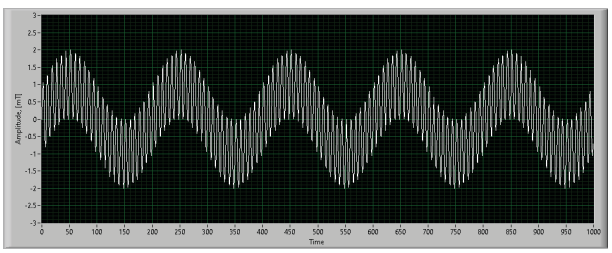
***в)** форма на сигнала след прилагане на КИХ*



***г)** форма на сигнала след прилагане на **к**омбинация от всички филтри*

***Фиг. 4**. Получен изходен сигнал след филтриране*

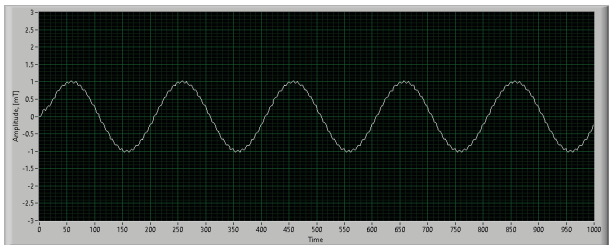
На фиг. 5 е представено магнитно поле със синусоидална форма и периодична съставка от 120 Hz.



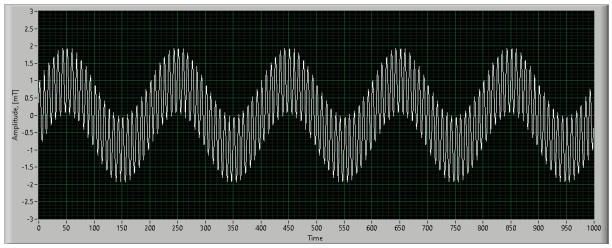
***Фиг. 5**. Синусоидално магнитно поле с периодична съставка 120 Hz*

На фиг. 6 а) до фиг. фиг. 6 г) са представени изходните форми на сигнала с приложените типове филтри, както и комбинира-

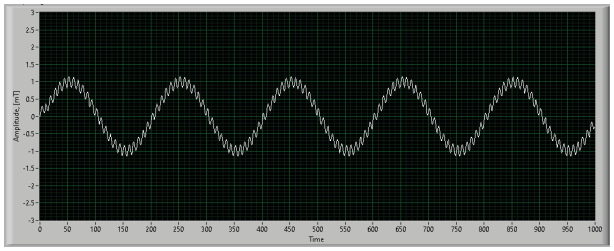
ното им прилагане с параметри описани в предходният експеримент.



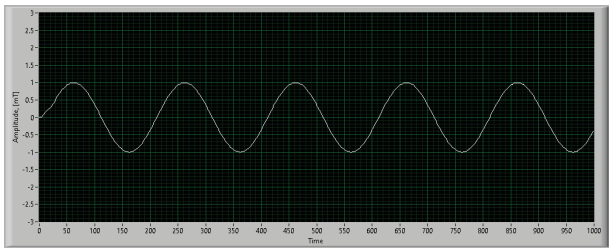
***а)*** *форма на сигнала след прилагане на НЧФ*



***б)*** *форма на сигнала след прилагане на СС*



***в)*** *форма на сигнала след прилагане на КИХ*

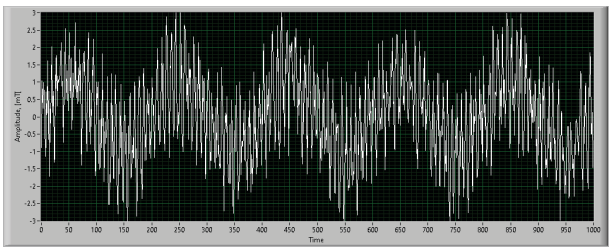


***г)*** *форма на сигнала след прилагане на комбинация от всички филтри*

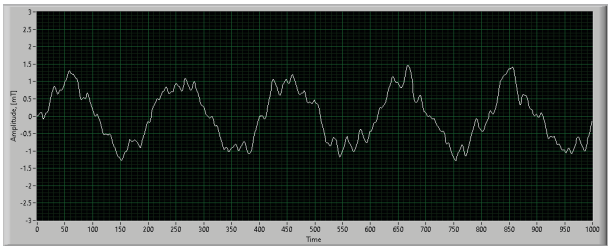
***Фиг. 6****. Получен изходен сигнал след филтриране*

От представените резултати на фиг. 6 ясно се вижда, че най – добъра форма на изходният сигнал се постига при прилагане на НЧФ. Също така се вижда, че СС не е приложим при филтриране на периодична съставка.

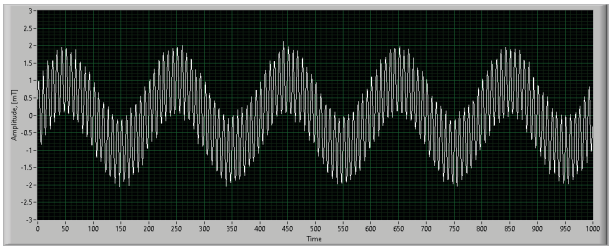
На фиг. 7 е представено синусоидално магнитно поле с комбиниран шум от периодична съставка 120 Hz и апериодична съставка с коефициент 2,5. На фиг. 8 а) до фиг. 8 г) са представени резултати от прилагане на типовете филтри с параметри като в предходното изследване.



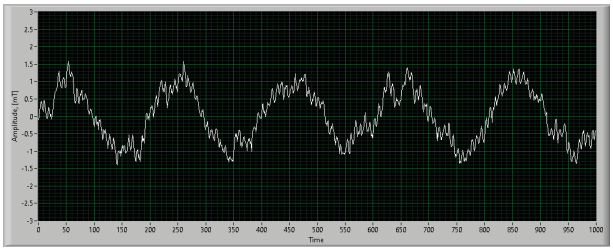
***Фиг.*** *7. Магнитно поле с комбиниран шум от периодична и апериодична съставка*



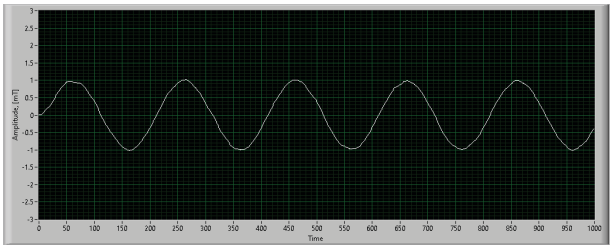
***а)*** *форма на сигнала след прилагане на НЧФ*



***б)*** *форма на сигнала след прилагане на СС*



***в)*** *форма на сигнала след прилагане на КИХ*



***г)*** *форма на сигнала след прилагане на комбинация от всички филтри*

***Фиг. 8****. Получен изходен сигнал след филтриране*

От фигура 8 се вижда, че най-добъра форма на изходният сигнал се постига при прилагане на комбинация от всички филтри.

От представените резултати се вижда ефективността на всеки филтър като самотоятелен и при прилагането му в комбина-

ция с останалите филтри към различен тип шум. Като обобщение може да се посочи, че най – добра форма на изходният сигнал при различните типове шум се постига чрез прилагане на комбинация от трита филтъра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализираният теоретичен модел показва, че избраните цифрови филтри са подходящи за премахване на постоянен и периодичен шум в процеса на измерване. Параметрите на филтрите са отворени за промяна във всеки един момент, което дава възможност за гъвкавост на интелигентният сензор за магнитно поле.

Предвидената възможност за включване и изключване на филтрите по време на измерване дава възможност за изследване и анализ на измерваното магнитно поле в реално време с отчитане на параметрите на магнитното поле.

От направените теоретични изследвания и получените резултати може да се направи заключение, че поставената цел е постигната. Събраното количество данни при провеждане на експеримента са достатъчни за извършване оценка ефективността на избраните филтри при обработка на магнитно поле с периодична и апериодична съставка.

Получените резултати са предпоставка към реализиране на теоретичният модел с избраните типове филтри.

## REFERENCE


[1] Georgiev D., Dankov D, Prodanov P. Experimental –Theoretical Model of Galvanomagnetic IC Type MLX91206. Proc. 12th National Conference with International Participation "Electronica 2021", May 27-28, 2021, Sofia, Bulgaria

[2] Georgiev D. EXPERIMENTAL CAPTURE OF TRANSFER CHARACTERISTICS OF GALVANOMAGNETIC HALL SENSORS TYPE MLX91206 CAL-001. Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 52'2016 (66-67).

[3] National Instruments. What is LabVIEW?. https://www.ni.com/en-rs/shop/labview.html

[4] Jayanth Murthy Madapura (Microchip). Achieving Higher ADC Resolution Using Oversampling. http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01152A.pdf

[5] Kehtarnavaz N., N. Kim. "Digital Signal Processing System-Level Using LabVIEW". Elsevier Inc. Unated States America, pp. 1-305, 2005.

[6] Georgiev G., Balabanova I., Penchev P. Development of a virtual tool for filtering, research and analysis of signals and noise by IIR and FIR digital filters in LabVIEW. PROCEEDINGS OF UNIVERSITY OF RUSE - 2016, volume 55, book 3.2.

# ТЕМПЕРАТУРНИ И ЧЕСТОТНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СЕГНЕТОКЕРАМИКА $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$

**Ивайло Лазаров**

*Технически университет -Габрово*

# TEMPERATURE ANA FREQUENCY CHARACTERISTICS OF FERROCERAMICS $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$

**Ivaylo Lazarov**

*Technical University of Gabrovo*

**Abstract**

*$BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$ ceramics have been by solid state reaction method. The materials were synthesized at a temperature 1250°C for 2h. The temperatures and frequencies characteristics of the dielectric permittivity and the tangent of the dielectric loss were obtained. As the frequency increases, the dielectric permittivity decreases and the Curie temperature increases. The values for the tangent of the dielectric losses are lower at higher temperatures and frequencies.*

**Keywords:** barium titanate dielectric permittivity; tangent of the dielectric loss.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Бариевият титанат е диелектрик с перовскитна структура, намерил приложение за изработване на многослойни керамични кондензатори, трансдюсери, актуатори, устройства за съхранение на електрическа енергия и др [1]. Диелектричните му свойства могат да изменят както с контролиране на различни параметри в процеса на получаване, така и със заместването на различни атоми в кристалната решетка. Легираният бариев титанат е намерил широко приложение за изработване на резистори с положителен температурен коефициент, ултразвукови трансдюсери и пиезоелектрични устройства [2]. При замяна на титановите йони с калаени се понижава температурата на фазовия преход до температури, близки до стайната и това го прави подходящ материал за ниско-температурни приложения [3]. Освен това се подобровят диелектричните и пиезо-електричните свойства на керамиката. Керамика от твърд разтвор на $BaSn_{0.1}Ti_{0.9}O_3$, синтезирана при температура 1300°C е изследвана в [4]. Рентгеноструктурният анализ показва, че е получена керамика без вторична фаза с високи стойности за относителната диелектрична проницаемост ($\varepsilon_r$ = 4600). $Ba(Ti_{0.92}Sn_{0.08})O_3$ керамика, получена при двустепенен режим е изследвана в [5]. Резултатите от рентгеноструктурния анализ показават, че се е получила керамика с чиста перовскитна фаза с високи стойности за относителната диелектрична проницаемост ($\varepsilon_r$ = 4250) и сравнително ниски стойности за тангенса от ъгъла на диелектричните загуби. Диелектричните и структурните свойства на керамика от бариев титанат – бариев станат са изследвани в [6]. Резултатите от рентгеноструктурния анализ показват, че се е получил материал с чиста перовскитна фаза, а с увеличаване на съдържанието на калай се понижава максимумът в температурната зависимост на относителната диелектрична проницаемост.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

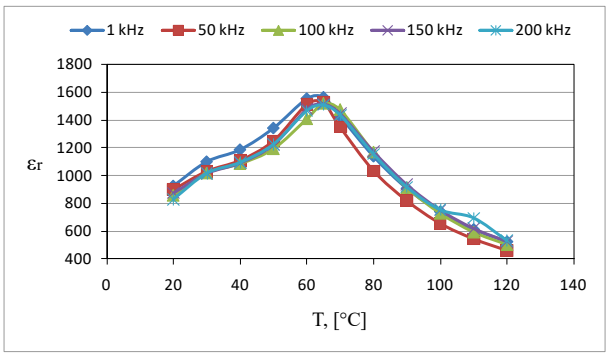
### Материали и методи

Изследваните керамични образци са получени по метода на твърдофазната реакция по стандартна керамична технология. Изходни компоненти са прахове от бариев карбонат ($BaCO_3$), титанов диоксид ($TiO_2$) и кален диоксид ($SnO_2$). Праховете са претеглени в стехиометрично количество и хомогенизирани в планетарна мелница “Pulverizte 5” с алундови гърнета и диаметър на сферите 10 mm. Праховете се изсушават при температура около 80°C и се гранулират с поливинилов алкохол (PVA). Изсушените прахове се пресуват под формата на дискове с диаметър 11mm и дебелина 1÷3mm. Синтезът на получените образци се провежда във високо-температурна пещ при температура 1250°C в продължение на 2h. За осъществяване на електрически контакт, повърхността на изследваните образци с покрива със сребърна паста, която се изпича при температура 900°C с продължителност 1h.

Измерванията се извършават с RLC метър.

### Температурни зависимости

На фиг.1 са дадени температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост при различни честоти за изследваните материали.




***Фиг. 1**. Температурни зависимости на относителната диелектрична проницаемост за материали от $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$, синтезирани при 1250°C*

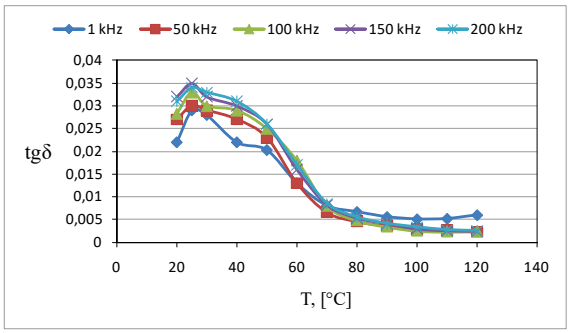
При всяка от изследваните честоти е наличен максимум (температура на Кюри) в температурната зависимост на относителната диелектрична проницаемост. С увеличаване на честотата нараства температурата на Кюри, при която се получават максимални стойности в зависимостта на относителната диелектрична проницаемост.

Максималните стойности в температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост намаляват с увеличаване на честотата. Стойностите за температурата на Кюри и максималните стойности за относителната диелектрична проницаемост при различни честоти са дадени в табл.1.

***Таблица 1.** Стойности за температурата на Кюри максималните стойности за относителната диелектрична проницаемост при различни честоти*

| f, [kHz] | Tc, [°C] | $\varepsilon_r$ |
|---|---|---|
| 1 | 63 | 1563,46 |
| 50 | 63 | 1525,93 |
| 100 | 65 | 1519,33 |
| 150 | 65 | 1517,19 |
| 200 | 65 | 1508,39 |

Температурните зависимости на тангенса от ъгъла на диелектричните загуби (tgδ) при различни честоти са дадени на фиг. 2.



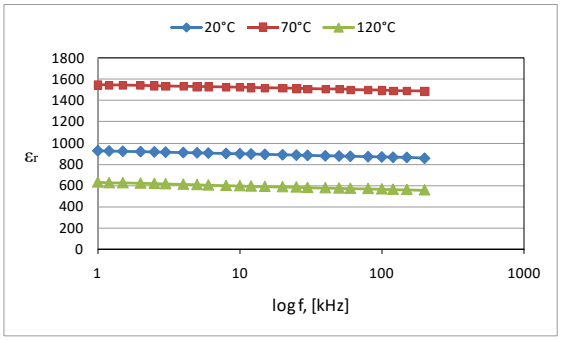

***Фиг. 2.** Температурни зависимости на тангенс от ъгъла на диелектричните загуби за материали от $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$, синтезирани при 1250°C*

За всяка от изследваните честоти се получава максимум в температурната зависимост на tgδ при температура 25°C. След достигане на максимална стойност стойностите за tgδ намаляват с увелича-ване на температурата. С увеличаване на честота стойностите за тангенса от ъгъла на диелектричните загуби нарастват. За температури до точката на Кюри на изследваните материали, tgδ има по – високи стойности при високи честоти. След температура на Кюри са

получени по – високи стойности за тангенса от ъгъла на диелектричните загуби при честота 1 kHz.

**Честотни зависимости**

На фиг. 3 е показано изменението на относителната диелектрична проницаемост от честотата при три различни температури – 20°C, 70°C и 120°C.

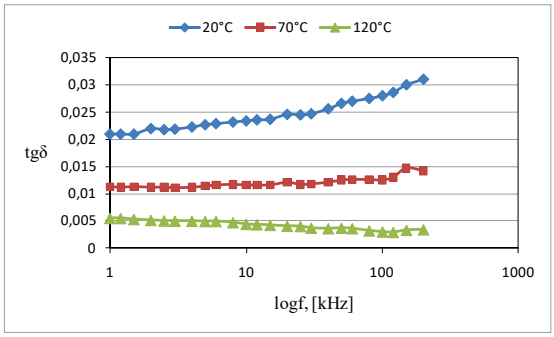



***Фиг. 3**. Честотни зависимости на относителната диелектрична проницаемост за материали от $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$, синтезирани при 1250°C при температури 20°C, 70°C и 120°C*

Относителната диелектрична проницаемост намалява с увеличаване на честотата при трите температури. Това се обяснява с механизма на поляризацията, при който йоните не могат да следват изменението на приложеното външно електрическо поле. Стойностите за относителната диелектрична проницаемост са най-високи при температура 70°C, в близост до точката на Кюри. Най-ниски стойности за относителната диелектрична проницаемост са получени при температура 120°C, което съответства и най-ниските стойности в температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост.

На фиг. 4 са показани честотните зависимости на тангенса от ъгъла на диелектричните загуби при температури 20°C, 70°C и 120°C.

Най-високи стойности за тангенса от ъгъла на диелектричните загуби са получени при стайна температура 20°C. За тази температура се наблюдава плавно нарастване на tgδ с увеличаване на честотата. Вероятно това се дължи, че на протичането на поляризационни процеси и сместване на границите на домените. При температура 70°C, в близост до точката на Кюри, tgδ нараства слабо с увеличаване на честотата.




***Фиг. 4**. Честотни зависимости на тангенса от ъгъла на диелектричните загуби за материали от $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$, синтезирани при 1250°C при температури 20°C, 70°C и 120°C*

При температура 120°C тангенса от ъгъла на диелектричните загуби намалява с увеличаване на честотата, поради това, че сегнотдиелектрикът е преминал в параелектрична фаза. За тази температура стойностите за тангенса от ъгъла на диелектричните загуби са най – ниски, което съответства на стойностите температурните зависимости на tgδ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследвани са керамични материали от твърди разтвори бариев титанат – бариев станат, при която 10% от титановите йони са заменени от калаени $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$, синтезирани при температура 1250°C, получени по метода на твърдофазната реакция. Получени са температурните и честотни зависимости на относителната диелектрична проницаемост ($\varepsilon_r$) и тангенса от ъгъла на диелектричните загуби (tgδ).

Температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост показват наличието на максимум при различните честоти. Честотните зависимости на относителната диелектрична проницаемост показват, че с увеличаване на честота диелектричната проницаемост намалява. Температурните и честотните зависимости на тангенса от ъгъла на диелектричните загуби показват, че стойностите на tgδ са по – ниски при по-високи температури и честоти от изследвания диапазон.

## REFERENCE


[1] Starkov I, Anokhin A, Mylnikov I, Mishnev I, Starkov A. Influence of sintering temperature on grain size and elektrocaloric effect of barium titanate ceramics. Physics of the Solid State, 2022;64(4):428-438.

[2] Drdlik D, Marak V, Maca K, Drdlikova K. Modification of barium titanate via rare earth oxides addition: Dilatometric and microstructural study. Ceramics International, 2022;47(17):24599-24608.

[3] Wu C, Yao M. Dielectric tunable properties of $BaTi_{1}$-x$Sn_xO_3$ thin films derived from sol – gel soft chemistry, Ceramics International, 2021;(47)14;20230-20238.

[4] Ansari MA, Sreenivas K. Influence of Sn doping in $BaSn_{1-x}Ti_x$ ceramics on microstructural and dielectric properties. In: 2nd International Conferenece Condensed Matter and Applied Physics, 2017, p.09929-1-090029-4.

[5] Bomlai P, Kongtong P. Improvement on the electrical properties in $Ba(Ti_{0.092}Sn_{0.08})O_3$ lead – free ceramics by Ca addition and sintering profile, Key Engineering Materials 2019, 798; 258-263.

[6] Kayaphan W, Bomlai P. Microstructural and electrical properties of Sn-modified $BaTiO_3$ lead free ceramics by two step sintering method. Advanced in Materials Science and Engineering, 2018; 1-6.

# ЕЛЕКТРИЧЕСКО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА БУТАЛЕН КОМПРЕСОР

**Свилен Рачев[1], Любомир Димитров[2]**
*[1]Технически университет – Габрово*
*[2]Технически университет – Габрово*

# ELECTRICAL SIZING OF A RECIPROCATING COMPRESSOR

**Svilen Rachev[1], Lyubomir Dimitrov[2]**
*[1] Technical University – Gabrovo*
*[2] Technical University – Gabrovo*

**Abstract**

*The widespread use of compressors in the industry is known. On the other hand, there is currently a general orientation worldwide towards energy-efficient technical solutions. If we consider a compressor unit as an electromechanical system, and the motor as its element, then we must undoubtedly take into account that the merits of the electric motor can be fully realized, only on the condition that the right electric motor is chosen and meets all the requirements. Its reliability when working as part of the electromechanical system and energy indicators in the process of operation depend on its correct power selection. All this makes the question of an appropriate choice of an electric motor for a compressor system relevant, as well as obtaining specific characteristics related to work processes. The main goal and tasks to be implemented in this paper are precisely these questions.*

**Keywords:** induction motor, reciprocating compressor, performance characteristics, energy efficiency.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Компресорите са много важен компонент, масово разпространени и използвани в различни отрасли. Намират приложение като се започне от домашните хладилници, промишлени инсталации и се стигне до космическите съоръжения (напр., охлаждане на горивото на ракетите-носители).

Компресорите са устройства, служещи за сгъстяване на газове под определено налягане и подаването им към потребителите чрез тръбопроводи.

Накратко компресорните устройства са съставени от [1]:

- електродвигател;
- нагнетателно устройство;
- резервоари (ресивери) за съхранение на необходимия газ;
- съединителни шлангове и тръби.

Компресорите биват обемни и турбокомпресори. Турбокомпресорите от своя страна се подразделят на центробежни, осеви и диагонални, а обемните – на бутални и ротационни.

Поради широкия диапазон на налягания-та буталните компресори се отличават с многообразните си схеми на действие и устройство.

При малки компресорни уредби, които работят с налягане до 6 атмосфери се използват едностепенни компресори. При компресорни уредби, които работят по-продължително време в денонощието, с налягане над 6 атмосфери, се използват двустепенни компресори.

Основни величини (параметри), характеризиращи работата на компресора са: дебит, начално и крайно налягания или степента на сгъстяване, честота на въртене и мощност на вала на компресора.

## НЯКОИ СЪОБРАЖЕНИЯ

Повечето работни механизми и машини се привеждат в движение от електродвигатели. Всеки електродвигател, заедно с механични устройства (редуктори, трансмисии, коляно-мотовилкови механизми и др.), служещи за предаване на движение на работния орган, а също и с устройствата за управление и контрол, образува електромеханична система, която се явява енергетична, кинематична и кибернетична (в смисъл на управление) основа за функциониране на работните машини.

Електродвигателите, използвани в компресорните устройства, се явяват елемент на електромеханичната система. Те могат да работят с постоянен или променлив (еднофазен и трифазен) ток. Най-често употребявани са асинхронните двигатели с накъсосъединен ротор, работещи с променлив ток.

Преимуществата на асинхронните двигатели с накъсосъединен ротор са тяхната икономичност, простота на устройство и управление, удобна конструкция и голяма сигурност в експлоатацията, малки размери, имат най-малка специфична маса за единица мощност, евтини са, лесно се захранват. Пусково-регулиращите им характеристики не са много добри, т.к. пусковият им момент е малък, а пусковият ток голям, (превишава от 5 до 7 пъти номиналния ток на двигателя), но тези отрицателни страни са търпими [2].

Достойнствата на електродвигателя могат да бъдат напълно реализирани, само при условие, че е избран правилният и отговарящ на всички изисквания електродвигател. От правилния му избор по мощност зависят неговата надеждност при работа в състава на електромеханична система и енергийните показатели в процеса на експлоатация (електрически коефициент на полезно действие, фактор на мощността и др.).

С използването на електродвигател притежаващ излишна мощност, неоправдано се повишават габаритите на системата, нейната маса, стойност (цена) и се влошават нейните енергийни показатели. При използване на такъв електродвигател се увеличават загубите и времето на излизане от работен режим (времето за спиране).

Недооразмеряването по мощност (в сравнение с необходимата) на електродвигателите също не е целесъобразно поради това, че се прегряват над допустимите норми и се намалява производителността на механизмите, главно поради влошени качества на преходните процеси [3].

Поради това мощността на електродвигателя трябва да бъде в строго съответствие с режимите на работа и натоварването.

За да се избере мощността на електродвигателя, може да се постъпи по следния начин. Като се използва кривата на момента в зависимост от ъгъла на завъртане $\alpha$ - $M=f(\alpha)$, може да се намери средната стойност на момента $M_{ср}$ и привеждайки го към вала на двигателя с предавателно число $i$ с отчитане на загубите в предавката, ще се получи:

$$M'_{ср} = \frac{M_{ср}}{i\eta_{пр}} \qquad (1)$$

С този момент може ориентировъчно да се избере електродвигател с най-близкия по каталог по-голям момент. За този електродвигател се отчита $GD^2_д$ и общият приведен махов момент ще бъде [4]:

$$GD^2_{пр} = GD^2_д + \frac{GD^2_{max}}{i^2} \qquad (2)$$

С помощта на $GD^2_{пр}$ може да се построи кривата на момента на вала на двигателя в зависимост от времето $M_д = f(t)$, като се използват известни методи от теорията на електрозадвижването. От получената крива може да се определят средноквадратичният и максималният момент, по който се проверява ориентировъчно избраният електродвигател. Ако се окаже, че избраният електродвигател не е подходящ, избира се следващият по мощност и изчисленията се повтарят.

Освен по гореописания начин определянето на необходимата двигателна мощност

при бутални компресори може да се извърши с помощта на товаровата диаграма. Това е показано по-долу.

## ИЗБОР НА ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛ ЗА ЗАДВИЖВАНЕ НА КОМПРЕСОР

Предварително зададени условия за работа на компресора: влажност до 90%; температурни граници от -20 до +20ºC, надморска височина до 1000 m. Изходните данни са показани в Табл. 1.

***Табл. 1.*** *Данни на разглеждания компресор*

| Предавателно отношение на редуктора, $i$ | Номинална честота на въртене, $n_H$, $min^{-1}$ | Инерционен момент на механизма, $J_{мех}$, $kg.m^2$ |
|---|---|---|
| 3 | 730 | $3*10^{-2}$ |

В съответствие с изходните данни и посоченото в източник [1] изменението на съпротивителния момент за един оборот на коляновия вал е дадено в Табл. 2.

По зададените стойности на съпротивителния момент, приложен към вала на двигателя се определя еквивалентния такъв:

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{1}{mi^2}\sum_{к=1}^{m} M_{ck}^2}\ ; \qquad (3)$$

$$M_{екв} = 28.3339\ \ , Nm$$

Определяне на ъгловата скорост на ротора на електродвигателя:

$$\omega_н = \frac{n_н \cdot \pi}{30}\ ; rad/s \qquad (4)$$

Определяне на еквивалентната мощност на електродвигателя:

$$P_{екв} = \frac{M_{екв} \cdot \omega_н}{10^3}\ ;\ P_{екв} = 2.166\ \ kW \qquad (5)$$

***Табл. 2.*** *Стойности на съпротивителния момент*

| № | $M_{ck}$, $Nm$ |
|---|---|
| 1 | 0 |
| 2 | -4.5 |
| 3 | -7.2 |
| 4 | -1.8 |
| 5 | 12.6 |
| 6 | 36 |
| 7 | 64.8 |
| 8 | 90 |
| 9 | 100.8 |
| 10 | 99 |
| 11 | 81 |
| 12 | 45 |
| 13 | 9 |
| 14 | 10.8 |
| 15 | 21.6 |
| 16 | 59.4 |
| 17 | 99 |
| 18 | 135 |
| 19 | 147.6 |
| 20 | 147.6 |
| 21 | 136.8 |
| 22 | 120.6 |
| 23 | 97.2 |
| 24 | 57.6 |
| 25 | 30.6 |

От [5] избираме асинхронен електродвигател с технически данни, дадени в Табл. 3.

***Табл. 3.*** *Технически данни на избрания електродвигател*

| Тип | $P_н$, kW | При номинално натоварване | | | $\frac{M_m}{M_н}$ | $\frac{M_п}{M_н}$ | $\frac{I_п}{I_н}$ | | $J$, $kgm^2$ | $n_o$, $min^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $n$, $min^{-1}$ | $\eta$,% | $cos\varphi$ | | | | | | |
| AO2-42-8 | 3.0 | 710 | 80.2 | 0.71 | 2.2 | 1.2 | 4.0 | | 0.2 | 750 |

където: $n$ - честота на въртене на ротора на електродвигателя, $min^{-1}$;
$n_o$ - синхронна честота на въртене, $min^{-1}$;

$\eta$ - к.п.д. на двигателя, %;

$cos\ \varphi$ - фактор на мощността на електродвигателя;

$\frac{M_m}{M_н}$ - кратност на максималния момент;

$\frac{M_n}{M_н}$ - кратност на пусковия момент;

$\frac{I_n}{I_н}$ - кратност на пусковия ток;

$J$ - инерционен момент на ротора, $kgm^2$.

Трифазните асинхронни електро-двигатели с накъсосъединен ротор тип АО2-42-8 са предназначени за продължителен режим на работа S1. Произвеждат се за директно пускане и работа към мрежата ниско напрежение 230/400V с честота 50 Hz.

Моменти на двигателя – номинален и максимален (уточняване на изчисленията):

$$M_н = \frac{P_н \cdot 10^3}{\omega_н}; \quad M_н = 39{,}2437, \quad Nm;$$

$$M_{max} = \lambda \cdot M_н; \quad M_{max} = 86{,}33614, Nm$$

където: $\lambda$ – кратност на максималния момент.

Номинално и максимално хлъзгане:

$$s_н = \frac{\omega_0 - \omega_н}{\omega_0}; \quad s_н = 0{,}0267;$$

$$s_{max} = s_н \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}); \quad s_{max} = 0{,}1109.$$

където: $\omega_0$ – синхронна ъглова скорост на електродвигателя по каталожни данни, rad/s.

Формула на Клос:

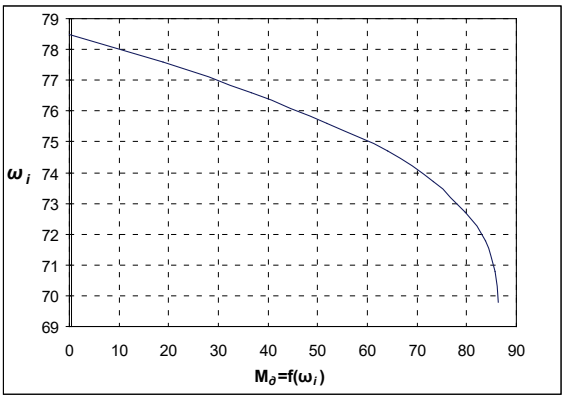
$$M_д = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{max}} + \frac{s_{max}}{s}}, Nm; \qquad (6)$$

- С помощта на формулата на Клос (6) построяваме механичната характеристика на електродвигателя. Задавайки различни стойности за хлъзгането $s$ получаваме съответните стойности за двигателния момент $M_д$.

Стойностите за изменението на ъгловата скорост на въртене на ротора $\omega_i$ получаваме също задавайки различни стойности за $s$, по следната формула:

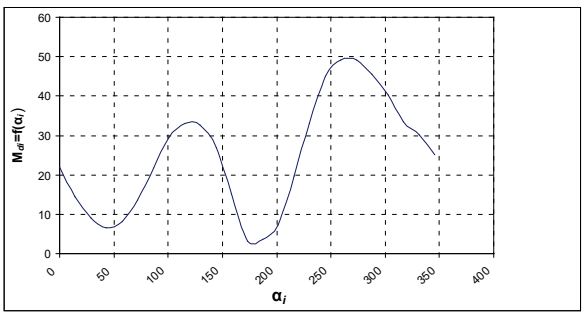
$$\omega_i = \omega_0(1 - s), rad/s \qquad (7)$$

По данните от изчисленията построяваме механичната характеристика $M_д = f(\omega)$ – фиг. 1.




***Фиг. 1**. Работен участък на механичната характеристика на двигателя*

Определени са и стойностите на ъгловия момент на вала на електродвигателя за различни ъгли на завъртане на вала на компресора, а също и стойности на изходящата мощност на вала на ротора.

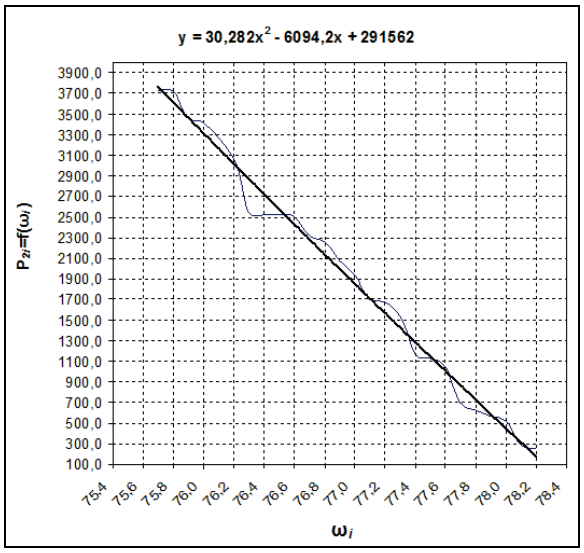



***Фиг. 2**. Стойности на ъгловия момент на вала на двигателя за различните ъгли на завъртане*

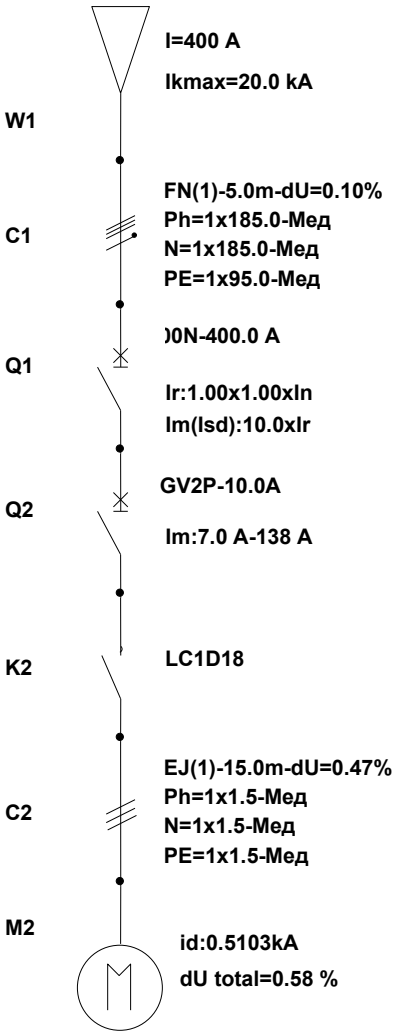
Като допълнение – извършен е и избор на електрически апарати за управление и защита на електродвигателя чрез специали-

зиран софтуер и е построена силовата верига на електродвигателя [6].

На фиг. 4 е представена схема на силовата верига.




***Фиг. 3**. Зависимост на изходящата мощност на ротора от ъгловата скорост*




***Фиг. 4**. Схема на силовата верига*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършен е избор на електродвигател за задвижване на компресор при предварително зададени условия на работа и извършване на съответните проверки. Проверките на избрания електродвигател са съпроводени от аналитично получаване и графично построяване на конкретни характеристики.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Изпълнението на този доклад е благодарение на подкрепата на:

- Проект 2206С ‘Приложни математически изследвания в електроснабдяването и електрообзавеждането с фокус върху енергийната и икономическа ефективност’, финансиран от Министерството на образованието и науката на Република България.

- Проект BG05M2OP001-1.002-0023 Competence Center ‘Intelligent Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies’ financed by the Operational Program ‘Science and Education for Intelligent Growth’ of the European Regional Development Fund.

## REFERENCE

[1] Завьялов Е. М., Выбор электропривода для компрессорных машин и установок, Омск, 1989 //Zavyalov E. M., Vibor elektroprivoda dlya kompresornih mashin I ustanovok, Omsk, 1989.

[2] Ангелов А., Димитров Д., Електрически машини 1, София, Техника, 1976 // Angelov A., Dimitrov D., Electricheski mashini 1, Sofia, Tehnika, 1976.

[3] Рачев С., Д. Коева Д., Л. Димитров, Електрообзавеждане, Габрово, УИ „Васил Априлов”, 2018 // Rachev S., D. Koeva, L. Dimitrov, Elektroobzavezhdane, Gabrovo, UI „Vasil Aprilov”, 2018.

[4] Стоянов С., Ц. Цанев, Електрообзавеждане на производствени агрегати, София, Техника, 1990 // Stoyanov S., Ts. Tsanev, Elektroobzavezhdane na proizvodstveni agregati, Sofia, Tehnika, 1990.

[5] Стоянов С., Ст. Пандуров, Справочник по енергетика, том 5, София, АВС Техника, 1998 // Stoyanov S., St. Pandurov, Spravochnik po energetika, tom 5, Sofia, ABC Tehhnika, 1998.

[6] https://www.se.com/il/en/product-range/61013-ecodial-advance-calculation/#overview. (29 Sept. 2022).

# PHOTOVOLTAIC MODULES SOILING DURING HEATING SEASON IN NIŠ, SERBIA

**Ivana Radonjić[1], Lana Pantić[1], Tomislav Pavlović[1], Dragoljub Mirjanić[2], Darko Divnić[2]**

*[1] University of Niš, Faculty of Sciences and Mathematics, Department of Physics, Višegradska 33, 18000 Niš, Serbia*
*[2] Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Bana Lazarevića 1, 78000 Banja Luka, Republic of Srpska*

**Abstract**

*Wide use of fossil fuels in Serbia causes, beside air pollution, PV modules soiling, especially during heating season. In this paper results of the soiling effects on output power of horizontal and optimal PV modules during the first month of the heating season 2016/2017 in Niš are given. Heating season 2016/2017 in Niš started on 08.10.2016 and lasted until 30.04.2017. This paper shows results of PV modules soiling effects for the period 24.10-25.11.2016. It was noted that power reduction due to fly ash soiling was higher for horizontal PV module. Maximum power reductions of horizontal (32.9%) and optimal PV module (20.8%) were measured after 32 days from the measurement beginning.*

**Keywords:** PV modules, power reduction, heating season (HS), fly ash, soiling.

## INTRODUCTION

One of the most important goals in energy sector all over the world is production of safe, reliable, affordable, available, and clean energy [1].

Although the heat represents the largest end-use energy sector [2], the share of electricity in global final energy consumption continues to follow an increasing trend, reaching 20.4% in 2021 [3].

Due to its installation and utilization simplicity, photovoltaic (PV) technology is very convenient option for clean electricity production [4].

Fuel crisis and increase of electricity prices are additional motives for PV modules use because they provide self-production and self-consumption, and lower dependence on the electrical grid, where realizable [5].

After years of declines, PV modules cost increased in 2021 as a consequence of raw materials cost rise. Reasons for PV modules cost augmentation were also polysilicon (raw material for PV wafers production) shortage, shipping delays and rise in shipping container costs from China (dominant PV module manufacturer). Thus, significance of PV modules domestic production came into the focus in some countries [5].

Several research concluded that soiling is one of the most important parameters influencing PV modules efficiency and electricity production [1]. Generally, PV modules soiling represents deposition of particles (particulate matter (PM)) on PV modules surfaces. Worldwide, there are areas with consistent soiling throughout the year, but there are also areas with seasonal differences in PV modules soiling [6].

In Serbia one of the causes for PV modules seasonal soiling appears during heating season (HS), especially in the cases of roof mounted PV modules (close to the chimneys). Although PV modules in Serbia are mainly cleaned by precipitation and wind, they are not enough to achieve efficiency of PV modules given by manufacturers.

Rooftop PV installations and building integrated PV systems are especially affected by soiling during HS. For achieving as low as

possible PV modules soiling effects, design innovations of PV integrated surfaces and building products containing PV cells are also important [5].

Serbia has good natural conditions for solar energy use. Energy potential of solar radiation in Serbia is greater for 30% compared to Central Europe. For example, the lowest values of average annual energy from global solar radiation in the northwestern part of Serbia are equal to the highest ones in Germany [7]. Regardless, in 2021 Germany was the first country in Europe and fifth in the world according to cumulative PV capacity [5].

According to [8], Serbia has favorable mid-range PVOUT (photovoltaic power output) average value of 3.52 kWh/kWp. Only 6.5% of evaluated Serbian territory has PVOUT values below 3.4 kWh/kWp, 83.1% of the Serbian territory has PVOUT values between 3.4-3.6 kWh/kWp, and 10.4% has PVOUT values over 3.6 kWh/kWp [8, 9].

Beside possibilities for higher production, in the Republic of Serbia in 2017 only 0.04% of the total produced electricity was generated using solar energy (photovoltaics) [10]. In 2018 and 2019 the percentages were 0.03% and 0.05%, respectively [11, 12].

Due to good Serbian PV potential, it is important to provide best possible conditions for maximum use of PV energy in Serbia and investigate factors influencing PV modules production, such as PV modules soiling. The purpose of this paper is to investigate PV modules soiling at the beginning of the HS (the first month) in Niš, Serbia.

## HEATING IN SERBIA

Fossil fuels are still widely used for energy production in Serbia. In the year 2020, 71.2% of electricity and 99.1% of heat was produced using fossil fuels [13].

Mostly used heating source in Serbian households (Figure 1) is wood (37.592%), followed by electricity (21.872%), heat obtained in the district heating system (19.434%), natural gas (10.772%) and coal (10.330%). The primary energy sources for the production of heat in the district heating system in Serbia are natural gas, fuel oil and coal. Fossil fuels burning causes not only emission of harmful gases ($NO_x$, $SO_2$, $CO_2$), but also particles emission. These particles further initiate the binding to other substances in the atmosphere, influencing the formation of smog in the lower layers of the atmosphere. The number of particles emitted into the atmosphere depends, firstly, on the type of burnt fuel, and secondly on the way of use, which is determined by the combustion regime, the existence of filters, etc. [14].

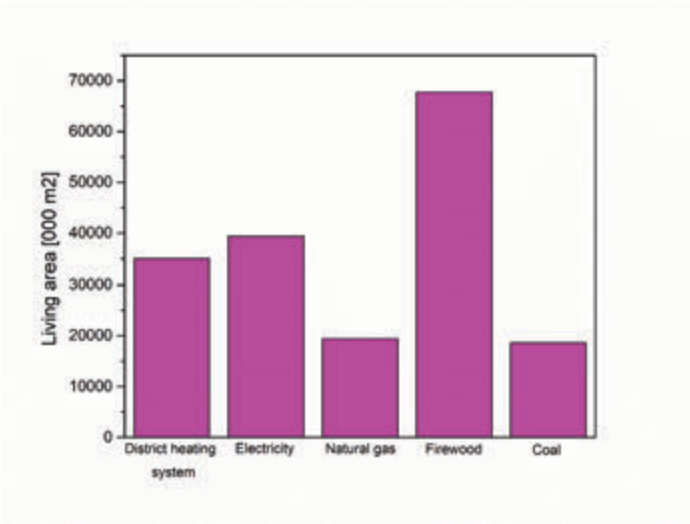



***Fig 1.*** *Households living area and heating sources in Serbia*

The dominant pollutants in Serbian air are PM10 and PM2.5 particles. In the year 2020, the air was over-polluted in 7 (including Niš) out of 8 agglomerations in Serbia [15].

## HEATING SEASON IN NIŠ

District heating has been very important in Niš and in whole Serbia, especially because it lasts around six months every year. Municipality of Niš introduced consumption-based billing for district heating. Before that, households haven't been paying for heating services based on the level of consumption, thus some of them started disconnecting from the district heating system. In that way, district heating system becomes less efficient because it usually supplies whole buildings and not just individual apartments [16].

During HS 2016/2017 boiler rooms in district heating system of Niš were using natural gas and fuel oil. HS 2016/2017 in Niš started on 08.10.2016 and lasted until 30.04.2017 (Table 1). It lasted a total of 205

days (more than half of the year), out of which 6 days there was no heating due to high morning and daily temperatures (22-25.03.2017 and 28-29.04.2017). The average daily temperature of the heating days was 5.61°C (Table 2) [17].

***Tab. 1.*** *A-average ambient temperature (°C), B-natural gas consumption ($m^3$), and C-fuel oil consumption (kg) for each month of the heating season 2016/2017 [17]*

| | Oct (from 08.10.) | Nov | Dec | Jan | Feb | Mar | Apr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 10.91 | 7.31 | -0.01 | -3.74 | 5.16 | 10.17 | 11.89 |
| B | 1731948 | 3572024 | 6320311 | 7734236 | 3945197 | 2233068 | 1756487 |
| C | 184186 | 284338 | 435685 | 578959 | 333903 | 223051 | 192164 |

***Tab. 2.*** *Average ambient temperature and fuel consumption for the whole heating season 2016/2017 [17]*

| | Whole heating season |
|---|---|
| Average ambient temperature (°C) | 5.61 |
| Natural gas consumption ($m^3$) | 27293271 |
| Fuel oil consumption (kg) | 2232286 |

In the cellar of the Faculty of Sciences and Mathematics building in Niš, there is one of the 14 boiler rooms of the city's heating plant. This boiler room uses fuel oil for heat production and in the HS of 2016/2017 it spent 267814 kg of fuel oil and produced 2496 MWh of heat energy [17].

## PV MODULES SOILING

In order to investigate the fly ash influence on PV modules soiling, the system of identical PV modules (Isofoton ISF-60/12, each PV module power of 60 Wp) facing south was created on the roof of the Faculty of Sciences and Mathematics in Niš. Two PV modules were placed horizontally side by side, and two more at an optimal angle (32° for Niš area) also side by side. PV modules system was placed at a 12 m distance from a chimney of a boiler room located in the cellar of the Faculty of Sciences and Mathematics building. Due to fuel oil combustion during HS, fly ash was emitted through the chimney into the atmosphere and caused PV modules soiling [18].

In this paper, the results of investigation of PV modules soiling at the beginning of the HS 2016/2017, when the average daily temperature was not below 0°C, are given. Beginning of the HS with average daily temperatures over 0°C was chosen because in that period heating intensity was not on the highest level. The measurements started on 24.10.2016 and the results for the period up to 25.11.2016 (one month, more precisely 32 days) are shown. At the beginning of the measurement, on 24.10.2016, all PV modules were cleaned. On each measurement day one horizontal and one optimally inclined (optimal) PV module were cleaned (referent PV modules), and the other two PV modules (the other horizontal and the other optimally inclined) contained fly ash accumulated from the beginning of the measurement. Measurements were performed at the same time of the day and only on clear days with no precipitation.

Figure 2 shows that at the beginning of the measurement both horizontal PV modules had power of 31.7 W (both were clean). At the end of the measurement period (32nd measurement day), clean horizontal module had power of 23.4 W and fly ash soiled PV module had power of 15.7 W. It means that after 32 measurement days power of horizontal PV module reduced for 32.9% due to fly ash soiling.

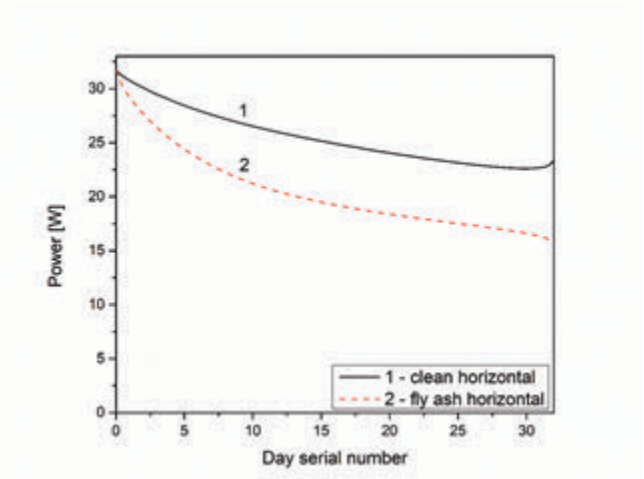



***Fig. 2.*** *Power comparison for horizontal clean PV module (1) and horizontal fly ash soiled PV module (2) depending on the day serial number*

At the beginning of the measurement, both optimally inclined PV modules had power of 45.4 W (both were clean). At the end of the measurement period (32nd measurement day), clean optimally inclined PV module had power of 42.4 W and fly ash soiled PV module had power of 33.6 W (Figure 3). It means that after

32 measurement days power of optimally inclined PV module decreased for 20.8% due to fly ash soiling.

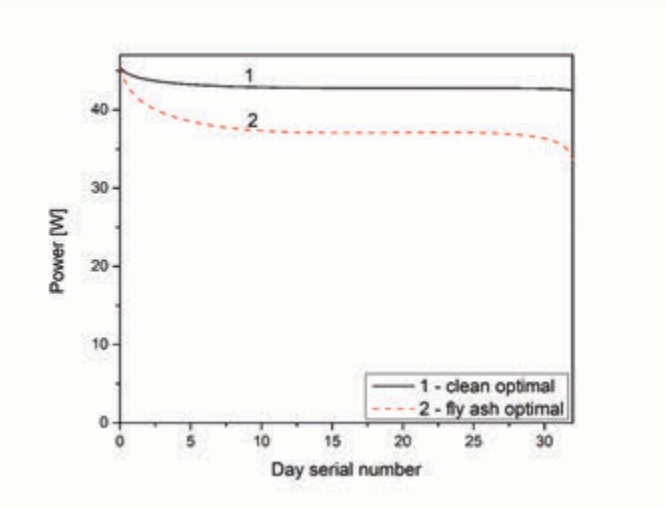



***Fig. 3.*** *Power comparison for optimal clean PV module (1) and optimal fly ash soiled PV module (2) depending on the day serial number*

Figure 4 shows that power reduction due to fly ash soiling was always higher for horizontal PV module, as expected. Maximum power reductions of horizontal PV module (32.9%) and optimally inclined PV module (20.8%) were measured at the end of the period, i.e., after 32 days from the measurement beginning. It was experimentally confirmed that power reduction due to fly ash soiling decreases with the increase in PV modules tilt angle.

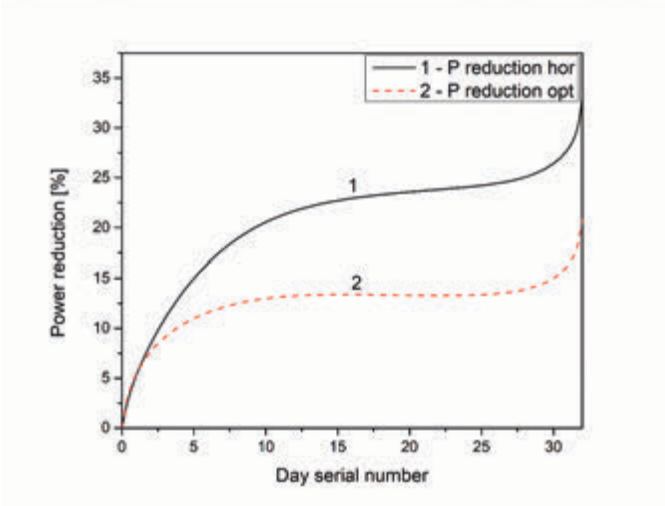



***Fig. 4.*** *Power reduction of the horizontal and optimal PV modules due to fly ash soiling*

It can be also concluded that although measurements were performed at the beginning of the HS, power reduction of both horizontal and optimally inclined PV modules was not negligible.

Power reduction of horizontally and optimally inclined PV modules due to fly ash soiling is affected not only by heating frequency and intensity, but also by meteorological conditions (precipitation, wind direction, wind speed, relative humidity, ambient temperature, etc.) of the PV modules location. Correlation of these parameters affecting PV modules soiling can be subject of future experiments.

## CONCLUSION

Serbia has favorable conditions for solar energy use. Electricity production in PV systems can be expanded in several ways, and one of them is increased installation of PV modules on the roofs.

In Serbia heat is produced almost absolutely using only fossil fuels. Like a consequence, during HS, PV systems installed near chimneys (emission sources) are affected by additional soiling caused by fossil fuels combustion. Although PV modules in Serbia are naturally cleaned by precipitation and wind, in cases of fly ash soiling they are not sufficient for reaching estimated PV modules efficiency.

This paper presents experimental results of PV modules power reduction due to fly ash soiling from a chimney of a boiler room located at the Faculty of Sciences and Mathematics in Niš, during HS 2016/2017.

It was experimentally confirmed that power reduction due to fly ash soiling was always higher for horizontal PV module. Maximum power reductions were measured after 32 days from the measurement beginning, and for horizontal PV module maximum power reduction was 32.9%, and for optimally inclined PV module 20.8%. It can be concluded that power reduction of fly ash soiled PV modules decreases with the increase in PV modules tilt angle.

Also, it can be concluded that power reduction of horizontal and optimally inclined PV modules was considerable although measurements were performed at the beginning of the HS.

In parts of the world where fossil fuels are largely used, like in Serbia, renewable energy

sources should be used more frequently in order to reduce particles emission and to provide adequate conditions for maximum PV modules electricity production at the same time.

## ACKNOWLEDGEMENT

This paper was done with the financial support of the Faculty of Sciences and Mathematics, University of Niš, Republic of Serbia, and of the Agreement 451-03-68/2022-14/200124 on the realization and financing of scientific research work of the Faculty of Sciences and Mathematics, University of Niš in 2022 by the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia.

## REFERENCE

[1] Zitouni H, Azouzoute A, Hajjaj C, El Ydrissi M, Regragui M, Polo J, Oufadel A, Bouaichi A, Ghennioui A. Experimental investigation and modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables: A case study of semi-arid climate. Solar Energy Materials and Solar Cells 2021;221:110874.

[2] Keiner D, Barbosa L. D.S.N.S, Bogdanov D, Aghahosseini A, Gulagi A, Oyewo S, Child M, Khalili S, Breyer C. Global-local heat demand development for the energy transition time frame up to 2050. Energies 2021;14:3814.

[3] https://yearbook.enerdata.net/electricity/share-electricity-final-consumption.html, Accessed: 2022-09-25.

[4] Micheli L, Talavera D. L, Tina G. M, Almonacid F, Fernández E. F. Techno-economic potential and perspectives of floating photovoltaics in Europe. Solar Energy 2022;243:203-214.

[5] https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf, Accessed: 2022-09-25.

[6] Valerino M, Ratnaparkhi A, Ghoroi C, Bergin M. Seasonal photovoltaic soiling: Analysis of size and composition of deposited particulate matter. Solar Energy 2021;227:44-55.

[7] Doljak D, Stanojević G. Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia. Energy 2017;127:291-300.

[8] https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study, Accessed: 2022-09-25.

[9] http://documents1.worldbank.org/curated/en/466331592817725242/pdf/Global-Photovoltaic-Power-Potential-by-Country.pdf, Accessed: 2022-09-25.

[10] http://www.ems.rs/media/uploads/2018/Garancije%20porekla/Godisnji_izvestaj_o_nacionalnom_rezidualnom_miksu_2017.pdf, Accessed: 2022-09-25.

[11] http://www.ems.rs/media/uploads/2018/Garancije%20porekla/Godisnji_izve%C5%A1taj_o_nacionalnom_%202018.pdf, Accessed: 2022-09-25.

[12] http://www.ems.rs/media/uploads/2018/Garancije%20porekla/Godisnji_izvestaj_o_nacionalnom_rezidualnom_miksu_-_2019.pdf, Accessed: 2022-09-25.

[13] https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=SERBIA&energy=Electricity&year=2020, Accessed: 2022-09-25.

[14] https://www.toplanesrbije.org.rs/uploads/ck_editor/files/izvestaj%20o%20radu%20SDG%20u%20RS%20za%202018%20pdf.pdf, Accessed: 2022-09-25.

[15] SEPA. Republic of Serbia, Ministry of Environmental Protection, Environmental Protection Agency, Air quality in the Republic of Serbia in 2020, Belgrade. 2021, http://www.sepa.gov.rs/download/izv/Vazduh_2020.pdf, Accessed: 2022-09-25.

[16] https://unece.org/sites/default/files/2022-09/REN21_UNECE2022_FullReport_red.pdf, Accessed: 2022-09-25.

[17] http://nitoplana.rs/fajlovi/documents/Planovi%20i%20finansijski%20izvestaji/izvestaj__gs_16-17.pdf. Accessed: 2022-09-25.

[18] Radonjić I, Pavlović T, Mirjanić D, Pantić L. Investigation of fly ash soiling effects on solar modules performances. Solar Energy 2021;220:144-151.

# A REVIEW OF IoT BASED PHOTOVOLTAIC MONITORING SYSTEM APPLICATIONS

**Stefan Đorđević[1], Marko Krstić[1], Lana Pantić[1], Ivana Radonjić[1], Tomislav Pavlović[1]**

[1] *University of Niš, Faculty of Sciences and Mathematics, Department of Physics, Višegradska 33, 18000 Niš, Serbia*

**Abstract**

*We are becoming more and more aware of the lack of electricity problem. In order to make the energy crisis bearable, it is necessary to invest in alternative energy sources and use energy more effectively. Solar energy can generate electricity directly from the sun's energy using PV panels. PV systems are used in households, industries, agricultural facilities, and others. In order to significantly improve the reliability, energy efficiency, safety, and quality of the electricity supply, it is necessary to build a smart grid that will include the activities of all users-producers, consumers, and those who are both. The Internet of Things (IoT) offers a new solution to overcome these problems. IoT is a network of physical objects embedded in electronics, software, and sensors that enables remote sensing and management of things through the existing network. IoT enables quick and easy interaction with everyday objects such as personal computers, smartphones, sensors, and microcontrollers. This paper gives detailed description of four very different innovative applications of PV system and IoT coupling used to increase energy efficiency of widely used devices.*

**Keywords:** Photovoltaic, IoT, Monitoring system application

## INTRODUCTION

Millions of small photovoltaic systems are operational, providing energy, for example, for lighting and telecommunications. Solar energy systems can be integrated very well in the built environment and are contributing substantially to the impressive growth of the utilisation of solar energy that we see today. In order to significantly improve the reliability, energy efficiency, security, and quality of the electricity supply, it is necessary to build a smart electricity grid (smart grid) that will include the activities of all user-producers, consumers, and those who are both. A smart grid applies information technologies, tools, and techniques that make the network more efficient and flexible.

The conventional method of system monitoring mainly involves manual testing and remote monitoring. These methods have some disadvantages, such as time consuming and problems with complex wiring. The Internet of Things (IoT) offers a new solution to overcome these problems. IoT is a network of physical objects embedded in electronics, software and sensors that enables remote observation and management of objects through the existing network. [1,2] IoT enables fast and easy interaction with everyday objects such as personal computers, smartphones, sensors, microcontrollers, transceivers, etc. [3,4]. Thus, a communication network with IoT can enable the monitoring and control of PV systems located in remote locations.

The term IoT refers to a system of interconnected devices used in everyday life that aims to automate a certain domain (from home devices, through manufacturing to military applications). These devices are equipped with different types of sensors, cameras, and positioning modules that generate different types of data. They can also be equipped with actuators to control the environment. [4]

It can be noted that IoT has great potential for application in smart grids. Smart grids require measuring and actuating

devices to be distributed throughout residential and industrial areas to collect the necessary data and provide adequate responses to emerging changes. IoT systems are perfectly suited for that purpose, given that internet connectivity is widely available today. [1,4]

The paper gives four detailed descriptions of IoT-based photovoltaic system applications used to increase with intent of energy efficiency increase of used devices.

## IOT BASED PHOTOVOLTAIC MONITORING SYSTEM APPLICATION

The authors in [5] designed a system for measuring the voltage, current, and temperature of a solar PV panel, as well as the intensity of sunlight received by the panel. All data was captured by an Arduino ATMega2560 microcontroller and uploaded to the internet using a NodeMCU ESP8266 wireless transceiver.

The authors used Thinkpeak to store all the data from the sensors, so the user can monitor the data remotely as long as an internet connection is available. Monitoring was done through the Thinkspeak website and also through a smartphone app designed using MIT App Inventor. The system diagram is shown in Figure 1.

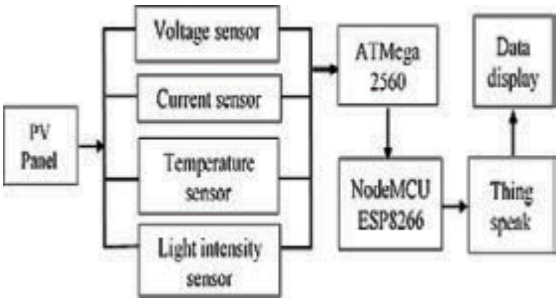



***Figure 1.*** *Diagram of the PV panel monitoring system [5]*

A current sensor based on the Hall effect was used to measure the current in the circuit. The Hall effect is the creation of a potential difference across a current conductor in a vertical magnetic field. Current sensor had an overall output error of ± 1.5% with an optimized accuracy range of ± 30 A. The board temperature was measured using an LM35 temperature sensor. Temperature sensor gives a very accurate reading in the range of 0-100 °C. Light intensity sensor GI-49 MAKS44009 was used to measure the intensity of sunlight to which the panel is exposed. To ensure the accuracy of data collection, authors firstly calibrated all sensors to an appropriate standard.

The performance of the PV system was measured on three consecutive days for eight hours a day (8 a.m. to 4 p.m.). The PV system was placed on top of a building that is exposed to direct sunlight without much shadowing from surrounding objects. The system was placed at a fixed angle of $30^0$ facing the South. Tracking of the movement of the Sun was not used. Arduino Mega based on ATMega2560 acted as the microcontroller that collects and processes all the data from the sensors. The data was then sent via WiFi module NodeMCU ESP8266 via a serial communication protocol.

Figure 2. shows the hardware that authors designed for a solar photovoltaic system consisting of all the above mentioned components. [5]

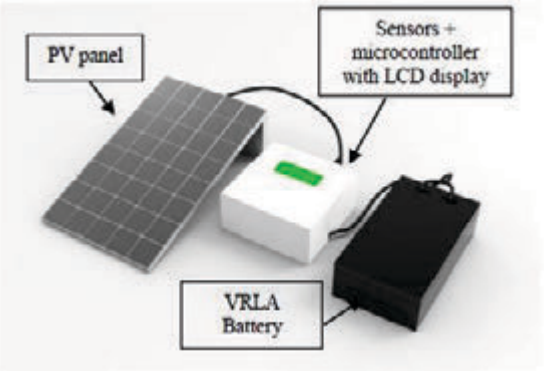



***Figure 2.*** *The hardware of the solar photovoltaic system [5]*

## SMART SOLAR LED STREET LIGHT

Authors in paper [6] propose an energy-efficient smart street lighting system using an Arduino-based microcontroller. The main objective of their work was to design energy-efficient smart street lighting for energy conservation in existing street lighting in rural areas, urban areas as well as in smart cities.

Smart Solar LED Street Light system consisted of LED bulbs, Solar panels, a light sensor (Light Dependent Resistor-LDR), a motion sensor (Passive Infrared Sensor-PIR), Battery, a Charge controller, an LED driver,

MOSFET (Metal oxide semiconductor field effect transistor) and Arduino microcontroller.

Figure 3. shows a diagram of the Smart Solar LED Street Light system designed by authors in [6].

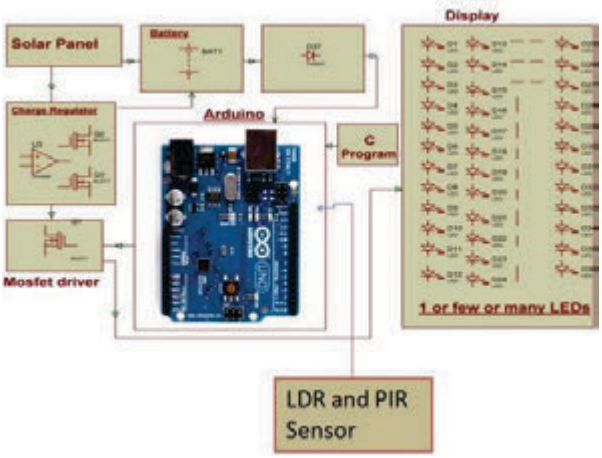



***Figure 3.*** *Diagram of the Smart Solar LED Street Light system [6]*

Authors programmed system to automatically turn off during daylight hours and only operate at night and during heavy rain or bad weather.

The battery for powering the LED bulb was charged during the day by the PV solar panel. With the help of LDR, at dusk, the street light automatically turned on at 30% intensity and the battery starts to discharge. For each movement of a vehicle or a person, the PIR motion sensor sent a command to the microcontroller to increase the light intensity from 30% to 100% for a preset period of time. After a certain time and if no motion was detected the light gradually decreases to 30%. This ensured optimal lighting as well as energy savings. In the morning, LDR sent a command to Arduino and the street light turned off. The power supply of the street lighting was connected to the battery, and if the battery was not sufficiently charged due to cloudy weather, the street lighting automatically switched to power from the electrical distribution network.

Arduino the microcontroller received the command signal from the LDR light sensor, motion sensor, and charge controller and controlled the street lighting according to the program loaded into it. Authors gave following working diagram of system (Figure 4).

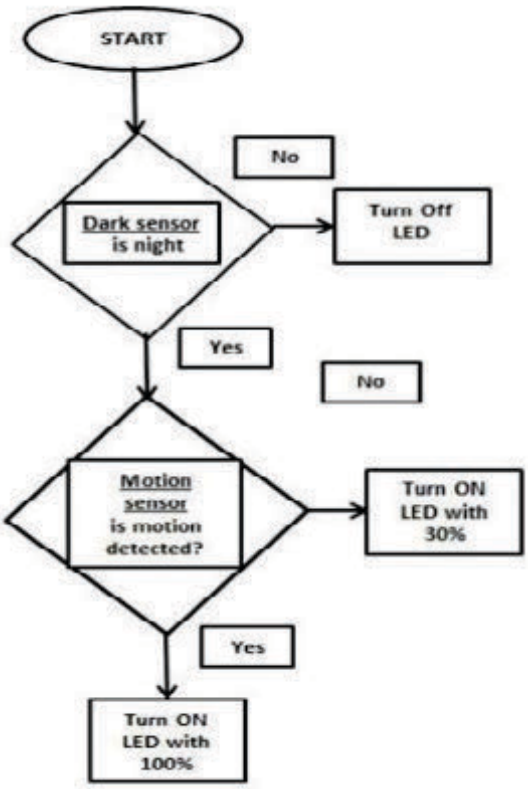



***Figure 4.*** *Operation diagram of the Smart Solar LED Street Light system [6]*

The system can be integrated as an IoT application using a low-cost ESP Wi-Fi module, so the brightness of the LED lighting can be set to any required value. Various street lighting parameters can be monitored online, such as battery charge percentage, power consumption, on/off status, etc. In the coming years, all cities will have access to the Internet, so IoT control of street lighting will be able to be used. [6]

## SMART SHOWER

Authors in [7] designed a smart shower that is an example of an autonomous photovoltaic system. Using a microcomputer and microcontroller, the shower monitors the operation of all its parts. It has sensors, relays, and other electronic components that enable it to distribute energy properly. It uses only solar energy and no additional energy source is needed. The power of the solar system was 60 W, which was enough for the operation of all components of the shower. Figure 5. shows a smart shower presented in [7].



***Figure 5.*** *Smart shower[7]*

Each shower was connected to a base station that enabled remote control. In this way, constant monitoring of all components and timely updating of the system and elimination of potential malfunctions were carried out.

The shower included the ability to connect to the Internet and had ambient RGB LED lighting for users to access the shower at night, which was connected to the motion sensors. It had a screen that showed weather forecast data, the intensity of UV radiation, and the temperature of the sea. The scheme of the smart shower given [7] is shown in Figure 6.

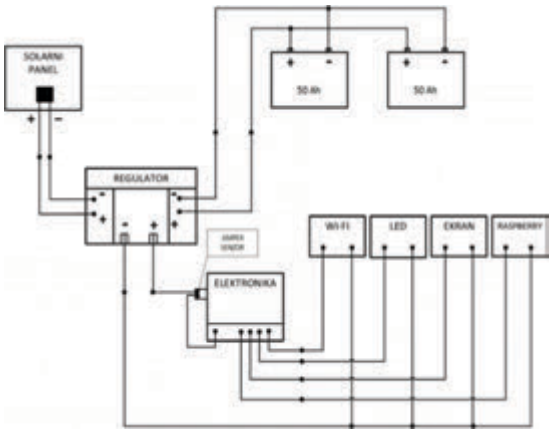



***Figure 6.*** *Scheme of a smart shower [7]*

The smart shower consisted of PV modules, rechargeable batteries, charge controllers, and consumers.

Photovoltaic modules were an integral part of the system. The shower had rechargeable batteries to store energy in sunny weather (called the charging period). The discharge period occurred when the battery was the source of energy because the PV module did not produced enough energy for various reasons (time, age, etc.). An electrolytic lead battery was used in the shower.

A charge controller or voltage regulator was used for regulating the battery charge by stabilizing the AC voltage coming from the PV module. In this way, authors stabilized the voltage and the battery was maintained. The controller also ensured that the battery does not discharge too deeply.

The smart shower used all the necessary electrical energy for its work (parts such as sensors, info screens) from the solar radiation, while the ability to connect to the Internet made this device smart [7].

## SOLAR POWERED SMART IRRIGATION SYSTEM

Authors in [8] used solar energy from solar panels to power the pumps that filled the tank with water. The water from the tank was used to water the crops and the tank had a valve that controlled the flow of water coming out of it. The valve was connected to a moisture sensor that detects the amount of moisture present in the soil, and depending on the moisture level, the valve opens and closes. Figure 7. shows the layout of the system that authors designed.

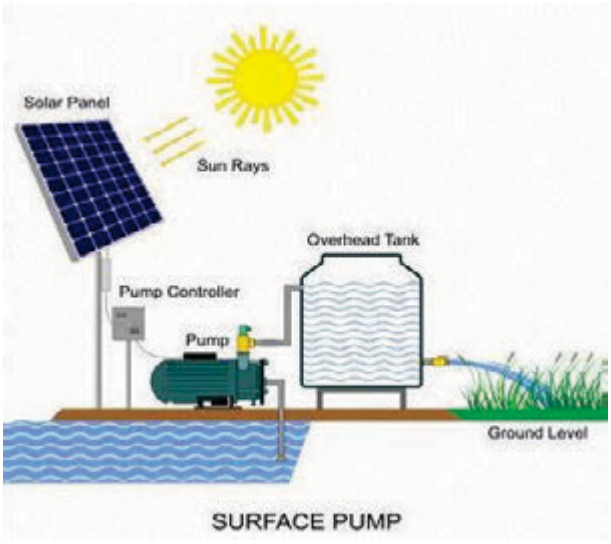



***Figure 7.*** *Scheme of the irrigation system[8]*

The irrigation system presented in [8] consisted of two modules:

1. module for solar power supply of the pump,
2. module for automatic irrigation.

In the solar pump module, the solar panel of the required specifications was mounted near the pump. The batteries were charged by the solar modules, after which the electricity from them

passed through the inverter and powered the pump.

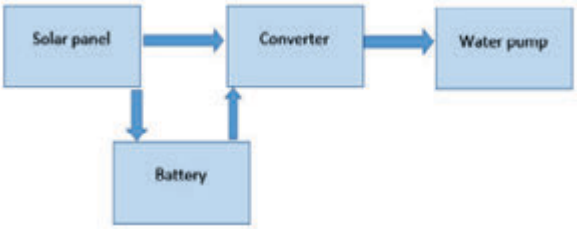



***Figure 8.*** *Solar pumping module diagram [8]*

The water was then pumped into a temporary water storage tank before releasing the water into the field, (Figure 8.). In the automatic irrigation module, the tank's water outlet valve was electronically controlled by a system connected to a soil moisture sensor. The sensor converted the soil moisture content into an equivalent voltage.

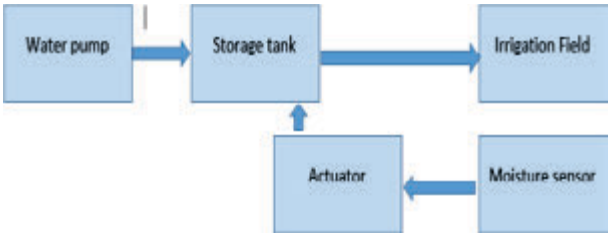



***Figure 9.*** *Diagram of the automatic irrigation module[8]*

The sensor had a module for detecting the reference level of humidity that was pre-selected. The humidity sensor used in [8] is shown in Figure 10.

***Figure 10.*** *Moisture sensor VG400[8]*

By using an automatic irrigation system authors made possible watering the crops without flooding. Another advantage of presented irrigation system was that the irrigation was controlled by one person [8].

## CONCLUSION

Systems for photovoltaic conversion of solar radiation are used for the operation of audiovisual and cooling devices, the operation of signaling devices on roads, tunnels, airports, and lighthouses, for powering buildings, ships, airplanes, space stations, as well as in households, agriculture, the auto industry, etc. Applications such as lighting, telecommunications as well as providing electricity to entire settlements, especially in remote areas, have proven to be competitive and profitable compared to already existing technologies.

This paper gives an overview of four examples of innovative application of power smart systems (solar energy, smart sensors and microcontrollers as the main elements), which enabled energy efficiency increase and electrical energy saving. All four examples considered PV systems that can be integrated as an IoT application that enables real-time monitoring of system parameters.

## ACKNOWLEDGEMENT

This paper was done with the financial support of the Faculty of Sciences and Mathematics, University of Niš, Republic of Serbia, and of the Agreement 451-03-68/2022-14/200124 on the realization and financing of scientific research work of the Faculty of Sciences and Mathematics, University of Niš in 2022 by the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia.

## REFERENCE

[1] Reka, S. S., &Dragicevic, T. (2018). Future effectual role of energy delivery: A comprehensive review of Internet of Things and smart grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91, 90-108.

[2] M. Bardwell, J. Wong, S. Zhang and P. Musilek, "Design Considerations for IoT-Based PV Charge Controllers," 2018 IEEE World Congress on Services (SERVICES), 2018, pp.



59-60, doi: 10.1109/SERVICES.2018.00043.

[3] Gupta, J. et.al., (2020). An IoT-Based Controller Realization for PV System Monitoring and Control. In: Haldorai, A., Ramu, A., Khan, S. (eds) Business Intelligence for Enterprise Internet of Things. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44407-5_13

[4] P. Luo, D. Peng, Y. Wang and X. Zheng, "Review of Solar Energy Harvesting for IoT Applications," 2018 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), 2018, pp. 512-515, doi: 10.1109/APCCAS.2018.8605651.

[5] Priharti, W., Rosmawati, A. F. K., & Wibawa, I. P. D. (2019, November). IoT based photovoltaic monitoring system application. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1367, No. 1, p. 012069). IOP Publishin

[6] Bhairi, M. N., Kangle, S. S., Edake, M. S., Madgundi, B. S., & Bhosale, V. B. (2017, May). Design and implementation of smart solar LED street light. In 2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI) (pp. 509-512). IEEE

[7] Crnković, M. (2018). Smart shower (Doctoral dissertation, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek. Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek. Department of Power Engineering. Electromagnetic Compatibility Laboratory).

[8] Harishankar, S., Kumar, R. S., Sudharsan, K. P., Vignesh, U., & Viveknath, T. (2014). Solar powered smart irrigation system. Advance in electronic and electric engineering, 4(4), 341-346.

# ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МАКСИМАЛНАТА МОЩНОСТ НА ЦЕНТРАЛИ ОТ ВЪЗОБНОВЛЯЕМИ ЕНЕРГОИЗТОЧНИЦИ В МРЕЖИ 35 КВ

**Красимир Маринов Иванов [1], Петър Колев Петров [1], Георги Цонев Велев[1], Цвятко Колев Върбов[1]**

*[1]ТУ Габрово*

# DETERMINATION OF THE MAXIMUM POWER OF POWER PLANTS FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES IN 35 KV NETWORKS

**Krasimir Marinov Ivanov [1], Peter Kolev Petrov [1], Georgi Tsonev Velev[1]**

*[1] TU Gabrovo*

**Abstract**

*This report examines 35kV medium voltage networks with connected distributed generation systems. The maximum power of the plants from renewable energy sources, which can be connected to a 35kV medium voltage power line, is determined depending on the nominal power of the power transformers, their number, the section of the wires of the overhead power line and the regulatory documents in our country..*

**Keywords:** *plants from renewable energy sources, medium voltage overhead network.*

## УВОД

У нас към края на 2021 година има инсталирана мощност от фотоволтаични централи в размер на 1246 МВт, а от вятърни централи 705 МВт. Възобновяемите енергийни източници (ВЕИ) продължават да покачват своя дял в произведената електрическа енергия изнесена към преносната и разпределителната мрежа. Общият дял на ВЕИ в преносната мрежа за периода 1 януари - 2 октомври 2022 г. отбелязва съществено увеличение с 26,29% като постига стойности от 1 225 853 MWh. По-значителен принос за това увеличение имат фотоволтаичните централи (+52,36%), както и вятърните (+14,56 %). Данните за производството на електроенергия от биомаса отбелязват скромен ръст за периода от 0,14%. Участието на ВЕИ в разпределителната мрежа спрямо предходната 2021 г. се увеличава с 13% и достига до 1 758 373 MWh, като този дял е на стойност 1 527 233 MWh. И тук увеличението се дължи на по-високия дял на фотоволтаичните (+18,56%) и вятърни (+17,54%) централи. В същото време има спад при централите на биомаса (-19,61%).

Повишаването на цената на електрическата енергия на либеризирания пазар води до развитие на този сектор и в нашата страна и до повишаване на заетостта [1]. Експлоатационните разходи, правят вятъра особено привлекателен за инвеститорите като енергиен източник. Истина е, че вятърната енергия не може да бъде източник на произвеждана по график, съобразно потребностите на електроенергийната система, електроенергия. Но в това направление се работи като се правят центрове за прогнозиране скоростта и посоката на вятъра, а оттам и на вероятностното количество произведена електроенергия. В България също съществува потенциал за изграждане ветрови централи в крайбрежната ни ивица. Бъдещото развитие в зони при по-ниски скорости на вятъра зависи от развиването на нови технически решения. Работата на ветрогенератора зависи от скоростта и турболентността на вятъра, височината на кулата

и плътността на въздуха, затова е важно да се познава потенциала в избрания за инсталиране регион на страната и условията, при които е получен. По-голямата част от ветрогенераторите и фотоволтаичните централи се изграждат в райони с разширени електроразпределни или преносни електрически мрежи и по този начин се свързват към електроенергийната система. Вятърните паркове и фотоволтаичните централи с мощност над 5MWp генерират по-големи количества електрическа енергия и затова се свързват към мрежи средно и високо напрежение. В някои паркове с мощности над 20 MWp предпочитително е помощните електрически мрежи да бъдат на напрежение 35 кВ, т.к. мощността която може да се предаде по тях е значително по-голяма.

## ОСНОВНО ИЗЛОЖЕНИЕ

Фотоволтаичните и ветрогенераторните са електрически генериращи системи, които се различават от традиционните директно свързани към мрежата синхронни генератори, използвани обикновено в конвенционалните електроцентрали. Поради своите различни характеристики тези генератори взаимодействат по различен начин с ЕЕС в сравнение със синхронните генератори. Това означава, че те могат да доведат до смущение като например промяна в напрежението на клемите и честотата или в първичния задвижващ източник, по различен начин и че тяхната възможност да участват в контрола на напрежението в мрежата може да бъде малка. Освен това някои аспекти на взаимодействието на ветрогенераторите с мрежата са специфични за съответния вид генератор, който се използва, особено при ветрогенератори със или без силови електронни преобразователи (конвертори), т.е. с постоянна и с променлива скорост.

Докато електроенергията произведена от вятърната и слънчева енергия в общото производство е малък, режимът и поведението на ЕЕС продължава да се обуславя от синхронните турбо- и хидрогенератори, които все още генерират най-голямата част от консумираната електрическа енергия. Поради това поведението на такава система не се различава значително от електроенергийна система без генератори, задвижвани от ВЕИ. Въпреки това, когато голям брой ветрогенератори и фотоволтаични централи са присъединени към системата и те заменят значителна част от мощността, произвеждана от стандартните синхронни генератори, те започват да засягат различни аспекти на поведението на електроенергийната система. В момента балансът между генерирането на мощност и консумацията основно се поддържа чрез адаптиране на генерациите към товара. Причината за това е, че включването на товар в балансирането на системата е трудно, тъй като консумацията на електроенергия не е силно изменяща се и следователно товарът е по-скоро неизменящ се. Докато енергията, произвеждана в електроцентралите може да бъде контролирана, това не е главен проблем, макар и затруднявайки диспечирането на генераторните мощности, т.е. определяне кои електроцентрали трябва да работят за покриване на товарите най-ефективно и икономично, като се вземат предвид цената на горивата и техническите характеристики на електроцентралите. Въпреки това значителното участие на генератори, чиято изходна мощност не може да се регулира, представлява основен проблем за днешните процедури за балансиране на системата, т.к. като такива генератори не могат да допринесат за поддържането на системния баланс.

Генератори, чиято изходна мощност не се регулира, могат разбира се да покриват част от консумацията на електроенергия, без да причиняват проблеми за баланса на системата. Нивото, до което генератори, чиято изходяща мощност не се регулира, могат да допринесат за покриването на товара без допълнителни мерки, както и естествено степента, при която трябва да бъдат предприети допълнителни мерки, за да се позволи по-нататъшно увеличаване на приноса на тези генератори зависи от такива фактори като: товаровият график на системата; процента на съотношение между товара и наличността на първичен енергиен източник, използван от не регулируемите генератори; характеристиките на останалите регулируеми централи и топологията на мрежата. Следователно не е възможно да се

направи общо твърдение по отношение на количеството на не регулируемата генерирана мощност, която може да бъде присъединена към електроенергийната система, без да се вземат допълнителни мерки, нито по отношение на точните мерки, които трябва да бъдат взети с цел допълнително увеличаване на нивото им на прилагане. Все пак е ясно, че увеличаването на броя на не регулируемите генератори, като например ветрогенераторите и фотоволтаичните централи, в крайна сметка води до проблеми при поддържането на системния баланс.

Експлоатационните изисквания за присъединяването на вятърните електрически централи (ВяЕЦ) към електрическата мрежа средно напрежение в България са регламентирани. Тези изисквания биха могли да се използват и за останалите централи от ВЕИ. Ето някой от тях:

• Инсталираната сумарна мощност от вятърната електрическа централа (ВяЕЦ) в точката на присъединяване към ЕЕС, не трябва да надвишава 5% от мощността на к.с. в този възел;

• Не се допуска работа на ВяЕЦ в островен режим (island operation);

• Допустимата несиметрия на напреженията, предизвикана от ВяЕЦ в точката на присъединяване към преносната мрежа е 2.0% и 3.0% към разпределителната мрежа;

• Допустимите отклонения от номиналната честота в точката на присъединяване на ВяЕЦ при нормална работа са (49.5Hz…50.2Hz);

• Допустимото внасяне на хармоници от ВяЕЦ в точката на присъединяване към електрическата мрежа (Total Harmonic Distortion) е THD ≤ 8% (за мрежи СрН);

• Допустимите трептения (фликер), които може да внесе ВяЕЦ в точката на присъединяване към преносната мрежа (short-term flicker indicator; long-term flicker indicator) са Pst = 0.8; Pit = 0.6 (за мрежи ВН) и Pst = 0.9; Pit = 0.7 (за мрежи СрН);

• Диапазонът на фактора на мощността на един ветрогенератор от ВяЕЦ, трябва да е най-малко 0.98 (CAP)…1…0.96 (IND);

• ВяЕЦ трябва да е оборудвана с честотна защита, която да я изключва от мрежата при отклонение на честотата извън диапазона 47.5Hz … 50.3Hz, с времезадръжка 0.2s;

• Не се допуска автоматична ресинхронизация на ВяЕЦ към преносната мрежа, след нейното автоматично изключване от честотна защита. Такава синхронизация може да се осъществи само след разрешение на оперативния персонал на ЕСО (ЕРД);

• Качеството на произвежданата от ВяЕЦ електрическа енергия, трябва да отговаря на БДС IEC 61000-2-2 и БДС EN 50160. Когато произведената електрическа енергия не отговаря на критериите за качество, ЕСО или ЕРД имат право да прекратят достъпа на съответния производител до електрическата мрежа;

ВяЕЦ трябва да допускат краткотрайни понижени и повишени стойности на напрежението, без да се нарушава синхронната им работа с електрическата мрежа, както следва: понижение на напрежението под 75%Un за време до 0.08s и повишение на напрежението над 120%Un за време до 0.08s.

Стойността на допустимата сумарна мощност от всички централи от ВЕИ в ЕЕС на България се предлага ежегодно от ЕСО и се одобрява от КЕВР.

Някой от изискванията за присъединяване противоречат на европейският стандарт EN50160, в които се казва че изискванията към производителите на електрическа енергия в някой случай са по-утежнени. В Германия предписанията за присъединяване на източници на генерираща мощност от 2008г. максималната мощност която може да се присъедини към мрежите се оценява и от увеличението на напрежението в мястото на включването му съгласно следната формула:

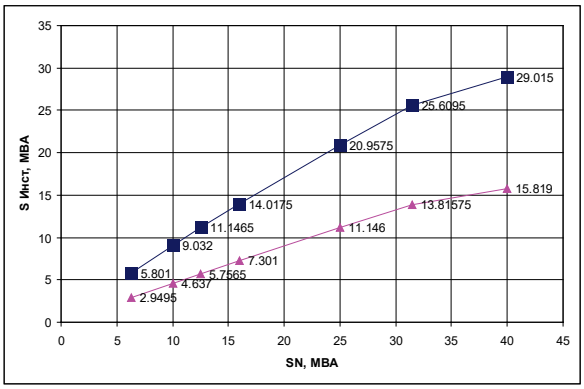
$$\Delta U_{aV} = \frac{S_{Wmax}}{S_k}.\cos(\psi_k + \varphi), \qquad (1)$$

където: $S_{kV}$ – мощност на късо съединение в точката на свързване; $\psi_k$ – ъгъл на импеданса на късо съединение в точката на свързване; $S_{Wmax}$ – максимална мощност на генерираща източник в точката на свързване; φ– ъгъл на дефазиране между напрежението и тока в точката свързване.

Това увеличение на напрежението не би трябва да надвишава 2%. В българските предписания това максимално увеличение на напрежението може да достигне 5%. Съ-

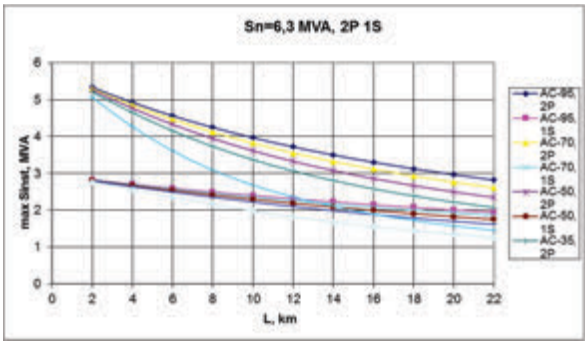
гласно немските предписания [3] фактора на мощността може да 0.95 (CAP)…1…0.95 (IND). По този начин би могло да се постигне допълнително увеличение на генерираща мощност и да тя да участва в регулирането на напрежението. Немските предписания допускат регулиране на активната мощност на вятърни и фотоволтаични централи и в определени случай участие в регулиране на честотата на мрежа, при аварии в мрежата не изискват задължително изключване.

Най дългите мрежи средно напрежение у нас 35kV като правило се захранват от понизителни подстанции 110kV/35kV. Усреднената свръхпреходна мощност на късо съединение на страната 110kV е в рамките на 3500MVA. Най-често броя на използваните трансформатори в тези подстанции е два. Номиналната мощност на тези трансформатори може да бъде 6.3, 10, 12.5, 16, 25, 31.5 и 40 MVA. Когато работят в паралел тези трансформатори на страна средно напрежение се получават по-големи мощности на късо съединение и те са както следва 116.02, 180.65, 222.93, 280.35, 419.15, 512.195, 580.03 MVA. При разделна работа на трансформаторите свръхпреходните мощности на късо съединение се получават както следват 58.99, 115.13, 146.02, 222.92, 276.315, 316.38 MVA. Разработен е модел на електрическа мрежа с присъединени централа от ВЕИ (възобновляем енерго източник) към края на въздушен електропровод средно напрежение. Централите от ВЕИ (фотоволтаични и вятърни) се моделират по мощност и се състоят от инвертор със съответната мощност, присъединен към електропровода. Определената максимална мощност на централите от ВЕИ, които могат да бъдат присъединени към електрическата мрежа е при условие, че се спазват изискванията за качество на напрежението на ДКЕВР, тоест отклонението е в рамките на +/-10% и условието за не надвишаване на съотношението на генерираща мощност към мощността на к.с. от 0,05. Използвайки предписанията на ДКЕВР получените максимални мощности на вятърни електроцентрали, включени към шини 35 kV, в зависимост от номиналната мощност и броя (1 или 2) на силовите трансформатори са представени на графиката фиг. 1. На фиг. 1 стойностите на максимално възможната мощност при паралелна работа на трансформаторите са обозначени с квадрат, а тези при разделна работа с триъгълник.




***Фиг. 1**. Максимално възможна мощност на шините в подстанцията.*

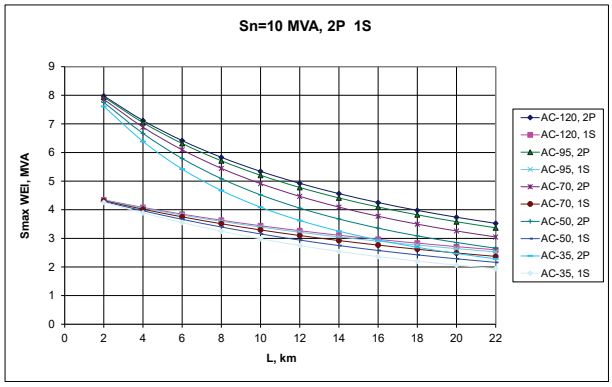
На фиг. 1 стойностите на максимално възможната мощност при паралелна работа на трансформаторите са обозначени с квадрат, а тези при разделна работа с триъгълник.



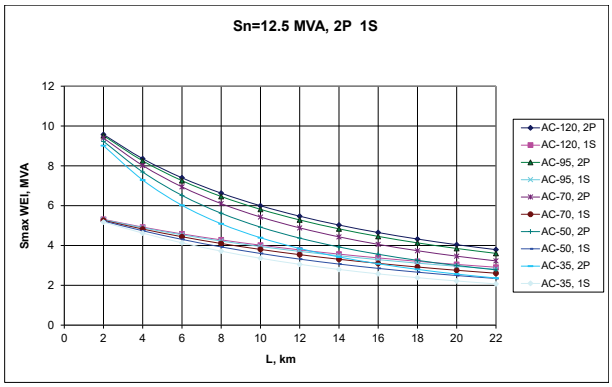

***Фиг. 2**. Максимална мощност на централа от ВЕИ присъединена към подстанция с трансформатори 6,3 MBA посредством електропровод с различно сечение и дължина*

Обикновено подстанциите се намират на значителни разстояния от местата на построяване на централата. Изследвано е присъединяване на централа задвижвана от ВЕИ посредством електропровод средно напрежение 35 kV с различна дължина и сечение на електропровода (въздушен и кабелен) в зависимост от начина на работа и мощността на силовите трансформатори. На фиг. 2 са представени кривите на изменение на максималната мощност на централа от ВЕИ, която може да се присъедини към въздушен електропровод с алуминиево

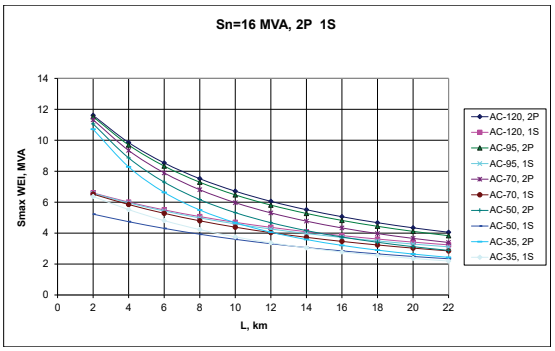
стоманен проводник със сечение от 35 до 120mm$^2$ свързан към шините 35 kV на подстанция с два силови трансформатора с номинална мощност 6,3 MVA. Дадени са и двата варианта на паралелна (2P) и разделна работа (1S) на трансформаторите. На фиг. 3, 4, 5, 6, 7 и 8 са представени кривите на изменение на максималната мощност на централи от ВЕИ, която може да се присъедини към въздушен електропровод с алуминиево стоманен проводник със сечение от 35 до 120mm$^2$ свързан към шините 35 kV на подстанция 110 kV с два силови трансформатора с номинални мощности 10, 10, 12.5, 16, 25, 31.5 и 40 MVA. Изчислени са двата варианта на паралелна и разделна работа на трансформаторите. Тези криви биха могли да се използват за да се определя максималната инсталирана мощност на централа от ВЕИ присъединена към електропровод, свързан към разпределителна подстанция високо напрежение с различни мощности и брой на понижаващите трансформатори.



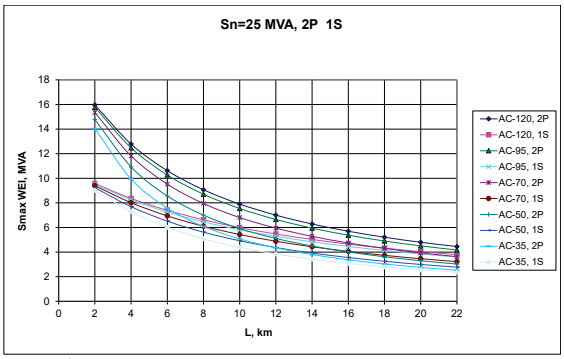

***Фиг. 3**. Максимална мощност на централа от ВЕИ присъединена към подстанция с трансформатори 10 MBA посредством електропровод с различно сечение и дължина*



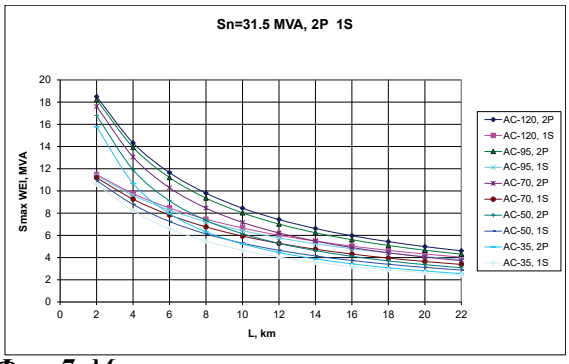

***Фиг. 4**. Максимална мощност на централа от ВЕИ присъединена към подстанция с трансформатори 12,5 MBA посредством електропровод с различно сечение и дължина*



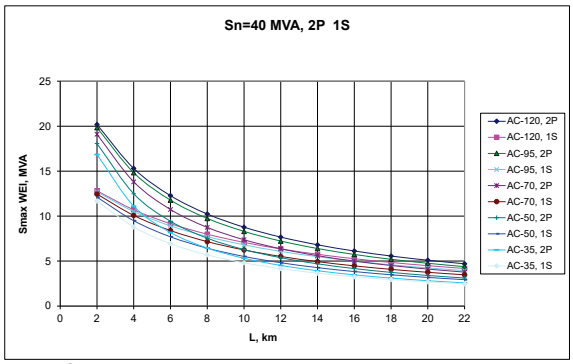

***Фиг. 5**. Максимална мощност на централа от ВЕИ присъединена към подстанция с трансформатори 6,3 MBA посредством електропровод с различно сечение и дължина*




***Фиг. 6**. Максимална мощност на централа от ВЕИ присъединена към подстанция с трансформатори 25 MBA посредством електропровод с различно сечение и дължина*




***Фиг. 7**. Максимална мощност на централа от ВЕИ присъединена към подстанция с трансформатори 31,5 MBA посредством електропровод с различно сечение и дължина*




***Фиг. 8.** Максимална мощност на централа от ВЕИ присъединена към подстанция с трансформатори 40 MBA посредством електропровод с различно сечение и дължина*

Загубата на напрежение в електропровода с централа от ВЕИ с максимална мощност, представена на графиките, не надвишава 4% при приемане, че произвежданата мощност е изцяло активна. Продължителният ток на проводниците също не се надвишава.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На територията на България има подходящи условия за изграждане на централи от ВЕИ, които се използват все по силно. Определянето на максималните мощности на тези електроцентрали, които се включват в края на електропропровод 35 kV, е основна цел която е постигната при изследване на възможностите на подстанция високо (110 kV) средно напрежение със силови трансформатори с различна мощност и брой. Изследванията са осъществени са представени в графичен вид..

## REFERENCE


[1]Gankova-Ivanova, Zwetelina, Renewable Energy Sources and Employment (Erneuerbare Energiequellen und Beschäftigung), Plenary talk, FDIBA Conference Proceedings, vol.2, 2018, S.1-10

[2] Stiebler, Manfred: Wind energy systems for electric power generatrion, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

[3] Volker Quaschning: Regenerative Energiesysteme, Technologie – Berechnung – Simulation, Hanser Verlag Muenchen, 7. aktualisierte Auflage, 2011.

[4] Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, Richtlinie fur Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz Ausgabe Juni 2008, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.

# АНАЛИЗ НА ГОДИШНАТА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ СИСТЕМИ С МОДУЛИ ОТ MonoSi, CdTe и CIGS

**Пламен Цанков, Ивайло Лазаров**

*Технически университет - Габрово*

# ANALYSIS OF THE ANNUAL PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH MonoSi, CdTe AND CIGS PV MODULES

**Plamen Tsankov, Ivaylo Lazarov**

*Technical University of Gabrovo*

**Abstract**

*The paper presents the performance analysis of three different photovoltaic systems – monoSi, CdTe and CIGS installed in May 2020 as a part of a project "Competence center – Intelligent Mechatronic, Eco and Energy Saving Systems and Technologies. The analysis covers the results obtained for system monitoring for the 2021 year. The results for electricity production and specific yield by months and single sunny days are presented tabularly and graphically. Photovoltaic modules from monoSi obtain the highest values for electricity production and a specific yield of 1,08 kW/kWp, while for the CIGS modules the value is 1kW/kWp, and for the CdTe modules 0,9 kW/kWp.*

**Keywords:** photovoltaic module, monoSi, CdTe, CIGS, specific yield.

## ВЪВЕДЕНИЕ

В последните години нараства потреблението на електрическа енергия, която основно се произвежда от електрически централи, работещи с изкопаеми горива. Недостатък на изкопаемите горива е, че тяхната цена постоянно варира, изчерпаеми са, а произведената от тях електрическа енергия е свързана с отделянето на големи количества въглеродни емисии [1]. Това повишава търсенето на алтернативни, най-често възобновяеми енергийни източници. Слънчевите фотоволтаични системи се очертават като ефективна алтернатива за източник на електрическа енергия. Основните им предимства са: произведената от тях електрическа енергия е „чиста" (директно преобразуване на падащата слънчева радиация в електрическа енергия); ниски разходи за поддръжка; възможност да бъдат използвани за различни приложения. Производителността на фотоволтаичните системи зависи технологията на фотоволтаичните модули, географското разположение и ориентацията им спрямо слънцето и от параметрите на околната среда, като температура, слънчева радиация и скорост на вятъра [2].

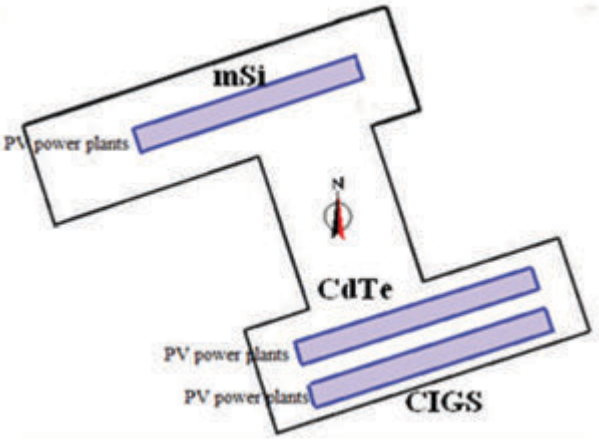
Според [3] общата инсталирана мощност от възобновяеми източници на енергия в България е 4211 MW, като инсталираната мощност от фотоволтаични електроцентрали е 1033 MW. Инсталираните мощности за фотоволтаичните електроцентрали с мощност до 1 MW е 121 MW, а на тези с мощност над 1 MW 911MW. Повечето фотоволтаични електроцентрали са изградени с модули от кристален силиций, поради което представлява интерес възможността за изследване на производителността на други технологии фотоволтаични модули за условията в България.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

От месец май 2020 г., на покрива на сградата на Технологичния парк на Технически университет – Габрово, като част от

проект център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии” е в експлоатация е фотоволтаична електроцентрала с обща мощност 30kWp Фотоволтаичната система е изградена от три различни типа технология на фотоволтаични модули:

- Кадмиев телурид (CdTe) – два стринга, всеки с мощност 4,8 kWp. Всеки стринг се състои от 48 модула с единична мощност 100Wp. Общата инсталирана мощност е 9,6kWp;
- Монокристален силиций (mSi) – два стринга, всеки с мощност 4,5 kWp. Всеки стринг се състои от 18 модула с единична мощност 250Wp. Общата инсталирана мощност е 9 kWp ;
- Медно индиево – галиев селенид (CIGS) – един стринг с мощност 3,3 kWp и един стринг с мощност 6,6 kWp. Първият стринг се състои от 30 модула, а вторият стринг от 60 модула. Единичната мощност на всеки модул от CIGS е 110Wp. Общата инсталирана мощност е 9,9 kWp;




***Фиг. 1**. Ориентация на фотоволтаичните модули*

Фотоволтаичните модули са монтирани върху метални рамки, като наклона им спрямо хоризонта е 33°. В резултат на конструктивни съображения, ориентацията на фотоволтаичните модули е отклонена с 18,4° на изток [4] (Фиг. 1).

Трите фотоволтаични подсистеми са свързани към мрежата посредством три трифазни инвертора, модел SUN2000-10KTL-M0 (Huawei), които преобразуват постоянната мощност от трите фотоволтаични подсистеми с различен тип фотоволтаична технология в променлива мощност, която се отдава в електрическата мрежа.

В табл. 1 са представени стойностите за произведената електрическа енергия в kWh от трите вида фотоволтаични модули по месеци за 2021 г. Най-високи стойности за произведената енергия са получени през летните месеци юли и август, съответно за месец юли от mSi – 1818, 26kWh, и CIGS – 1863,25 kWh, а за месец август от mSi – 1716,18 kWh, и CIGS –1751 kWh. От 15 май до началото на месец декември, поради повреда на фотоволтаичните модули от CdTe не са налични данни за произведена електрическа енергия.

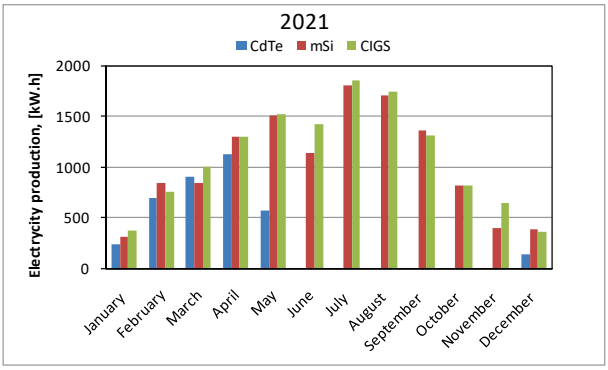
***Таблица 1.** Стойности за произведената електрическа енергия в kWh от три вида фотоволтаични модули за месеци от 2021 г.*

| Месец от 2021 г. | Вид на фотоволтаичния модул | | |
|---|---|---|---|
| | CdTe | mSi | CIGS |
| януари | 244,72 | 324,10 | 380,92 |
| февруари | 699,46 | 855,23 | 768,93 |
| март | 916,86 | 850,10 | 1011,58 |
| април | 1129,73 | 1312,34 | 1308,49 |
| Май | 574,74 | 1519,87 | 1525,97 |
| юни | 0 | 1143,71 | 1431,37 |
| юли | 0 | 1818,26 | 1863,25 |
| август | 0 | 1716,18 | 1751,66 |
| септември | 0 | 1365,12 | 1315,44 |
| октомври | 0 | 825,65 | 831,78 |
| ноември | 0 | 403,21 | 660,14 |
| декември | 153,39 | 401,02 | 370,10 |
| ОБЩО | 3 718,90 | 12 534,79 | 13 219,63 |

Най-ниски стойности за произведената електрическа енергия са отчетени през зимните месеци – януари и декември. За месец януари данните произведената електрическа енергия от трите вида фотоволтаични технологии са следните: CdTe – 244,72 kWh; mSi–324,1kWh; CIGS – 380,92 kWh. Отчетените данни за произведената електрическа енергия за месец декември са: CdTe – 153,39kWh; mSi – 401,02kWh; CIGS – 370,1kWh.

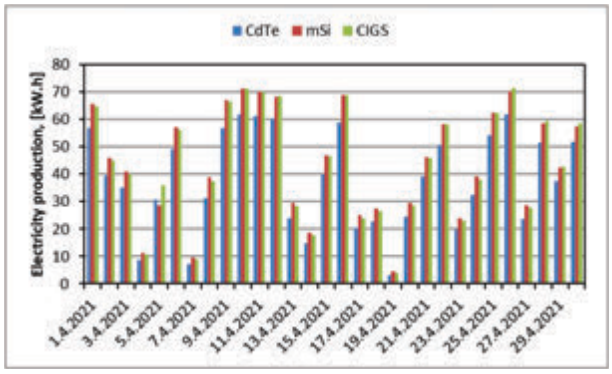
На фиг. 2. е показано графично сравнение на произведената електрическа енергия

от трите вида фотоволтаични технологии за месеците от 2021г.




***Фиг. 2**. Произведена електрическа енергия от различните видове фотоволтаични технологии по месеци за 2021 г.*

През месец декември 2021 г. не са работили всички фотоволтаични модули от кадмиев телурид CdTe. Високи стойности за произведената електрическа енергия са получени за месеци май и септември. За месец юни, са получени по- ниски стойности за произведената електрическа енергия, поради големия брой облачни дни. На фиг. 3 е показано производството на електрическа енергия на модулите от CdTe, mSi и CIGS по дни за месец април 2021 г.




***Фиг. 3**. Произведена електрическа енергия от модули от CdTe, mSi и CIGS за дните от месец април 2021 г.*

За по-коректна сравнителна оценка на производителността на различните по тип и мощност фотоволтаични системи е извършено изчисление на параметъра „специфично електропроизводство (SpecificYield)", който представлява отношение на отдадената от фотоволтаичната система електрическа енергия към електропреносната мрежа ($E_{out}$) и номиналната ú мощност ($P_{pvrated}$) [5].

$$Y_f = \frac{E_{out}}{P_{pvrated}}, \left[\frac{kW.h}{kW_p}\right] \quad (1)$$

В табл. 2. са дадени стойностите за „специфичното електропроизводство" за месеците от 2021 г.

***Таблица 2.** Стойности на специфичното електропроизводство в $kWh/kW_p$ за трите вида фотоволтаични модули по месеци за 2021 г.*

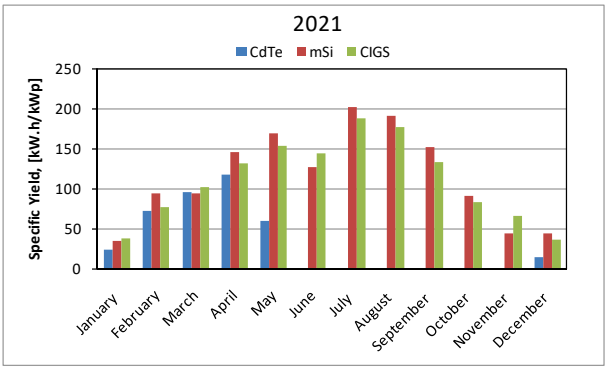
| Месец от 2021 г. | Вид на фотоволтаичния модул | | |
|---|---|---|---|
| | CdTe | mSi | CIGS |
| януари | 25,492 | 36,011 | 38,477 |
| февруари | 72,860 | 95,026 | 77,670 |
| март | 95,506 | 94,456 | 102,180 |
| април | 117,680 | 145,816 | 132,171 |
| май | 59,869 | 168,874 | 154,138 |
| юни | 0.000 | 127,079 | 144,583 |
| юли | 0.000 | 202,029 | 188,207 |
| август | 0.000 | 190,687 | 176,935 |
| септември | 0.000 | 151,68 | 132,873 |
| октомври | 0.000 | 91,739 | 84,018 |
| ноември | 0.000 | 44,801 | 66,681 |
| декември | 15,978 | 44,558 | 37,384 |
| ОБЩО | 387,385 | 1392,756 | 1335,317 |

Най-високи стойности за специфичното електропроизводство са получени за фотоволтаичните модули от монокристален силиций (mSi) за месеци юли, август, май, септември и април.

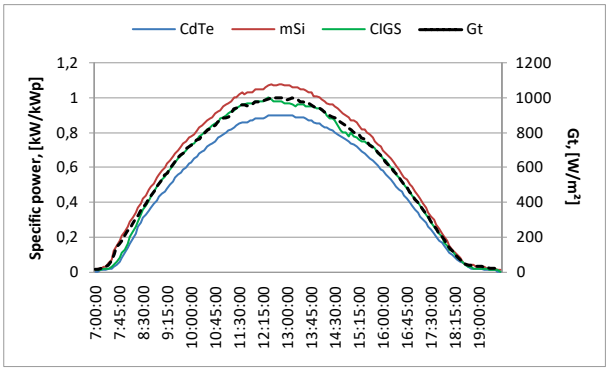
За месеците за които средномесечната температура е с по-ниски стойности (януари, март, ноември, декември) са получени по-високи стойности за специфичното електропроизводство за модулите медно индиево-галиев селенид.

На фиг. 4 е показано изменението на специфичното електропроизводство за 2021 година.

Направени са и изследвания на дневното изменение за всеки 10-минутен период на специфичното електропроизводство на различните видове фотоволтаични технологии за два изцяло слънчеви дни през 2021 г. На фиг. 5 е показано изменението на специфичната мощност за трите вида фотоволтаични технологии при изменение на слънчевата радиация за 10.04.2021 г.



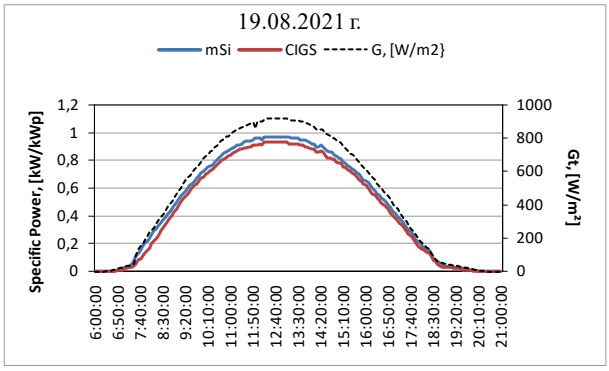

***Фиг. 4**. Изменение на специфичното електропроизводство на различните видове фотоволтаични технологии за 2021 г.*




***Фиг. 5**. Изменение на специфичната мощност за трите вида фотоволтаични технологии и глобалната слънчева радиация за 10.04.2021 г.*

Най-високи стойности за специфичната мощност са получени за модулите от монокристален силиций, като максимална стойност (1,08kW/kW$_p$) е получена в 12:45h при стойност на слънчевата радиация 1000 W/m$^2$. За модулите от кадмиев телурид е отчетена максимална стойност за мощност 0,9 kW/kW$_p$ в 13:00h при стойност на глобалната слънчева радиация 989,7 W/m$^2$. Отчетената максимална стойност за специфичната мощност за модулите от медно индиево-галиев селенид е 1kW/kW$_p$ в 12:25h при стойност на глобалната слънчева радиация 993,4 W/m$^2$.

На фиг. 6 е показано изменението на специфичната мощност за 19.08.2021 г. за два вида фотоволтаични технологии при изменение на слънчевата радиация. Получените стойности за специфичната мощност са по-ниски в сравнение с разгледаните за 10.04.2021 г. Стойностите за специфичната мощност за модулите от монокристален силиций са по-високи от тези на модулите от медно индиево-галиев селенид.




***Фиг. 6**. Изменение на специфичната мощност за два вида фотоволтаични технологии и глобалната слънчева радиация за 19.08.2021 г.*

Отчетената максимална стойност за специфичната мощност за модулите от монокристален силиций е 0,97 kW/kW$_p$, в диапазона между 12:15 h и 13:10 h, като стойностите за глобалната слънчева радиация се изменят от 911,7W/m$^2$ до 921,3W/m$^2$. Във времевия диапазон между 12:15 h и 13:10 h е отчетена максимална стойност за специфичната мощност 0,93 kW/kW$_p$, като стойностите за глобалната отново се изменят от 911,7W/m$^2$ до 921,3w/m$^2$. За този период от годината модулите от кадмиев телурид не са работили, поради повреда и за тях не са отчетени данни.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършена е обработка и анализ на данните за производство на електрическа енергия от системата за мониторинг на фотоволтаична електроцентрала в Технологичния парк на Технически университет – Габрово с обща инсталирана мощност 30 kW$_p$, включваща три вида фотоволтаични технологии – кадмиев телурид (CdTe), монокристален силиций (mSi) и медно индиево – галиев селенид (CIGS), за първата цяла календарна година – 2021 от работата на електроцентралата. Отчетени са стойностите за произведената електрическа енергия и специфичното електропроизводство за месеците от 2021 г.

Анализът показва, че най-високи стойности за специфичното електропроизводство са получени за фотоволтаичните модули от монокристален силиций. За месец юли стойността за специфичното електропроизводство за модули от mSi превишава със 7,3% тази за модули от CIGS, а за месец август със 7,7%. Отчетено е изменението на

специфичната мощност на различните видове фотоволтаични технологии за два слънчеви дни от 2021 г., като максималните стойности за трите технологии са 1,08 $kW/kW_p$ за mSi модули, $1kW/kW_p$ за CIGS и 0,9 $kW/kW_p$ за CdTe. За всичките видове фотоволтаични технологии, най-високите стойности за специфичната мощност са отчетени в обедните часове при слънчева радиация между 900 и 1000 $W/m^2$. Най-високи стойности за специфичната мощност са отчетени за модулите от монокристален силиций, като за 10.04.2021 г., те са по–високи с 0,8% спрямо тези на модулите от медно индиево-галиев селенид и с 2% спрямо тези от кадмиев телурид.

Заключенията от анализа на годишната производителност на фотоволтаичните системи с модули от MonoSi, CdTe и CIGS доказват широките възможности на изградената система за мониторинг на фотоволтаичните електроцентрали в Технологичния парк на Технически университет – Габрово, които могат да бъдат разширени за следващи времеви периоди и с отчитане на измерваните метеорологични параметри.

## REFERENCE


[1] Haffaf A, Lakdja F, Djaffar O.A, Meziane R. Monitoring, measured and simulated performance analysis of a 2.4 kWp grid-connected PV system installed on the Mulhouse campus, France, Energy for Sustainable Development, 2021;(62):44-55.

[2] Al-Otaibi A, Al-Qattan A, Fairouz F, Al-Mulla A, Performance evaluation on photovoltaic system on Kuwaiti schools' roof top, Energy Conversation and Management, 2015;(95):110-119.

[3] https://www.veiregistar.bg

[4] Tsankov, P. Reducing climate change by installing a new photovoltaic power plant in Bulgaria. CONTEMPORARY MATERIALS, 12(2). 2021, pp. 126-139. ISSN 1986-8677.

[5] IEC 61724-1:2021 Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring.

# ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ДВИГАТЕЛИ С МАЛКА МОЩНОСТ - ТЕНДЕНЦИИ И СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ

**Димитрина Коева**
*Технически университет - Габрово*

# LOW POWER ELECTRIC MOTORS - DIRECTIONS OF DEVELOPMENT AND COMPARATIVE ANALYSIS

**Dimitrina Koeva**
*Technical Universityof Gabrovo*

**Abstract**

*The objective of this work is to use conventional design methodologies for low power collector and brushless motors in order to obtain relations and present comparative data for overall dimentions and performance, electromechanical quantities and parameters. Their comparison would show the qualities of the motors (total losses, developed torque, power, etc., per unit mass of active parts ) and could be used as a guide when selecting a motor for a particular application according to various criteria. The object of the analysis is the data of lowpower motors which is as follows: single-phase collector motors, universal collector motors, induction motors and permanent magnet brushless motors.*

**Keywords:** motors, electrical products, Ecodesign.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Един от основните отрасли на индустрията на развитото общество винаги е била и ще си остане електротехническата промишленост и нейните основни съставящи – електромеханика и преобразователна техника, т.к. огромна част от цялата произвеждана електрическа енергия в крайна сметка се преобразува в механична посредством различни видове изпълнителни електродвигатели. По такъв начин електромеханиката и управляващата я електроника са в основата на промишлеността. И за в бъдеще все по-актуални ще са проблемите за енергоспестяващите мерки и минимизиране на загубите на енергия. В контекста на казаното към електродвигателите и управляващата ги електроника като перспективна електромеханична система се поставят следните изисквания: висока производителна мощност, повишена честота на въртене, пълна управляемост, висок коефициент на полезно действие, ниска цена и дълъг срок на безотказна работа. За успешното реализиране на тези разнородни критерии за качество е необходим, разбира се, комплексен подход, като все още за всеки конкретен случай се прави компромисът цена/качество.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Висикоскоростните електрически машини с електронно управление намират приложение в редица устройства, където обемът и теглото са от съществено значение като ръчни електроинструменти, прахосмукачки, медицински инструменти /стоматологични и хирургически/ и др. Развитието на силовата електроника позволи използването на безконтактни електрически машини с електронно управление (БЕМЕУ), в т.ч. асинхронни, синхронни, безконтактни постояннотокови с постоянни магнити (БДПМ), които имат редица предимства пред универсалните колекторни и постояннотоковите двигатели, използвани доскоро масово.

Наличието на механичен комутатор в конструкцията на последните ограничава областта на тяхното приложение. С бурното развитие на полупроводниковата техника се създава възможността механичният комутатор да се замени с много по-надежден – полупроводникова схема, управлявана от сигналите на безконтактен датчик за положението на ротора. Тези електродвигатели се срещат под името безконтактни, вентилни или двигатели с електронна комутация, т.е. функциите на комутатора се изпълняват от електронна полупроводникова схема, [1].

Съществуват технологични, технически и пазарни различия между малките и големи електрозадвижвания (ЕЗ). За големите ЕЗ се предпочитат класическите постояннотокови двигатели (ПТД), асинхронни двигатели (АД) и синхронни машини (СМ), поради високата им работоспособност, умело използване на вложените материали (оптимално проектиране на двигателите) и необходимост от плавно изменение на въртящия момент, без пулсации. При малките ЕЗ разнообразието е голямо поради необходимостта от различен диапазон на регулиране и други изисквания към изменението на различни величини. Коефициентът на полезно действие и оптималното използване на материали все още е много важен въпрос, както и управлението на момента, динамичните натоварвания и диапазона на регулиране. Не на последно място значение има и управляващата схема и вложените елементи в нея. За малките мощности се препоръчват MOSFET и IGBT като елементна база, заради малките загуби при сравнително високи честоти на превключване, което ги прави предпочитани за широчинно-импулсни модулиращи схеми. Като главни изисквания за малките ЕЗ се определят: ниска цена, безшумна работа, добър коефициент на полезно действие, компактност. В голяма част от случаите тези изисквания са взаимно противоречащи си. С разпространението на нови идеи за конструкциите, нови материали и компоненти, все по-труден става въпросът кой е най-подходящият двигател за конкретно приложение.

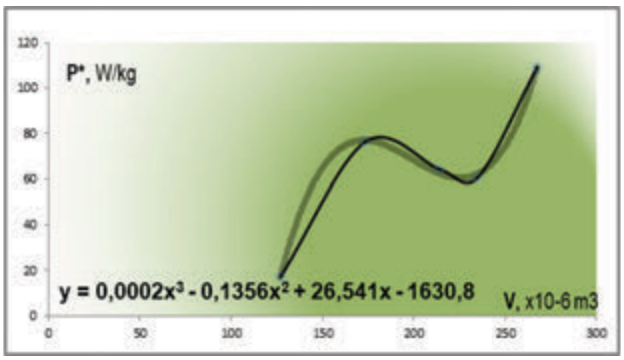
Еднофазните колекторни и универсалните колекторни двигатели все още намират приложение в промишлеността и битовата техника, където се изискват високи честоти на въртене – 3000-30000 $min^{-1}$. Това са ръчни електроинструменти, шевни машини, прохосмукачки, центрофуги и др. Тези типове двигатели се предпочитат заради възможността за получаване на практически всякакви честоти на въртене при захранване на двигателя с променливо напрежение и променлива честота, при това регулирането е плавно и технически просто осъществено. Но утежнената и неудовлетворителна комутация, която имат е голям недостатък. Освен това, вследствие на тази лоша комутация тези двигатели са източник на радиосмущения. Работата им е съпроводена с голям шум, който може да има механичен, вентилационен или магнитен характер. В контекст на изискванията на Европейските директиви за електромагнитна съвместимост, тези двигатели все по-рядко се предпочитат, атрактивна остава единствено цената им, и постепенно отстъпват място на БДПМ, които стават все по-популярни и достъпни. Но какви са особеностите на отделните видове конструкции и защо е необходим сравнителен анализ на различните видове електродвигатели, влизащи в състава на високоскоростните задвижвания? Правилният отговор на този въпрос се крие в подходящия избор сред многообразието от нови идеи, съвременни материали и технологии на най-подходящия двигател за всеки конкретен случай. От голяма важност за електроинструментите например, е тяхната висока маневреност, подвижност, ефективност, и надеждност в експлоатацията. Особеното в тези устройства се състои в това, че двигателят непосредствено е съединен с работния инструмент и в процеса на работа се намира в ръката на работещия. Основно предимство на такива високоскоростни механизми се явява високото качество на обработка, позволяващо да се разшири значително кръгът на изпълняваните операции, малки усилия, изразходвани в хода на работата и висока производителност на труда. Друго предимство е високата относителна мощност /мощността на

механизма, отнесена към неговата маса и обем/, [6, 7].

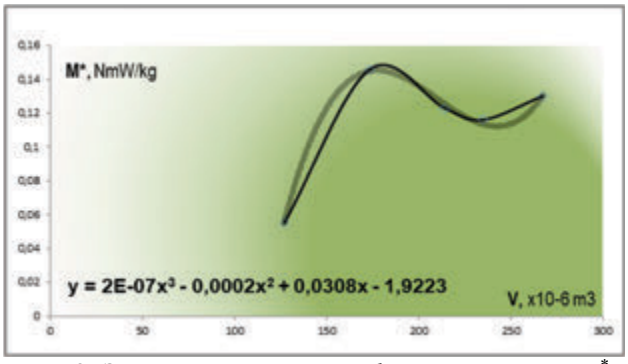
От произвежданите в света ръчни механизирани инструменти (електрически, пневматични, хидравлични и с двигатели с вътрешно горене) с електрическо задвижване са около 65% поради по-малките експлоатационни разходи и по-големия им коефициент на полезно действие (к.п.д.). В тази връзка към високоскоростните двигатели с електронно управление, влизащи в състава на електроинструментите, следва да се предявят следните специфични условия:

- малки габарити и маса – за удобство и лекота при работа;
- сравнително ниска /под 45°C/ температура на корпуса, за да не се предизвикват изгаряния;
- минимални жироскопични моменти – за повишаване на маневреността на инструмента и за удобство и точност при работа;
- широк диапазон на честотата на въртене и въртящия момент на вала на двигателя, обуславящ разнообразието на изпълняваните операции. На практика тези двигатели работят както с моменти, близки до пусковия, така и с честоти на въртене, близки до тези на празен ход. Това затруднява осигуряването на висок к.п.д. за всички режими на работа и налага необходимостта от създаване на ефективна система на охлаждане на двигателя;
- стабилизация на честотата на въртене – за поддържане на зададения режим на работа;
- повишена електро безопасност, особено за хирургическите и стоматологични инструменти. Един от начините за постигане на това е намаляване на захранващото напрежение на 12 – 24 V.

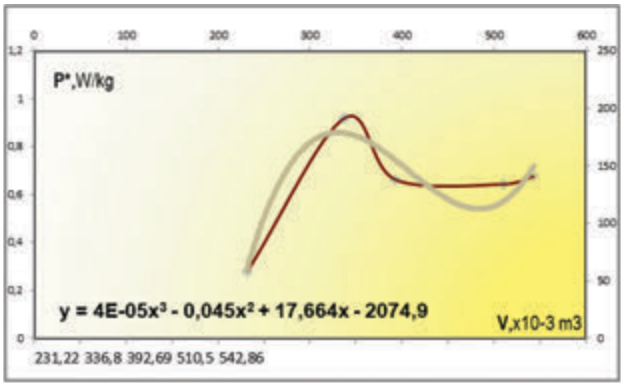
Възможно е да се обобщят важни сравнителни масогабаритни показатели: мощност за единица маса на активните части, (т.нар. специфична мощност), момент за единица маса на активните части, (т.нар. специфичен момент), обем на активните части, [2]. Обобщаването по тези показатели е направено за колекторни двигатели и безконтактни двигатели поотделно и е представено в таблици 1 и 2, [3, 4, 5].



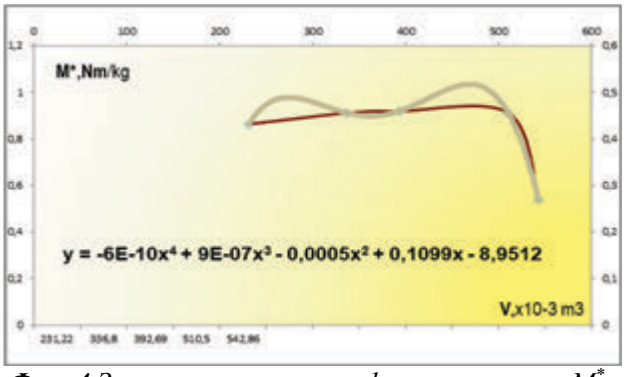

***Фиг. 1**. Зависимост на специфичната мощност $P^*$ на колекторни двигатели от обема на активните им части V.*




***Фиг. 2.** Зависимост на специфичния момент $M^*$ на колекторни двигатели от обема на активните им части V.*




***Фиг. 3**.Зависимост на специфичната мощност $P^*$ на безконтактни двигатели от обема на активните им части V.*




***Фиг. 4.**Зависимост на специфичния момент $M^*$ на безконтактни двигатели от обема на активните им части V.*

Във вид на функция $y = f(x)$ в полетата на графиките са отразени зависимостите $P* = f(V)$ и $M* = f(V)$ при разглежданите двигатели. Величините $C$ (машинна константа) и $\kappa_и$ (коефициент на използване) характеризират степента на използване на вложените активни материали в двигателите. Величината $C$ определя обема на активните материали за единица енергия. Величината $\kappa_и$ определя плътността на енергията, т.е. енергията за единица обем. Колкото е по-малка $C$, толкова са по-малки размерите на статора/котвата и коефициентът на използване е по-висок. Колкото са по-големи електромагнитните натоварвания $A$ и $B_\delta$, толкова се повишава $\kappa_и$ и размерите на двигателите намаляват. Големината на $A$ и $B_\delta$ се съобразяват с класа на изолация, а отношението $A/B_\delta$ трябва да бъде в определени граници, т.к. неговата стойност влияе върху технико-икономическите показатели на променливотоковите двигатели – к.п.д., $cos\varphi$, пускови характеристики и маса, а при колекторните двигатели – к.п.д., регулировъчните свойства, комутационните показатели и масата на двигателите. Отношението $\lambda = \frac{l_\delta}{D}$ влияе на масата, динамичния инерционен момент, енергийните показатели и други технико-икономически показатели на машините. При разглежданите колекторни двигатели с малка мощност $\lambda = 0,8 \div 1,1$, като ниските стойности се отнасят за оптимално проектирани двигатели. При разглежданите безконтактни двигатели $\lambda = 0,62 \div 1,2$, като ниските стойности се отнасят за БДПМ, а по-високите – за АД. Ако критерият за избор е един и същ обем на вложените активни материали, ($V = 225.10^{-6}m^3$), колекторните двигатели имат специфична мощност $P^* = 58,3W/kg$и специфичен момент $M^* = 0,118Nm/kg$, а безконтактните двигатели - $P^* = 70,83W/kg$и$M^* = 0,48Nm/kg$. Следователно, безконтактните двигатели имат 1,22 пъти по-голяма специфична мощност и 4,07 пъти по-голям специфичен момент. При това електромагнитните натоварвания са както следва: за колекторните двигатели $A = (9,09 \div 10).10^3 A/m$ и $B_\delta = (0,4 \div 0,45)T$, а за безконтактните двигатели $A = (15,5 \div 17,03).10^3 A/m$ и $B_\delta = (0,67 \div 0,69)T$. По-високите стойности (средно 1,7 пъти) на електромагнитните натоварвания обясняват и високия коефициент на използване на безконтактните двигатели - 2,57÷2,96 пъти по-голям от този на колекторните двигатели. При разглежданите двигатели тези резултати се постигат при използване на известните методики за проектиране, но въведени в конструкциите нови материали. Използваните до скоро марки електротехническа стомана на ламелите Э – 13 и 2013 или подобни са заменени с нови: марка POWER Core A, M330 и/или NEMA 23. За постоянните магнити на безконтактните двигатели се използва NdFeB сплав (търговска марка Ugimax-Ugistab 37B1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изведените зависимости и извършените сравнителни анализи потвърждават, че съвременните насоки за оптимизиране габаритните размери и енергийни показатели на двигателите с малка мощност са: използване на съвременни марки електротехнически стомани – студеновалцованите стомани имат голяма магнитна проницаемост и малки специфични загуби; използване на съвременни изолационни материали – корпусната изолация и тази на намотъчните проводници да бъде с по-малка дебелина и да осигурява необходимата електрическа и механична якост (с това се постига по-добър коефициент на запълване на медта и съответно по-добър коефициент на използване на двигателя); използване на критерии за оптимално проектиране при осигуряване на минимална маса и висока надеждност при работа. За безконтактните двигатели с малка мощност добрите практики и методи за управление (изпреварваща комутация и контрол върху ширината на импулса) трябва да се комбинират с оптимално проектиране на двигателя за постигане на малка индуктивност на намотката, [8]. Така биха се постигнали малки пулсации на момента, бързодействие и добри енергийни показатели. Това важи особено при двигателите с високи честоти н авъртене. Колкото по-висока е управляваната скорост, толкова по-голям е оптималният ъгъл на

комутация и по-малка е оптималната ширина на импулса. И в двата случая индуктивността на статорната намотка ще лимитира оптималната работа на двигателя.

***Таблица 1.*** *Обобщени показатели за разглежданите колекторни двигатели.*

| Номинална мощност, $P_н$, *W* | **12** (УКД) | **80** (УКД*) | **80** (УКД) | **80** (ЕКД) | **160** (ЕКД) |
|---|---|---|---|---|---|
| Общи загуби, $\sum P_{заг}$, *W* | 4 | 17,3 | 25 | 27 | 43 |
| Специфична мощност, **P***, *W/kg* | 17,26 | 76,3 | 64,2 | 60,6 | 109,1 |
| Специфичен момент, **M***, *Nm/kg* | 0,055 | 0,146 | 0,123 | 0,116 | 0,130 |
| Обем на активните части **V**,$x10^{-6}m^3$ | 126,92 | 173,41 | 214,0 | 234,94 | 267,5 |

Забележка: Двигателят, отбелязан с този символ (*) е оптимално проектиран.

***Таблица 2.*** *Обобщени показатели за разглежданите безконтактни двигатели.*

| Номинална мощност, $P_н$, *W* | **90** (АД) | **300** (БДПМ) | **400** (АД) | **400** (БДПМ) | **500** (АД) |
|---|---|---|---|---|---|
| Общи загуби, $\sum P_{заг}$, *W* | 30 | - | 210 | 45 | 256 |
| Специфична мощност, **P***, *W/kg* | 57,84 | 191,63 | 138 | 141 | 134,1 |
| Специфичен момент, **M***, *Nm/kg* | 0,432 | 0,456 | 0,46 | 0,269 | 0,454 |
| Обем на активните части **V**,$x10^{-6}m^3$ | 231,22 | 336,8 | 392,69 | 542,86 | 510,5 |

## REFERENCE


[1] Hendershot J. R., AC, Brushless, Switched Reluctance Motor Comparisons, Magna Physics Corporation, Hillsboro, OH 45133.

[2] Kopilov I. P., Design of Electrical Machines, vol. 1, vol. 2, Moscow, Ener-goatomizdat, 1993 (in Russian).

[3] Baldor Motor and Drives, Catalog, 2000.

[4] PAPST DC Motion, 2001.

[5] MAXON der fuhrende Hersteller hochpreziser Antriebe und Systeme, 2001.

[6] Sharma Virendra Kumar, Khan M. A., Singh Bhim, Murthy S., Comparison of Power Quality Aspects of Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor, TENCON 2000, Proceeding, Vol. 3, pp: 300 - 303.

[7] Fussell, B. K., Taft, C. K., Brushless DC Motor Selection, Proceedings of Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference, 18 – 21 Sept. 1995, pp: 345 – 353.

[8] FujiiYoshito, Nidec Corporation. US Patent № US 7294944 B2, Nov. 13/2007.

# GRAPHICAL REPRESENTATION OF BASIC ELECTRICAL POWER QUANTITIES MEASURED WITH POWER LOGIC PM5000 SERIES

**Marko Rosić[1], Uroš Pešović[1]**
[1] *University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia*

**Abstract**
*The paper describes the realization of the recording device of basic electrical quantities of power supply, acquired by the power meter PM5110 through Modbus serial communication. The developed "RecMod2021" device is based on an Arduino microcontroller board programmed to read registers of PM5110 during specific time recording patterns and store the data in the SD card using a desirable file format. Data stored on an SD card is further used for graphical representation of measured time-instantaneous and time-averaged electrical quantities such as line or phase voltage, current, frequency, active, reactive, apparent power, THD, power factor, etc. through ACLoadView software. The ACLoadView software allows offline parameters observation and analysis in numerical and graphical terms, towards tracking potential malfunctions of the testing equipment of which counted electrical quantities are measured and recorded. ACLoadView allows generation of final report in pdf format at the end of the testing procedure.*

**Keywords:** PM5110 power meter, data logging, Modbus, ACLoadView software.

## INTRODUCTION

Measurements in electrical engineering are quite represented and in use in various forms and applications. Measurement equipment is an unavoidable part of every electrical engineering laboratory usually represented through various types of multimeters designated for different purposes [1].

Today a large number of multimeters can be found on the market suitable for various needs in electrical engineering measurement. A typical multimeter can measure voltage, current and resistance. Nowadays, multimeters are usually digital and able to measure numerous electrical and nonelectrical quantities with different accuracy. Multimeters designed to measure electrical power, usually referred to as power meters, can measure active and reactive power, power factor, and other characteristic quantities that define the quality of the power supply.

However, the price of this measuring equipment is directly proportional to its accuracy, data processing and recording capabilities. In that sense, the idea for this paper arose from need to find a relatively cheap way to measure electrical power quantities with satisfactory accuracy and recording possibilities. This paper presents the development of the RecMod2021 logging device which is capable to collect data measured with PM5110 power meter and store it to an SD memory card after which these data can be graphically presented.

## DATA LOGGING MULTIMETERS

Power meters are specialized multimeters used for active and reactive power monitoring. They usually provide the measurement of power factor, frequency, current and voltage and their higher spectral components presented in the form of total harmonic distortion (THD) or percentage share of each harmonic. This PM5110 device is a flush-mount energy meter with a 96 mm by 96 mm backlit LCD as it is shown in Fig. 1. The meter provides Class 0.5S accuracy per IEC 62053-22 standard and 64 samples per cycle. The meter will measure Energy, Active and Reactive Power, Voltage, Current, Frequency, Power Factor and up to 15th harmonics [2]. The meter will function in a 50Hz or 60Hz network and accepts supply voltage ranging from 100 to 415 VAC and 125 to 250 VDC. Line rated current for this meter

is 1A or 5A input and will support Single Phase and Neutral, Three Phase, or Three Phase and Neutral configurations. The range of measurement voltage between Phases is 35 to 690 V AC at 47 to 63 Hz. The measurement range between Phase and Neutral is 20 to 400 V AC at 47 to 63 Hz. The communication protocol is Modbus RTU and ASCII 2 wires with RS485 port support.




***Fig. 1.*** *PM5110 power meter*

Unlike the PM5110, which does not have an option to store data, different power meters with data logging options can be found on the market. Also, there are meters with larger LCDs in colour with a modest real-time graphical representation of measured electrical quantities. Moreover, high-quality measurement equipment with sophisticated data processing analysis options is usually followed with built-in high-power processors, or as a modular power meter setup with a separate high-resolution display or PC and DAQ controller, or specific PLC responsible for data processing, analysis and visualization [3]. Nevertheless, all these kinds of equipment are characterized by high prices. Even meters with characteristics equivalent to PM5110 but with data logging possibilities are at least twice costly in comparison with PM5110.

This paper presents the realization of the "RecMod2021" low-cost device based on the Modbus communication protocol designed to read and save electrical quantities measured with PM5110. Appropriate PM5110 registers are read and stored on an SD card in CSV file format. Time-stamped data on the SD card are stored in a specific pattern which further allows a simple read and appropriate graphical representation of the recorded data and its analysis.

## THE RECMOD2021 LOGGING DEVICE

Realized RecMod2021 logging device is based on an ATmega168 microcontroller located on an Arduino Nano board. This 8-bit RISC microcontroller has 16KB of FLASH memory for the program and 1KB of RAM and 512B of EEPROM memory for data storage. The microcontroller communicates with the PM5110 panel meter as a Modbus master [4] using the RS485 module. Received data are stored on an SD memory card which is connected to a microcontroller using the SPI protocol. Simplified structural diagram of realized RecMod2021 logging device is shown in Fig 2.

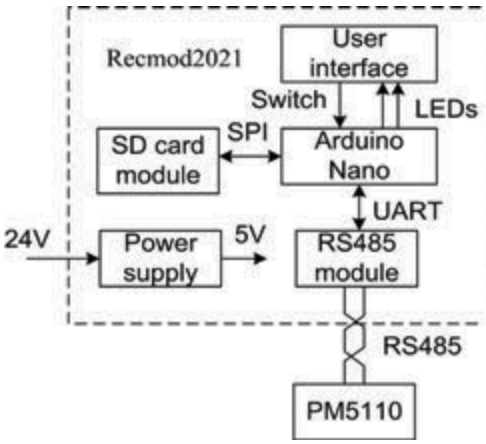



***Fig. 2.*** *Structural diagram of RecMod2021*

Communication on the UART port is configured to the 8N1 data format, with a baud rate of 19200 bps. PM5110 slave address is set to 1 and the real-time clock registers are read from the PM5110 slave to check device presence. Then the SD card is initialized and a new CSV file is created with the predefined header. The name of the CSV file is given in the format Data_XYZ.csv, where XYZ is the decimal number of the log file which is stored in EEPROM and is incremented for every new logging file. Data logging starts when the user activates the recording switch (switch START at Fig.3), which periodically appends PM5110 data to a CSV file. The acquisition period is configurable and currently is set to one second as the shortest due to slow communication speed over RS485 line. During the acquisition interval the microcontroller first reads real-

time clock registers, after which the number of measurement registers is read from the PM5110 slave, and data is appended to the CSV file. Table 1. represents the list of the measurement parameters which are read from the PM5110 slave. Parameters are read using the five Modbus telegrams [5] for reading multiple holding registers, starting from the register base address and reading the consecutive number of registers [6]. Real-time clock values are read in unsigned integer format, while the electrical values are read in 32-bit floating point format.

***Table. 1.*** *List of PM5110 parameters read*

| Parameter | Register base address | Registers read |
|---|---|---|
| Real-time clock | 1837 | 7 |
| Currents | 3000 | 12 |
| Voltages | 3020 | 18 |
| Powers (PQS) | 3054 | 32 |
| Frequency | 3110 | 2 |

When the user stops the recording using the switch, the current logging file is closed and the file number is incremented in EEPROM, so the new recording will be appended to a new CSV file.

RecMod2021 logging device housing is printed on the 3D printer using the ABS filament suitable for mounting onto the DIN rail. The designed 3D model is shown in Fig 3, while the photographs of the realized device are shown in Fig 4.

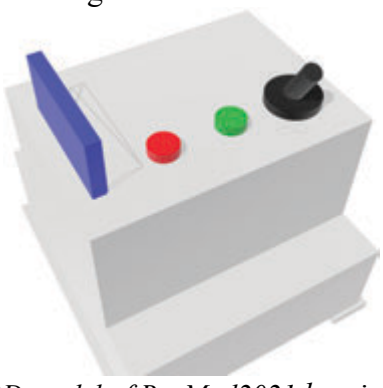


***Fig. 3.*** *3D model of RecMod2021 logging device*

Fig. 3 shows first version of the realised RecMod2021 device with SD card inserted. Beside the START switch, placed on the right side of the device, there are two visible LED confirming power supply presence (green) and recording in process (red). When device is successfully logging the data to the SD card, recording LED will be permanently on. In case of the any communication error, such as absence of SD card when recording has started, recording LED will blink rapidly.




***Fig. 4.*** *Final look of the developed RecMod2021 device - ver. 1*

## ACLoadView SOFTWARE

The ACLoadView software (Fig. 5) can be freely downloaded from the official Hillstone load banks web page [7]. It was purposely developed as an accompanying diagnostic software of the high-power load banks whose main purpose is load regulation to prevent generator wet stacking due to low load on a diesel engine. The ACLoadView software allows time stamped graphical and data reporting of the load delivered during the load bank operation. This allows user subsequent analysis of the recorded power supply quantities and potential irregularities notation during the load test, which could be quite helpful in isolation of the problem origin.




***Fig. 5.*** *ACLoadView start screen*

After the software is started, main options related to testing results are available such as import and load of the new results together with the overview of previously recorded measurements as it is depicted in Fig. 6.

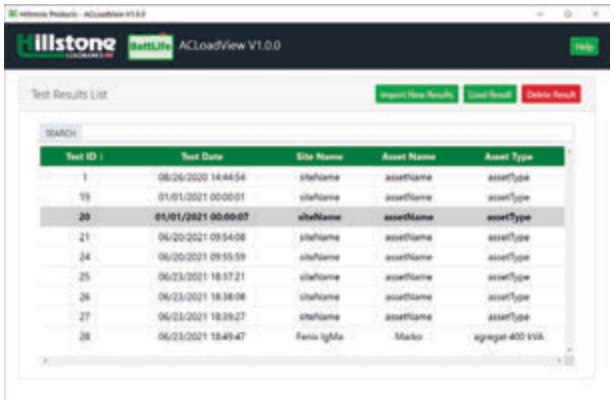



***Fig. 6.*** *Previous results list and import of the new results*

After the results are imported from the SD card and loaded, a window with test results, testing equipment (in this case a diesel generator) information and other related details are shown (Fig. 7).

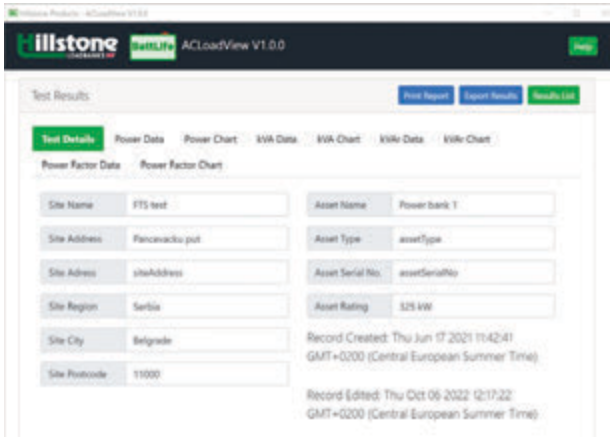



***Fig. 7.*** *Test results with test details window*

Fig. 8 shows the power chart of all selected data graphically represented during the recording period and marked with different colours. The power chart window allows users to switch off or switch back on the particular electrical quantity representation, by its selection at the top of the graph. This option is quite useful during electrical quantity transition period analysis and generator malfunction tracking and solving.




***Fig. 8.*** *Graphical representation of the results*

After the analysis of testing results is done, the ACLoadView allows printing of the test report (Fig.9). The test report consists of basic test details with numerical and graphical test result representation. The generated PDF test report can be printed and joined accompanying documentation of each tested device as a proof of their performances during various load and under on-site real testing conditions.

Nevertheless, since all measured and recorded electrical quantities are saved on SD card in CSV file format, they can easily be graphically represented in any other available software allowing graphical visualisation of

numerically stored data such as MS Excel, Origin, DatPlot, etc.

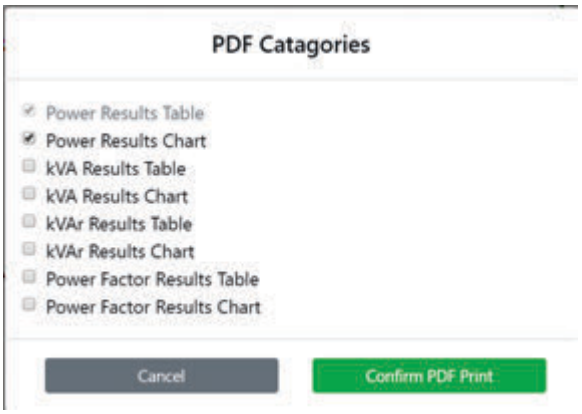



***Fig. 9.*** *PDF report generation*

## CONCLUSION

The paper presents a low budget solution of how basic electrical power quantities can be read form the PM5110 power logic meter, recorded and further graphically represented and analysed. The RecMod2021 device based on Modbus communication protocol is developed and described in this paper. Consisting parts of the realised RecMod2021 device are presented together with detailed description of how appropriate registers of the PM51110 meter are read and stored on the SD card in CSV file format. At the end of the paper an ACLoadView software is presented together with the description of its options related to graphical representation and report generation of recorded electrical quantities during the diesel generator testing by load bank.


## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, and these results are part of the Grant No.451-03-68/2022-14/200132 with University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Čačak.


## REFERENCE


[1] Tyler Saunders, Understanding the Different Types of Digital Multimeters, Available online: oct. 2022, https://www.toolnerds.com/types-of-digital-multimeters/

[2] PM5110 metter data sheet, Available online: https://www.se.com/ww/en/product/METSEPM5110/pm5110-meter-modbus-up-to-15th-h-1do-33-alarms/

[3] Matuschek power analysers, Available online: https://www.matuschek.de/power-analyzer/overview.htm

[4] Modicon inc, Modbus Protocol Reference Guide, June 1996, Available online: oct. 2022, https://modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf

[5] MODBUS Organization, MODBUS over Serial Line Specification & Implementation guide V1.0, 2002, Available online: oct. 2022, https://modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1.pdf

[6] PM5100_PM5300 Register List v01.00.0, Available online: oct. 2022, https://www.se.com/ww/en/download/document/PM5100-PM5300_PublicRegisterList/

[5] HillStone load bank web page. Online available sept. 2022: https://hillstone.co.uk/

# LARGE HYDROPOWER PLANTS IN THE VLASINA MICROREGION

**Anđelina V. Marić Stanković[1], Tomislav M. Pavlović[1], Ivana S. Radonjić[1]**

[1] *University of Niš, Faculty of Sciences and Mathematics, Višegradska 33, 18000 Niš, Serbia*

**Abstract**

*In the paper are given basic information on the geographical position of Vlasina microregion in Serbia. Also, are given the information about geographical position and construction and power of four large hydropower plants Vrla 1, Vrla 2, Vrla 3 and Vrla 4 in Vlasina microregion At the end are given information about total annual output of large hydropower plants in Vlasina microregion in 2019 and 2020.*

**Keywords:** electrical energy, large hydropower plant, Vlasina, Vrla River, Serbia.

## INTRODUCTION

The Vlasina microregion is located in the southeastern Serbia and stretches between the South Morava valley and the Serbian-Bulgarian border and belongs to the Vlasina river basin. In the northwest, the Vlasina microregion extends to the mountains Čemernik and Vardenik. The eastern border of the Vlasina microregion encompasses the state border between Serbia and Bulgaria. In the north, above the Vlasina microregion the Plana Mountain rises sharply, and in the southeast the Miljevska mountains [1, 2].

According to the regional division, the Vlasina microregion belongs to the region of the Southern Serbia located between the Toplica and Pirot districts in the north, the Republic of Bulgaria in the east, the Republic of Northern Macedonia in the south, and the Autonomous Province of Kosovo and Metohija in the west. It covers the territory of two districts (Jablanica and Pčinja) and three municipalities (Vlasotince, Crna Trava and Surdulica). The municipalities of Vlasotince and Crna Trava belong to the Jablanica district, and Surdulica to the Pčinja district [1, 2].

The central part of the Vlasina microregion accommodates the Vlasina plateau at an altitude of 1000-1300 m, which is the watershed of the rivers Struma (Aegean Sea basin), Jerma and South Morava (Black Sea basin). In the southwest, the Vlasina plateau is bordered by the Vrla River, in the northwest by the Vlasina River, in the northeast by the Jerma River, and in the southeast the Božička River. The Vlasina Lake is located in the center of the Vlasina Plateau. Based on the previously mentioned facts, it can be concluded that the Vlasina microregion is very rich in water resources of the fast mountain rivers, which in turn indicates its great hydropower potential [3]. In the Vlasina microregion exist four large hydropower plants (HPP), Vrla 1, Vrla 2, Vrla 3 and Vrla 4.

## LARGE HYDROPOWER PLANTS

*Hydropower plant "Vrla 1"*



***Fig. 1.*** *HPP "Vrla 1", village Valjavica, 1955 [4]*

HPP "Vrla 1" is located 12 km from Surdulica, near the village Valjavica. HPP

"Vrla 1" uses water from the Vlasina Lake, Vrla River and Gradski Potok. Water from the Vlasina Lake is brought through a pressure tunnel through the entrance building to HPP "Vrla 1" and introduced into turbines. The length of the tunnel is 2065 m, and the pipeline is 1330 m long. The machine building of HPP "Vrla 1" is elliptical in shape and is located underground. The length of the machine building is 68 m, width 13,6 m and height 27 m. HPP "Vrla 1" has four Pelton turbines, four generators and a power of 50.66 MW. HPP "Vrla 1" was installed on November 6, 1955 and produces annually about 95 GWh of electricity. HPP "Vrla 1" produces 0.74 kWh of electricity per cubic meter of water. In the middle rainy year, about $140 \cdot 10^6$ $m^3$ of water passes through HPP "Vrla 1".

The height difference between the Vlasina Lake and HPP "Vrla 1" is 343 m. Command devices are located underground, while transformers and switchyards are located on the plateau next to the hydropower plant. In the machine building of HPP "Vrla 1" there is a command, distribution of 10 kV and 0.4 kV, accumulator batteries and other devices. On the plateau, in front of the hydropower plant, there is a 110 kV distribution plant through which HPP "Vrla 1" is connected with HPP "Vrla 2" and HPP "Vrla 3" and with the power system of Serbia and Bulgaria. When the water from the lake and its tributaries passes through all four hydropower plants "Vrla 1- 4" 1858 kWh of electricity per cubic meter of water is generated [3, 5].

*Hydropower plant "Vrla 2"*



***Fig. 2.*** *HE "Vrla 2", village Bitvrđa, 1954 [5]*

HPP "Vrla 2" is located 7 km from Surdulica near the village Bitvrđa. The HPP "Vrla 1" uses water that passes through the HPP "Vrla 1" and the waters of the rivers Vrla, Bitvrđa and Gradski Potok. HPP "Vrla 2" uses the total water drop between elevation 868 m and 710 m, or 158 m. HPP "Vrla 2" was installed in September, 1954. HPP "Vrla 2" starts with an accumulation basin with a volume of 100 000 $m^3$ of water, just below the outlet waters of HPP "Vrla 1". The accumulation pool was constructed by building a dam over 23 m high and 80.5 m long. The dam is on a rocky ground, with an injected bottom of up to 15 m. The body of the dam is homogeneous, made of slate from the gallery of HPP "Vrla 1" which are firmly packed in layers of 50 cm. On the upstream side is a concrete wall with a reinforced, waterproof screen. Water is brought to the machine building which is above ground, through a tunnel 3568 m long, with a flow of 18 $m^3/s$.

The hydropower plant has two turbines, two generators and a power of 24 MW. HPP "Vrla 2" produces annually about 51 GWh of electricity. In the middle rainy year, $160 \cdot 10^6$ $m^3$ of water passes through HPP "Vrla 2". HPP "Vrla 2" produces 0.34 kWh of electricity per cubic meter of water. Transformers and switchyards are located on the plateau next to the building [3, 5].

*Hydropower plant "Vrla 3"*



***Fig. 3.*** *HPP "Vrla 3", village Masurica, 1955 [5]*

HPP "Vrla 3" is located 2 km from Surdulica near the village Masurica. HPP "Vrla 3" has a gross water drop between

elevation 710 m and 503.6 m, i.e., 206.4 m on the stretch between HPP "Vrla 2" and the machine building located on the right bank of the river Masurica. HPP "Vrla 3" uses water from HPP "Vrla 2", the rivers Romanovska and Masurica. HPP "Vrla 3" was installed in 1955 and comprises two turbines, two generators and has a power of 28.95 MW. It generates about 73 GWh of electricity annually. In the middle rainy year about $195 \cdot 10^6$ $m^3$ of water passes through HPP "Vrla 3". The HPP "Vrla 3" uses an underground basin in order to avoid expensive work on the protection of the above-ground basin from the sediments of the river Vrla. The machine hall of HPP "Vrla 3" is structurally the same as the one in HPP "Vrla 2". In addition to the plant itself, the 110 kV central distribution plant, the 135 kV central command, the central machine workshop, the main warehouse and the vehicle fleet, part of the technical and other professional services are located in HPP "Vrla 3". VF and UKT telephone connection systems are also located there. The HPP "Vrla 3" monitors the work of the entire Vlasina system of hydropower plants through the central command and connects them to the electric power system of Serbia.

The reservoir for water leveling in HPP "Vrla 3" consists of the labyrinths of underground, horizontal and vertical tunnels, total length of 2000 m and capacity of 50000 $m^3$ water. HPP "Vrla 3" generates 0.44 kWh of electricity per cubic meter of water [3, 5].

*Hydropower plant "Vrla 4"*



***Fig. 4.*** *HPP "Vrla 4", villagePolomnear Vladičin Han, 1955 [6]*

HPP "Vrla 4" is located 15 km from Surdulica along the highway in the village of Polom, not far from Vladičin Han. HPP "Vrla 4" uses a water drop of 171 m. Waters from HPP "Vrla 3" and the remaining waters of the Masurica River and some smaller streams pass through HPP "Vrla 4". HPP "Vrla 4" was installedin 1955 and has two turbines, two generators and a power of 24.84 MW. It generates about 68 GWh of electricity annually. In the middle rainy year, $195 \cdot 10^6$ $m^3$ of water passes through HPP "Vrla 4".

HPP "Vrla 4" differs from other Vlasina hydropower plants with a 35 kV switchyard which, in addition to transmission to the central switchyard at HPP "Vrla 3" is connected to the distribution system of Vladičin Han by a low voltage transmission line. This is very important for the secure supply of electricity to the south of Serbia and the electricity system of Serbia.

HPP "Vrla 4" generates 0.33 kWh of electricity per cubic meter of water. Water leveling for HPP "Vrla 4" was solved by widening the canal in Masuričko polje (450 x 100 x 1.75 $m^3$) and thus accumulated 60,000 $m^3$ of water, plus 20,000 $m^3$ using steel canals. With the last utilization in HPP "Vrla 4" all Vlasina and incidental waters after 25 km from the lake go through a beautifully arranged open canal to the South Morava [3, 5].

## TOTAL ANNUAL OUTPUT OF LARGE HYDROPOWER PLANTS

Total annual output of large hydropower plants in the Vlasina microregion in 2019 and 2020 is given in Table 1.

***Tab. 1.*** *The power and total annual output of large hydropower plants in the Vlasina microregion in 2019 and 2020*

| Power plant | Power (MW) | Generation (kWh) | |
|---|---|---|---|
| | | 2019 | 2020 |
| **Vrla 1** | 50.66 | 158 089 499 | 77 623 205 |
| **Vrla 2** | 24 | 34 139 160 | 44 582 010 |
| **Vrla 3** | 28.95 | 53 655 360 | 71 128 860 |
| **Vrla 4** | 24.84 | 44 403 639 | 60 621 120 |
| **Total** | 128.45 | 190 287 658 | 253955195 |

## CONCLUSION

Based on the above, it can be concluded that Vlasina microregion is located in the Southeast Serbia close to the Serbian-

Bulgarian border and belongs to the Vlasina river basin. In the Vlasina microregion are located four large hydropower plants Vrla 1, Vrla 2, vrla 3 and Vrla 4. The power of Vrla 1 is 50.66 MW, Vrla 2 is 24 MW, Vrla 3 is 28.95 MW and Vrla 4 is 24.84 MW. The total power of large hydropower plants in the Vlasina microregion is 128.45 MW. The annual output in 2020 year for Vrla 1 is 77 623 205 kWh, Vrla 2 is 44 582 010 kWh, Vrla 3 is 71 128 860 kWh and Vrla 4 is 60 621 120 kWh. The total output of Vrla1-4 large hydropower plants in the Vlasina microregion are 253 955 195 kWh.

## ACKNOWLEDGEMENT

This paper was done with the financial support of the Faculty of Sciences and Mathematics, University of Niš, Republic of Serbia, and of the Agreement 451-03-68/2022-14/200124 on the realization and financing of scientific research work of the Faculty of Sciences and Mathematics, University of Niš in 2022 by the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia.

## REFERENCE

[1] M. Pavlović, Geographical regions of Serbia 2 - Mountain-valley macroregion, University of Belgrade, Faculty of Geography, Belgrade, 2019.

[2] V. Ranđelović, B. Zlatković, Flora and vegetation of the Vlasina plateau, Faculty of Science and Mathematics, Nis, 2010.

[3] T. M. Pavlović, D. Lj. Mirjanić, D. D. Milosavljević, Electric Power Industry in Serbia and the Republic of Srpska, Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, 2018.

[4] Publication Hydropower System Vlasina, 1946–1957, Special print from the magazine "Elektroprivreda" 1958, double issue 4-5, p. 151-186.

[5] B. Cvetković, Half a Century of Vlasina Hydropower Plants, Electric Power Industry of Serbia, Public Company Djerdap, Surdulica, November 6, 2005.

[6] B. Rajčević, Land water tunnels, Syndicate publishing house "Rad", Belgrade, 1948.

НАПРАВЛЕНИЕ 2

# ЕЛЕКТРОНИКА И СЕНЗОРНА ТЕХНИКА

SESSION 2

# ELECTRONICS AND SENSORS TECHNICS

# A SIMPLE LOW COST FUNCTION GENERATOR CONTROLLED BY ANDROID APPLICATION

**Nikola Žorić[1], Aleksandar Žorić[1], Siniša Ilić[1], Bojan Jovanović[2]**

*[1] Faculty of technical sciences - University of Priština, Serbia*
*[2] Kosovo and Metohija Academy of applied studies-Department Uroševac, Serbia*

**Abstract**

*An elementary, low cost function generator controlled by Android application is described in this paper. The controlled function generator is based on the ESP32 general purpose development board and AD9833 – programmable waveforms generator - module, capable generating frequencies 0 - 12.5MHz of sine, triangle or square wave signal.*

*The Android application is developed using MIT App Inventor – an intuitive, visual programming environment, while the communication between the hardware and application has been based on Bluetooth technology. Such realization significantly reduced the hardware complexity and the price of the device.*

*The realized function generator is unipolar, but it can be bipolar with slightly additional modifications. It was developed for laboratory testing purposes.*

**Keywords:** function generator, bluetooth, MIT App Inventor, ESP32 board, AD9833 programmable function generator, sine wave, Android, direct digital synthesis - DDS.

## INTRODUCTION

Function generator is one of numerous laboratory devices uses for frequency excitation, test equipment, defect detection, semiconductor component testing, equipment testing in cellular and wireless systems, broadcasting, television and radio systems etc [1]. It is almost inevitable device in every laboratory. The standard function generator is a complex device whose price amounts a few hundred dollars.

Some of the standard waveforms produced by the function generator are the sine wave, square wave and triangular wave. The newer function generators can produce additional cardiac pattern wave, Gaussian pulse waves and arbitrary waves [2].

There are mainly two types of function generators - analog and digital [2, 3, 4]. Analog are based on pulse integrated circuits while digital function generators utilize digital technology to generate the waveforms. Most versatile and most widely used technique for digital function generators is to use direct digital synthesis – DDS [1, 2]. DDS uses a phase accumulator, a look-up table containing a digital representation of the waveform, and a DAC [5]. Digital function generators offer high levels of accuracy and stability and also provide a high spectral purity and low phase noise. A DDS based digital function generator can also be swept over a much wider frequency range than an analogue function generator. It can also perform a number of other functions such as phase continuous frequency hopping because of the action of the direct digital synthesizer.

This paper describes a programmable digital function generator with standard outputs, controlled by Android application via bluetooth connection. All of the controls are implemented in the application in order to reduce the cost of the device. The hardware of the device consists of only AD9833 module [5] and ESP32 development board [6].

## HARDWARE ARCHITECTURE

The proposed device is very simple and inexpensive, based on AD9833 versatile, easy to use direct digital synthesis waveform generator on a chip [5]. The output frequency and phase are software programmable,

allowing easy tuning the frequency from 0.1Hz to 12.5MHz. The frequency registers are 28 bits wide. With a 25 MHz clock rate, the frequency resolution of 0.1Hz can be achieved while with a 1MHz clock rate, the AD9833 can be tuned to 4mHz resolution. The AD9833 has a 3-wire SPI serial interface operating at clock rates up to 40MHz and is compatible with DSP and microcontroller standards.

The internal circuitry of the AD9833 direct digital synthesis chip consists of the following main sections: a numerically controlled oscillator (NCO), frequency and phase modulators, SIN ROM, a 10-bit DAC, and a voltage regulator. The DAC generates an output voltage of typically $0.6V_{pp}$. The chip operates with a power supply from 2.3V to 5.5V.

With the addition of one SPI controlled digital potentiometer and an operational amplifier, the AD9833 module board, available on the market, was obtained, Fig. 1.

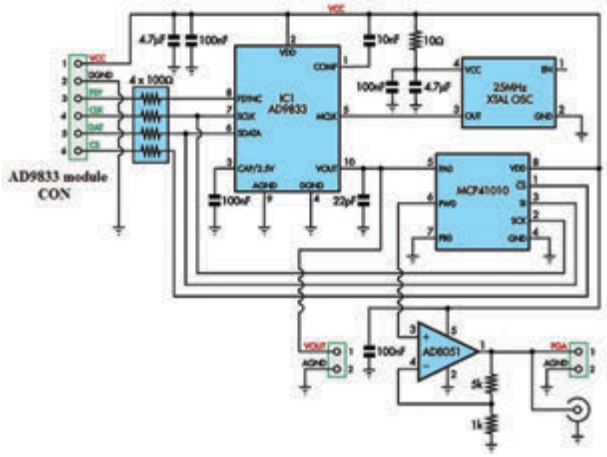



***Fig. 1.*** *AD9833 module*

As can be seen in Fig. 1, the digital potentiometer MCP41010 [8] of 10KΩ-nominal resistance and 256-position has the role of the divider of the output voltage of AD9833. Its output is then amplified six time by operational amplifier AD8051. In such a way the programmable amplitude of the waveform generator was enabled.

The AD9833 module is connected to ESP32 development board which control the module.

ESP32 is a low-cost system on chip (SoC) microcontroller from Espressif Systems [6], It is a successor to ESP8266 SoC and comes in both single-core and dual-core variations of the Tensilica's 32-bit Xtensa LX6 microprocessor with integrated 2.4GHz Wi-Fi and dual-mode bluetooth connectivity. The microprocessor operates at 160 or 240MHz of the clock and performs up to 600 DMIPS. ESP32 integrates an antenna switch, RF balun, power amplifier, low-noise receive amplifier, filters, and power management modules. As such, the entire solution occupies minimal printed circuit board (PCB) area. Typical ESP32 development board, Fig. 2, is based on ESP-WROOM-32 module available in the market.




***Fig. 2.*** *ESP32 development board*

As can be seen from the Fig. 2, the ESP32 board consists of the following:

- ESP-WROOM-32 Module
- 30 I/O pins
- CP2012 USB to UART Bridge IC
- micro–USB connector (for power and programming)
- AMS1117 3.3V voltage regulator IC
- enable button (for reset)
- boot button (for flashing)
- power LED
- user LED connected to GPIO2
- some passive components

The ESP32 board is selected for control the AD9833 module via bluetooth connection of the board and Android application. In the Fig. 3 is shown a way of connection the ESP32 board to the AD9833 module. As can be seen, the communication between the ESP32 and AD9833 module is established by hardware SPI serial communication interface with two slave select lines, one FSY for AD9833 chip and second CS for MCP41010 digital potentiometer.

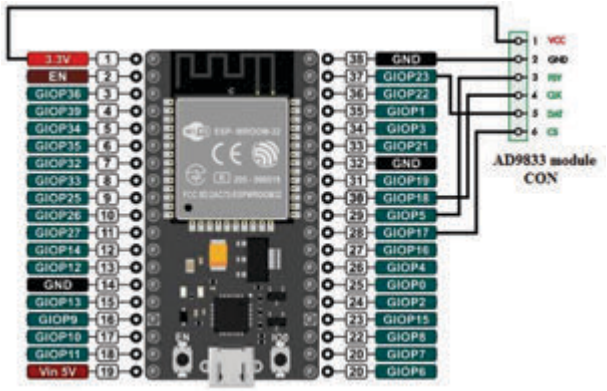



***Fig. 3.*** *Connecting the ESP32 board to the AD9833 module*

The firmware for ESP32 board was developed under Arduino IDE using MD_AD9833.h library for programming AD9833 chip. This library provides access to all on-chip features.

## THE CONTROL APPLICATION

To realization the control Android application was used an intuitive, visual programming environment that allows the creation of fully functional applications for Android phones or tablets, known as MIT App Inventor [7]. Blocks-based tool facilitates the creation of complex applications for significantly less time than traditional programming environments. Owing to that, the created control application is based on a relatively simple graphical code.

The MIT App Inventor consists of the Designer and the Block editor. The Designer serves for the application interface creation, while the Block editor lets the graphical programming of the application by putting blocks together.

In the Fig 4 is shown the appearance of the application interface to control the simple function generator. The application interface was created to Android mobile phone and consists of more buttons, text boxes, labels and one slider. By pressing the '*Connect*' button, after start the application, a list of available bluetooth devices appears. It is necessary to select the ESP32_FG device in order to establish connection between the mobile phone and the function generator. The function generator is initially turned off. After setting the frequency by entering the frequency value and then by pressing the button '*ENTER FREQ.*', it is necessary to select one of the three waveforms by pressing one of the three buttons with images of the waveforms.

The label below the waveforms selection buttons shows the selected waveform while the label below the text box for frequency entering shows the selected frequency value.

The amplitude of the selected waveform can be changed by changing the position of the slider. The amplitude is set in percent of full scale. There is a label with selected amplitude in percent below the slider, also.




***Fig. 4.*** *The function generator application interface on a mobile phone*

When an excitation time limit is desired by the output of the function generator, a countdown timer can be used. This timer automatically turns off the function generator after the time specified in seconds has elapsed. The remaining operation time in seconds is displayed on the label below the button '*ENTER TIME*'. The described functionality does not have to be used if the time input button '*ENTER TIME*' is not used. All text labels in Figure 4 have built-in speech support.

Described application interface is very simple to control the function generator. The main disadvantage is the inability to adjust the offset of the selected waveform but this functionality is not support by the device hardware.



***Fig. 5.*** *Block diagram of the application interface implemented in the MIT App Inventor*

Fig. 5 shows the graphical programming of the bluetooth application interface, implemented in the MIT App Invertor environment and based on the block diagram.

On the left side of the diagram are show blocks for the client initialization before and after list picking of the bluetooth devices. Then follows the blocks corresponding to the function generator off button and to the buttons for selecting one of three waveforms. This blocks send the corresponding data packets to the ESP32 development board via bluetooth, and have text to speech conversion support.

On the right side of the diagram are show two timer blocks used together with '*ENTER TIME*' button for countdown time setting and turning off the generator after this time has expired. Next two blocks related to work with buttons '*ENTER FREQ.*' for frequency entering and amplitude adjustment of the waveforms by the slider, respectively. Last three blocks have the text to speech conversion support.

As can be seen from Fig. 5, the application algorithm is relatively simple, intuitive and clear.

## CONCLUSION

A simple low cost solution of the classic function generator was constructed for laboratory test purposes. The bluetooth based Android application for mobile phone or tablet replaces the necessary hardware box to adjustment the frequency, amplitude and to selection waveforms. For this purpose, an integrated, programmable DDS function generator - AD9833 module board, available on the market, was used as well as an ESP32 system-on-chip development board. Despite the advantages of the proposed solution compared to the conventional devices of this type, its main disadvantages are: inability to adjust waveform offsets and generated unipolar waveforms.

The mentioned disadvantages can be eliminated by slight modification the circuit of the AD9833 module and the Android application interface.

## REFERENCE


[1] HM Bhavanishankar, J Manikandan, "Design and development of low-cost portable function generator", *2021 IEEE Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, pp. 692-696, 2021.

[2] P. Batavale, R. D. Daruwala, "Remotely Configurable Low Cost Arbitrary Function Generator", *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pp. 1-6, 2019.

[3] A. Srinivasulu and D. Pal, "CCII+ based dual square and triangular waveform generator", *2017 9th International Conference on Electronics Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, pp. 1-6, 2017.

[4] Elijah Zac Mathew, Sunil Karamchandanai and T.D. Biradar, "Mobile Function Generator using Android", *International Conference on Advances in Computing Communication & Control (ICAC-3)*, vol. 400, no. 050, April 01, 2015.

[5] AD9833-Programmable waveform generator, *https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9833.pdf*

[6] ESP32 Series, *https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf*

[7] MIT App Inventor, *https://appinventor.mit.edu/explore/designer-blocks*

[8] MCP41XX digital potentiometer with SPI, *https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/11195c.pdf*

# CLARIFICATION OF UTILIZED MEASUREMENT CIRCUITS FOR PIEZOELECTRIC VIBRATIONAL HARVESTERS

**Rumyana Stoyanova, Dimo Kolev, Velimira Todorova**
*Technical University – Gabrovo*

**Abstract**
*Energy harvesters are promising technology from which clean and renewable electrical energy can be extracted to power low-consumption devices, wireless sensors, and a wide range of medical accessories for remote patient monitoring. They are small, portable, independent and can have a major impact on improving the environmental situation. This is leading to increasing research interest in them, as well as improvements to existing models.*

**Keywords:** piezoelectric; harvester; energy; power.

## INTRODUCTION

The aim of this paper is to investigate the possibility of piezoelectric harvesters to generate electrical power. Wireless technologies and microelectronics have led to the proliferation of low-power devices that are powered by batteries or energy harvesting devices. This allows sensors to be installed in remote locations where the electrical grid is difficult to access or unavailable, increasing the need to develop new technologies to make such systems self-powered. This type of energy reduces the risk of further pollution.




***Fig.1*** *Classification of energy harvesting sources*

The possible sources for energy extracting for the EH system are as follows (fig. 1):

- Electromagnetic background- using radio waves;
- Photovoltaic - with specially designed amorphous Si-layer and the new technology Dye Sensitisezed Solar Cell;
- Fluid currents- using different turbine or non-turbine technology.
- Thermoelectric – utilizing the Seebeck and Peltier effects.
- Electrostatic devices (capacitive) – based on charging a variable capacitor with movable plates that are exposed to mechanical vibrations.
- Magnetic inductance.
- Pyroelectricity effects.
- Piezoelectric effects.

## EXPOSITION

### *A. Basic form of Energy Harvesting*

Typically, an energy harvesting system has three parts:

- The energy source which represents the energy from which the electrical power will be scavenged – this energy can be in distributed form (available from the ambient environment, e.g., sunlight, ambient heat, or wind) or external (energy sources that are purposedly deployed, e.g., lightning, human heat or vibrations);
- The harvesting mechanism consists of the structure which converts the ambient energy into electrical energy;
- The load: the device which consumes or stores the electrical output energy.

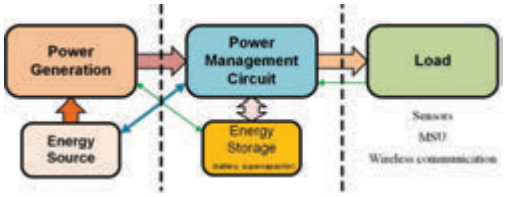
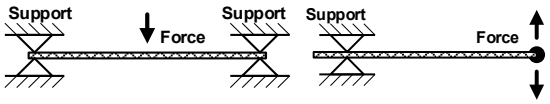



***Fig.2**. Basic Harvesture Structure*

One of more commonly used methods for energy harvesting [1] is the usage of piezoelectric transducers for obtaining the energy that are contained in the mechanical forces that are not of vital necessity for given industrial or more ordinary process. They have curtain advantages- such as relatively high output voltage/mechanical stress ratio: relatively easy methods for manufacturing the active elements. Because of the advantages piezoelectric transducers, they are object for extensive research for mobile micro-electrical autonomous sources [1].

*B. Vibrational Piezoelectric EH*

The vibrational EH system have relatively the biggest gain [3d] without too much dependence on the external factors. The vibrational harvesters usually convert mechanical energy in electrical one using the piezoelectric materials because of the high ratio of conversion distinctive for the piezoelectric effect [2]. Some harvesters are designed for collecting the waste energy of human motion as they are mounted in the part of human clothing or accessories – for example vibrational harvesters are mounted in the shoe soles [3]. Other types are stationary mounted in appropriate locations so the passing vehicles [4] or the pedestrians are to exert mechanical force over them.




a) b)

***Fig. 3**. Typical mounting of vibrational piezoelectric EH*



***Fig. 4**. Vibrational EH mounted in shoe.*

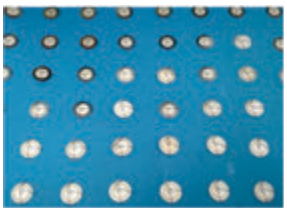


***Fig.5**. Compression EH mounted on a pedestrian power generator walkway.*

*C. Description of piezoelectric vibrational EH*

The vibrational piezoelectric harvester can be considered as a generalized case of beam construction with one or two anchored ends (Fig. 3), described in general by Euler-Bernoulli's beam theory [2]. More often used configuration of the vibrational piezoelectric EH is that of the cantilever type (Fig. 6, b) or the cantilever type with semi-anchored point of inflexion that is like that shown on Fig. 6, a.

The parameters described in Fig. 6 are the length of the beam – $L$, an added tip mass – $M_t$, the electrical load resistance – $R_l$, the voltages over the resistive load respectively for the series and parallel connection cases – $v_{ser}(t)$ and $v_{par}(t)$ [2], because the EH that is shown on Fig. 6 has two active (piezoelectric) layers that are connected with the aim to increase the current density output of the piezoelectric EH system.

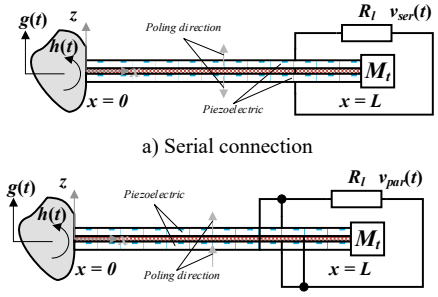



***Fig. 6**. General diagram of EH device with two active layers [2]*

The beam system is typically presumed to be excited due to the motion of its base. Then if the translation and the small rotation of the base are designed by $g(t)$ and $h(t)$, respectively, as shown in Fig. 3, the base motion $w_b(x, t)$ of the beam can be represented as [2, 5]:

$$w_b(x,t) = g(t) + xh(t) \tag{1}$$

The equivalent electromechanical equations governing the mechanical response and the voltage response of a bimorph can be given as [2]:

$$\frac{d^2\eta_r(t)}{dt^2} + 2\zeta_r\omega_r\frac{d\eta_r(t)}{dt} + \omega_r^2\eta_r(t) + \tilde{\theta}_r v(t) = f_r(t), \tag{2}$$

$$C_p^{eq}\frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} = \sum_{r=1}^{\infty}\tilde{\theta}_r\frac{d\eta_r(t)}{dt}, \tag{3}$$

where:

$\tilde{\theta}_r$ – modal electromechanical coupling term;

$C_p^{eq}$ – the equivalent capacitance (depends on the connection between the layers);

$f_r(t)$ – modal mechanical forcing function.

$v(t)$ – voltage across the resistive load;

$\zeta_r$ – mechanical damping ratio;

$\eta_r(t)$ – mechanical modal response;

$\omega_r$ – undamped natural frequency of the $r^{\text{-th}}$ mode.

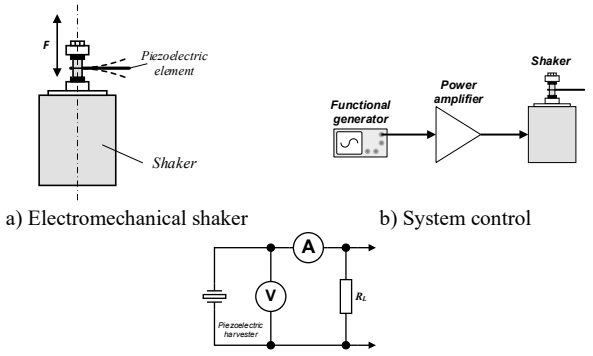
The right part of Eq. 3 is the expression that describes the electrical current that theoretically can be obtained from the harvester. The models usually depict the mechanical stresses that impact the harvester structure through second order partial differential equations (as shown in Eq. 2) [2, 5, 8].

The used second order partial differential equations are suitable to describe the behaviour of the piezoelectric EH system either with continuous external mechanical forces or with brief mechanical pulses. But the problem with a mathematical model based on the equations for vibrational piezoelectric EH systems is that there are some equation constants and variables that are dependent on physical quantities that are indirectly or not at all connected with the main variables that constitute the general mathematical models – for example the temperature in the piezoelectric mediums is not directly included in the describing equations [2, 4].

Thus, the experimental research for this type of devices is strongly recommended.

*D. Experimental setup for piezoelectric vibrational EH*

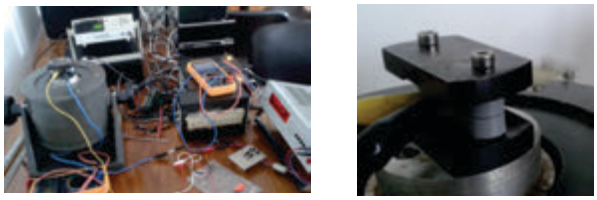
Experimental research is carried out over commercially available piezoelectric harvester type [6], which will guarantee that there is ensured degree of a repeatability for the harvester parameters. The harvester is *S233-H5FR-1107XB* – bimorph structure with series layer connection (former designation *PPA-2014*). An electromechanical shaker with acceleration of $a$ = 5,21 m/s$^2$ is used to imitate the external mechanical stresses (Fig. 4, a) as a functional generator is being used to supply harmonic signal through amplifier to it (Fig. 7, b). The functional generator is used to change the working frequency as its output voltage is constant and have value of 2 V peak-to-peak. The electrical measurement circuit is from *VA* type (Fig. 7, c) that is been maximally simplified for the research purposes. The measurements are done with digital devices that give the corresponding alternating values in Root Mean Square (RMS) form. This form of data representation should be useful because for alternating electric currents and voltages, RMS is equal to the value of the direct current or voltage that produces the same average power dissipation in a constant resistive load. Thus, the power that is being measured in theory should be the actual active power that can be readily used and is the main aim of a harvesting process.




a) Electromechanical shaker b) System control

c) Measurement Circuit

***Fig 7.*** *Initial experimental setup*



a) Research stand b) Working harvester

***Fig. 8.*** *Experimental clamping*

The initial experiment was carried out with the aim of determining the optimal measurement circuit, i.e., between *AV* and *VA* (Fig. 7, c) simple measurement circuits with a follow-up evaluation of the obtainable electrical power. The power output of this type of piezoelectric EH is usually in the range of thousandth of one Watt ([*mW*]) which is a problem of its own. The precise measurement equipment in this value ranges is very rare and usually in these cases the preferred methods for power estimation are indirect ones – usually with the utilization of the measured voltage (as is the case with the electronic load *LD400P* [10]) over beforehand known precise constant load impedance.

The theoretical difference between the *AV* and *VA* types of circuits should be in the values of the obtained voltages and currents as in the *AV* case the currents should be slightly bigger and voltages – slightly less.

*E. Initial experiments with inertial mass*

First batch of experiments are carried out with inertial load of $m = 1{,}13$ g with different values for $R_L$ and frequency $f = 113$ Hz, which is near the resonance frequency for the experimental configuration that is set for the piezoelectric EH. The voltage from function generator was 2,65 V peak-to-peak. The piezoelectric sample is double layered, i.e. it has two active (piezoelectric) layers which will nearly double the output current.

The voltage results were in the expected range, but nevertheless the current values were somewhat strange, because they exceeded the expected values.

TABLE 1. VA CIRCUIT (FIG. 7, C) INITIAL RESULTS

| $R_L$, Ω | 390 | 1000 | 2400 | 5100 | 10000 | 12400 | 24000 | 51000 | 75000 | 100000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_{RMS}$, V | 1,302 | 1,457 | 1,872 | 2,37 | 3,18 | 3,47 | 4,34 | 5,15 | 5,47 | 5,58 |
| $I_{RMS}$, mA | 4 | 3,92 | 3,68 | 3,46 | 3,10 | 2,92 | 2,38 | 1,62 | 1,22 | 1,14 |

Simple calculations are done to verify the obtained results. The values are in RMS format and theoretically the equations for the simple form of the electrical power should be in force:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R_L} = I^2 \cdot R_L \qquad (4)$$

TABLE 2. VA CIRCUIT (FIG. 7, C) INITIAL RESULTS

| | $U_{RMS}$ | $I_{RMS}$ | $P_U$ | $P_I$ | $P_{UI}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $R_L$, Ω | [V] | [mA] | [mW] | [mW] | [mW] |
| 390 | 1,302 | 4 | 4,347 | 6,24 | 5,208 |
| 1000 | 1,457 | 3,92 | 2,123 | 15,366 | 5,711 |
| 2400 | 1,872 | 3,68 | 1,46 | 32,502 | 6,889 |
| 5100 | 2,37 | 3,46 | 1,101 | 61,055 | 8,2 |
| 10000 | 3,18 | 3,1 | 1,011 | 96,1 | 9,858 |
| 12400 | 3,47 | 2,92 | 0,971 | 105,727 | 10,132 |
| 24000 | 4,34 | 2,38 | 0,785 | 135,946 | 10,329 |
| 51000 | 5,15 | 1,62 | 0,52 | 133,844 | 8,343 |
| 75000 | 5,47 | 1,22 | 0,399 | 111,63 | 6,673 |
| 100000 | 5,58 | 1,14 | 0,311 | 129,96 | 6,361 |

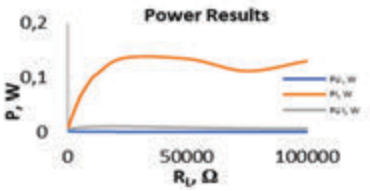


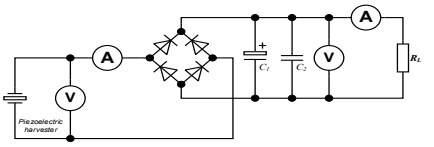

***Fig. 9.*** *Difference between the calculated powers*

The results for the electrical power are so diverging that the assumption for wrong experimental setup is not farfetched. But there is another explanation: the indicated values are for reactance power that is present in the system and is not at all extractable. The process frequency is relatively low (113 Hz) but the piezoelectric element (harvester) that is generating the electrical oscillations has prevailing capacitive features and its internal impedance respectively can be substituted with its reactance in the equivalent circuits as evident in (3) from $C_p^{eq}$.

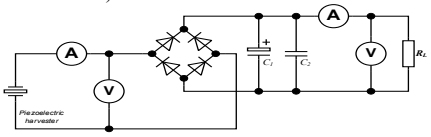
Thus, a rectification of the harvester electrical signal is needed for proper evaluation for the obtainable energy as the rectifier should eliminate the influence of the reactance energy portion. Therefore, the experimental circuit is expanded with the addition of full rectifier bridge.

*F. Experimental circuits with rectifier*

The rectifier full bridge and capacitive elements are added to the experimental circuit as it is shown on Fig. 6 as the diodes are of 1N4148 type and the capacitive elements have the following values: $C_1 = 1$ µF and $C_2 = 10$ nF.




a) VA circuit with rectifier




b) AV circuit with rectifier

***Fig. 10.*** *Experimental setup with bridge rectifier*

The mechanical frequency is 115 Hz and the magnitude of the generator voltage is 2 V peak-to-peak. The experimental setup is divided on alternating part and direct current part and the experimental circuits are for VA and AV type

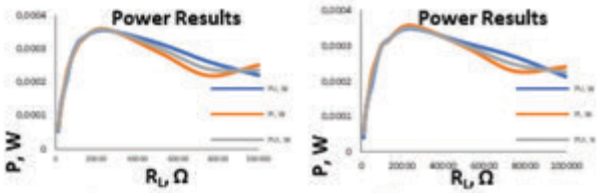
(Fig. 10). Admittedly, part of the energy will be wasted in the rectifier bridge and the capacitance elements, but only the usable part of the electrical energy will be dissipated over the constant electrical load $R_L$.

TABLE 3. VA CIRCUIT WITH RECTIFIER

| | $U_{RMS}$ | $I_{RMS}$ | $P_U$ | $P_I$ | $P_{UI}$ | $U_{DC}$ | $I_{DC}$ | $P_{Udc}$ | $P_{Idc}$ | $P_{UIdc}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $R_L$, Ω | [V] | [mA] | [mW] | [mW] | [mW] | [V] | [mA] | [mW] | [mW] | [mW] |
| 1000 | 1,31 | 2,9 | 1,716 | 8,41 | 3,799 | 0,23 | 0,246 | 0,053 | 0,061 | 0,057 |
| 2400 | 1,62 | 2,76 | 1,094 | 18,28 | 4,471 | 0,58 | 0,228 | 0,14 | 0,125 | 0,132 |
| 5100 | 2 | 2,6 | 0,784 | 34,48 | 5,2 | 1,02 | 0,209 | 0,204 | 0,223 | 0,213 |
| 7500 | 2,33 | 2,44 | 0,724 | 44,65 | 5,685 | 1,43 | 0,189 | 0,273 | 0,268 | 0,27 |
| 10000 | 2,58 | 2,3 | 0,666 | 53,90 | 5,934 | 1,76 | 0,173 | 0,31 | 0,299 | 0,304 |
| 12400 | 2,78 | 2,16 | 0,623 | 57,85 | 6,005 | 2,02 | 0,161 | 0,329 | 0,321 | 0,325 |
| 24000 | 3,4 | 1,2 | 0,482 | 71,00 | 5,848 | 2,92 | 0,122 | 0,355 | 0,357 | 0,356 |
| 51000 | 4,04 | 1,14 | 0,32 | 66,28 | 4,606 | 4,01 | 0,075 | 0,315 | 0,287 | 0,301 |
| 75000 | 4,25 | 0,88 | 0,241 | 58,08 | 3,74 | 4,43 | 0,054 | 0,262 | 0,219 | 0,239 |

TABLE 4. AV CIRCUIT WITH RECTIFIER

| | $U_{RMS}$ | $I_{RMS}$ | $P_U$ | $P_I$ | $P_{UI}$ | $U_{DC}$ | $I_{DC}$ | $P_{Udc}$ | $P_{Idc}$ | $P_{UIdc}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $R_L$, Ω | [V] | [mA] | [mW] | [mW] | [mW] | [V] | [mA] | [mW] | [mW] | [mW] |
| 1000 | 1,3 | 2,9 | 1,69 | 8,41 | 3,77 | 0,2 | 0,245 | 0,04 | 0,060 | 0,049 |
| 2400 | 1,6 | 2,74 | 1,067 | 18,02 | 4,384 | 0,55 | 0,227 | 0,126 | 0,124 | 0,125 |
| 5100 | 1,99 | 2,56 | 0,776 | 33,42 | 5,094 | 0,99 | 0,208 | 0,192 | 0,221 | 0,206 |
| 7500 | 2,3 | 2,42 | 0,705 | 43,92 | 5,566 | 1,39 | 0,188 | 0,258 | 0,265 | 0,261 |
| 10000 | 2,58 | 2,3 | 0,666 | 52,90 | 5,934 | 1,74 | 0,174 | 0,303 | 0,303 | 0,303 |
| 12400 | 2,75 | 2,12 | 0,61 | 55,73 | 5,83 | 1,98 | 0,158 | 0,316 | 0,31 | 0,313 |
| 24000 | 3,38 | 1,72 | 0,476 | 71,00 | 5,814 | 2,9 | 0,122 | 0,35 | 0,357 | 0,354 |
| 51000 | 4,03 | 1,16 | 0,318 | 68,63 | 4,675 | 3,97 | 0,076 | 0,309 | 0,295 | 0,302 |
| 75000 | 4,26 | 0,9 | 0,242 | 60,75 | 3,834 | 4,5 | 0,055 | 0,27 | 0,227 | 0,248 |
| 100000 | 4,39 | 0,82 | 0,193 | 67,24 | 3,6 | 4,62 | 0,049 | 0,213 | 0,24 | 0,226 |




a) VA results b) AV results

***Fig. 11.*** *Experimental results with rectifier 115 Hz*

TABLE 5. AV CIRCUIT WITH RECTIFIER

| | $U_{RMS}$ | $I_{RMS}$ | $P_U$ | $P_I$ | $P_{UI}$ | $U_{DC}$ | $I_{DC}$ | $P_{Udc}$ | $P_{Idc}$ | $P_{UIdc}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $R_L$, Ω | [V] | [mA] | [mW] | [mW] | [mW] | [V] | [mA] | [mW] | [mW] | [mW] |
| 1000 | 1,410 | 0,023 | 1,988 | 0,001 | 0,033 | 0,346 | 0,367 | 0,127 | 0,120 | 0,135 |
| 10000 | 3,510 | 0,019 | 1,232 | 0,004 | 0,067 | 2,770 | 0,279 | 0,773 | 0,767 | 0,778 |
| 51000 | 5,930 | 0,010 | 0,690 | 0,005 | 0,059 | 6,220 | 0,118 | 0,734 | 0,759 | 0,710 |
| 100000 | 6,280 | 0,007 | 0,394 | 0,005 | 0,045 | 6,940 | 0,077 | 0,534 | 0,482 | 0,593 |

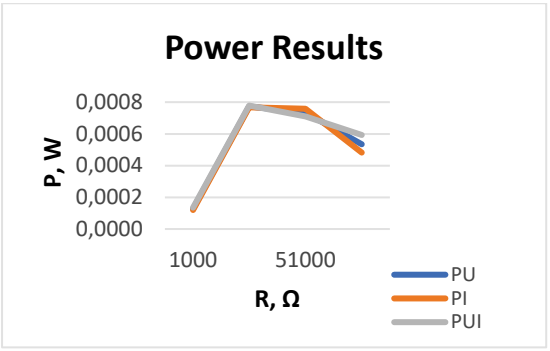



***Fig. 12.*** *Experimental results with rectifier 130Hz*

The mechanical frequency is 130 Hz and the magnitude of the generator voltage is 1V pick-to-pick (fig.12).

The obtained DC energy is much smaller than the indicated one before the rectifier but also there are no signs of heating over the diodes that would indicate more consumption in the rectifier block. But the calculated powers are not noticeably diverging from each other. Thus, it can be assumed that large part of indicated before the rectifier energy is from reactance type and is useless for the harvesting purposes.

It should be mentioned that piezoelectric vibrational harvester is under perfect conditions when being experimented on as the external mechanical force is supplied continuously and the amplitude of the control signal is constant. In real life conditions, the frequency and the magnitude of the mechanical stress will be variables that depend solely on random factors, which will lead to additional decrease in the amount of the obtainable energy

## CONCLUSION

The two types of measuring circuits (namely VA and AV type) can be used for determining the possible limit of the obtainable energy as VA will have slightly higher voltage values and AV type – slightly higher current values. They are generally not so different in regards with the measured values.

The bigger problem is the amount of not usable energy in the experimental circuit (the reactance part). Thus, all measurement circuits for evaluating the energy gain ought to be expanded with full bridge rectifier with the appropriate capacitive elements.

The rectifier will prevent the reactance power to be directed to the electrical load and

therefore will allow to measure the real power output of the piezoelectric vibrational harvester.

The measurement circuits need further study as in the rectifier is presented as ideal (zero impedance when diodes are forward biased and infinity resistance when they are backward biased). Also, there were no experiments over the connection between the values of the capacitive elements and the volume of the obtainable energy.

## REFERENCE


[1] Nurettin S., K. Muammer. Comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. Nano energy, Vol. 80, February 2021, DOI: 10.1016/ j.nanoen.2020.105567.

[2] Erturk A. Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters, PhD dissertation thesis in Engineering Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, 20 November 2009.

[3] H. Wang, A. Jasim, X. Chen, Energy Harvesting Technologies in Roadway, and Bridge for Different Applications – A Comprehensive Review. Applied Energy, Vol. 212 (2018), pp. 1083–1094, ISSN: 0306-2619.

[4] H. Xiong, Piezoelectric Energy Harvesting for Public Roadways. PhD dissertation thesis in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, December 2014.

[5] M. F. Lumentut, I. M. Howard, Electromechanical Finite Element Modeling for Dynamic Analysis of a Cantilevered Piezoelectric Energy Harvester with Tip Mass Offset under Base Excitations. Smart Materials and Structures, 23(9), 2014, 095037, DOI:10.1088/0964-1726/23/9/095037.

[6] Piezo.com (Former Mide Engineering Smart Technology and Piezo Systems), Piezoelectric Energy Harvester: https://piezo.com

# RADIOMETRIC METHOD OF RESEARCHING THE EMISSION PROPERTIES OF BIO-OBJECTS

**Oleksiy Yanenko[1], Kostiantyn Shevchenko[1], Vasyl Kuz[2], Mikhail Prokofiev[3], Sergey Peregudov[1]**

[1] *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*
[2] *Ternopil Ivan Puluj National Technical University*
[3]Vasyl Stus Donetsk National University

**Abstract**

*A radiometric method is proposed for studying the emission (radiative) properties of microbiological objects (microorganisms, colonies of yeast bacteria, fungi, mold, biological tissue samples) in the microwave range. A block diagram of the implementation of the method using the modulation transformation of information signals is proposed. An algorithm and technology for measuring weak emission signals of the objects under study has been developed. The results of experimental studies of the technological process of maturation of hard cheese, accompanied by an increase in emission radiation, are presented. At the same time, the emission coefficient of radiation during 20-80 days of ripening increases by 5-10%, and then decreases almost to zero.*

***Keywords:*** *biological object, emission properties, radiometric system, emission coefficient.*

## INTRODUCTION

The surrounding space (air, water, earth) is filled with various types of microorganisms (bacteria, archaea, fungi, eukaryotes, etc.) [1,2]. Some of these micro-objects are useful and are used in technologies for the production of food products (fermented milk and cheese products, wine, beer to create conditions for fermentation and maturation), medical drugs - for the production of antibiotics and other drugs by bioengineering methods [1,3,4].

At the same time, biologically active substances are used that isolate these micro-objects and accelerate the processes of product formation, improving their quality, color, and appearance. All of the listed processes have their own methods and devices for assessing the degree of technological processes of manufacturing products. They can be classified as classic methods, and the application, in the time interval, can be calculated for tens or more years.

At the same time, the development of radio-electronic technology, the emergence of a new element base contributes to the emergence of new, more modern and accurate methods of controlling technological processes, material properties, the state of biological objects, etc.

The use of such equipment and control methods open up additional opportunities for increasing the sensitivity and accuracy of evaluating the parameters of technological processes.

Such innovations include the creation of highly sensitive microwave radiometers. The integral sensitivity of such equipment reaches $10^{-13}…10^{-15}$W, which contributes to its use for the study of "subtle" processes in materials science, biology, medicine, light and even food industry [5].

## RADIOMETRIC SYSTEMS FOR EVALUATING THE RADIATION CAPACITY OF BIOLOGICAL OBJECTS

The authors of [6] developed a highly sensitive radiometric system for evaluating the emission properties of biological objects.

In fig. 1 shows the structural implementation of the developed radiometric system for measuring weak emission signals of samples of biological objects.

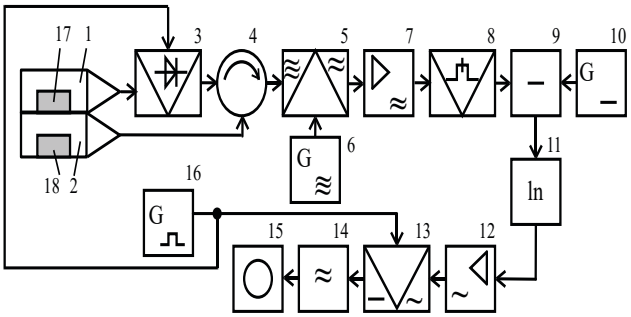



***Fig. 1**. Radiometric system for evaluating emission properties of samples of biological objects*

The radiometric system contains the following functional modules: working 1 and reference 2 waveguide sensors, controllable modulator-splitter 3, circulator 4, mixer 5, microwave local oscillator 6, intermediate frequency amplifier 7, amplitude detector 8, difference signal selection module 9, reference constant voltage source 10, logarithm 11, low-frequency amplifier 12, synchronous detector 13, low-pass filter 14, voltmeter 15, low-frequency multivibrator 16, sample under study 17 and sample-simulator 18.

The working and reference sensors are made in the form of waveguide segments mechanically connected to each other.

## ALGORITHM AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Emissions from the working 1 and reference 2 sensors enter the inputs of the circulator 4. The working sensor is connected to the circulator through a controlled modulator-branch 3, which is controlled by a low-frequency multivibrator 16. Noise signals from the working 1 and reference 2 sensors when the modulator-branch 3 is open and closed are received at the input of the mixer 5 in different half-periods of the control voltage. Their dispersions have the form:

$$\overline{U}_{11}^2 = K_1\left(\overline{U}_{21}^2 + \overline{U}_3^2 + \overline{U}_4^2\right), \quad (1)$$

$$\overline{U}_{12}^2 = K_1\left(\overline{U}_{22}^2 + \overline{U}_4^2\right), \quad (2)$$

where $\overline{U}_{21}^2$, $\overline{U}_3^2$, $\overline{U}_4^2$ – dispersion, respectively, radio-thermal, bio-informational radiation of the studied sample and the inherent noise of the mixer; $K_1$ – transmission coefficient of the waveguide; $\overline{U}_{22}^2$ is the dispersion of thermal radiation of a simulated sample, which is an object with "inanimate" bacteria.

The amplitude-modulated signal is formed during the periodic operation of the modulator-branch 3 with the frequency of the multivibrator $\Omega$ at the out of the mixer 5:

$$M_1 = \frac{\overline{U}_{11}^2 - \overline{U}_{12}^2}{\overline{U}_{11}^2 + \overline{U}_{12}^2} = \frac{\overline{U}_3^2}{2\left(\overline{U}_4^2 + \overline{U}_{21}^2\right)}. \quad (3)$$

With the help of a microwave signal of the local oscillator 6, the emission radiation spectrum is transferred to the intermediate resonant frequency $\omega_0$, to which the intermediate frequency amplifier 7 is tuned.
After heterodyne conversion and detection by the amplitude detector 8 in different half-cycles of the control voltage, video pulses are formed, the amplitudes of which after functional conversion in the subtraction 9 and logarithmization modules in 11 take the form:

$$U_{51} = S_3\, ln\left\{K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 K_3\left[\overline{U}_{21}^2(\omega_0) + \overline{U}_3^2(\omega_0)\right]\right\}, \quad (4)$$

$$U_{52} = S_3\, ln\left[K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 K_3 \overline{U}_{22}^2(\omega_0)\right], \quad (5)$$

where $S_1$, $S_2$, $S_3$ – respectively, the steepness of heterodyne, quadratic and logarithmic transformations; $K_2$ – the gain factor at the intermediate frequency; $K_3$ – the transfer coefficient of the subtraction module.

Decomposing one by one the component of the sequence of video pulses (4) and (5) into an exponential series, it is easy to see that the reading of the radiometric system indicator $(\eta)$ are proportional to the ratio of bioinformatic and radiothermal radiation powers:

$$\eta = \frac{K_0 \overline{U}_3^2(\omega_0)}{\overline{U}_{21}^2(\omega_0)}, \quad (6)$$

where $\eta$ – emission factor; $K_0$ - coefficient of proportionality.

The obtained ratio (6) is a desirable measure of emission properties of biological objects and tissues.

At the same time, the power ratio does not depend on the transmission properties of the connecting sensors and waveguides, the instability of the steepness of the heterodyne conversion of the compared signals, the instability of the gain of the selective amplifier, the sensitivity of the amplitude detector and the gain of the subtraction module.

Coefficient of proportionality $K_0$ depends only on the stability of low-frequency radiometric system modules and is determined in the calibration process by samples of microorganisms, the emissivity of which is estimated based on the results of biochemical studies.

## STUDY OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MAKING HARD CHEESES

The process of cheese production belongs to dynamic processes with a high level of uncertainty, which combines many physical and chemical processes. During the production of cheeses, phases of heating and mechanical mixing are distinguished, as a result of which a curd (Calie) is formed, which is separated from the liquid part by pressing, and then aged for a certain time, depending on the variety. To ensure guaranteed safe and high-quality cheese products, it is necessary to monitor changes in the main quality indicators, both organoleptic, physicochemical, and microbiological [7]. The duration of maturation of natural rennet cheeses is 20…60 days, and their storage temperature must be maintained with an error of no worse than ±1°C.

The ripening stage of cheeses is determined by the action of milk enzymes, rennet, lactic acid and other microflora. Under their influence, the processes of hydrolysis of proteins, milk fat, lactic acid and propionic acid fermentation take place in the curd mass. The process of product maturation is accompanied by an increase in the number of spoilage agents. At the same time, it is necessary to monitor the condition of the cheese and remove the mold in time. One of the indicators of this process is the emissive (radiothermal) radiation of the cheese mass in the microwave range.

A certified radiometric system with sensitivity was used to study the cheese ripening process $1 \cdot 10^{-14}$ W. A study of 5 cheese samples was conducted over a period of 80 days at a frequency of 50 GHz. In the course of the study, measurements of weak emission radiation were carried out every day.

Experimental radiometric studies of the technological process of hard cheese ripening have shown that this process is accompanied by an increase in emission radiation. Emission factor $\eta$ at the same time, it increases to 0.05...0.1, which is 5…10% of radio-thermal radiation during 20…80 days of ripening.

Excessive aging of cheeses is accompanied by a decrease in emissive radiation to almost 1%. The consequence of this is a significant deterioration of the taste properties and smell of cheese.

A simulated sample for research was prepared from biological cells of the same mass as the studied sample. Preparation of the protein in the simulated sample was carried out by heating it to a temperature of 80...90°C, at which denaturation of the protein of the living substance occurs.

Additional heat generation associated with biochemical processes in materials and tissues with living protein leads to a slight increase in the temperature of the working sensor. Thanks to the good thermal contact of sensors 1 and 2, the temperatures of the working and reference sensors are equalized. In the same way, the inconstancy of the influence of the external temperature on the level of radiothermal radiation of the tested and simulated samples is compensated.

## CONCLUSIONS

1. Conducting experimental radiometric studies of the technological process of ripening hard cheese showed that this process is accompanied by an increase in emission radiation.

2. Emission factor $\eta$ at the same time, it increases to 0.05...0.1 (5-10% of radio-thermal radiation) during 20-80 days of ripening.

3. Further aging of the cheese leads to a significant deterioration of some of its taste

qualities, which is accompanied by a decrease in the emission coefficient to 0.01 (less than 1% of radiothermal radiation), and further to zero. The latter indicates a decrease in the number of living microorganisms in the product and the end of its ripening stage.

4. The radiometric method of evaluating the emission properties of cheese products can act as a test method when launching new types, as well as a control (verification) method in sustainable technologies.

## REFERENCE


[1] Pert S. Dzh. Osnovy kul′tyvyrovanyya mykroorhanyzmov. Moskva: Myr, 1978- 332 p.

[2] Kondratyuk T.A., Kalinichenko A.V. Mikroskopichni hryby v prymishchennyakh bahatopoverkhovoho budynku v Kyyevi// Visnyk L′vivs′koho universytetu – Seriya biolohichna, 2013.- 61: 30.

[3] Bylay V.Y. Byolohychesky aktyvnye veshchestva- produtsenty antybyotykov.- Kyev: Naukova dumka, 1965-266 p.

[4] Bylay V.Y, Bylay T.Y., Musych E.H. Transformatsyya tsellyulozy hrybamy.- Kyev: Naukova dumka, 1982.- 296 p.

[5] Kutsenko V. P. Radiometrychnyy NVCH-kontrol′ vlastyvostey materialiv / V. P. Kutsenko, YU. O. Skrypnyk, M. F. Trehubov, K. L. Shevchenko, O. P. Yanenko — Donets′k: IPSHI «Nauka i osvita», 2012. — 348 p.

[6] Patent №33222 A (Ukraine) Mikrokhvyl′ovyy prystriy dlya analizu emisiynykh vlastyvostey zhyvoho bilka/ Skrypnyk YU.O., Shevchenko K.L., Tsymbalyuk V.I.- Byul.№1-2001.

[7] I.H. Vlasenko, T.V. Semko, S.V. Hyrych. Innovatsiyi u vyrobnytstvi tverdykh syriv – Vinnytsya, RVV VTEI KNTEU, 2018. – 144 p.

# MAXIMUM POWER POINT TRACKING BASED ON PERTURB AND OBSERVATION ALGORITHM COMBINED WITH AQUILIA OPTIMIZER ALGORITHM FOR THERMOELECTRIC GENERATORS

**Mehmet Ali Üstüner[1], Hayati Mamur[1], Sezai Taşkın[1]**

[1] *Manisa Celal Bayar University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Manisa, TURKIYE*

**Abstract**

*Since the efficiency of thermoelectric generators (TEG) used to convert waste heat into electrical energy is low, converters with maximum power point tracking (MPPT) algorithms are used in such systems. In this study, a hybrid AO-P&O MPPT algorithm is developed with conventional Perturb & Observe (P&O) and Aquila Optimizer (AO) algorithms to maximize the power of a TEG. For the studies, a TEG model is designed in the MATLAB/Simulink environment and the performance of the hybrid AO–P&O algorithm is tested. The power of the designed TEG model is 57 W, and the internal resistance value is 7.3 Ω when the cold surface temperature is 30°C and the hot surface temperature is 200°C. When using only P&O, the power obtained is 54.53 W, while using the hybrid AO–P&O, 54.87 W is obtained. As a result of the study, it is seen that the hybrid AO–P&O algorithm increases the TEG MPPT value by 0.596%.*

**Keywords:** Aquila optimizer, hybrid MPPT, thermoelectric generator, maximum power point tracking

## INTRODUCTION

The possibility of renewable and sustainable energy sources being the main energy policy in the future will necessitate the efficient implementation of these source [1]. Therefore, waste heat recovery systems show promise in reducing energy waste [2]. One of the technologies used for this purpose is thermoelectric generators (TEGs). TEGs are semiconductor devices that work with the Seebeck effect and convert the temperature difference between their surfaces into electrical energy [3]. Since low efficiency is the biggest disadvantage of TEG systems, TEGs must be operated at near full capacity [4]. Full capacity operation of TEGs is related to taking maximum power from TEGs [5]. Therefore, maximum power point tracking (MPPT) methods embedded in DC-DC converter applications are used to capture the maximum power point (MPP) of a TEG system [6].

The P&O algorithm is the simplest, cost-effective and most widely used MPPT algorithm among MPPT methods. However, the oscillation problem around the MPP and its rapid effect from the suddenly changing environmental conditions led the researchers to develop this algorithm [7]. Among the developed algorithms, metaheuristic algorithms used together with P&O draw attention. These algorithms, designed as hybrids with P&O, include algorithms such as ant-colony optimization (ACO) [8], Fireworks algorithm (FA) [9], learning automata (LA) [10], and genetic algorithm (GA) [11].

In this study, the AO algorithm together with the P&O algorithm is used as a hybrid MPPT method. The step size is used as a constant in the P&O algorithm. In the hybrid AO-P&O method, the step size adjustment of the P&O algorithm is optimized by the AO.

## THERMOELECTRIC GENERATORS

The electrical equivalent circuit of the TEG consists of a temperature dependent voltage source and an internal resistor $R_{int}$ as seen in **Figure 1**. The load is connected to supply power from $R_L$, TEG. When this load value and the internal resistance of the TEG are equal ($R_{int} = R_L$), the power transmitted from the TEG reaches the maximum power point (MPP)

[12]. As the load value changes, the power value transmitted from the TEG decreases.

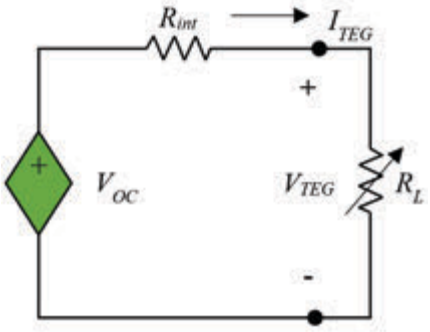



***Fig. 1.*** *Electrical equivalent circuit of TEG*

When the power value delivered from the TEG is at the MPP point, the open circuit voltage and short circuit current are at their half values as described below:

$$V_{MPP} = V_{OC}/2 \text{ and } I_{MPP} = I_{SC}/2 \quad (1)$$

where, $V_{MPP}$ and $I_{MPP}$ are voltage (V) and current (A) at maximum power point, respectively. $I_{SC}$ is the short-circuit current (A). With these values, MPP can be determined. The current value passing through the TEG is given below:

$$I_{TEG} = V_{OC}/(R_{int} + R_L) \quad (2)$$

where, $I_{TEG}$, $R_{int}$, and $R_L$ are TEG current (A), TEG internal resistance (Ω), and load resistance (Ω), respectively. The power delivered from the TEG depending on the load resistance and internal resistance is as follows:

$$P = \frac{V_{OC}^2}{(R_{int} + R_L)^2} \cdot R_L \quad (3)$$

where, $P$ is the power (W) generated from the TEG. As can be seen from Equation 3, the power produced from the TEG depends on the internal resistance of the TEG, $R_{int}$ and the load resistance connected to the TEG, $R_L$. The MPPT methods are used with a converter to deliver maximum power from the TEG by equalizing the load resistance to the internal resistance of the TEG. This synchronization is done with the duty cycle sent to the switching element of the converter by the MPPT algorithm.

## METHOD

In this study, a hybrid MPPT method is developed using a metaheuristic algorithm, AO, in order to obtain maximum power from TEGs. In the northern hemisphere, the Aquila is one of the most popular raptors [13]. The Aquila optimizer (AO) arrives at the conclusion by modeling the hunting methods of Aquila [14]. The AO algorithm flowchart is shown in **Figure 2**. The hunting methods of the golden eagle can be expressed in four steps: high soar with a vertical stoop, contour flight with short glide attack, a low flight with a slow descent attack, and walking and grab prey.

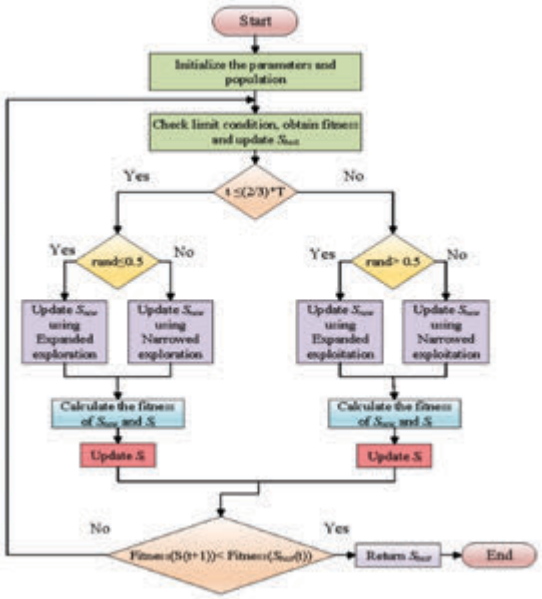



***Fig. 2.*** *Flowchart of aquila optimizer*

**Table 1** shows the properties of the TEG system designed for simulation studies in this study. Since the efficiency of TEG systems used for waste heat recovery is low, it is very important to use an MPPT control algorithm. MPPT is a control method used to achieve maximum power in power generation systems.

***Table 1.*** *Properties of TEG system*

| Characteristics | TEG system |
|---|---|
| Output Power at MPP ($P_{MPP}$) | 57 W |
| Output Voltage at MPP ($V_{MPP}$) | 20.5 V |
| Output Current at MPP ($I_{MPP}$) | 2.8 A |
| Open circuit voltage ($V_{OC}$) | 41 V |
| Short circuit current ($I_{SC}$) | 5.61 A |
| Internal Resistance | 7.3 Ω |
| Hot-side temperature | 200°C |
| Cold-side temperature | 30°C |

MPPT algorithms adjust the duty cycle of the converter switching element in a TEG system consisting of TEG, converter, and load. In this work, a hybrid MPPT algorithm named AO-P&O is developed to monitor the maximum power, and a boost converter designed to match the impedance is used. Firstly, the traditional P&O MPPT algorithm is used in the study. The step size of the P&O algorithm is used as 0.001. Then, the metaheuristic algorithm AO is adapted for MPPT. Finally, the AO algorithm and the P&O algorithm are developed as a hybrid. In the developed AO-P&O algorithm, AO is used to optimize the step size of the P&O. Thus, instead of fixed step size, the step size is continuously calculated according to the changing conditions in the dynamic system. Ultimately it helps to improve MPPT performance. The performance of the developed hybrid algorithm is compared with the traditional P&O algorithm and the AO algorithm.

## RESULTS

In this study, three different simulations are made for the hot surface temperature of 120°C, 200°C, and 160°C by keeping the cold surface temperature of TEG constant at 30°C. When the hot surface temperature rises and falls, the response and performance of the algorithms are observed. **Table 2** shows the maximum power values obtained with AO, P&O, and hybrid AO-P&O algorithms. Also in **Figure 3**, there is a graphical comparison of the powers obtained by the algorithms.

***Table 2*** *Powers obtained by MPPT algorithms from TEG for different temperature difference values*

| Algorithm | $T_C$=30°C, $T_H$=120°C | $T_C$=30°C, $T_H$=200°C | $T_C$=30°C, $T_H$=160°C |
|---|---|---|---|
| AO | 16.65 W | 51.64 W | 32.96 W |
| P&O | 18.08 W | 54.53 W | 35.16 W |
| AO-P&O | **18.16 W** | **54.87 W** | **35.36 W** |

The powers obtained by AO, P&O, and hybrid AO-P&O algorithms from TEG are 16.65 W, 18.08 W, and 18.16 W, respectively, at $T_C = 30°C, T_H = 120°C$ conditions. They give results as 51.64 W, 54.53 W, 54.87 W under $T_C = 30°C, T_H = 200°C$ conditions, and 32.96 W, 35.16 W, 35.36 W under $T_C = 30°C, T_H = 160°C$ conditions. As can be seen, AO gives the worst results and is quite inadequate as a stand-alone MPPT algorithm. When the MPPT efficiencies are calculated using the data in Table 1, the MPPT efficiency of the AO, P&O, and hybrid AO-P&O algorithms is 90.597%, 95.667%, and 96.263%, respectively.

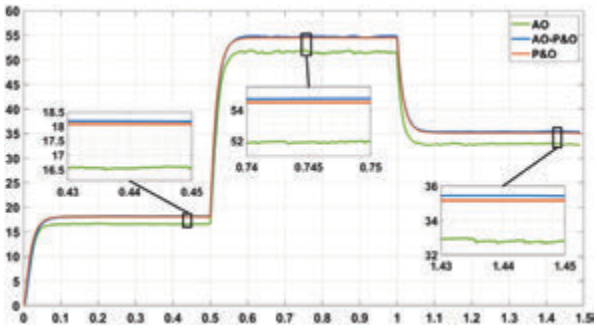



***Fig. 3*** *Comparison of AO, P&O and hybrid AO-P&O MPPT algorithms*

## CONCLUSION

Energy efficiency is one of the most important issues of recent times. Therefore, MPPT algorithms used to obtain maximum power from TEGs used in waste heat recycling are also being developed day by day. Metaheuristic algorithms, which have increased in number in recent years, have recently been used as MPPT methods. In this study, the results of the AO algorithm, which is a metaheuristic algorithm, when used as an MPPT method are investigated. Like other metaheuristic algorithms, AO, which is based on multiple iteration methods, cannot produce successful results when adapted as a stand-alone MPPT method. However, when used as a hybrid method together with the conventional P&O algorithm, which is well known as the MPPT method, it appears to provide 0.596% better MPPT efficiency than the conventional P&O. It is a possible field of study that the more powerful metaheuristic algorithms in the literature are used as hybrid methods, and they have the capacity to increase the performance of MPPT methods.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Research Project Coordination Unit of The Manisa Celal Bayar University (Project Number: 2022-012).

## REFERENCES


[1] A. M. Omer, 'Focus on low carbon technologies: The positive solution', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 9, pp. 2331–2357, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.04.015.

[2] L. S. Hewawasam, A. S. Jayasena, M. M. M. Afnan, R. A. C. P. Ranasinghe, and M. A. Wijewardane, 'Waste heat recovery from thermo-electric generators (TEGs)', *Energy Reports*, vol. 6, pp. 474–479, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2019.11.105.

[3] A. R. M. Siddique, S. Mahmud, and B. V. Heyst, 'A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 730–744, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.177.

[4] M. R. A. Bhuiyan, H. Mamur, M. A. Üstüner, and Ö. F. Dilmaç, 'Current and Future Trend Opportunities of Thermoelectric Generator Applications in Waste Heat Recovery', *Gazi University Journal of Science*, pp. 1–1, Dec. 2022, doi: 10.35378/gujs.934901.

[5] H. Mamur, M. A. Üstüner, and M. R. A. Bhuiyan, 'Future perspective and current situation of maximum power point tracking methods in thermoelectric generators', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, p. 101824, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101824.

[6] S. Twaha, J. Zhu, Y. Yan, B. Li, and K. Huang, 'Performance analysis of thermoelectric generator using dc-dc converter with incremental conductance based maximum power point tracking', *Energy for Sustainable Development*, vol. 37, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.esd.2017.01.003.

[7] M. Abdel-Salam, M.-T. El-Mohandes, and M. Goda, 'An improved perturb-and-observe based MPPT method for PV systems under varying irradiation levels', *Solar Energy*, vol. 171, pp. 547–561, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.06.080.

[8] K. Sundareswaran, V. Vigneshkumar, P. Sankar, S. P. Simon, P. S. R. Nayak, and S. Palani, 'Development of an Improved P O Algorithm Assisted Through a Colony of Foraging Ants for MPPT in PV System', *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 1, pp. 187–200, Feb. 2016, doi: 10.1109/TII.2015.2502428.

[9] C. Manickam, G. P. Raman, G. R. Raman, S. I. Ganesan, and N. Chilakapati, 'Fireworks Enriched P O Algorithm for GMPPT and Detection of Partial Shading in PV Systems', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 6, pp. 4432–4443, Jun. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2604279.

[10] S. Sheik Mohammed, D. Devaraj, and T. P. Imthias Ahamed, 'A novel hybrid Maximum Power Point Tracking Technique using Perturb & Observe algorithm and Learning Automata for solar PV system', *Energy*, vol. 112, pp. 1096–1106, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.024.

[11] A. Harrag and S. Messalti, 'Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1247–1260, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.05.003.

[12] M. F. Remeli, L. Tan, A. Date, B. Singh, and A. Akbarzadeh, 'Simultaneous power generation and heat recovery using a heat pipe assisted thermoelectric generator system', *Energy Conversion and Management*, vol. 91, pp. 110–119, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.001.

[13] L. Abualigah, D. Yousri, M. Abd Elaziz, A. A. Ewees, M. A. A. Al-qaness, and A. H. Gandomi, 'Aquila Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm', *Computers & Industrial Engineering*, vol. 157, p. 107250, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107250.

[14] M. Hussan *et al.*, 'Aquila Optimization Based Harmonic Elimination in a Modified H-Bridge Inverter', *Sustainability*, vol. 14, p. 929, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14020929.

# EFFECT OF LOAD VARIATIONS ON MAXIMUM POWER POINT TRACKING WITH INCREMENTAL CONDUCTANCE METHOD FOR NON-ISOLATED BOOST CONVERTERS IN THERMOELECTRIC GENERATORS

**Mehmet Ali Üstüner[1], Hayati Mamur[2], Sezai Taşkın[3]**

*[1,2,3]Manisa Celal Bayar University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Manisa, TURKIYE*

**Abstract**

*The efficiency of thermoelectric generators (TEGs) used to convert waste heat into electrical energy is low. Therefore, TEGs are powered by converters with embedded maximum power point tracking (MPPT) algorithms. However, depending on the converter used, the operation of the MPPT algorithms may be adversely affected by the load connected to the converter. Therefore, it is important to know the lower and upper limit values of the load used. In this study, a thermoelectric generator (TEG) model and a non-isolated boost converter model are designed in MATLAB/Simulink environment and the monitoring of the maximum power point (MPPT) according to the connected load value is investigated. The incremental conductance (INC) MPPT algorithm is used for MPPT. MPPT does not occur until the load resistance of the boost converter is equal to the internal resistance TEG. MPPT can be performed if the load resistance is greater than or equal to the internal resistance value. For very high values of the load resistance of the boost converter, a decrease in MPPT performance is observed. Finally, it is appropriate that the load resistance connected to the TEG system should be up to three times the TEG internal resistance, provided that its value is not less than the TEG internal resistance.*

**Keywords:** Thermoelectric generator, Maximum power point tracking, Boost converter, Load limits

## INTRODUCTION

The possibility of renewable and sustainable energy sources being the main energy policy in the future will necessitate the efficient implementation of these sources [1]. Therefore, waste heat recovery systems show promise in reducing energy waste [2]. One of the technologies used for this purpose is thermoelectric generators (TEGs). TEGs are semiconductor devices that work with the Seebeck effect and convert the temperature difference between their surfaces into electrical energy [3]. Since low efficiency is the biggest disadvantage of TEG systems, TEGs must be operated at near full capacity [4]. Full capacity operation of TEGs is related to taking maximum power from TEGs [5]. Therefore, maximum power point tracking (MPPT) methods embedded in DC-DC converter applications are used to capture the maximum power point (MPP) of a TEG system [6]. In addition to the temperature difference and material properties, another parameter that plays an important role in the amount of power produced is the load used in the system.

According to the maximum power theorem, the MPP value is obtained by matching the TEG internal resistance with the load resistance [7]. Impedance matching occurs when the duty cycle of the boost converter connected between the TEG and the load is adjusted with MPPT algorithms [8].

Attar et al. [9], conducted a study to find the optimum electrical load resistance in TEG systems without a boost converter with an embedded MPPT. Dileep and Singh [10] drew attention to the connection between converters and load resistors. However, although many studies have been done using DC-DC converters and load resistors, the relationship between selected load resistors, converter and input impedance is not mentioned. Although

not seen in many studies, parameters such as internal resistance are hidden in other parameters and are used indirectly. In many studies on TEG systems and MPPT algorithms in the literature, fixed loads are generally used when evaluating TEG efficiency and MPPT performances, and no information is given about why this load value is chosen. As a result, in studies carried out under different load conditions, the limits of the load resistance value must be determined according to the converter planned to be used. This can only be accomplished by considering the converter formulation and input impedance. This study highlights the considerations in selecting the load resistor used to deliver maximum power from the TEG system with a step-up converter with embedded MPPT algorithms and determines the limits of the load resistance.

## THERMOELECTRIC GENERATORS

The electrical equivalent circuit of the TEG consists of a temperature dependent voltage source and an internal resistor $R_{int}$ as seen in **Figure 1**. The load is connected to supply power from $R_L$, TEG. When this load value and the internal resistance of the TEG are equal ($R_{int} = R_L$), the power transmitted from the TEG reaches the maximum power point (MPP) [11]. As the load value changes, the power value transmitted from the TEG decreases.

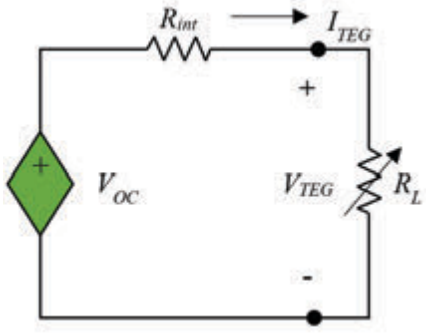



***Fig. 1.*** *Electrical equivalent circuit of TEG*

When the power value delivered from the TEG is at the MPP point, the open circuit voltage and short circuit current are at their half values as described below:

$$V_{MPP} = V_{OC}/2 \text{ and } I_{MPP} = I_{SC}/2 \qquad (1)$$

where, $V_{MPP}$ and $I_{MPP}$ are voltage (V) and current (A) at maximum power point, respectively. $I_{SC}$ is the short-circuit current (A). The MPP can be determined with these values. The current value passing through the TEG is given below:

$$I_{TEG} = V_{OC}/(R_{int} + R_L) \qquad (2)$$

where, $I_{TEG}$, $R_{int}$, and $R_L$ are TEG current (A), TEG internal resistance (Ω), and load resistance (Ω), respectively. The power delivered from the TEG depending on the load resistance and internal resistance is as follows:

$$P = \frac{V_{OC}^2}{(R_{int} + R_L)^2} \cdot R_L \qquad (3)$$

where, $P$ is the power (W) generated from the TEG. As can be seen from Equation 3, the power produced from the TEG depends on the internal resistance of the TEG, $R_{int}$ and the load resistance connected to the TEG, $R_L$. The MPPT methods are used with a converter to deliver maximum power from the TEG by equalizing the load resistance to the internal resistance of the TEG. This synchronization is done with the duty cycle sent to the switching element of the converter by the MPPT algorithm. Therefore, as the load connected to the converter changes, the value of the duty cycle sent to the switching element also changes. The important point here is that the switching element works in harmony with the duty cycle. Therefore, it is desirable for the duty cycle to operate the switching element stably. Therefore, the load connected to the converter must also be within certain limits.

## METHOD

**Table 1** shows the properties of the TEG system designed for simulation studies in this study. Since the efficiency of TEG systems used for waste heat recovery is low, it is very important to use an MPPT control algorithm.

***Table 1.*** *Properties of TEG system*

| Characteristics | TEG system |
|---|---|
| Output Power at MPP ($P_{MPP}$) | 57 W |
| Output Voltage at MPP ($V_{MPP}$) | 20.5 V |
| Output Current at MPP ($I_{MPP}$) | 2.8 A |
| Open circuit voltage ($V_{OC}$) | 41 V |
| Short circuit current ($I_{SC}$) | 5.61 A |
| Internal Resistance | 7.3 Ω |
| Hot-side temperature | 200°C |
| Cold-side temperature | 30°C |

MPPT algorithms adjust the duty cycle of the converter switching element in a TEG system consisting of TEG, converter, and load. In this study, INC MPPT algorithm is used to track the maximum power, and a designed boost converter employed to match the impedance The flowchart of INC algorithm is given in **Figure 2**. [12].

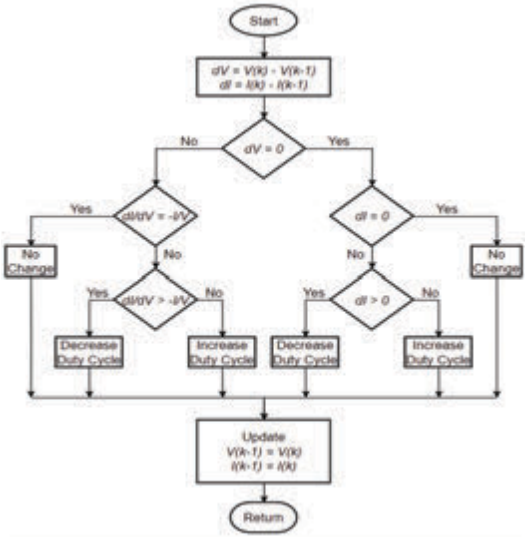



***Fig. 2*** *Incremental conductance algorithm*

## RESULTS

**Table 1** shows that the maximum power that can be obtained from the TEG system is 57 W and the total internal resistance of the TEG is 7.3 Ω. Since maximum power can be obtained when the load resistance is equal to the internal resistance, it is clear that maximum power cannot be obtained at load resistance values other than 7.3 Ω without using a converter.

Simulations are made for 14 different load resistance cases. Each case represents different load resistances which are 1 Ω, 3 Ω, 5 Ω, 7.3 Ω, 9 Ω, 11 Ω, 13 Ω, 15 Ω, 20 Ω, 25 Ω, 30 Ω, 40 Ω, 50 Ω, 60 Ω. The behavior of MPPT algorithms is examined against these load resistors that change in 0.5 seconds. In the first four cases where the load resistance is less than the internal resistance, the MPPT algorithms should try to achieve the maximum output voltage and maximum power at the converter output by producing the minimum duty cycle. The MPPT algorithm produces a minimum duty cycle since the converter cannot perform impedance matching, and power is obtained through the resistor thanks to the voltage directly shared on the load.

The power values obtained from TEG over the load resistor of the INC algorithms and the duty cycle values produced by the algorithms are shown in **Figure 3**. Furthermore, the delivered power from the TEG values and the duty cycles generated by the MPPT algorithm are given numerically in **Table 2**. As can be seen, the tracking efficiency and the transferred power are highest when the load resistance value is slightly higher than the internal resistance value. As the value of the load resistor increases, the obtained power and tracking efficiency decrease.

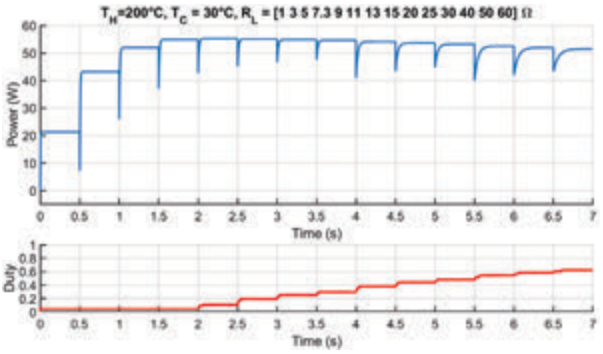



***Fig. 3*** *The power delivered over the load resistor (1–60 Ω) by the INC algorithm and the duty cycle produced by the algorithm.*

***Table 2*** *The power obtained from the TEG, tracking efficiency of INC MPPT algorithm ($\eta_{MPPT}$%), and produced duty cycle by INC MPPT algorithm for $R_L$ = 1– 60 Ω*

| | $R_L$ (Ω) | Power (W) | $\eta_{MPPT}$ (%) | Duty cycle |
|---|---|---|---|---|
| Case 1 | 1 | 21.3 | 37.37 | 0.05 |
| Case 2 | 3 | 43.21 | 75.81 | 0.05 |
| Case 3 | 5 | 51.94 | 91.12 | 0.05 |
| Case 4 | 7.3 | 54.90 | 96.32 | 0.05 |
| Case 5 | 9 | 55.23 | 96.90 | 0.108 |
| Case 6 | 11 | 55.08 | 96.63 | 0.192 |
| Case 7 | 13 | 54.88 | 96.28 | 0.253 |
| Case 8 | 15 | 54.65 | 95.88 | 0.295 |
| Case 9 | 20 | 54.14 | 94.98 | 0.381 |
| Case 10 | 25 | 53.64 | 94.10 | 0.441 |
| Case 11 | 30 | 53.24 | 93.40 | 0.482 |
| Case 12 | 40 | 52.5 | 92.11 | 0.543 |
| Case 13 | 50 | 51.91 | 91.07 | 0.585 |
| Case 14 | 60 | 51.45 | 90.26 | 0.623 |

## CONCLUSION

Due to their low efficiency, TEGs are used with converters with the MPPT algorithm to extract maximum power from them. Thanks to the duty cycle generated by the MPPT algorithms, the converters make an impedance match between the load connected to them and the TEG internal resistance. However, the load connected to the converters must have limits. In this study, studies are carried out with the boost converter. The simulation results show that the load connected to the boost converters has to be higher than the internal resistance of the TEG, and the power obtained and the MPPT performance decrease as the value of the load resistance increases. As a result, it has been observed that the use of load resistors with values up to about three times the internal resistance is more acceptable in terms of performance.


## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Research Project Coordination Unit of The Manisa Celal Bayar University (Project Number: 2022-012).


## REFERENCE


[1] A. M. Omer, 'Focus on low carbon technologies: The positive solution', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 9, pp. 2331–2357, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.04.015.

[2] L. S. Hewawasam, A. S. Jayasena, M. M. M. Afnan, R. A. C. P. Ranasinghe, and M. A. Wijewardane, 'Waste heat recovery from thermo-electric generators (TEGs)', *Energy Reports*, vol. 6, pp. 474–479, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2019.11.105.

[3] A. R. M. Siddique, S. Mahmud, and B. V. Heyst, 'A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 730–744, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.177.

[4] M. R. A. Bhuiyan, H. Mamur, M. A. Üstüner, and Ö. F. Dilmaç, 'Current and Future Trend Opportunities of Thermoelectric Generator Applications in Waste Heat Recovery', *Gazi University Journal of Science*, pp. 1–1, Dec. 2022, doi: 10.35378/gujs.934901.

[5] H. Mamur, M. A. Üstüner, and M. R. A. Bhuiyan, 'Future perspective and current situation of maximum power point tracking methods in thermoelectric generators', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, p. 101824, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101824.

[6] S. Twaha, J. Zhu, Y. Yan, B. Li, and K. Huang, 'Performance analysis of thermoelectric generator using dc-dc converter with incremental conductance based maximum power point tracking', *Energy for Sustainable Development*, vol. 37, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.esd.2017.01.003.

[7] W.-H. Chen and Y.-X. Lin, 'Performance comparison of thermoelectric generators using different materials', *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1388–1393, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.339.

[8] E. H. Houssein, B. E. Helmy, H. Rezk, and A. M. Nassef, 'An efficient orthogonal opposition-based learning slime mould algorithm for maximum power point tracking', *Neural Comput & Applic*, vol. 34, no. 5, pp. 3671–3695, Mar. 2022, doi: 10.1007/s00521-021-06634-y.

[9] A. Attar, H. Lee, and G. J. Snyder, 'Optimum load resistance for a thermoelectric generator system', *Energy Conversion and Management*, vol. 226, p. 113490, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113490.

[10] G. Dileep and S. N. Singh, 'Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 1230–1247, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.130.

[11] M. F. Remeli, L. Tan, A. Date, B. Singh, and A. Akbarzadeh, 'Simultaneous power generation and heat recovery using a heat pipe assisted thermoelectric generator system', *Energy Conversion and Management*, vol. 91, pp. 110–119, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.001.

[12] K. S. Tey and S. Mekhilef, 'Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level', *Solar Energy*, vol. 101, pp. 333–342, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.01.003.

# IMPLEMENTATION OF THE HARDWARE MODULE FOR IMAGE SKELETONIZATION SYSTEM

**Jana Janković**
*Faculty of Technical Sciences*
*University of Novi Sad*
*e-mail: jana.jankovic99@yahoo.com*

**Abstract**

*This paper presents realization and implementation of a system for skeletonization of binary images. The skeletonization algorithm is based on iterative parallel thinning approach. The purpose of this work was to exploit the parallelism of algorithm by implementing it in hardware block that will process more image pixels in parallel. The hardware block for algorithm acceleration is implemented and embedded in the system.*

**Keywords:** Skeletonization, FPGA, Hardware accelerator.

## INTRODUCTION

Skeletonization is an image pre-processing technique that is important in a number of applications like pattern recognition, data compression and data storage. All algorithms can be classified as either iterative or non-iterative. In iterative methods, algorithms produce a skeleton by examining and deleting contour pixels through an iterative process in either sequential or parallel way.[1] The Zhang-Suen algorithm is probably the most used parallel algorithm for skeletonization. Instead of implementing algorithms by programs executed in a general purpose computer, to obtain better performance and efficiency, it is sometimes beneficial to realize an algorithm in custom hardware. The register transfer methodology provides a systematic way to convert an algorithm into hardware. [2]

## EXPOSITION

In a parallel algorithm, the deletion of pixels in the *nth* iteration would depend only on the result that remains after the $(n-1)th$ iteration; therefore, all pixels can be examined independently in a parallel manner in each iteration.[3]

DISCLAIMER:
**This work resulted from the bachelor thesis whose mentor was Vuk Vranjković, PhD.**

In hardware module every pixel will be examined by functional unit called worker. Module has parametrized number of workers (NUM_WORKERS) and parametrized BRAM dimensions (WIDTH, DEPTH) which requires three different architectures of hardware module. Workers will process a pixel in one cycle, so the maximum number of workers is limited to a number for two smaller than the width of the BRAM.

### Interface

- Input interface

  height_i – type STD_LOGIC_ VECTOR ld(DEPTH)-1 downto 0) – represents the number of image rows.

  last_px – type STD_LOGIC_ VECTOR (ld(PARAMETAR) downto 0) – represents the number of worker who will receive the right border pixel at the entrance.

  num_px – type STD_LOGIC_ VECTOR (ld(WIDTH-2)/ PARAMETAR+1) downto 0) – represents the number of pixels that the worker who does not process the last pixel, should process in one row of the image.

- AXI-*Stream* slave interface

  sdata – type STD_LOGIC_ VECTOR (63 downto 0) – the input data bus, represents the 64 pixels of the image that needs to be processed.

  svalid – type STD_LOGIC– indicates whether the data sent by the external component is valid.

  sready – type STD_LOGIC– indicates whether the module is ready to receive the data sent by the external component.

- AXI-*Stream* master interface

  mdata – type STD_LOGIC_ VECTOR (63 downto 0) – output data bus, represents 64 pixels of the processed image.

  mvalid – type STD_LOGIC– indicates whether the data sent by the module is valid.

  mready – type STD_LOGIC– indicates whether the external component is ready to receive the data sent by the module.

- Command interface

  start – type STD_LOGIC – module starts working when the start signal is activated.

- Status interface

  ready – type STD_LOGIC - asserted when the module is ready to accept new inputs.

In addition to these ports, the digital system must also have standard ports for clock and reset signals, clk and rst. Figure 1 shows the complete interface of the image skeletonization module.

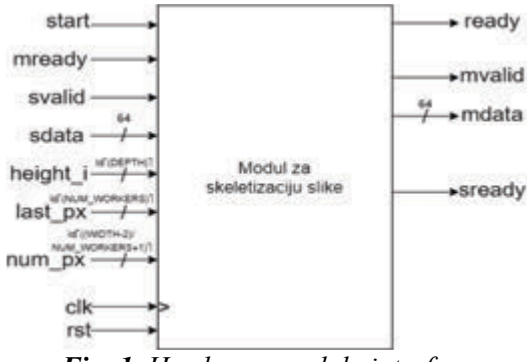



***Fig. 1.*** *Hardware module interface*

**Controlpath**

In the ASM diagram, for all three architectures, the first six and the last three states are identical. In the first, idle state, it waits for an instruction to start processing. In the second, shift state, the content of the register is shifted to the left, while the data arriving from the DMA controller is written to the beginning. In the third state, the contents of the register is written to BRAM. The next three states load the first three rows of the image from BRAM into the three registers, so that the workers can process them. In state l1, it is checked whether the skeletonization process has been completed. In the penultimate state, content is loaded from the appropriate location from BRAMA into the register. In the last state (shift1), via the AXI-Stream interface, the lower 64 bits are sent and then the contents of the register are shifted to the right.

For the first architecture, the BRAM width minus two is equal to the number of workers, it is specific that all the pixels of one row of the image are processed in one clock. This happens in the worker state. At the same time, the outputs of the register red2_reg are fed to the input of the register red1_reg, the outputs red3_reg are output to the inputs red2_reg, and the next line of the image from BRAM is fed to the inputs red3_reg. In this way, a new row of the image will be processed in the next cycle. The results of workers are also placed in the rez_reg register and its contents are written into BRAM in the next cycle. The outputs of the worker representing the variable flag are fed to the inputs of the register flags_reg. Figures 2 and 3 show the ASM diagram of the first architecture.

The second architecture, the BRAM width minus two is divisible by the number of workers. Due to the smaller number of workers, it is necessary to move the contents of the registers every cycle, in order to allow all pixels to appear at the worker inputs. This happens in the states workeri2 and workeri3. The content of the rez_reg register is also moved to the left, while the results of the worker processing are written at the end. In the worker state, as with the previous architecture, the content of the register red2_reg is written

into the register red1_reg, the content of red3_reg into red2_reg and into red3_reg the new image row. The difference is that now it is necessary to properly connect the outputs and inputs of the registers, because, due to the previous shift, the pixels located at the end of the row were at the beginning.

The difference between the second and third architectures is in the writing the results of workers in the register rez_reg. In the third architecture, the number of pixels processed is not divisible by the number of workers, which means that when the last group of pixels is processed, pixels that have already been processed will appear at the inputs of some workers, and their processing results are not written into rez_reg.

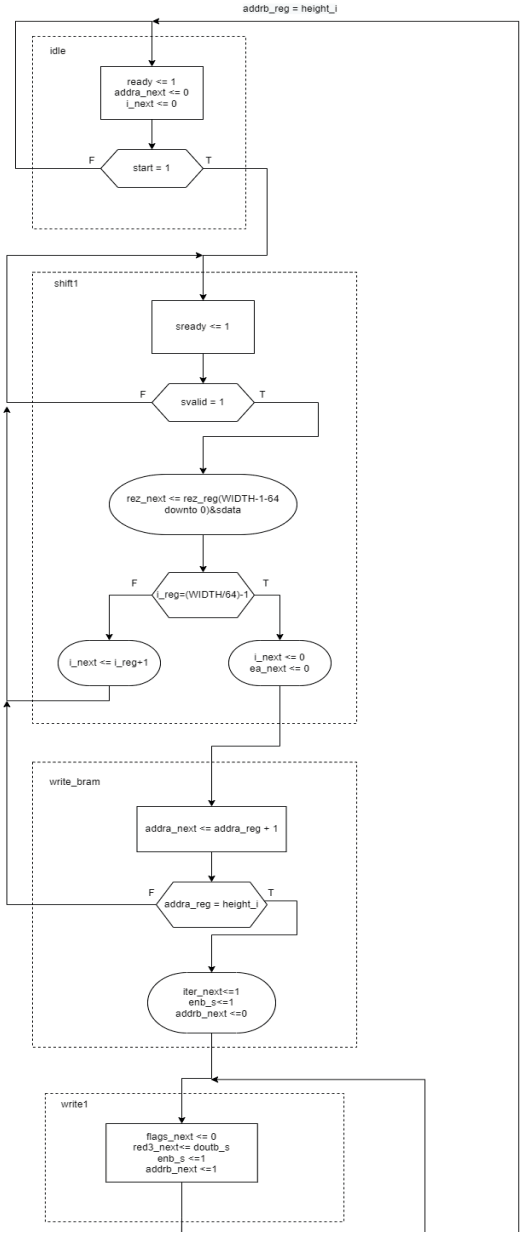



***Fig. 2.*** *ASMD of first architecture- first part*

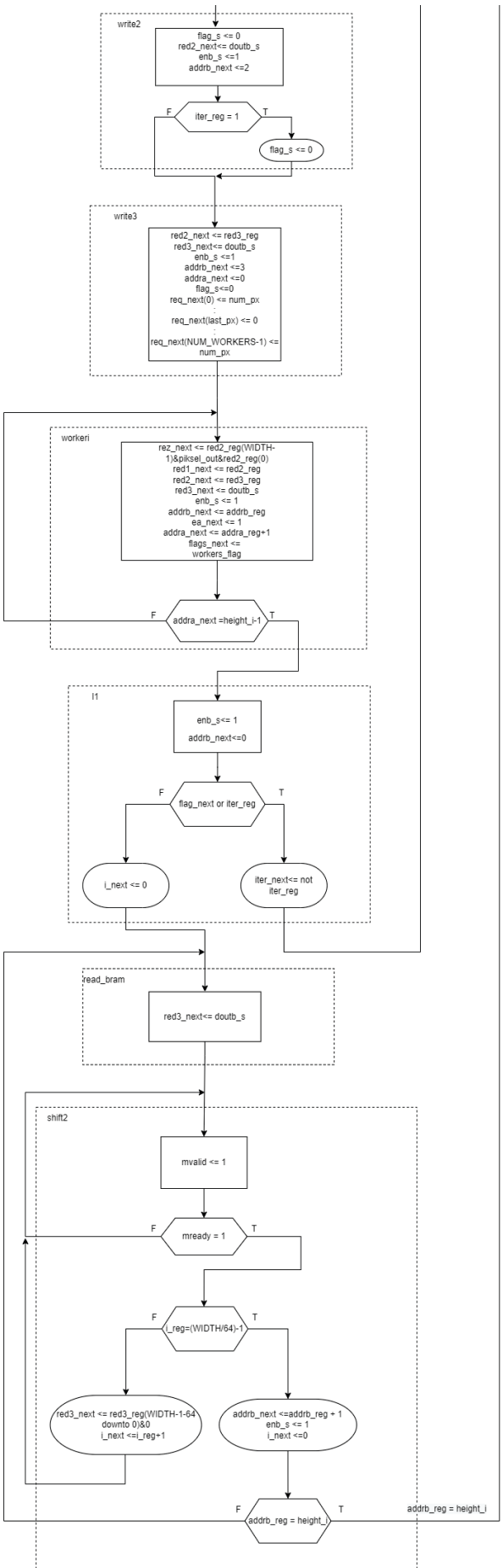



***Fig. 3.*** *ASMD of first architecture- second part*

*Datapath*

Hardware module for skeletonization consists of workers that examine pixels. Structure of the worker is shown in figure 4.

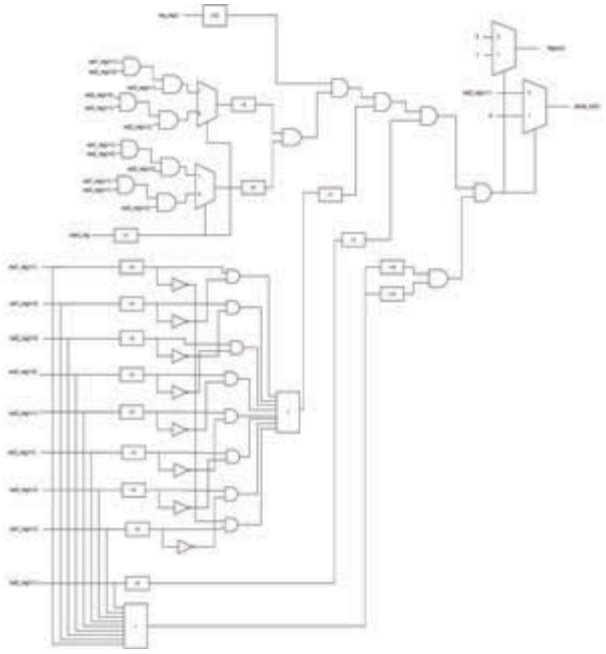


***Fig. 4.*** *Structure of the worker*

The inputs of the worker are connected to the outputs of the registers in which the rows of the image are located. Additional worker inputs are register outputs that indicate whether a pixel needs to be processed and whether it is the first or second iteration of the algorithm. The worker outputs are connected to the register in which the processed image row is placed. The additional output of the worker is connected to the register flags_reg in which the values of the flag variable are placed.

The output of that register goes to the inputs or gate to determine if at least one worker has changed the pixel value. Since the number of workers can be large, in order to reduce the path, instead of a cascaded chain of two-input or gates, a parameterized tree structure was implemented (Figure 5). The output of the circuit is fed to the input of the register whose output is fed back to the input of the circuit. This needs to be done so that the value of the flag variable, from the processing of the previous group of pixels, will be taken into account during the next calculation, and in this way it will be possible to know at the end of passing through the entire image whether any pixel of the image has been changed.

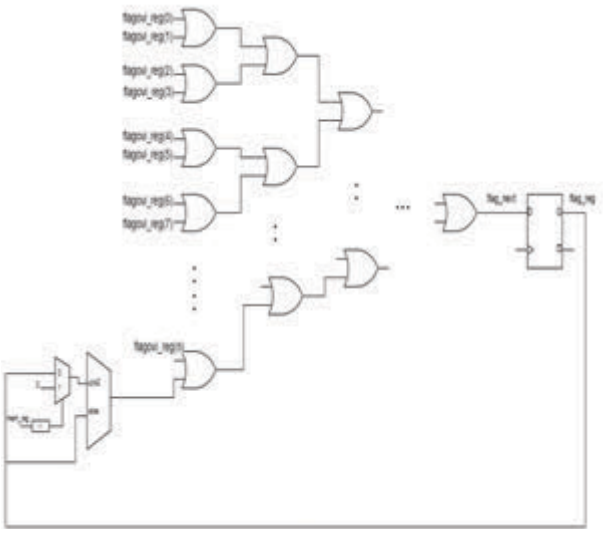


***Fig. 5.*** *Parameterized tree structure of or gate*

For each of the module architectures, there is a data routing network and memory elements. In case of the first architecture, there are eleven registers in the module (Figure 6): three registers are used to save the rows of the image that are being processed, one register is used to store the processing result, two registers are used to store address values, and one register is used to store write permissions. in memory, one register helps in calculating positions, one register that stores information about whether it is the first or second iteration, one register based on the value of which the worker decides whether to process a pixel and one register that stores the values of the flag variable.

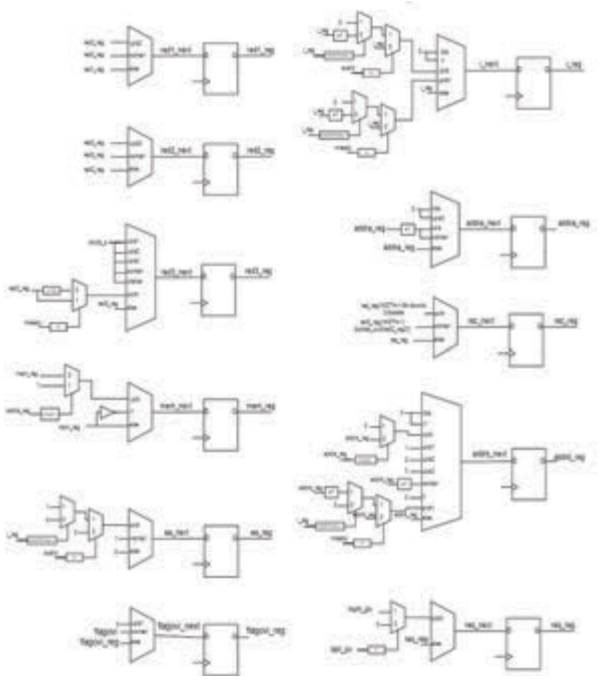


***Fig. 6.*** *Data routing network and memory elements for first architecture*

In case of the second and third architectures, a register was added to track which group of pixels is being processed. The other registers are the same, the difference is in the values that are written into them.

Inside the module there is a BRAM memory with parameterized dimensions in which the image is stored. Figure 7 shows which datapath signals the BRAM memory is connected to.

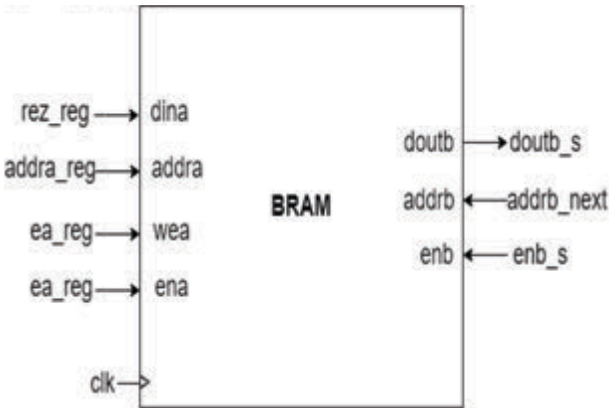



***Fig. 7.*** *Signals connected to BRAM interface*

DMA reads 64-bit data from memory and sends it to the module, which then stores it in BRAM, one location of which can be more than 64 bits wide. Due to the difference in width of the data being exchanged, it is necessary to perform a width conversion. This is done using the shift register. After the data is placed in the lower 64 bits of the register, the content of the register is shifted, so that the next data can be received. When the register is full, the contents of the register are written to BRAM. When data is sent to the DMA component, the contents of BRAM are first written to a register. The upper 64 bits of the register are connected to the m_axis_s2mm _tdata bus of the DMA component. After the first 64 bits are read, the contents of the register are shifted to read the next 64 bits. The process is repeated until the entire image is sent.

## Integration in Zynq platform

After the IP core is designed, the system can be implemented. Using the Vivado integrator, the IP core is connected to existing components into a single system (Figure 8). The system consists of a Zynq7 processor, a DMA controller, an IP core that performs image skeletonization, and two interconnect components. The processor is connected to the DMA controller and the IP core via AXI-Lite interface using an AXI interconnect. The IP core is connected via AXI-Stream slave and master interface to the DMA controller. The DMA controller is connected via the AXI-Full interface to the memory.

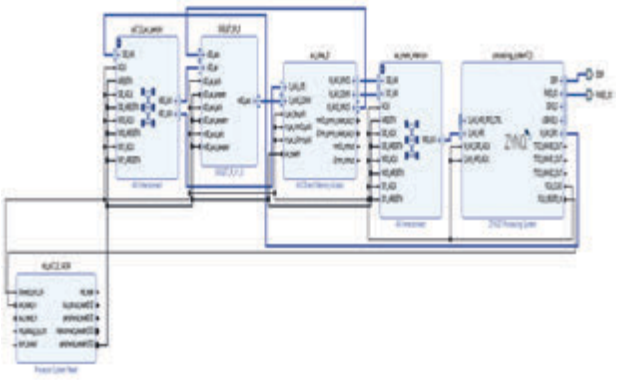


***Fig. 8.*** *Block diagram of the system*

## Resource utilization and operating frequency

After the implementation of the system, where the values of 510 worker and 512 for BRAM dimensions were selected for the IP core parameters, a time analysis was performed. The maximum operating frequency of the system is 142MHz.

Using the Vitis tool, an application was created that tests the system, and using the timing functions, it was measured that the delay of the system, is 241us, which means that its throughput is 4165 images per second.

The consumption of hardware resources is shown in Tables 1, 2. LUTs were used the most, followed by BRAM memory, while DSPs were not used at all in the design. Figure 9 shows the spatial distribution of used resources.

***Table 1.*** *Logic gates utilization*

| Site Type | Used | Fixed | Available | Util% |
|---|---|---|---|---|
| Slice LUTs | 14122 | 0 | 17600 | 80.24 |
| LUT as Logic | 13926 | 0 | 17600 | 79.13 |
| LUT as Memory | 196 | 0 | 6000 | 3.27 |
| LUT as Distributed RAM | 22 | 0 | | |
| LUT as Shift Register | 174 | 0 | | |
| Slice Registers | 7107 | 0 | 35200 | 20.19 |
| Register as Flip Flop | 7107 | 0 | 35200 | 20.19 |
| Register as Latch | 0 | 0 | 35200 | 0.00 |
| F7 Muxes | 4085 | 0 | 8800 | 46.42 |
| F8 Muxes | 2040 | 0 | 4400 | 46.36 |

***Table 2.*** *BRAM utilization*

| Site Type | Used | Fixed | Available | Util% |
|---|---|---|---|---|
| Block RAM Tile | 16.5 | 0 | 60 | 27.50 |
| RAMB36/FIFO* | 15 | 0 | 60 | 25.00 |
| RAMB36E1 only | 15 | | | |
| RAMB18 | 3 | 0 | 120 | 2.50 |
| RAMB18E1 only | 3 | | | |

For systems with a smaller number of workers, the difference in frequency is not significant, while the differences in resource consumption can be seen in Table 3.

***Table 3.*** *Resource utilization for different parameter values*

| Number of workers | BRAM dimensions | LUT utilization | Flip-flop utilization | BRAM utilization |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 256x256 | 4249 (24%) | 5042 (14%) | 13 (21%) |
| 127 | 256x256 | 7092 (40%) | 5405 (15%) | 13 (21%) |
| 254 | 256x256 | 8693 (49%) | 5540 (15%) | 13 (21%) |
| 1 | 1024x1024 | 8904 (50%) | 8266 (23%) | 37.5 (62%) |
| 340 | 1024x1024 | 16247 (92%) | 9631 (27%) | 37.5 (62%) |

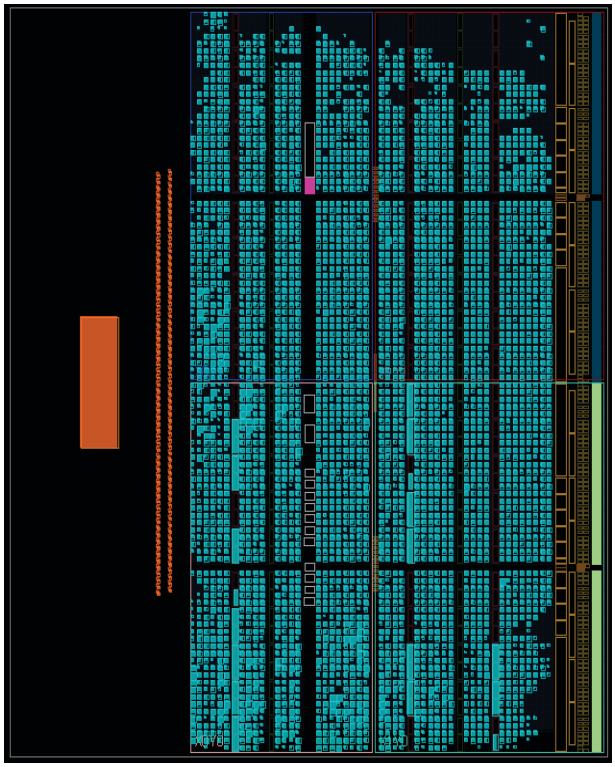


***Fig. 9.*** *Spatial distribution of used resources*

## CONCLUSION

The goal of this paper was to implement a system for image skeletonization. For implementation of the skeletonization process, the Zhang-Suen algorithm was chosen. The hardware block was successfully implemented in VHDL, using RTL methodology. The realized IP core has a parameterized number of functional units - workers that process pixels, which can be changed according to available resources and desired image processing speed. The IP core, using the AXI-Stream interface, through the DMA controller receives and sends the image before and after processing.

Implementing a system that would potentially utilize less resources than implemented system, would require, the implementation of an AXI controller inside the core, instead of DMA controller, which would instead of the AXI-Stream interface, use AXI-Full interface for memory access.

## REFERENCE


[1] Khalid Saeed, Marek Tabedzki, Mariusz Rybnik, Martin Adamski, „K3M: A universal algorithm for image skeletonization and a review of thinning techniques”, Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2010, Vol. 20, No. 2, 317–335

[2] Pong P. Chu, „RTL Hardware Design Using VHDL”, Wiley-Interscience, 2006

[3] Lynda Ben Boudaoud, Abderrahmane Sider, Abdelkamel Tari, „A new thinning algorithm for binary images”, 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT) 2015

# PROCESSING OF THE PULSE SIGNALS PERIODS

**Perišić Đurđe, Željko Gavrić, Vanja Mišković**

*Faculty of Information Technology, Slobomir P University, Slobomir, BiH*

**Abstract**

*This article presents a brief report of a new approach to time processing of the input and output periods and time differences between them. The general view of this new field is based on the recently published articles. For this new field of electronics, it is necessary to use more scientific disciplines. The methodological approach of mathematical and system analysis, as well as the ways of realization of these electronic systems are pointed out. Some of the applications described in the published papers are illustrated in the article. The most recent works in this field are related to a new type of FIR and IIR digital filters intended for filtering the periods of the pulse signal. The other areas of possible applications of this scientific discipline were indicated, as well as the next desirable steps of its further development.*

**Keywords:** Digital circuits, Digital filters, PLL, FLL, Pulse circuits, Linear discrete system.

## INTRODUCTION

According to refs. [1 to 13], the processing of input and output periods and time differences between them, allows a number of new and powerful applications in all areas of applied electronics, which have not been described in the literature. At the beginning of the development of the FLL (Frequency Locked Loop) and PLL (Phase Locked Loop) based on the time processing, it was intended to discover one new system with some new properties, in comparison with the existing ones: analogy, digital and hybrid FLL and PLL. Let us call these new systems, in short, Time FLL (TFLL) and the Time PLL (TPLL). The articles [1-13] fulfilled the expectations. At the very beginning of their development, TFLL and TPLL were applied in the field of frequency averaging, phase shifting, time shifting, phase control, tracking, predicting, frequency synthesizers, noise rejection, frequency multipliers and the others. One of the new properties of the period TPLL, is its ability to generate the desired phase difference between the input and output signals, thereby opening up a wide range of new applications in electronics and other fields. It is worth underlining that this area is also the basis of a new theory of digital filters intended for filtering the periods of pulse signals, refs. [1, 2, 3]. The rest of articles and books in the references, are used as the theoretical base for the different fields.

## SYSTEM DESCRIPTION

Let us consider Fig. 1, which represents a general case of the input and output signals Sin and Sop of TPLL. Because of simplicity, all discrete times in brackets are changed with the

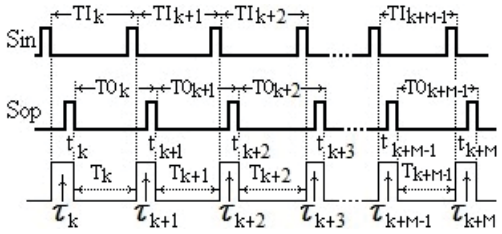



***Fig. 1.*** *The time relations between the input and output variables of TPLL.*

corresponding index in Fig. 1, for instance instead of $TO$(k+M), $TO_{k+M}$ is used. In comparison to the classical PLL and FLL, the input and output frequencies are changed by the input and output periods in Fig. 1, and the phase differences are changed by the time differences, just like in refs. [1-13]. The periods $TI_k$ and $TO_k$, as well as $\tau_k$ and $T_k$ occur at discrete times $t_k$, $t_{k+1}$, $t_{k+2}$,…$t_{k+M-1}$, $t_{k+M}$, which are defined by the falling edges of the

pulses of Sop in Fig. 1. Note that $TI_k$, $TO_k$, $\tau_k$ and $T_k$ are distributed in time in Fig 1, so that every input period overlaps with the output period of the same order. Due to this distribution in time and overlapping, in the real time applications, an output period $TO_{k+M}$ can be calculated only using the previous $TI_k...TI_{k+M-1}$, $TO_k...TO_{k+M-1}$, $\tau_k...\tau_{k+M-1}$ and $T_k...T_{k+M-1}$, as presented in eq. (1).

$$TO(k+M) = \sum_{i=1}^{M} b_i \cdot TI(k+M-i) + \sum_{i=1}^{M} a_i \cdot TO(k+M-i) + \sum_{i=1}^{M} c_i \cdot \tau(k+M-i) + \sum_{i=1}^{M} d_i \cdot T(k+M-i) \quad (1)$$

It comes out from eq. (1), that there are "M" system parameters $b_1$, $b_2$... $b_M$, "M" system parameters $c_1$, $c_2$... $c_M$, "M" system parameters $d_1$, $d_2$... $d_M$ and "M+1" system parameters $a_0$, $a_1$, $a_2$... $a_M$, where $a_0$=1. If we wont to complete the calculation of $TO_{k+M}$ with all system parameters, it is necessary "M" input periods. Equation (1), corresponding to Fig. 1, uses the maximum number of system parameters for M input periods, what makes it look very complicated. But in practice, we can choose only some of the parameters or we can completely omit some of variables from the basic algorithm in order to obtain the desired function and/or easier implementation. The best examples for the simplification of the basic algorithm in practice are just shown in refs. [1 to 13], in which very simple systems of the lower order were able to perform the required electronically functions.

In addition to eq. (1), we can notice the natural relations between the variables in Fig. 1, expressed by eqs. (2) and (3). Note that $\tau_{k+1}$ is a function of $TO_k$. $T_k$ is also indirectly a function of $TO_k$. This means that using any of $\tau_k$, $T_k$ or $TO_k$ in eq. (1), system gets feedback, which plays very important role in the applications of TPLL.

$$\tau_{k+1} = \tau_k + TO_k - TI_k \quad (2)$$

$$T_k = TI_k - \tau_k \quad (3)$$

## REALIZATION OF TPLL

Papers [1 to 13] describe electronic modules that perform the necessary measurements, calculations and output period generation. The approaches described are similar, but the modules for calculating the period, differ to some extent because they depend on the chosen algorithm.

Fig. 2 shows the input and output signals Sin and Sop from ref. [4]. The second order TPLL tries to equalize the output period with the input period, but due to the low clock frequency, it is unable to do so. The clock frequency $f_c$ was chosen intentionally to be low, so that the functioning of TPLL becomes visible. Positive and negative time differences, for the stable system, denoted by $\tau_{\infty+}$ and $\tau_{\infty-}$ alternate with each other at each step in Fig. 2.

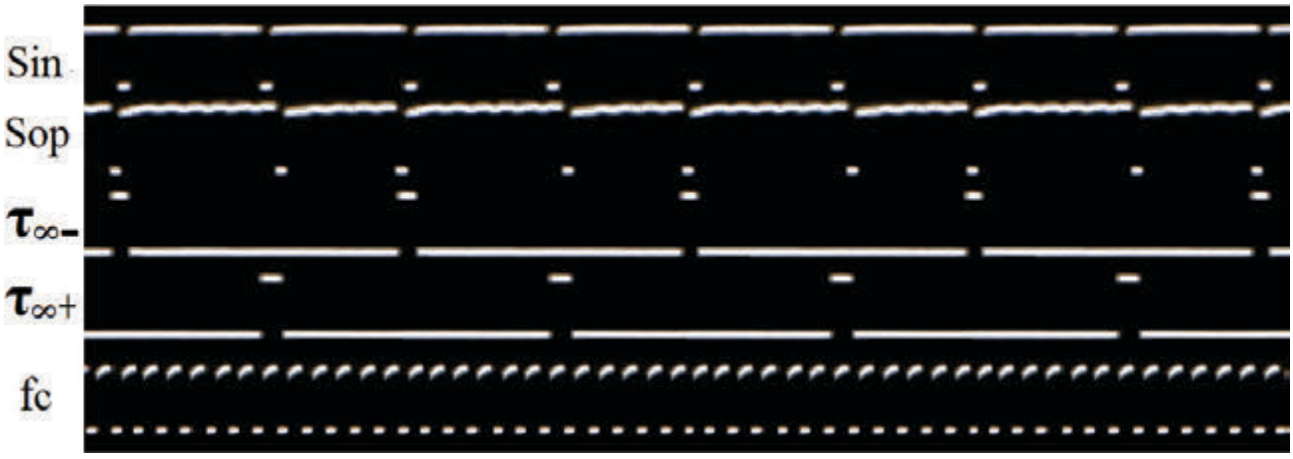



***Fig. 2.*** *Voltage waveforms taken on the realized TPLL.*

## PRESENTATION OF SOME ADDITIONAL TPLL APPLICATIONS

Using the presented general mathematical description of the system, for each of the TPLL applications in references [1 to 13] it was necessary to select the basic algorithm for calculating $TO_k$, to define the input period $TI_k$ and to perform Z transformations of the selected equations. After that it was necessary to determine Z transformation of all output variables depending on the input period as well as the transfer functions of the output variables used. With the help of computer simulation in time domain and theory of linear discrete systems, analyzes of the transient and stable states of the chosen system were performed for the different system parameters. The result of all practical realizations agreed with the simulations and mathematical analyses. The illustrations of some additional applications are following.

Fig. 3 shows the input and output signals Sin and Sop for the circuit in ref. [5]. Signal $Sin_d$ is generated by multivibrators using Sin. The circuit averages the periods of $Sin_d$, multiplying the frequency of Sin by two, at the same time.




***Fig. 3.*** *Voltage waveforms taken on the realized circuit.*

Fig. 4 shows the input and output signals Sin and Sop and clock $CL_c$ for the circuit described in ref. [5]. The circuit is realized by the professional software package for electronic circuits "Multisim". The circuit generates uniform periods of Sop, whose frequency is equal to the average frequency of Sin.

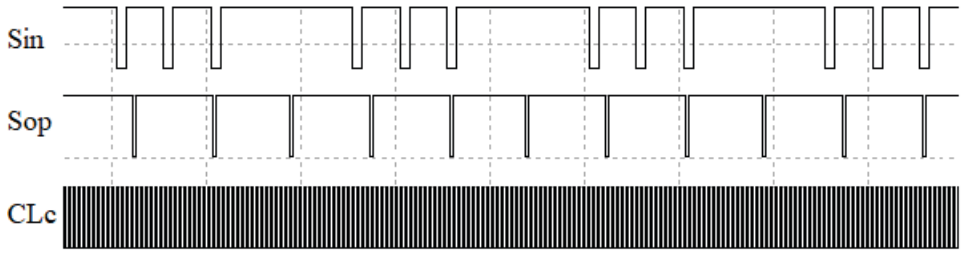



***Fig. 4.*** *The average frequency of Sin is 1 kHz. The frequency of $CL_c$ is 16 kHz.*

A simple version of the second order TFLL is described in ref. [6]. The tracking ability of TFLL is presented in Fig. 5. The input period changes linearly with time. For the different values of system parameters, three output periods $TO_1$, $TO_2$ and $TO_3$ track the input with different transition times. All details are given in ref. [6].

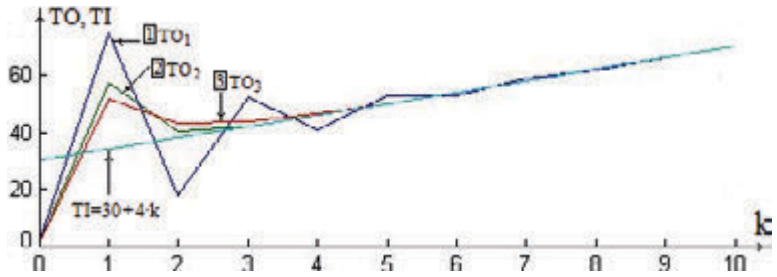



***Fig. 5.*** *The output periods $TO_1$, $TO_2$ and $TO_3$ track the input period.*

The first order TFLL is described in ref. [7]. The circuit suppression ability for uniformed distributed noise is presented in Fig. 6. For the given noisy input TI, TFLL generates the output periods $TO_1$, $TO_2$ and $TO_3$ with the different intensity of noise suppressions, depending on the system parameters. All details are given in ref. [7].

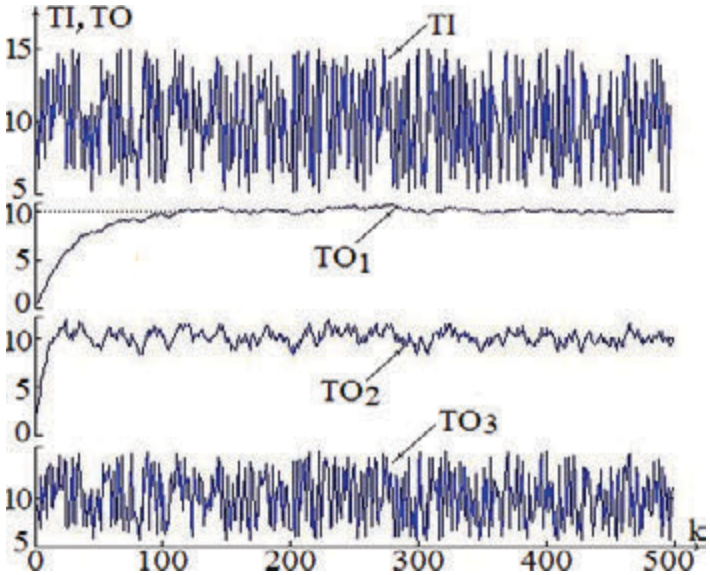



***Fig. 6.*** *The noise suppression at the outputs depends on the system parameters.*

A digital IIR filter of periods, based on TPLL of the third order, is described in ref. [3]. The cutoff frequency of this Butterworth low pass filter is $f_g$=2000 Hz. The input period of Sin is modulated with two sinusoidal signals of frequencies 1000 Hz and 4000 Hz. Covering the whole sample rate, Fig. 7 shows the spectrums of the input and output signals Sin and Sop. In the spectrum of Sop, the component of 4000 Hz is suppressed, since 4000 Hz belongs to the stop band of the filter. All details are given in ref. [3].

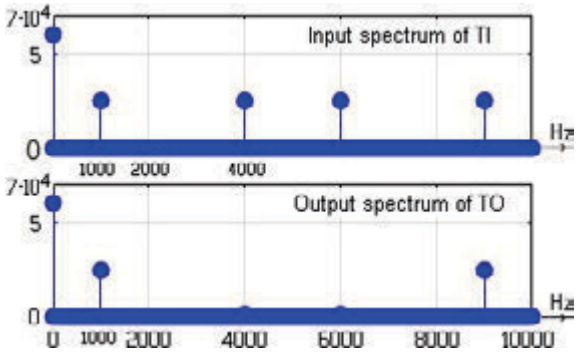



***Fig. 7.*** *The input and output spectrums of TI and TO.*

## CONCLUSION

Processing of periods and time intervals of impulse signals represents a new approach which, according to the illustrations shown, has a wide range of influences in the fields of electronics, telecommunications, measurement and control, but also in other fields in which electronics are used. Measuring time as the basic source of information in systems of this type, provides great accuracy and simple solutions. These systems do not require A/D and D/A converters either for connection to the outside world or for filtering purposes. These systems, with the appropriate choice of parameters, have the filter characteristics, either of FIR or IIR digital filters.

The realization of these systems by digital integrated circuits may be acceptable only for the systems of the first order and for the simple systems of the second order. Much more convenient is to use a microprocessor because of numerous calculations.

There are several next logical steps for further development of this area, such as the development of higher order systems, the development of digital filters of this type, finding additional approaches to analyze these systems in the frequency domain and the others.

## REFERENCE


[1] Dj. M. Perišić,"Digital filters intended for pulse signal periods", Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., Vol. **67**, 2, pp. 161-166, Bucarest, (2022).

[2] Dj. M. Perišić,"Frequency locked loops of the third and higher order", Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., Vol. **66**, 4, pp. 261-266, Bucarest, (2021).

[3] Dj. M. Perišić, M. Bojović, "Infinite Impulse Response digital filter for pulse signal periods", International Sc. Conf. UNITECH 2021, Gabrovo Bulgaria, Vol. I, pp. 114-118, 2021.

[4] Dj. M. Perišić, M. Bojović, "Application of Time Recursive Processing for the development of the time/phase shifter", *Engineering, Technology & Applied Science Research,* Vol. 7, No. 3, p. 1582-1587, (2017).

[5] Dj. M. Perišić, A. Zorić, A., Gavrić, Ž., N. Danilović, "Digital circuit for the averaging of the pulse periods", *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.,* **Vol. 63, 3**, pp. 300-305, Bucarest, (2018).

[6] Dj. M. Perišić, M. Perišić, D. Mitić, M. Vasić, "Time Recursive Frequency Locked Loop for the tracking applications", *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, **60**, *2*, pp. 195–203, (2015).

[7] Dj. M. Perišić, A. Zorić, M. Perišić, D. Mitić, "Analysis and Application of FLL based on the Processing of the Input and Output Periods", *Automatika ATKAFF 57 (1),* pp. 230–238, (2016).

[8] Dj. M. Perišić, A. Žorić, M. Perišić, V. Arsenović, Lj. Lazić, "Recursive PLL based on the Measurement and Processing of Time", *Electronics and Electrical Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 33-36, (2014).

[9] Dj. M. Perišić, M. Perišić, S. Rankov, "Phase Shifter based on a Recursive Phase Locked Loop of the second order*"*, *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg*., **59**, 4*,* pp. 391–400, (2014).

[10] Dj. M. Perišić, A. Zorić, A., Gavrić, "A Frequency Multiplier based on Time Recursive Processing, *Engineering*", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 2104-2108, (2017).

[11] Dj. M. Perišić, M. Bojović, " Multipurpose Time Recursive PLL", *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, Vol. 61, 3, p. 283-288, (2017).

[12] Dj. M. Perišić, V. Petrović, B. Kovacević, "Frequency Locked Loop based on the Time Nonrecursive Processing", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 8, No. 5, p. 3450-3455, (2018).

[13] Dj. M. Perišić, A. Žorić, Dj. Babić, Dj. Dj. Perišić, "Decoding and prediction of energy state in consumption control", *Electrical Review Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg*., **58**, *3*, pp. 263–272, Bucarest, (2013).

[14] G. Bianchi, "Phase-Locked Loop Synthesizer Simulation", *Nc-Hill, Inc.*, New York, USA, (2005).

[15] R. Vich, "Z Transform Theory and Application (Mathematics and Applications)", *Ed. Springer*, (1987-first edition).

[16] M, Gardner, "Phase lock techniques", *Hoboken*, Wiley-Interscience, (2005).

[17] B. D. Talbot, "Frequency Acquisition Techniques for Phase Locked Loops", *Wiley-IEEE Press*, (2012).

[18] S. Winder, Analog and Digital Filter Design (second edition), Copyright©2002 Elsevier Inc., 2002).

UNITECH 2022 GABROVO

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
18-19 November 2022, GABROVO

# APPLICATION OF SIC AND GAN TRANSISTORS IN HIGH-FREQUENCY INVERTER CIRCUITS FOR INDUCTION HEATING

**Petko Stefchov Marinov**
*Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering and Electronics*
*Technical University of Gabrovo*
*4 Hadji Dimitar str., 5300 Gabrovo, Bulgaria*
*pepimarinov@abv.bg, p.marinov@tugab.bg*

**Abstract**

*This paper is about the power semiconductor devices which play a major role in efficient power conversion. As we have Silicon (Si), Silicon Carbide (SiC) and Gallium Nitride (GaN) based power devices. GaN technologies are ideal for working in high-frequency power electronic systems (in MHz). Since the GaN has superior electron mobility and bandgap than the SiC and Si, it has superior characteristics like low conduction losses, high switching rate so that there is better power efficiency than SiC and Si based inverters. This paper is devoted to the application of SiC and GaN transistors in high- frequency inverter circuits for induction heating.*

**Keywords:** Power electronics transistors; Efficiency, SiC; GaN; Wide Bandgap.

## I. INTRODUCTION

The majority of power electronic devices has been based on silicon for a number of decades. Silicon is a semiconductor that can be manufactured at a low cost and is practically defect free. The fact that silicon has almost entirely realized its theoretical capability highlights some of its limitations, such as its limited ability to block voltage and its limited potential for heat transfer, as well as its non-negligible conduction losses. Wide bandgap (WBG) semiconductors, including gallium nitride (GaN) and silicon carbide (SiC), outperform silicon in terms of switching frequency, efficiency, operating temperature, and operating voltage.

Gallium Nitride and Silicon Carbide has a bandgap from 3,4(eV) and 3,3(eV) respectively, which is nearly three times higher than that of Silicon, which is equal to 1,1(eV).

This means that more energy is required to excite a valence electron in the conductive band of the semiconductor. While this property limits the use of GaN and Sic in ultra-low voltage applications, it has the advantage of allowing larger breakdown voltages and greater thermal stability at higher temperatures. GaN and SiC greatly increases the efficiency of power conversion stages, serving as a valuable replacement for silicon in the production of high efficiency voltage converters, power MOSFETs and Schottky diodes.

Compared to Silicon, Gallium Nitride and Silicon Carbide allows to obtain important improvements, such as greater energy efficiency, smaller dimensions, lower weight, and lower overall cost.[1]

The purpose of this paper is to compare the losses in high frequency inverter schemes with the selected: Si (JD225005), SiC (SCT2280KE) and GaN (GAN063-650WSAQ) transistors.

***TABLE 1.*** *OVERVIEW OF BANDGAP OF DIFFERRENT TYPE OF SEMICONDUCTORS.[2]*

| Material | Chemical Symbol | Bandgap Energy (eV) |
|---|---|---|
| Germanium | Ge | 0,7 |
| Silicon | Si | 1,1 |
| Gallium arsenide | GaAs | 1,4 |
| Silicon Carbide | Sic | 3,3 |
| Gallium Nitride | GaN | 3,4 |
| Gallium Oxide | GaO | 4,8 |
| Diamond | C | 5,5 |

WBG benefits include:

• 90% of the power losses that happen during power conversion are eliminated.

• Higher switching frequencies than Si-based devices by up to 10 times.

• Higher maximum operating temperature than Si-based devices.

• Systems with lower overall energy consumption.[1]

## II. CASE STUDY

### A. FUNCTIONAL DESCRIPTION OF SILICON CARBIDE:

In devices with rated breakdown voltages of 600 V and above, SiC serves as a semiconductor material.

Commercially available SiC Schottky diodes with 600- and 1200-V ratings are considered to be the best way to increase power converter efficiency.

Silicon Carbide (SiC) devices offer advantages in inverters, motor drives, and battery chargers including higher power density, lower cooling demands, and lower overall system costs.

The benefits at the system level, especially at 1,200V, more than cover the increased device cost of a SiC device, although it being more expensive than its silicon analog. The advantages over silicon are negligible at or below 600V. For a SiC die to benefit, highly specialised gate drivers and packaging are required.[2]

In high-power, high-voltage applications where better results, reliability, and power density are crucial factors, Silicon carbide (SiC) provides a number of advantages:

Solar inverters; Welding; Plasma cutters;

• Quick vehicle charges; Oil prospecting.

These are a few examples of industrial applications that benefit from the higher breakdown field strength and improved thermal conductivity that SiC offers over silicon (Si) material.

Advantages of designing in SiC include: SiC diodes have near-zero reverse recovery current; Improved efficiencies and decreased thermal dissipation; Smaller power electronics and system size; Higher power density; Higher operating frequency; Simple parallel operation; Reduced overall system cost.[3]

### B. FUNCTIONAL DESCRIPTION OF GALLIUM NITRIDE:

A wide bandgap semiconductor called gallium nitride is quickly replacing silicon as the preferred material for power transistors.[3]

By growing a thin layer of aluminum gallium nitride (AlGaN) on top of a GaN crystal, a strain is created at the interface that induces a compensating two-dimensional electron gas (2DEG). This 2DEG is used to efficiently conduct electrons when an electric field is applied across it. This 2DEG is highly conductive, in part due to the confinement of the electrons to a very small region at the interface. This confinement increases the mobility of electrons from about 1000 cm2/V·s in unstrained GaN to between 1500 and 2000 cm2/V·s in the 2DEG region. This high mobility produces transistors and integrated circuits that feature higher breakdown strength, faster switching speed, higher thermal conductivity and lower on-resistance than comparable silicon solutions.

The leading candidate for taking electronic performance to the next level and a reactivation of positive momentum of Moore's Law is gallium nitride. GaN's ability to conduct electrons more than 1000 times more efficiently than silicon, while being able to be manufactured at a lower cost than silicon has now been well established. Silicon is out of gas, and a new, higher performing semiconductor material is emerging – GaN is on the rise.

Fortunately, the cost to produce a GaN device is inherently lower than the cost to produce a MOSFET device, since GaN devices are produced using standard silicon manufacturing procedures in the same factories that currently produce traditional silicon semiconductors, and the resulting devices are much smaller for the same functional performance. Since the individual devices are much smaller than silicon devices, many more GaN devices can be produced per wafer, thus forming a situation where GaN devices always cost less to manufacture than their silicon counterparts. As GaN technology improves, the cost gap gets even wider.[4]

GaN E-HEMTs* from Gan Systems enable designers to set new norms for efficiency, power density, size, and weight because to

their outstanding material qualities and ease of use.

GaN are easy to use because:

- Voltage driven, like MOSFETs;
- True enhancement-mode, normally off;
- Easily driven by Si or GaN-specific gate driver;
- Conventional slew rate control using RG;
- Simple paralleling.

Advantages of designing in GaN include:

- ZERO reverse recovery – Low power loss, high efficiency;
- High switching frequency – Size reduction, high power density;
- Bi-directional conduction – New high efficiency topologies;
- Intrinsically stable paralleling – Broad power range.[3]

The power source is type LSS7.5/200 of the American company LEPEL, built on the basis of a three-phase rectifier, an input pulse regulator and a high-frequency series transistor inverter with self-excitation [6], as shown in the block diagram - fig.1. The input pulse regulator is used to set and change the output power.

In the rectifier, the AC voltage of the supply network is converted into DC, which is fed to the input of the pulse regulator. Through it, the magnitude of the input voltage of the bridge inverter is adjusted, thereby adjusting the output power.

Fig. 1 shows the power circuit of the inverter - implemented in a bridge circuit with four MOSFET transistors. A separating transformer is included in the diagonal of the inverter, which also serves to match the parameters of the load with those of the bridge inverter. Transformer TR1 has six secondary windings which are switched by the TAP SWITCH. In this way, the load impedance can be matched to the inverter output. In addition, there is the option of adding capacitors to the high-frequency capacitor bank in the secondary winding of the transformer.

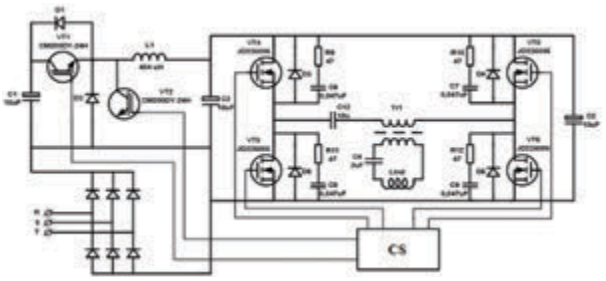



***Fig. 1.*** *Principle schematic of the transistor inverter of Lepel LSS7.5 with transistors JD225005*

- The maximum power of the scheme is 7.5kW.
- Maximum operating frequency 200kHz,
- Maximum output voltage on the primary side of the transformer – 450V.
- Maximum current on the primary side of the transformer – 37A.

For the correct setting, it is necessary to establish the range of variation of the equivalent parameters of the load.

According to the obtained simulation results and the done modeling of the inductor-detail system, according to the methodology described in [1], an inductor was constructed.

The results of the performed simulations are compared with the experimental data, reporting a coincidence of the results with an accuracy of 10%.

Experimental studies were carried out in the brazing of hard alloy plates with the largest part size. The operation of the inverter is reflected by oscillograms at several control points. The voltage of the circular capacitor C4 is shown in Fig. 2, with a load - a tool of the largest dimensions.

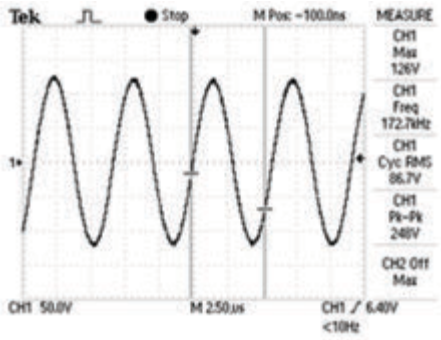



***Fig. 2.*** *Oscillogram of voltage UC4*

Figure. 2 shows the voltage of C4 obtained as a result of the simulations. It can be seen that in both cases its value does not exceed the maximum allowable effective capacitor voltage of 200V.

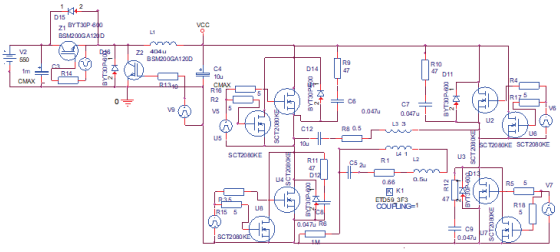


***Fig. 3.*** *Principle schematic of the transistor inverter of Lepel LSS7.5 with SiC transistors SCT2280KE*

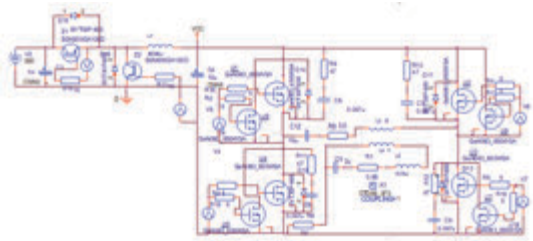


***Fig. 4.*** *Principle schematic of the transistor inverter of Lepel LSS7.5 with SiC transistors GAN063-650WSAQ*

## III. NUMERICAL RESULTS

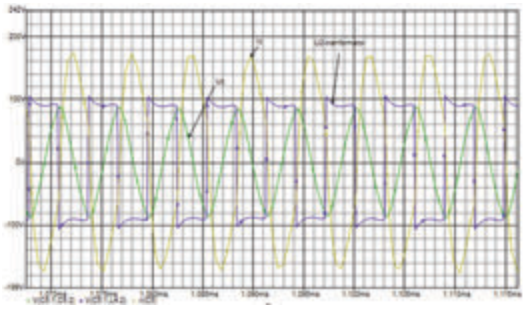


***Fig. 5.*** *Oscillogram of voltage Uc4, current Ic4 and secondary voltage of transformer Tr.2 with JD225005 transistors*

The comparison of the data from oscillograms 5, 6 and 7 show that after the change of the element base of the inverter - its characteristics have not changed.

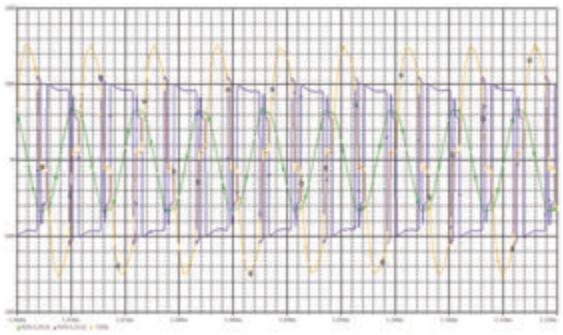


***Fig. 6.*** *Oscillogram of voltage Uc4, current Ic4 and secondary voltage of transformer Tr.2 with SCT2280KE transistors*

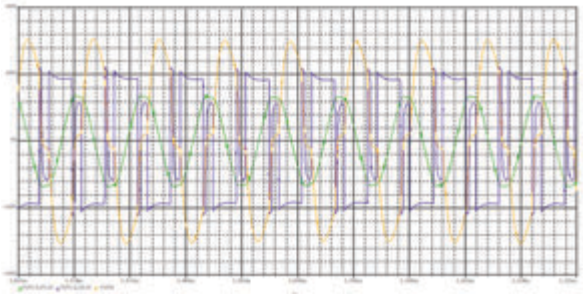


***Fig. 7.*** *Oscillogram of voltage Uc4, current Ic4 and secondary voltage of transformer Tr.2 with GAN063-650WSAQ transistors*

On fig. 8. the voltage oscillogram of transistor VT3 in the bridge series inverter is shown.

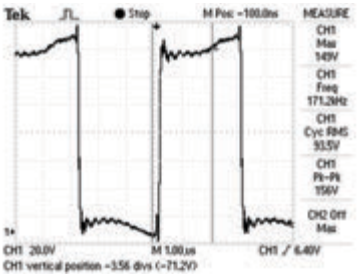


***Fig. 8.*** *Voltage on transistor VT3*

Fig. 8 matches with the shown of fig. 9. the results of the current and voltage simulation of the same transistor – VT3 are shown. The resonant nature of the current in the circuit can be seen, as well as the type of commutation. The transistor turns on at zero current and turns off at zero voltage. The cut-off voltage is determined by the voltage drop across the reverse-connected diode D4.

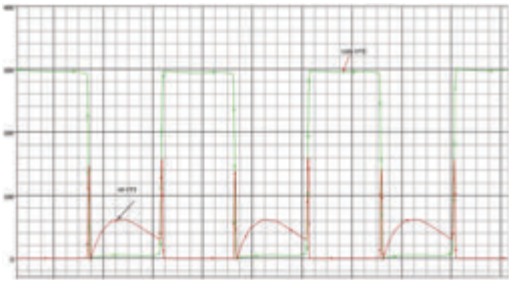


***Fig. 9.*** *Current and voltage simulation of VT3 with JD225005 transistors*

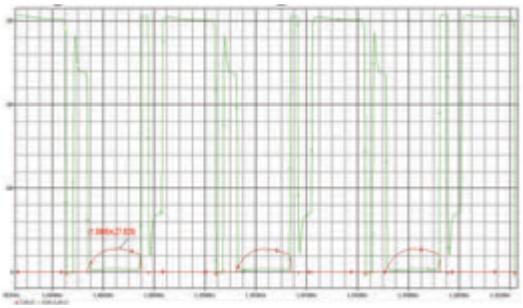


***Fig.10.*** *Current and voltage simulation of VT3 with SCT2280KE transistors*

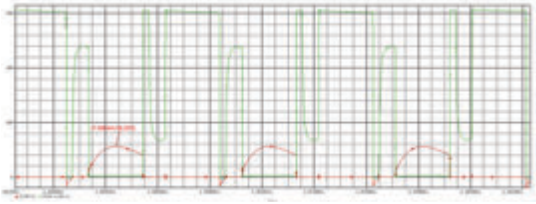


***Fig.11.*** *Current and voltage simulation of VT3 with GAN063-650WSAQ transistors*

The obtained results described on fig. 9, 10 and 11 shows a coincidence of the voltage and current with those of the experimental operation of the generator. The power does not exceed the maximum permissible of 7.5kW. The operating frequency in the simulations also corresponds to the experimentally measured one with a value of 170kHz.

The agreement of the simulation results and the experimental work for the designed inductor shows the adequacy of the selected models.

The results of the simulations, at a translation ratio of the high-frequency transformer of 5:1, are shown on Fig. 12.

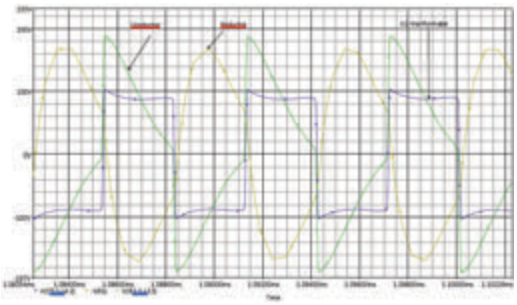


***Fig. 12.*** *HF transformer voltage with 5:1 ratio with Si transistors type: (JD225005)/ixfk55n50/*

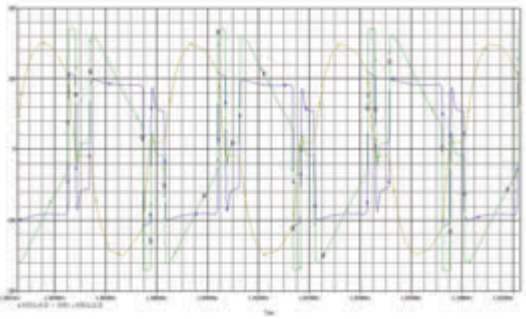


***Fig. 13.*** *HF transformer voltage with 5:1 ratio with SiC transistors type: (SCT2280KE)*

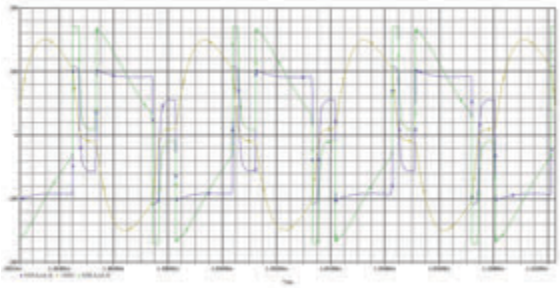


***Fig. 14.*** *HF transformer voltage with 5:1 ratio with GaN transistors type: (GAN063-650WSAQ)*

Figures 12, 13, 14 summarize the simulation results of the 3 types of transistors. They have the same readings, regardless of the type of semiconductor used.

An experimental study of the performance of the different types of transistors has been made, and the major characteristics are described in the table below:

*TABLE 2. CHARACTERISTICS OF THE USED TRANSISTORS*

| Semiconductor | Si | SiC | GaN |
|---|---|---|---|
| Characteristics | JD225005 | SCT2280KE | GAN063-650WSAQ |
| Junction Temperature, Tj | -40 up to 150 °C | 175 °C | -55 up to 175 °C |
| Storage Temperature, Tstg | -40 up to 150 °C | -55 up to 175 °C | -55 up to 175 °C |
| Drain Source Voltage, VDss | 450/500 V | 1200V | 650 V |
| Gate-Source Voltage, VGss | ± 20 V | -10 to 26 V | ± 40 V |
| Continuous Drain Current, ID | 50 A | 35 A | 34.5 A |
| RDs(on) | 0.32Ω | 280mΩ | 60mΩ |
| Power Dissipation, Pt | 310 W | 108 W | 143 W |

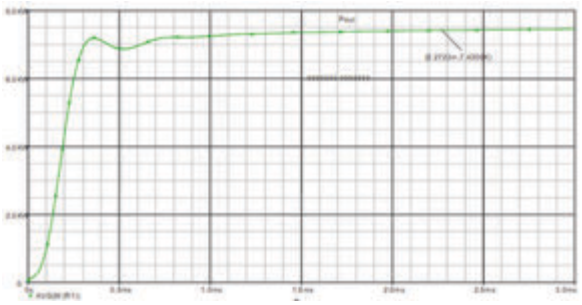


***Fig. 15.*** *Output power simulation of LEPEL LSS7.5/200 with JD225005 transistors*

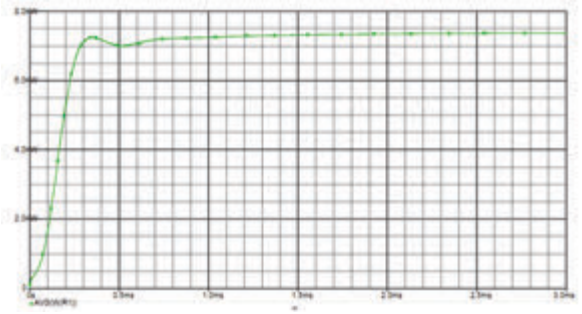


***Fig. 16.*** *Output power simulation of LEPEL LSS7.5/200 with SCT2280KE transistors*

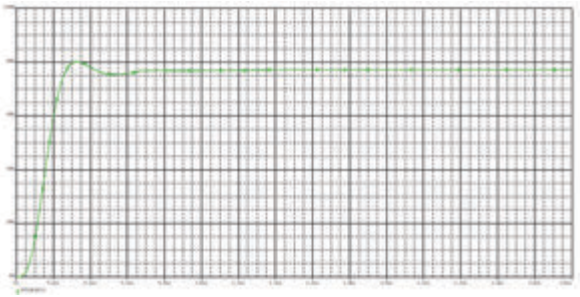


***Fig. 17.*** *Output power simulation of LEPEL LSS7.5/200 with GAN063-650WSAQ transistor*

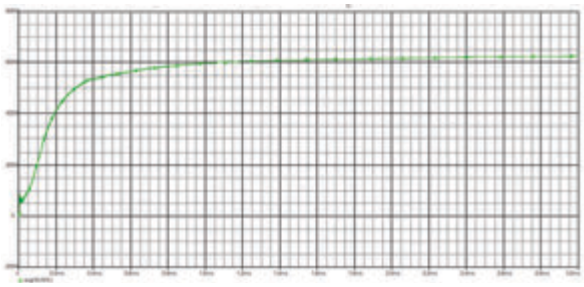


***Fig.18.*** *Losses in the Si transistor type: JD225005*

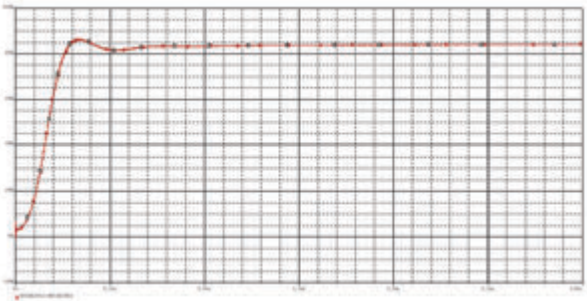


***Fig.19.*** *Losses in the SiC transistor type: SCT2280KE*

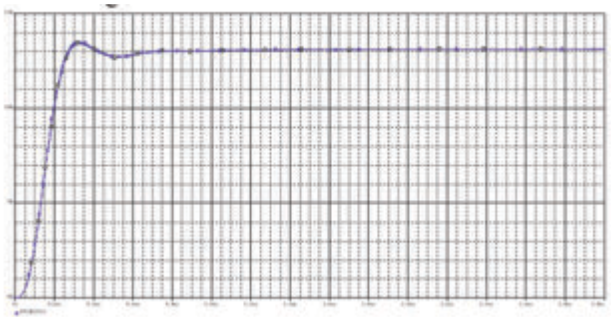


***Fig. 20.*** *Losses in the GaN transistor type: GAN063-650WSAQ*

*TABLE 3. LOSSES IN THE TRANSISTORS*

| | Type of the transistor | Losses of the transistor PVT [W] | Pdiss | Efficiency |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Si | 615 | $P_{diss}$ =4. $P_{VT}$ | 2460 |
| 2 | SiC | 86 | $P_{diss}$ =8. $P_{VT}$ | 688 |
| 3 | GaN | 14.5 | $P_{diss}$ =8. $P_{VT}$ | 116 |

Table 3 shows and summarizes the transistor losses and their efficiency.

The following formulas were used:

Pdiss =4. PVT (1).

Pdiss =8. PVT (2).

The inverter efficiency is calculated with the following equations:

$$Si = \frac{POUT}{(POUT+PDISS)} = \frac{7500}{(7500+2460)} = \frac{7500}{9960} = 0.753 \times 100 = 75.3\%$$

$$SiC = \frac{POUT}{(POUT+PDISS)} = \frac{7500}{(7500+688)} = \frac{7500}{8188} = 0.9159 \times 100 = 91.59\%$$

$$GaN = \frac{POUT}{(POUT+PDISS)} = \frac{7500}{(7500+166)} = \frac{7500}{7616} = 0.9847 \times 100 = 98.47\%$$

The following formulas were used:

Efficiency= $P_{OUT}/(P_{OUT}+P_{DISS})$ (3).

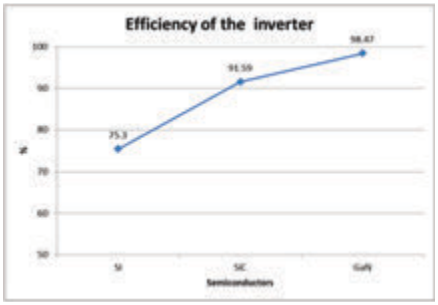



***Fig. 21.*** *Efficiency graph of the three of inverters with the three types transistors*

Fig. 21 shows that the inverter with GAN transistors has the highest efficiency.

*TABLE 4. MAXIMUM TRANSISTORS LOAD*

| Maximum transistor load | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Type of the transistor | Losses of the transistor PVT [W] | Power Dissipation by catalogue [W] | Results [%] |
| 1 | Si | 615 | 310 | 99.19 |
| 2 | SiC | 86 | 108 | 79.6 |
| 3 | GaN | 14.5 | 143 | 10.14 |

Table 4 shows and summarizes the maximum transistor load and the result in %.

The following formulas were used:

PVT/Pt ( by catalogue) (4).

The maximum transistors load is calculated with the following equations:

$$Si = \frac{Losses\ in\ the\ transistor}{Dissipated\ power\ by\ catalogue} = \frac{615}{310*2} = \frac{615}{620} = 0.9919 * 100 = 99.19\ \%$$

$$SiC = \frac{Losses\ in\ the\ transistor}{Dissipated\ power\ by\ catalogue} = \frac{86}{108} = 0.796 * 100 = 79.6\%$$

$$GaN = \frac{Losses\ in\ the\ transistor}{Dissipated\ power\ by\ catalogue} = \frac{14.5}{143} = 0.10139 * 100 = 10.14\%$$

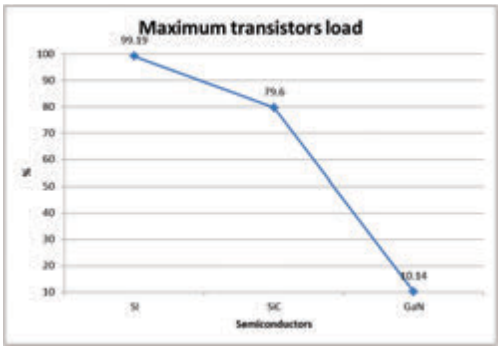



***Fig. 22.*** *Efficiency graph of the three of inverters with the three types transistors*

Fig. 22 shows that Si transistor type: JD225005 has the largest maximum transistor load. This means that it will defect. This transistor cannot operate at maximum power for an extended period of time. The GaN transistor type: GAN063-650WSAQ is least loaded.

## CONCLUSION

This paper has investigated a circuit that is simulated on PSpice TI and has used real models of the transistors in it.

A comparison of the output power, efficiency, operating points and maximum transistors load was made. What became clear is that the highest efficiency has been achieved with the transistors based on GaN.

The faster switching capability of the new generation of transistors on the basis of SiC and GaN has a significant effect on increasing the efficiency of the high frequency inverters.

As it is having been demonstrated in this paper, the efficiency of the inverter is improved with the same load.

Real experiments with this circuit and transistors based on GaN and SiC are forthcoming.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank to all reviewers for their advices and suggestions on improving this paper.

The present paper has been prepared in connection with implementation of contract №2102У/21.03.2022, "Development of an electric car" of UCRT (University Center for Research and Technology) at Technical University of Gabrovo.

## REFERENCES

[1] “10 Things to know about GaN”, https://www.powerelectronicsnews.com.

[2]“The great semi debate: SiC or GaN”, https://www.electronicdesign.com/power-management .

[3] GaN & SiC Technologies for Power Electronics, RichardsonRPFD, June 2021.

[4] “What is Gallium Nitride (GaN), epc-co.com.

[5] Dankov D., "Modeling and research of the inductor-part system in induction soldering", Unitech'09, Gabrovo, Bulgaria.

[6] Blau D., T. Hussey “Product Spotlight: LSS Series Power Supplies Offer Superior Performance in a Compact Pack-age”. Lepel Inc. – Hot topics in Newsletter, Vol. 1, No. 3, October 1995.

# DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A TRIAXIAL INTERPOLATION FOR A CNC MACHINE IMPLEMENTED IN CONTROL SOFTWARE

**Petar Panayotov[1], Goran Goranov[2]**

[1] *TU - Gabrovo, jimp@abv.bg*
[2] *TU* - Gabrovo, *ph.d.g.goranov@gmail.com*

**Abstract**

*The CNC machine digitally interpolates the commands and thus controls the cutting tool in the working area of the machine. The operating parameters of the CNC can be changed by loading programs. The present paper proposes the development of a new mathematical model for three-axis control by method of a single impulse direct calculation method. The biggest advantage of the proposed method is that it can describe absolutely any mechanics - there are no restrictions. It can also work when there is a degree of uncertainty more degrees of freedom.*

**Keywords:** CNC control, mathematics model, synchronization, PC software

## INTRODUCTION

The most common difficulty in reading and executing G-code generated by CAD-CAM software is synchronizing the motors to provide tool motion that is as close as possible to the theoretical set point. Any deviation from the set can damage the tool or the machine's motors. There are different types of syncs. A part of them performs synchronization of two or more engines by controlling all engines. This type of synchronization is used in CNC machines. The supply of pulses is simultaneous to all motors with a certain frequency or change in the modes of acceleration and deceleration of the motors. This control is performed by (motion) controllers or PC systems with appropriate software. According to the proposed methodology, software was developed for a personal computer running on the Windows operating system. In this type of synchronization, there are feedback systems and non-feedback systems. Depending on the dynamics and price of the machines, different control options may be preferred. In scientific research, there are many examples of how to optimize the process with more precise and smooth control of the CNC machine. [1,3,4,5,6]

## THE MATH MODEL

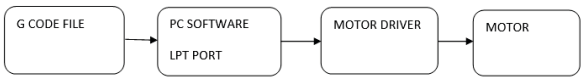



***Fig.1*** *Block diagram of the process and control machine*

A method by direct calculation of a single pulse.

Through this method, the controller does not generate a frequency and instead calculates the occurrence of each pulse necessary to move along any of the three axes X,Y,Z. This method considers the implementation of an analytical model of a CNC machine. As mentioned, the G-code that is generated by CAD-CAM programs, gives information about the coordinates to which the tool must reach and the speed for this movement. Since, as we mentioned, the motors driving CNC machines are most often controlled with pulses, the linear movement of the tool along any of the axes is discrete. The discretization corresponds to the linear displacement step of the CNC machine and it is different depending on the mechanics and configuration of the machine.

$\Delta X_{step}[mm]$ - Linear displacement for one pulse along the X axis

$\Delta Y_{step}[mm]$ - Linear displacement for one pulse along the Y axis

$\Delta Z_{step}[mm]$ - Linear displacement for one pulse along the Z axis

Due to the presence of such a discretization, the tool can never follow the "ideal" line in space specified by the G-code. If it is taken into account that the current position of the tool is the zero point, then at a precise moment in time the tool can move to one of the following points:

(0,0,0) ($\Delta X_{step}$,0,0) (-$\Delta X_{step}$,0,0)
(0,$\Delta Y_{step}$,0) ($\Delta X_{step}$,$\Delta Y_{step}$,0) (-$\Delta X_{step}$,$\Delta Y_{step}$,0)
(0,-$\Delta Y_{step}$,0) ($\Delta X_{step}$,$-\Delta Y_{step}$,0)
(-$\Delta X_{step}$,$-\Delta Y_{step}$,0)
(0,0,$\Delta Z_{step}$) ($\Delta X_{step}$,0,$\Delta Z_{step}$)
(-$\Delta X_{step}$,0,$\Delta Z_{step}$)
(0,$\Delta Y_{step}$,$\Delta Z_{step}$) ($\Delta X_{step}$,$\Delta Y_{step}$,$\Delta Z_{step}$)
(-$\Delta X_{step}$,$\Delta Y_{step}$,$\Delta Z_{step}$)
(0,-$\Delta Y_{step}$,$\Delta Z_{step}$) ($\Delta X_{step}$,$-\Delta Y_{step}$,$\Delta Z_{step}$)
(-$\Delta X_{step}$,$-\Delta Y_{step}$,$\Delta Z_{step}$)
(0,0,-$\Delta Z_{step}$) ($\Delta X_{step}$,0,$-\Delta Z_{step}$)
(-$\Delta X_{step}$,0,$-\Delta Z_{step}$)
(0,$\Delta Y_{step}$,-$\Delta Z_{step}$) ($\Delta X_{step}$,$\Delta Y_{step}$,$-\Delta Z_{step}$)
(-$\Delta X_{step}$,$\Delta Y_{step}$,$-\Delta Z_{step}$)
(0,-$\Delta Y_{step}$,-$\Delta Z_{step}$) ($\Delta X_{step}$,$-\Delta Y_{step}$,$-\Delta Z_{step}$)
(-$\Delta X_{step}$,$-\Delta Y_{step}$,$-\Delta Z_{step}$)

The tool move pattern looks like this-fig.1

Building the model in this way, at a precise moment in time, the tool can move to one of the marked points from 1 to 26, which we will call discrete points. These are, in fact, all combinations of the possibilities of supplying pulses to the three axes at the same moment in time $t + \Delta t$.

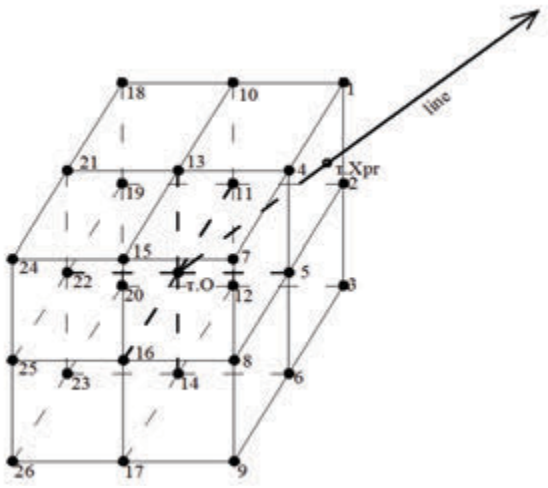



***Fig.2.*** *Possible displacement points for one pulse*

Following the end point that the tool must reach and starting from p.O, the coordinates of the two points form a straight line that can be described by its equation [2]:

$$\frac{x - x_0}{x_{end} - x_0} = \frac{y - y_0}{y_{end} - y_0} = \frac{z - z_0}{z_{end} - z_0}\ , (1)$$

Since p.O is taken as the origin of the OXYZ coordinate system, therefore $x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 0$
Equation (1) takes the form:

$$\frac{x}{x_{end}} = \frac{y}{y_{end}} = \frac{z}{z_{end}}\ , \qquad (2)$$

The equation of the line can also be represented in a parametric form:

$$\begin{vmatrix} x = \lambda.t \\ y = \mu.t \\ z = \nu.t \end{vmatrix}, (3)$$ where

A quantity $t \in (-\infty, \infty)$ is called a parameter.

$\lambda, \mu, \nu$ are zero vector coordinates $l = \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix}$

Because the line passes through p.O, from where $\lambda = x_{end}, \mu = y_{end}, \nu = z_{end}$ the parametric equation can be represented in the form:

$$\begin{vmatrix} x = x_{end}.t \\ y = y_{end}.t \\ z = z_{end}.t \end{vmatrix}, \qquad (4)$$

The space around the point O that can be reached by the tool for one pulse, forms a parallelepiped or if the displacement steps are equal, forms a cube, the sides of which form six planes. Since every plane is defined by three non-collinear points, it can be said that every plane can be defined by the following points:

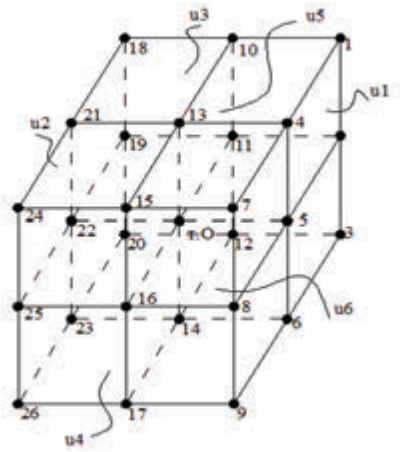



***Fig.3**. Planes formed by the possible displacement points*

$\upsilon_1 -> p.5, p.1, p.7$
$\upsilon_2 -> p.22, p.18, p.24$
$\upsilon_3 -> p.11, p.1, p.18$
$\upsilon_4 -> p.16, p.24, p.7$
$\upsilon_5 -> p.13, p.24, p.7$
$\upsilon_6 -> p.14, p.26, p.9$

The equation of a plane passing through three points, has the following form:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 , \qquad (5)$$

Since each of the formed planes is parallel to at least two of the coordinate axes, it is possible to use a plane segment equation having the form:

$$\frac{x}{m} + \frac{y}{n} + \frac{z}{p} = 1 , \qquad (6)$$

where
$m, n, p$ -sections of the plane along the x,y,z axis respectively.

Taking the segments of the planes, all the equations of the six discrete planes formed can be written:

$$\upsilon_1 => \frac{x}{\Delta X_{step}} = 1 , \qquad (7)$$

$$\upsilon_2 => \frac{x}{-\Delta X_{step}} = 1 , \qquad (8)$$

$$\upsilon_3 => \frac{y}{\Delta Y_{step}} = 1 , \qquad (9)$$

$$\upsilon_4 => \frac{y}{-\Delta Y_{step}} = 1 , \qquad (10)$$

$$\upsilon_5 => \frac{z}{\Delta Z_{step}} = 1 , \qquad (11)$$

$$\upsilon_6 => \frac{z}{-\Delta Z_{step}} = 1 , \qquad (12)$$

To find the intersection of the line with each of the planes, the parametric equation of the line (4) and the equations of the six planes.

$$\upsilon_1 => \Delta X_{step} = x_{end}.t \Rightarrow t = \frac{\Delta X_{step}}{x_{end}},$$
$$x_1 = \Delta X_{step}, y_1 = y_{end}.t, z_1 = z_{end}.t$$

$$\upsilon_2 => -\Delta X_{step} = x_{end}.t \Rightarrow t = \frac{-\Delta X_{step}}{x_{end}},$$
$$, x_2 = -\Delta X_{step}, y_2 = y_{end}.t, z_2 = z_{end}.t$$

$$\upsilon_3 => \Delta Y_{step} = y_{end}.t \Rightarrow t = \frac{\Delta Y_{step}}{y_{end}},$$
$$x_3 = x_{end}.t, y_3 = \Delta Y_{step}, z_3 = z_{end}.t$$

$$\upsilon_4 => -\Delta Y_{step} = y_{end}.t \Rightarrow t = \frac{-\Delta Y_{step}}{y_{end}},$$
$$x_4 = x_{end}.t, y_4 = -\Delta Y_{step}, z_4 = z_{end}.t$$

$$\upsilon_5 => \Delta Z_{step} = z_{end}.t \Rightarrow t = \frac{\Delta Z_{step}}{z_{end}},$$
$$x_5 = x_{end}.t, y_5 = y_{end}.t, z_5 = \Delta Z_{step}$$

$$\upsilon_6 => -\Delta Z_{step} = z_{end}.t \Rightarrow t = \frac{-\Delta Z_{step}}{z_{end}},$$

$, x_6 = x_{end}.t, y_6 = y_{end}.t, z_6 = -\Delta Z_{step}$

After finding the intersection of the line with each of the planes, the coordinates of 6 intersection points are found. If the line passes through the corners of the parallelepiped, then all six points will belong to its surface, and three by three will coincide. If the line passes through the edge of the parallelepiped, 4 of the points will belong to the surface of the cube as two by two will coincide and the other two will be outside the volume, which means that the tool cannot reach them in one pulse. If the line does not pass through an edge or corner of the parallelepiped, only two of the puncture points will belong to the surface, the remaining 4 will be outside the volume or outside the range of displacement for one pulse. Since the tool performs a discrete movement, it cannot be positioned at the puncture point. Therefore, it is necessary to find the nearest discrete point to the puncture point. Since the line has no direction, it can be considered as a zero vector

$$l = \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix}$$

In order to determine the directions to each discrete point, it is necessary to find the vectors passing through each of the discrete points or all the discrete vectors formed by OT and the discrete points belonging to the surface of the parallelepiped.

$$p.1 -> l_1 = \begin{bmatrix} \Delta X_{step} \\ \Delta Y_{step} \\ \Delta Z_{step} \end{bmatrix}$$

$$p.2 -> l_2 = \begin{bmatrix} \Delta X_{step} \\ \Delta Y_{step} \\ 0 \end{bmatrix}$$

etc. for 26 points lying on the surface of the parallelepiped.

The zero vector will coincide in direction with a number of discrete vectors defined by the discrete points. To determine which discrete vector to move the tool along, it is necessary to compare the zero vector with all discrete vectors that match the direction of the zero vector.

It is necessary to find the magnitude of the zero vector and the magnitude of the vector from the origin of the coordinate system to the point of the puncture, which has the form:

$$l_{len} = \sqrt{\lambda^2 + \mu^2 + \nu^2}$$

$$l_{len} = \sqrt{x_{pr}^2 + y_{pr}^2 + z_{pr}^2}\ , \qquad (13)$$

The magnitude of the discrete vectors has the form:

$$l_{len1} = \sqrt{\Delta X_{step}^2 + \Delta Y_{step}^2 + \Delta Z_{step}^2}$$

$$l_{len2} = \sqrt{\Delta X_{step}^2 + \Delta Y_{step}^2 + 0}$$

etc. for all discrete vectors.

This discrete vector that is closest to the punch vector is the closest discrete tool displacement to the actual path. This is how it is determined to which of the motor drivers to send an impulse to carry out the necessary displacement. When the puncture hits the middle of the quarter of a given plane, the magnitude of the puncture vector will have the same difference as four of the discrete vectors. In this case, no single discrete vector can be determined, so any matching vector can be chosen.

Since all calculations are made for a coordinate system with origin t.0, after moving the tool to one of the discrete points, it is necessary to translate the coordinate system to the new point. This will change the values of $x_{end}, y_{end}, z_{end}$. The zero vector is different after each coordinate system translation.

## APPLICATION SOFTWARE

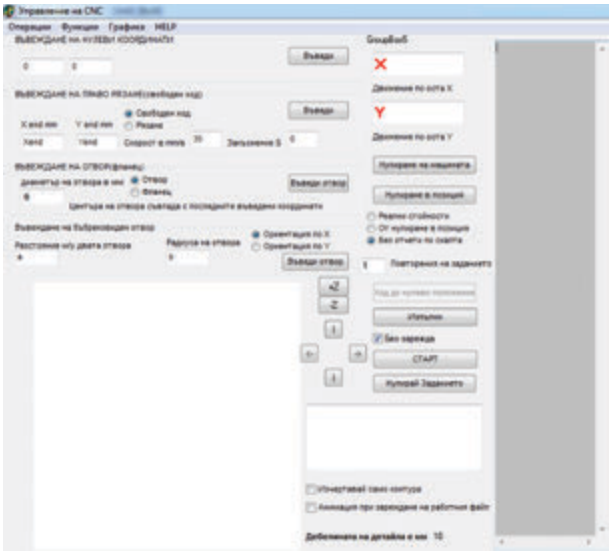


***Fig.4**. Software implemented on the basis of a method by direct calculation of a single impulse.*

Figures 4 and 5 show the developed software according to the proposed methodology. The software works under Windows operating system. The buttons "I" and "->" serve to move the machine in real time along its axis X and Y.

The developed software is implemented on a CNC machine for plasma metal cutting. Due to the type of operation of the machine, the software implements the presented mathematical model along two axes X and Y, since the movements are only in the plane. The software generates the necessary G-code and executes it.

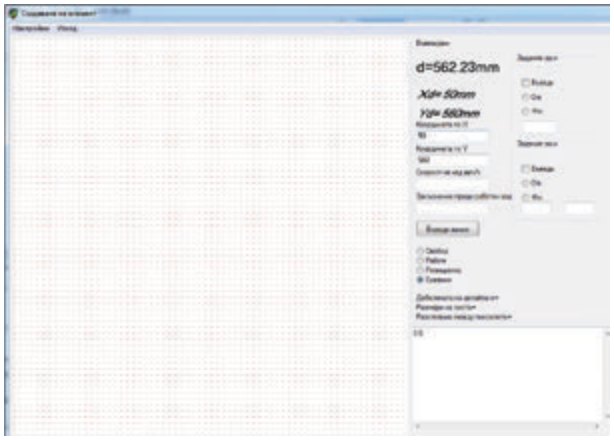



***Fig.5****.Create an item*



***Fig.6****. Plasma cutting machine*

The fig.6 shows a plasma cutting machine using control software by the direct calculation method of a single pulse.

## CONCLUSION

The presented mathematical model can also be applied to machines with different types of mechanics. For machines performing circular movements or a combination of linear and circular axes. The advantage of the method is very good synchronization of all engines and maximum approximation to the ideal tractor. Through the model, trajectories of functions can also be realized, which can be set through their equations. This can result in minimizing the generated G-code.

The need for large computing power is a disadvantage of the model. Because each pulse is calculated immediately before its occurrence. If a higher generated frequency is needed, the calculations can be done before the pulses are applied. This generates an array of binary code that is executed at the appropriate frequency.

## REFERENCE

[1] Prodanov, P. I. M. Simeonov. "Control system of stepper motors in a machine with digital program control". Unitech 2011, November 18 – 19, 2011, Gabrovo, p.I-230 – p.I.234.

[2] Georgi Kamenarov. REFERENCE BOOK - HIGHER MATHEMATICS

[3] Mikhov M., M. Zhilevski, Analysis of a Multi-Coordinate Drive System Aiming at Performance Improvement, Proceedings of the International Conference "Research and Development in Mechanical Industry", Vol. 2, pp. 1102-1107, Vrnjacka Banja, Serbia, 2012, ISBN 978-86-6075-037-4.

[4] Mikhov M., M. Zhilevski, A. Spiridonov, Modeling and Performance Analysis of a Spindle Electric Drive with Adaptive Speed Control, Journal Proceedings in Manufacturing Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 153-158, Bucharest, Romania, 2012, ISSN 2067-9238.

[5] Syed Hassaan Ahmed; Nauman Razzaq; Zaman Malik; Umair Qadeer; Iqra Sarfraz; Aasim Sharif, Design & fabrication of MATLAB based solar powered CNC machine, 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)2017, Electronic ISBN:978-1-5386-0484-7

[6] Yusri Yusof; Kamran Latif, Development of new open soft-CNC system, International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT) 2015, Electronic ISBN:978-1-4799-7952-3

[7] He Sicong; Huang Dagui; Feng Daiwei; Huang Xiaogang, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2008, Print ISBN:978-1-4244-2631-7.

# ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ С ДОЗИРАНЕ НА ЕНЕРГИЯТА ЧРЕЗ ИНДУКТИВНОСТ

**Десислав Илиев[1], Николай Маджаров[2]**

[1]*Технически университет-Габрово*
[2]*Технически университет-Габрово*

# CONVERTERS WITH ENERGY DOSING BY INDUCTANCE

**Desislav Iliev, Nikolay Madzharov[2]**

[1] *Technical University of Gabrovo, BG*
[2] *Technical University of Gabrovo, BG*

**Abstract**

*This paper presents the results of a studying of converters, demonstrating their ability to maintain a constant output power as the load parameters change without using the regulation properties of the control system.*

*The following circuits are analyzed - The boost converter, buck – boost converter, buck-boost converter with galvanic isolation, circuit from patent US 10,700,598 B2. The limiting conditions for the operation of the circuit with constant output power or output voltage are derived. The regulation characteristics, built in function of the value of the load and inductance, make it possible to evaluate the behavior of the converters and to carry out their design.*

**Keywords:** energy dosing; inductance; converter.

## 1. ПРИНЦИП НА ДОЗИРАНЕ НА ЕНЕРГИЯТА

Методът на дозиране на енергията посредством кондензатори е изследван и използван в [1-12], като се прилага на практика в промишлени уредби за индукционни, ултразвукови, газоразрядни, йонно-плазмени и лазерни технологии, а също и при безконтактното зареждане на електромобили.
До идеята за създаването на такъв вид преобразуватели се достига, когато съпротивлението на товара се променя с голяма динамика и в много широки граници - от режим на празен ход до режим на късо съединение. Чрез преобразувателите с дозиране на енергията може да се ограничи изходния ток и/или да се поддържа изходната мощност в точно определени граници.

Съществуват много принципни схеми на преобразуватели с дозиране на енергията [2,3,6,9]при които като дозиращ елемент да се използва кондензатор. Първоначално той се зарежда от захранващия източник, а след това запасената енергия в него се прехвърля в товара. Чрез правилния подбор на параметрите на кондензатора и режимите на работа на схемата се осигурява дозирането на енергията към консуматора. Мощността (P), която се отдава в товара при тези схеми може да се изчисли посредством формула 1.

$$P = kE^2C_df \quad (1)$$

където:
P - мощност, предавана към товара; E - захранващо напрежение; $C_d$ – капацитет на дозиращия кондензатор; f - работна честота; к- коефициент в зависимост от схемата (еднотактна, полумостова, мостова)

В настоящата работа са представени схеми, имащи подобни свойства, използващи метод с дозиране на енергията посредством индуктивен елемент. При тях се използва обстоятелството, че първоначално индуктивността се свързва към захранващия източник и в нея се запасява енергия, а след

това тази енергия се отдава в товара. Мощността, която се отдава в товара може да се изчисли със следния израз:

$$P = kI^2Lf \quad (2)$$

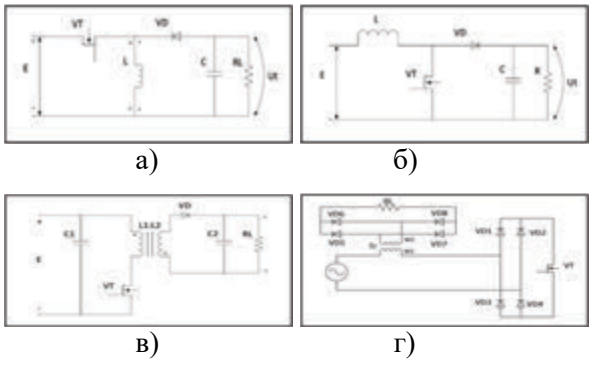
където:
P- мощност, предавана към товара; I- ток до който се зарежда индуктивността; L- индуктивност; f- работна честота
к- коефициент в зависимост от схемата (еднотактна, полумостова, мостова).

При неизменни стойности на индуктивността, максималната стойност на тока през нея и работната честота, мощността която се предава към товара е неизменна и не зависи от неговите параметри.

Тези схеми са добре изучени, но не са правени изследвания, относно възможноста да поддържат неизменна изходна мощност без да се въздейства чрез системата за управление върху алгоритъма на работа на силовата схема.

## 2. ИЗСЛЕДВАНЕ НА СХЕМИ НА ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ С ДОЗИРАНЕ НА ЕНЕРГИЯТА, ИЗПОЛЗВАЩИ ИНДУКТИВНОСТ

Направен е анализ на електромагнитните процеси и са изследвани четири различни вида преобразуватели с дозиране на енергията, използващи индуктивност, като вниманието е насочено към свойството им да поддържат постоянна изходна мощност (P) при промяна на товарното съпротивление ($R_t$) – повишаващ импулсен преобразувател, полярно реверсивен преобразувател, галванично разделен полярно реверсивен преобразувател, схема от патент US 10,700,598 B2 (Фиг. 1).




***Фиг. 1**. Преобразуватели с дозиране на енергията чрез индуктивност – а)- повишаващ преобразуватег, б) полярно реверсивен преобразувател, в)- галванично разделен полярно реверсивен преобразувател, г)- схема от патент US 10,700,598 B2*

### 2.1 ПОВИШАВАЩ ИМПУЛСЕН ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ

Принципната схема на преобразувателя е представена на фигурата по-горе (Фиг. 1а). В началото на всеки период се отпушва транзистора и се запасява енергия в индуктивността. При запушване на транзистора запасената енергия се отдава в товара, като напрежението на товара е по-голямо от захранващото. Като положителни качества на този вид преобразувател могат да се посочат малките пулсации на входния ток (при коефициент на регулиране от 0,25 до 0,75) и това, че той е непрекъснат. Това предопределя много добри параметри по отношение на EMC.

Като недостатък може да се посочи големите импулсни токове през елементите на схемата, както и това, че изходния ток е с големи пулсации и се налага използването на филтриращ кондензатор с голям капацитет.

### 2.2 ПОЛЯРНО РЕВЕРСИВЕН ИМПУЛСЕН ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ НА ПОСТОЯННО НАПРЕЖЕНИЕ.

Принципната схема на този вид преобразувател е показана на фигурата по-горе (Фиг. 1.б). Схемата има два работни интервала – на запасяване на енергия в индуктивността при отпушен транзистор и на отдаване на тази енергия в товара във втория интервал при запушване на транзистора. Като основен недостатък на този вид преобразувател може да се изтъкне импулсния характер на входния и изходния ток. Необходимо е да се използват големи по стойност филтровите кондензатори, за да се намалят пулсациите в изходното напрежение. Транзистора и диода в схемата са подложени на големи пикови претоварвания по ток и напрежение.

### 2.3 ГАЛВАНИЧНО РАЗДЕЛЕН ПОЛЯРНО РЕВЕРСИВЕН ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ.

Принципната схема на този вид преобразувател е показана по-горе (Фиг. 1в). Тук енергията се запасява в първичната намотка на трансформатора и след това се отдава в товара.

Като предимства на този вид преобразувател може да се посочи, че вторичната намотка на трансформатор служи като филтриращ елемент и това спомага да се нама-

лят стойностите на филтриращия кондензатор. Чрез коефициента на трансформация може да се постигнат различни по стойност изходни напрежения. Като недостатъци може да се изтъкне това, че когато транзистора е запушен, товара се захранва само с енергията, запасена във филтровия кондензатор. Изходното напрежение е с големи пулсации.

### 2.4 ГАЛВАНИЧНО РАЗДЕЛЕН ПОЛЯРНО РЕВЕРСИВЕН ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ.

При схемата от патент US 10700598 B2 (фиг. 1.г) като дозираща индуктивност се използва първичната намотка на високочестотния трансформатор. Независимо дали работи в режим на непрекъснат ток или режим на прекъснат ток, консумирания от захранващата мрежа ток е винаги непрекъснат или с много малки паузи, т.е. добра електромагнитна съвместимост.

## 3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

Анализът на преобразувателите е извършен аналитично на основата на протичащите електромагнитни процеси, както и с помощта на компютърно създадени модели. Важно е да се отбележи, че получените емпирични зависимости дават възможност да се проектират схемите и да се изследват техните дозиращи свойства.

На долната фигура (Фиг.2) са обобщени резултатите от изследването на четирите схеми.

| Rt,Ω | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ut, V | 571.80 | 738.80 | 882.30 | 998.20 | 1098.75 |
| It, A | 114.36 | 73.88 | 58.82 | 49.91 | 43.95 |
| Pout, W | 65391.05 | 54582.54 | 51896.89 | 49820.16 | 48290.06 |
| Is, A | 666.00 | 631.00 | 615.00 | 613.00 | 612.00 |

а)

| Rt,Ω | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ut, V | 420.35 | 596.10 | 729.90 | 842.80 | 941.50 |
| It, A | 84.07 | 59.61 | 48.66 | 42.14 | 37.66 |
| Pout, W | 35338.82 | 35533.52 | 35516.93 | 35515.59 | 35456.89 |
| Is, A | 600.00 | 600.00 | 600.00 | 600.00 | 600.00 |

б)

| Rt,Ω | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ut, V | 421.05 | 597.00 | 730.95 | 843.20 | 942.75 |
| It, A | 84.21 | 59.70 | 48.73 | 42.16 | 37.71 |
| Pout, W | 35456.62 | 35640.90 | 35619.19 | 35549.31 | 35551.10 |
| Is, A | 600.00 | 600.00 | 600.00 | 600.00 | 600.00 |

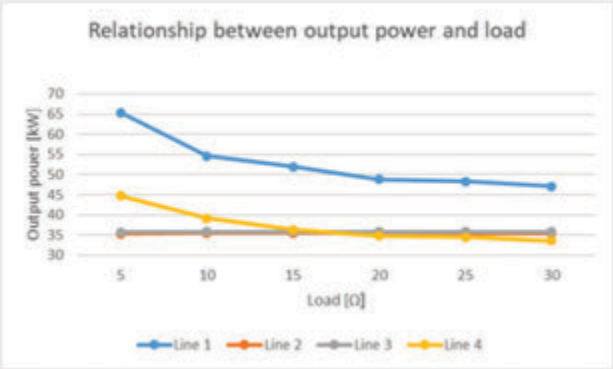
в)

| Rt,Ω | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ut, V | 467.05 | 629.90 | 742.95 | 850.20 | 933.25 |
| It, A | 93.41 | 62.99 | 49.53 | 42.51 | 37.33 |
| Pout, W | 43627.14 | 39677.40 | 36798.31 | 36142.00 | 34838.22 |
| Is, A | 600.00 | 600.00 | 600.00 | 600.00 | 600.00 |

д)

***Фиг. 2****. Входни и изходни данни на преобразувателите: а)-понижаващ преобразувател, б)- полярно реверсивен преобразувател, в)- галванично разделен полярно реверсивен преобразувател, г)- схема от патент US 10700598 B2.*

На фигурата по долу (Фиг.3) в графичен вид е обобщена информацията от изследванията на четирите схеми, като е акцентувано на мощността, отделена в товара в зависимост от неговото съпротивление.




***Фиг. 3****. Изходна мощност на преобраувателите спрямо товара: Line 1- пониаващ трансформатор; Line 2- полярно реверсивен реобразувател ; Line 3- галванично разделен полярно реверсивен преобразувател; Line 4- схема от патент US 10700598 B2.*

Вижда се, че най-добри съгласуващи свойства имат схемите buck – boost converter and buck-boost converter with galvanic isolation. При тях мощността се поддържа неизменна при промяна на товарните параметри в диазона от 5 до 30 ома. При boost converter and схема от патент US 10,700,598 B2 мощността не се поддържа неизменна в целия диапазон поради факта, че в интервала в който се отдава енергия към товара участва и захранващия източник, т.е. не се изпълняват условията от (2). Това е по ясно изразено при малките стойности на товарното съпротивление. В диапазона от 15 до 30 Ω на товарното съпротивление се получава относително добро поддържане на мощността, т.е. изразяване на дозиращите свойства.

## 4. ИЗВОДИ

В настоящия доклад са представени схеми с дозиране на енергия посредством индуктивен елемент. Доказана е възможността да поддържат неизменна изходна мощност при изменение на товарните параметри в диапазона на товарното съпротивление 5 – 30 ома.

При две от тях: полярно реверсивния трансформатор и галванично разделения полярно реверсивен трансформатор изход-

ната мощност се поддържа постоянна с толеранс от +/- 0.35 %. При повишаващия трансформатор and схема от патент US 10,700,598 B2 изходната им мощност се поддържа неизменна след определена стойност на товарното съпротивление (в случая след 15 Ω) с много малка разлика (под 2 %) между аналитично изчислената и тази от компютърната симулация стойности.

Основния извод който може да се направи е, че представеното свойство на схемите с дозиране на енергията посредством индуктивен елемент може да се използва в захранващи DC източници. Мощността предавана в товара е неизменна благодарение на вътрешния автоматизъм на схемите, без да се използват регулиращите и стабилизиращи свойства на системите за управление. Това е много необходимо и важно при товари с голяма динамика на товарните параметри и голяма разлика между минималната и максимална стойност.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящият доклад е във връзка с изследванията по договор № 2102У- „Разработка на електромобил“, към „Фонд научни изследвания“- МОН.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] S. Pareek, A. Sujil, S. Ratra and R. Kumar, "Electric Vehicle Charging Station Challenges and Opportunities: A Future Perspective," 2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICONC345789.2020.9117473.

[2] Boulatov O. G., A.I. Tsarenko. Thyristor-Capacitor Converters, Energoizdat, 1982 (in Russian).

[3] Madzharov N. D., Power electronics, Gabrovo, 2021, ISBN 978 954 683 636 6. (in Bulgarian)

[4] Yusop, Y.; Saat, S.; Husin, H.; Nguang, S.K.; Hindustan, I. Analysis of Class-E LC Capacitive Power Transfer System. Energy Procedia 2016, 100, 287–290, doi:10.1016/j.egypro.2016.10.179.

[5] Triviño, A.; González-González, J.M.; Aguado, J.A. Wireless Power Transfer Technologies Applied to Electric Vehicles: A Review. Energies 2021, 14, 1547. https://doi.org/10.3390/en14061547

[6] A. Elekhtiar, L. Eltagy, T. Zamzam and A. Massoud, "Design of a capacitive power transfer system for charging of electric vehicles," 2018 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), 2018, pp. 150-155, doi: 10.1109/ISCAIE.2018.8405461.

[7] R. W. Erickson, D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Kluwer Academic Publishers, NJ, USA, 2000.

[8] N. Madzharov, A. Tonchev, “Inductive high power transfer technologies for electric vehicles”, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 65, No. 2, pp. 125–128, 2014

[9] Madzharov, N. ,High-frequency power source with constant output power, (2016) Journal of Engineering Science and Technology Review, 9 (6), pp. 157-162.

[10] G.A Covic, JT Boys, Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications,IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, no. 1, pp. 28-41, 2013

[11] Patent - US 10700598 B2, PFC circuit with very low THD, D. Partridge.

[12] US 8,286,406 B2, Donati, A., N. Madzharov, A. Melandri, F. Sighinol, INDUCTION SEALING DEVICE FOR PRODUCOING POURABLE FOOD PACKAGES, Oct. 16, 2012

# ENERGY STORAGE CHARGING MODULE WITH DIGITAL CONTROL

**Ivan Stefanov[1], Dimitar Arnaudov[1]**

*[1] Technical University of Sofia, Bulgaria*
*ivan.stefanov.513@gmail.com, dda@tu-sofia.bg,*

**Abstract**

*The paper considers a module for charging energy storage cells - supercapacitors or rechargeable batteries. The module is controlled via a digital interface to achieve constant current, constant voltage or constant power modes of operation. The control of the module is through an Arduino based system. This allows the construction of a control system for the charging processes of the individual cells, including a virtual instrument.*

*В статията е разгледан модул за зареждане на клетки за съхранение на енергия – суперкондензатори или акумулаторни батерии. Модулът е управляван, чрез цифров интерфейс и може да работи в режими на константен ток, константно напрежение и константна мощност. Управлението на модулът се осъществява посредством Arduino базирана система. Това позволява изработването на система за управление на зареждането на всяка клетка включваща виртуален инструмент.*

**Keywords:** DC-DC, digital control, energy storage, charging.

## INTRODUCTION

The energy storage systems are conprised of series-connected cells which voltages must be equalized. The equalization is accomplished through additional charging current or discharging of the cell. The paper considers a variant in which current is added to the cell with the help of an additional DC-DC converter. In the experimental part a converter with digital control capabilities based on InnoSwitch 3 Pro was investigated.

InnoSwitch 3 Pro is a series of digital controllers for DC-DC converters operation in constant voltage, constant current and constant power modes and has built-in synchronous rectifier control. The controllers have $I^2C$ interface through which the digital communication is carried out for setting the operating mode and its parameters. For the purposes of the study an RDK-641 development board containing an INN3377C based converter and a PIC16F18325 MCU was used to demonstrate the digital control capabilities. It's possible to disconnect the built-in MCU from the $I^2C$ bus and connect an external controller instead as was done with Arduino board for the experiments. The aim of the study of a digitally controlled converter is its use in active voltage balancing systems to equalize the voltages of energy storage elements by supplying an additional charging current to each element ina a series-connected cell pack as shown in Fig. 1.

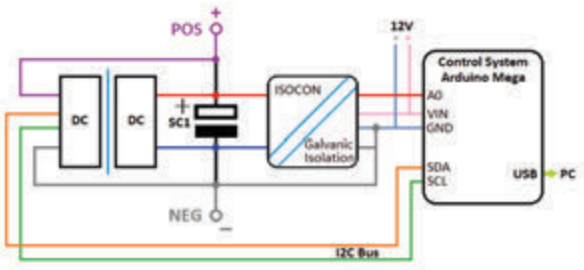



***Fig. 1*** *– One element charging circuit*

## EXPOSITION

A) Control via $I^2C$

The control of the converter is carried out by setting the mode and its parameters via writing the corresponding values in the registers of the InnoSwitch controller through the $I^2C$ interface. Fig. 2 shows the connection of the development board with the converter to the Arduino control board.

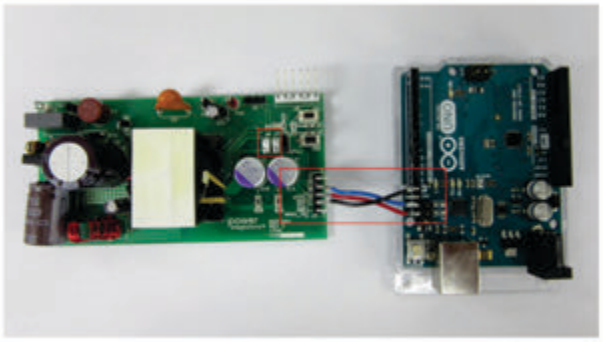


***Fig. 2** – RDK-641 connection to the Arduino*

B) Commands for setting voltage and current

For the study one of the provided examples with the manufacturer software library was modified and used to provide the desired voltage and current for the various experiments and to output data to the control system so that it could be logged and used to plot the collected data.

Management is done by using the parameter setting library functions provided by the manufacturer library. Fig. 3 shows block diagram of the library structure and its levels of abstraction. The library provides the hardware drivers, the communication drivers for the InnoSwitch controller - frame formation and compliance with the timing parameters of the communication and an API providing the functions for parameter setting and calculation of the registers values with the required parity checks.

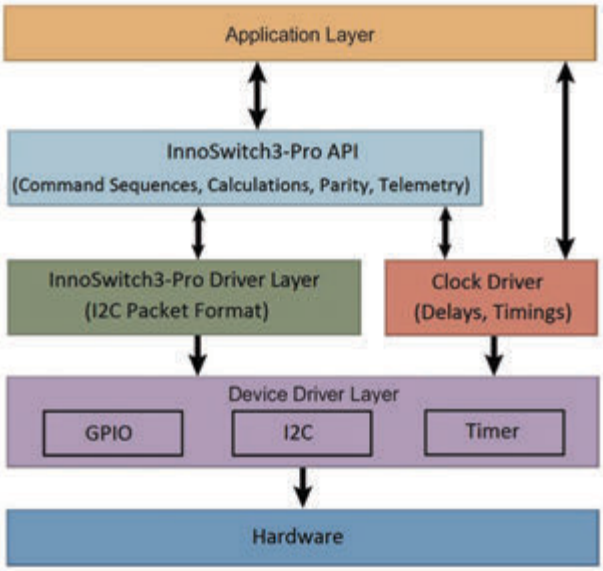



***Fig. 3** – InnoSwitch control library structure block diagram*

Communication with the controller requires the creation of control objects and the initialization of the library, as shown in Fig. 4.

```
42. //Step  1  :  Add the Header Files
43. #include <Drv_Rtc.h>
44. #include <Drv_i2c.h>
45. #include <Inno3Pro.h>
46. #include <Inno3ProConfig.h>
47.
48. //Step  2  :  Create the class instance
49. Inno3Pro_Rtc Inno3ProClk;
50. Inno3Pro_Application Inno3ProApp;
51.
52. //Step 3 :  Write Initial Commands to Inno Pro
53. void setup()
54. {
55.   // initialize the serial communication:
56.   Serial.begin(9600);
57.   Inno3ProApp.Inno3Pro_Initialization();
58. }
```

***Fig. 1.4** – Library initialization*

Output voltage and current are meeasured by the feedbacks of the InnoSwitch controller and their values are read from its registers using the code shown in Fig. 5.

```
72. //Timer Routine For Automatic Activation of  Requests
73. if (Inno3ProClk.clock_HasTimeElapsedMs(u16_Request_Timer, 100))
74. {
75.
76.   Inno3ProApp.b_Request_Enable = true;
77.
78.   fReadVolt = Inno3ProApp.Inno3Pro_Read_Volts();
79.   Serial.print(fReadVolt);
80.
81.   Serial.print("\t");
82.
83.   fReadAmps = Inno3ProApp.Inno3Pro_Read_Amps();
84.   Serial.println(fReadAmps);
85.
86.   u16_Request_Timer = Inno3ProClk.clock_GetTimeStampMs();
87. }
```

***Fig. 5** – Measurement of voltage and current*

The desired output voltage setting for the constant voltage mode and the current limit for the constant current mode are set by the command at line 89 shown in Fig 6. Line 90 shows a command to set an additional voltage to compensate for the voltage drop across the connecting cable to the load, setting the voltage in [mV]. On line 91 is the command to set the threshold voltage (in [V]), after which the converter goes into constant output power mode (power limitation). Line 92 shows the output switch control command, which turns power on and off at the board's output terminals, with 1 turning the output on and 0 turning it off. When power is initially applied to the converter the output is turned off and the power-on command must be executed at least once atfer the converter is powered on. By setting the voltage and

current before turning on the output, time is provided for the converter to reach the desired output voltage before it is applied to the output terminals.

```
88.  //Set Voltage and current
89.  Inno3ProApp.Inno3Pro_Write_VI(10, 2.0);
90.  Inno3ProApp.Inno3Pro_Write_Cable_Drop_Comp(300);
91.  Inno3ProApp.Inno3Pro_Write_Volt_Peak(7);
92.  Inno3ProApp.Inno3Pro_Vbus_Switch_Control(1);
```

***Fig. 6*** *– Setting of voltage and current*

With the use of this program experimental studies of the behavior of the converter at different set parameters were made at different active load resistances which have been simulated using a programmable electronic load operating in the constant resistance mode in order to observe the different operating modes of the converter and the transitions between them. In a real voltage balancing system, the load will be an energy storage element such as battery or supercapacitor.

## EXPERIMENTAL RESULTS

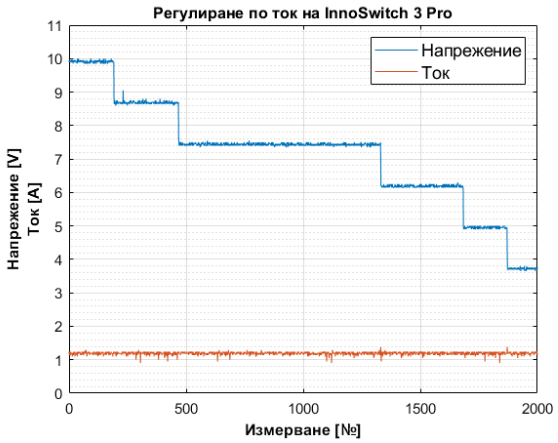



***Fig. 7*** *– Output voltage and current in constant current mode of operation at 1 A and different load resistance*

Fig. 7 shows the change of the output voltage (blue) when the active load resistance changes with the programmable load, thus the output current (orange) remains constant, which means that the converter works in constant current mode. It can also be seen that the minimum current in this mode is ~1.2 A which is determined by the shunt resistance which is 5mΩ and a 32 mV drop across it at a maximum current of 6.4 A and the minimum current is 20% of the maximum which makes 1.28 A. When charging a battery the maximum voltage must be reduced to the desired maximum charging voltage for the cell.

In Fig. 8 to 12 show the output voltage and current at different load resistances, in constant voltage mode set to 10 V and current limit from 1 A to 5 A. On each graph the moment of transition from constant voltage to constant current mode is indicated by an arrow. In each figure, the values of the software-set voltage and current are shown with dashed gray horizontal lines, and the load at which the converter is expected to switch from constant voltage mode to constant current mode is shown with a purple vertical line. The actual transition between the two modes is indicated by an arrow. The difference between the expected and the actual transition moment is due to the resistance of the connecting wires.

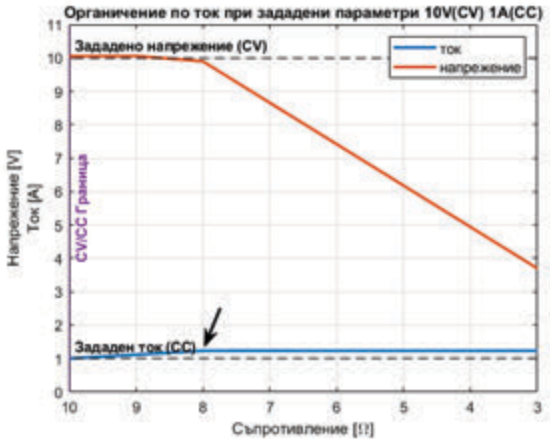



***Fig. 8*** *– 10 V CV / 1 A CC Mode*

In Fig. 8 the transition occurs when the minimum current for the constant current mode is reached at ~1.2 A.

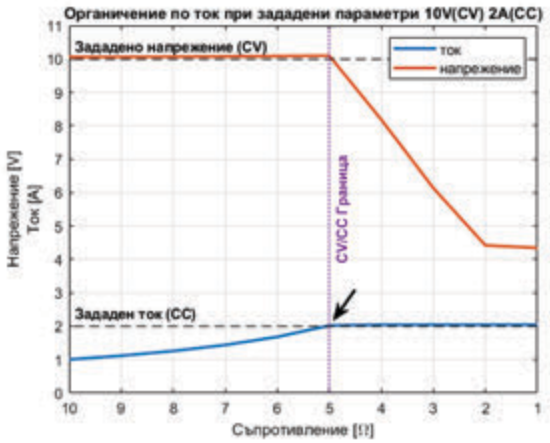



***Fig. 9*** *– 10 V CV / 2 A CC Mode*

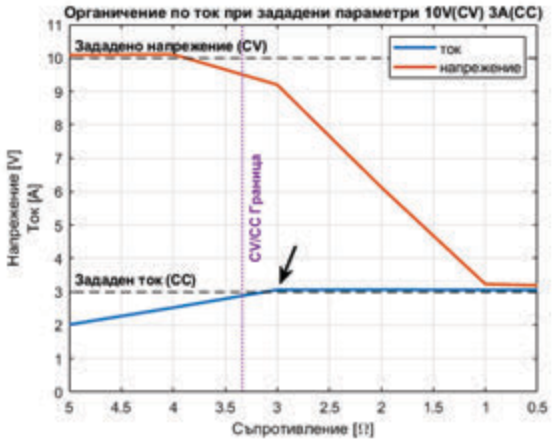



***Fig. 10*** *– 10 V CV / 3 A CC Mode*

In Fig. 9 and 10 the voltage almost does not change towards the end because of the resistance of the connecting wires and because of the set compensation of the voltage drop on them, which is set with the same value for all the experiments. In Fig. 11 and 12, a slight increase in voltage is also observed at very low load resistance, which is also due to the cable voltage drop compensation.

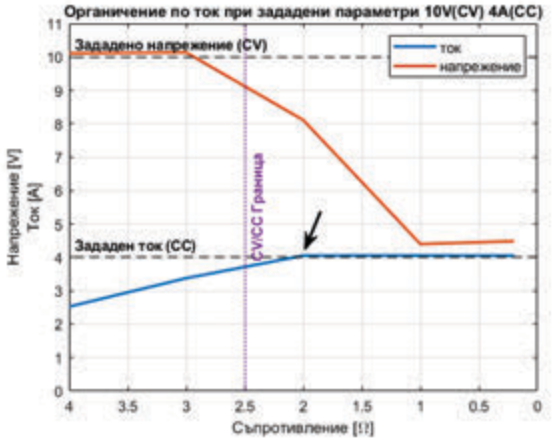



***Fig. 11*** *– 10 V CV / 4 A CC Mode*

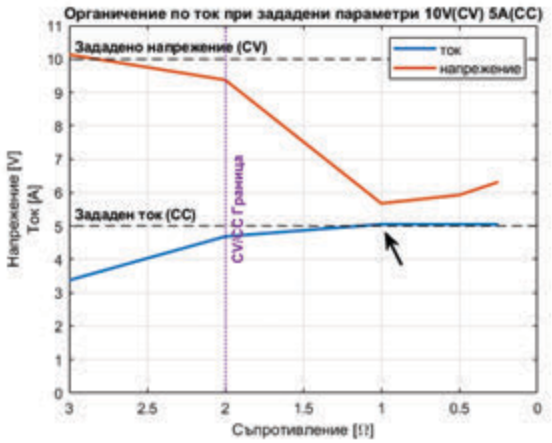



***Fig. 12*** *- 10 V CV / 5 A CC Mode*

Tab. 1 and 2 give the output voltage and current values measured with a digital multimeter and the ones read from the InnoSwitch feedbacks through the $I^2C$ interface. Voltage is measured at no-load(idle).

| Зададено | 11V | 12V | 13V | 14V | 15V |
|---|---|---|---|---|---|
| Мултимер | 10,998V | 11,998V | 12,998V | 13,998V | 14,998V |
| InnoSwitch | 11,86V | 11,84V | 12,8V | 13,75V | 14,72V |

***Tab. 1*** *– Voltage feedback evaluation*

The current was measured with a programmable load connected to the output in constant current mode with the corresponding current magnitude.

| Зададено | 1A | 2A | 3A | 4A | 5A |
|---|---|---|---|---|---|
| Мултимер | 0,998A | 1,999A | 3A | 4,002A | 5,002A |
| InnoSwitch | 1A | 1,98A | 2,96A | 3,94A | 4,905A |

***Tab. 2*** *– Current feedback evaluation*

## CONCLUSION

From the experiments and the data from them, it can be said that this type of converters can be successfully used in active voltage balancing systems. The converter supports all necessary operating modes – constant current, constant power and constant voltage. The digital control capabilities make this type of converter very convenient for working with a large number of cells where the battery management system can directly set the required additional equalizing current of each converter.

The maximum difference in the current and voltage measured by the feedback loops compared to the actual values measured with a digital multimeter is less than 2%, which is accurate enough for this type of converter to be used in voltage balancing systems.

## REFERENCE

[1] Power Integrations, Inc., “Reference Design Report for a 40 W Power Supply Using InnoSwitchTM3-Pro INN3377C-H301 and Microchip’s PIC16F18325 Microcontroller”, url: https://www.power.com/downloads/documents/rdr-641_40watt_constant_power_variable_output_power_supply_using_innoswitch3-pro.pdf, 2022.

[2] Power Integrations, Inc., “AN-77 - InnoSwitch3-Pro Code Library using Arduino.”, url: https://www.power.com/downloads/documents/an-77_innoswitch3-pro_code_library_using_arduino.pdf, 2022
[3] Ivan Stefanov, “Energy storage system”, Sofia, Technical University of Sofia, 2022
[4] Power Integrations, Inc., “InnoSwitch3-Pro Data Sheet.”, url: https://www.power.com/downloads/documents/innoswitch3-pro_family_datasheet.pdf, 2022
[5] D. Arnaudov, K.Kishkin, I.Stefanov, “Virtual Instrument for Capacitance Measurement of Supercapacitor Cells as part of an Energy Storage System”, Sozopol, ET 2022
[6] I. -C. Mituletu, D. Anghel, L. Ardeljan and M. Magda, "DC-DC Buck Converter Based on Arduino Uno Sliding Mode Controller," 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425185.
[7] X. Wei, X. Zhao and H. Dai, "The application of flyback DC/DC converter in Li-ion batteries active balancing," 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009, pp. 1654-1656, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289663.
[8] H. Priya V, A. T, P. Priya and S. Saravanan, "Bi-Directional Flyback DC-DC Converter For Solar PV - Battery Charger System," 2021 International Conference on Computing, Communication and Green Engineering (CCGE), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/CCGE50943.2021.9776460
[9] A. M. Kamath, K. G. Anjana and M. Barai, "Design and implementation of voltage mode digital controller for flyback converter operating in discontinuous conduction mode (DCM)," 2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/IICPE.2016.8079477.
[10] Y. -D. Yang, K. -Y. Hu and C. -H. Tsai, "Digital Battery Management Design for Point-of-Load Applications With Cell Balancing," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 8, pp. 6365-6375, Aug. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2940001.

# МОБИЛЕН БЕЗКОНТАКТЕН АМПЕРМЕТЪР

**Г.Н. Величков[1], С.В. Лозанова[1]**

*[1] Институт по роботика при Българска Академия на Науките*
*Ул. "Акад. Г. Бончев", бл.2, София 1113, България*
*Email: lozanovasi@abv.bg*

# MOBILE CONTACTLESS AMMETER

**G.N. Velichkov[1], S.V. Lozanova[1]**

*[1] Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences*
*"Acad. G. Bonchev" Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria*
*Email: lozanovasi@abv.bg*

**Abstract**

*The functional approach to the multisensors allows the achievement of the desired electronic properties. Some unexpected results have led to the question - what else in addition to the conversion of magnetic energy into an electric signal is "hidden" in the active regions of elements. Invention related to mobile contactless ammeter devised and applicable in control measurement technology, robotic systems with artificial intelligence, industrial manufactures, and energy measurement is presented in this paper. The new ammeter is based on contactless principle using modification of multisensor for magnetic field and temperature. Output signals as a function of the external field and temperature are linear and their polarity depends from magnetic field direction. The ammeter instrument contains sensor configuration and signal processing module situated on mobile robotized platform. The new solution is very suitable for power and current registration in many industrial applications. The achieved advantages are: improved conversion effect of the measurement system, simple construction, linear output signals and high precision measurement of magnetic induction. The mobile contactless ammeter via multisensor device is an original solution for precise automation control with high quality temperature compensation. Conducted pilot experiments with prototypes of this ammeter prove its practical feasibility in automation and robotics.*

**Keywords:** multisensor, Hall effect devices, in-plane sensitive silicon elements, mobile contactless ammeter, robotics

## ВЪВЕДЕНИЕ

Съществуват решения на безконтактен амперметър с висококоерцетивен тороиден магнит, през средната част на който преминава силов електрически кабел, свързан към товар, за който се осъществява измерване на консумирания ток. Тороидът е конструиран с тесен радиален процеп, в който е закрепен елемент на Хол с ортогонално магнитно активиране. Двата му входа са свързани към токоизточник, а двата изхода са диференциален изход за амперметъра, [1 - 7]. При известните безконтактни амперметри са използвани класическите ортогоналните елементи на Хол. Обхватът на приложение при съществуващите решения на такъв тип измервателни инструменти, има ограничения, породени от задължителното преминаване на силовия кабел през отвора на тороидалния магнит, [4,5]. По този начин се елиминират случите при измерване на ток в стационарно поставени кабели в хоризонтални равнинни повърхости. Като недостатък се явява и нелинейността на изхода на сензора, тъй като силовият кабел винаги трябва да е в средата на тороида. Важно условие е да няма утечка на магнитните силови линии извън тороида и съответното непропорционално разпределение на потока, въздействащ върху активната

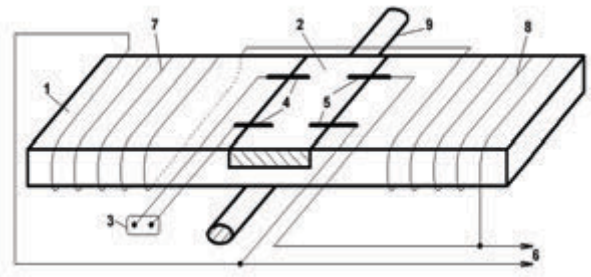
повърхност на ортогоналния елемент на Хол, поставен в тесния процеп. Тези условия изискват усложнена технологична настройка. В литературата и фирмените проспекти отсъства информация за приложение в този клас контролно-измервателна технология на съвременните, с по-висока ефективност и повишени функционални възможности сензори и мултисензори с равнинна магниточувствителност. Тяхна специфична особеност е, че всички контакти са планарни, т.е. те са разположени само от едната страна на полупроводниковата подложка – най-често силициева, а векторът на магнитното поле $\boldsymbol{B}$ е успоредно на равнината на чипа.

Основната цел на изследването е да бъде конструиран и тестван безконтактен амперметър, използващ многофункционалните сензори и мултисензори с равнинна чувствителност. Насочеността на разработката е да се обхванат решенията, когато силовият кабел не е възможо да преминава през тороида, а изходът се налага да е във висока степен линеен. Такива системи са наложителни в идустрията и автоматизацията на производството, [1].

## АРХИТЕКТУРА И ФУНКЦИОНИРАНЕ НА АМПЕРМЕТЪРА

Новата архитектура на безконтактния амперметър съдържа висококоерцетивен продълговат магнит, линеен с равнина чувствителност сензор на Хол или мултисензор за магнитно поле и температура, разработен в Института по роботика при БАН и токоизточник. В средната част на продълговатия магнит е формирана зона, в която се поставя магниточувствителния елемент, [7-12]. Входните контакти на сензора са свързани към токоизточник, а изходните формират диференциалния изход на амперметъра. Изходните контакти са съединени с двата края на меден проводник, който е навит еднопосочно в две еднакви, последователно свързани бобини. Тези бобини са разположени върху магнита, симетрично спрямо средната му част. Магнитът се поставя перпендикулярно върху силов кабел, свързан към товар. Действието на безконтактния амперметър се илюстрира с Фиг.1.

Както е известно безконтактното измерване на тока $I_0$ се заключава в регистрацията на стойността на магнитното му поле $\boldsymbol{B}_0$ без разкъсване на силовата верига 9.




***Фиг. 1.*** *Модул на безконтактен амперметър с положителна обратна връзка*

Този иновативен подход се различава от класическата за целта метрология, основаваща се на прекъсване на кабела 9 и свързване на еталонен резистивен шунт, [1,2, 4-6]. В нашия случай, Фиг. 1, се използва сензор 2, който изпълнява ролята на преобразувателен елемент с линеен изходен сигнал 6. Висококоерцитивният продълговат магнит 1, разположен в непосредствена близост до силовия кабел 9, свързан с товара, служи като концентратор на магнитния поток $\Phi$, генериран от протичащия в кабела 9 ток $I_0$ . Необходимостта от висок коерцетивен коефициент $\mu_r$ или магнитна проницаемост, е постигане на съществено увеличаване концентрацията на магнитните силови линии $\Phi$ в активната преобразувателна област на сезорния елемент 2. По такъв начин се повишава изходният сигнал – напрежението на Хол $V_A$ , $V_A \sim I_0$. Коефициентът $\mu_r$ показва в каква степен магнитното поле $B_0$ на тока $I_0$ се „задържа“, респективно усилва с магнитния концентратор 1. Най-общо, ефективната стойност на магнитната индукция $B$ се определя с израза $B \sim \mu_0.\mu_r$ , където $\mu_0$ е магнитната проницаемост във вакуум. Същевременно с разполагане на елемента 2 с равнинна чувствителност в средната част на магнита 1, в стеснения участък и непосредствено до сензора 2 се постига допълнително повишаване концентрацията на магнитните силови линии $\Phi$. Тази конфигурация магнит 1 - сензор 2 осигурява максимална част от потока $\Phi$ да попадне в преобразувателната област на елемента 2.

Перпендикулярното разположение на концентратора 1 по отношение на силовия кабел 9 предоставя възможност за максимална близост на генерираното от тока $I_0$ магнитно поле $B_0$ към сензорния елемент 2. Също така се осъществява възможност за оптимална взаимна ориентация на магнитния поток *Ф,* циркулиращ около силовия проводник 9 спрямо най-чувствителната преобразувателна зона на сензорния елемент 2. В резултат на това техническо решение се постига високо ниво в изходния сигнал 6, $V_A(B_0) \sim V_A(I_0)$. Всяка друга ориентация, въпреки че предоставя пропорционален магнитен поток $\Phi$ през сензора 2, чувствителността (преобразувателната ефективност) се намалява в резултат на неефективната ориентация. Напрежението $V_A(I_S)$ на изхода 6, след подходяща схемотехническа обработка и калибриране, предоставя информация за силата на протичащия ток $I_0$ през кабела 9. Допълнително повишаване на точността на измерване, съответно чувствителността на безконтактния амперметър, реализиран съобразно Фиг.1, се постига с иновативен подход – собствена положителна обратна връзка. Тя се осъществява с еднопосочно навит меден проводник, формиращ две еднакви, съединени последователно бобини 7 и 8, разположени симетрично спрямо средната зона на магнитната пластина 1. Двата края на бобините са свързани с изходните контакти на сензорния елемент 2. Положителната обратна връзка дава допълнително и съпосочно магнитно поле с основното, генерирано от тока $I_0$, $B(I_0)$. Важна особеност на този метод е линейността на този вторичен сигнал от положителната обратна връзка, тъй като самият изход на мултисензора 2 е линеен.

## РЕАЛИЗАЦИЯ НА МАГНИТОМЕТЪРА И РЕЗУЛТАТИ

Положителният ефект на новото техническо решение се състои в безконтактно измерване на тока $I_0$, реализирано за първи път със сензорен елемент с равнинна чувствителност, адекватно комбиниран с продълговат магнит. С този способ са преодолени проблемите, свързани с използването на тороиден магнит и класическите ортогонални сензори на Хол. Освен това е повишена точността на магнитометъра чрез конструктивни изменения, адекватни на равнинно-чувствителния подход в ефекта на Хол. Като магниточувсвителни елементи 2 с равнинна чувствителност могат да се използват сензори на Хол с три, четири, пет или шест планарни контакта, които са предложени и реализирани от Руменин и Лозанова, [3,7,8,11-14]. В нашият случай в безконтактния амперметър е използван мултисензор за магнитно поле и температура. Този силициев градивен елемент позволява с една и съща преобразувателна област в чипа, да се измерват едновременно и независимо силата и посоката на магнитното поле ***B***, както и температурата на околната среда *T*, [7-13]. В новото техническо решение, използването на мултисезор има важно предимство. С нивото на температурния сигнал *V(T)* и подходяща компенсационна схема, може успешно да се сведе до минимум негативното влияние на температурата на средата, която влияе негативно на нивото в изходните сигнали 6 от сензора, особеност характерна за всички полупроводникови преобразуватели 2. Така се повишава стабилността на показанията за тока в товара $I_0$ и се елиминира добавения температурен дрейф в изходите 6.

Максималната относителна грешка при измерването на тока и напрежението се определя от точността на измервателната апаратура. В използваните от нас измервателни устройства – дигитални амперметри и волтметри грешката съставлява ± 0.05 %. Захранването на системата е осъществено комбинирано: чрез блок V&A Instrument (HY 3005 D-2, HY 5003 - 2, HY 5003, HY 3005 D) както и HP 34401A и UNI-T – UTP3315TFL. В експериментите са използвани също цифрови мултимери от висок клас - HP 34401 A и BK Precision 5492 B. Проведени са и температурни изследвания на новия амперметър при $T = 25$ °C и $T = 60$ °C. Този параметър е регистриран с дигитален термометър на фирмата Bosch. Грешката при температурните измервания в интервала 10 ºC ≤ $T$ ≤ 80 ºC е ~ ± 0.1 ºC. Информацията за стойността на магнитното поле ***B*** се получава от монтиран високоточен *n*-GaAs сензор на Хол тип KSY 14 на фирмата *Siemens*. Грешката при измерването на

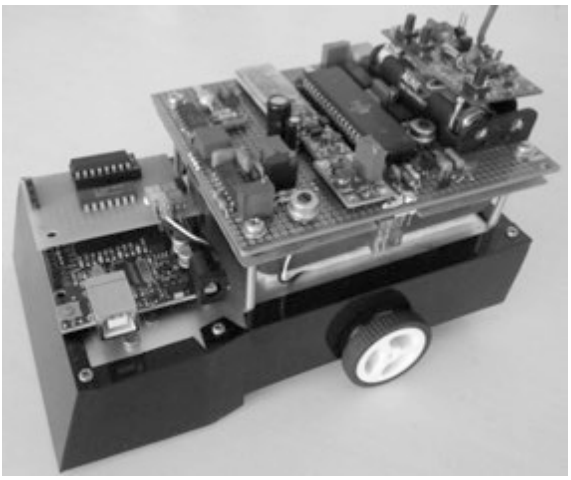
магнитната индукция е сума от отделните грешки на полупроводниковия сензор, регистриращ полето ***B***, обработващата сигнала електроника и грешката от калибрирането на измерващия Хол елемент. На практика всяка от тези грешки е около ± 0.3 %. От тук следва, че общата грешка при определянето на магнитната индукция $B$ е не повече от ~ ± 1.0 %. В нашите изследвания е използван тесламетър на швейцарската фирма *Schaefer.*

Тъй като поставените цели и задачи са изследователски, експерименталната точност е напълно достатъчна и е както в други европейски лаборатории за такъв вид измервания.

Реализираният безконтактен амперметър използва базовата архитектура от Фиг.1 и измерва променлив ток, но е възможно и регистрирането на постоянен ток с незначители корекции в схемотехниката при обработка на изходните сигнали 6.

За реализацията на продълговатия магнит 1, може да се използват магнитни сплави от пермалой (желязо-никелова стомана), ферит, $\mu$-метал, които са в непосредствена близост до сензорния елемент 2. Това е удобен подход при серийно производство. Оптималната стойност на висококоерцетивния коефициент $\mu_r$ на магнита 1, препоръчително следва да е $\mu_r$ ~1000. За постигане на още по-висока точност в някой специфични приложения, особено за целите на контратероризма, устройството от Фиг.1 може да се охлади до криогенни температури, например среда от течен азот $T$ = 77 K ($T$ = - 200 °C). Чувствителността нараства пет пъти предвид увеличената пдвижност на елктроните $\mu_n$ също около пет пъти, [15].

Безконтактният амперметър е реализиран върху автономна мобилна роботизирана платформа Фиг2., с елементи на изкуствен интелект. Роботът може да измерва тока $I_0$ в хоризонтално позиционирани силови кабели 9 в индустриални помещения при наличие, например, на стругове, бормашини, преси, леярни пещи и т.н. Функционирането на робота е оптимално, когато тези кабели са разположени на места, които да осигуряват перпендикулярно позициониране на амперометричния модул, Фиг. 1, към силовия кабел 9.



***Фиг. 2.*** *Прототип на мобилен безконтактен амперметър*

Измерването на силата на тока $I_0$, неговата температурна компенсация, амплитудата и честота се обработват от контролер в реално време. Получените данни за тези параметри се изпращат към компютър по безжичен интерфейс за допълнителни анализи и съхранение. Тази магнитометрична архитектура предоставя информация, чрез която се постига оптимален разход на ток и енергия в индустриални помещения, както и екологичен ефект.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализиран е мобилен безконтактен амперметър за променлив ток, Фиг. 2. В амперометричния модул е използван мултисензор за магнитно поле и температура с равнинна чувствителност и продълговат магнитен концентратор. Подобрена е преобразувателната ефективност на системата, повишавайки плътността на силовите линии. Така съществена част от магнитното поле, генерирано от тока в силовия кабел се „прихваща“ и насочва максимално към активната зона на равнинно-чувствителен сензорен елемент. С опростената конструкция на амперометричния модул отпада усложненото технологично решение за използване на тороиден магнит с процеп и задължителното преминаване на силовия кабел в средната му част. Предимство е линейността в изходния сигнал от пропорционално преминаващия магнитен поток през активната зона на сензора, независимо от разположението на силовия кабел спрямо

концентратора, като максималният изходен сигнал се получава при взаимната им ортгоналност. Повишена е измервателната точност в резултат на: увеличение на изходния сигнал. Това се постига от разполагането на продълговатия концентратор в непосредствена близост до сензора и използваната за първи път положителна обратна връзка, осъществена чрез свързване изхода на сензорния елемент с две еднопосочно навити бобини. Проведените пилотни експерименти с прототипи на този вариант на амперметър доказват практическата му целесъобразност в безконтактната автоматика и роботиката.

## REFERENCE


[1] Velichkov GN, Lozanova SV, Roumenin CS. Contactless ammeter, Reg. № 113463/20.12.2021.

[2] Ramsden E. Hall-Effect Sensors – Theory and Application 2nd ed. Newnes-Elsevier. Oxford 2006. ISBN: 978-07506-7934-3.

[3] Roumenin Ch. Solid State Magnetic Sensors. Elsevier. Amsterdam 1994. p.450. ISBN: 0 444 89401.

[4] Wais G. Physics of galvanomagnetic semiconductor devices, Energy, Moscow, 1974.

[5] Siemens. Magnetic Sensors. Data Book 07.96. Publ. by Siemens AG 1996.

[6] Popovic R. Hall Effect Devices 2ed. The Adam Hilger series on sensors. Bristol. IOP Publ. Ltd. 2004. ISBN: 0 7503 0855 9.

[7] Roumenin Ch. Microsensors for magnetic field. Chapter 9. in "MEMS – a practical guide to design, analysis and applications" ed. by Korvink J. and Paul O., William Andrew Publ. USA 2006, pp. 453-523; ISBN: 0-8155-1497-2.

[8] Roumenin CS, Kostov PT. In-plane sensitive Hall sensor, BG patent № 37208 B1/26.12.1983.

[9] Roumenin CS. Bipolar magnetotransistor sensors – An invited review, Sensors and Actuators, A 24 (1990) 83-105.

[10] Roumenin CS. Parallel-field Hall microsensors – An overview, Sensors and Actuators, A 30 (1992) 77-87.

[11] Roumenin CS. Magnetic sensors continue to advance towards perfection, Invited paper, Sensors and Actuators, A 46-47 (1995) 273-279.

[12] Lozanova SV, Roumenin CS. Paralell-field silicon Hall effect microsensors with minimal design complexity, IEEE Sensors Journal, 9(7) (2009) 761-766.

[13] Kaufmann T. On the offset and sensitivity of CMOS-based five-contact vertical Hall devices, in MEMS Technology and Engineering, v. 21, Der Andere Verlag, 2013, p. 147.

[14] Sander C, Leube C, Paul O. Three-dimensional magnetometer based on subsequent measurement principle, Sensors and Actuators, A 222 (2015) 329-334.

[15] Sze SM. Physics of Semiconductors, 2nd ed., Wiley-Intersc. Publ., John Wiley & Sons, New York, 1994.

# СЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ДЕФОРМАЦИОННОТО СЪСТОЯНИЕ НА СКАЛНИ МАСИВИ

**М.Л. Ралчев [1], С.В. Лозанова [1]**

*[1] Институт по роботика при Българска Академия на Науките*
*Ул. "Акад. Г. Бончев", бл.2, София 1113, България*
*Email: lozanovasi@abv.bg*

# SENSOR SYSTEM FOR DETERMINING THE DEFORMATION STATE OF ROCK MASSIVES

**M.L. Ralchev [1], S.V. Lozanova [1]**

*[1] Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences*
*"Acad. G. Bonchev" Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria*
*Email: lozanovasi@abv.bg*

**Abstract**

*Based on an experimentally registered new regularity - emission of mineral nano- and micro-sized particles during a strong uniaxial deformation of structurally disordered solid-state materials, a sensor system is proposed. It measures the stress state under pressure of rock formations. The obtained results are an integrated indicator for the timely identification of signs of pre-emergency and emergency conditions in the mountain massives, the continuous monitoring of objects from the critical infrastructure, assessment and forecasting of the seismological impact, etc.*

**Keywords:** particles emission, uniaxial deformation, rock structures, integrated indicator for establishing the failure events, seismic prognoses.

## ВЪВЕДЕНИЕ

За изследване на стратегически важния при добива на енергийни ресурси проблем, свързан с деформационното състояние на скалните масиви са разработени множество методи и инструменти. Независимо от многоцелевата и разнообразна информация, която те предоставят за ключови характеристики на този процес, получаваните данни са диференциални. Те се добиват в резултат на конкретен метод, за който е разработена еквивалентно реализираща го апаратура, [1,2]. Класическият принцип изключва възможността с едно явление или свойство интегрално да се добие едновременно информация за напрегнато-деформираното състояние и свързаните с него метрологични индикатори за скалните образования, нефтените и газовите хоризонти, урана, въглищата и др. Възниква обаче въпроса съществува ли ефект, който едновременно и независимо да предоставя данни, които интегрално да описват деформационното състоянието на твърдотелните структури. Ето защо усъвършенстването на съществуващите и реализацията на нови методи и инструменти за диагностика и контрол на характеристиките на геоложките масиви е от първостепенно значение. Приложимостта е в добивната индустрия, усвояването на подземните пространства, преди всичко газохранилищата, неразрушителния контрол в строителството за надеждността на крупни инженерни съоражения като мостове, виадукти, язовирни стени, високи сгради, качеството на бетоните

и т.н., [1,2]. Изучаването на напрегнатото състояние на неструктурираните или неподредените системи, основно скали, е свързано още с всевъзможни природни катаклизми - разместването на тектонските плочи и разломите. Събираната информация за този негативен процес разширява базата данни за евентуалните причини и симптоматиката, чрез които се разработват и усъвършенстват моделите за прогнозиране на земетресенията.

Неотдавна при конструирането на сензорни устройства за изследване на якостните характеристики на скали и бетони, експериментално е наблюдавана нова закономерност. Тя се заключава в емисия на нано- и микрочастици в обема и повърхността на скални структури при въздействие на високи едноосни деформации. Размерите и количеството на тези дисперсни микрофракции зависят от физикомеханичните свойства на материала и стойностите на налягането, [3-7]. Това необичайно явление мотивира възможността за използване на емисията на фини микрочастици от скалните образувания като интегрален сензорен метод за оценка на тяхното напрегнато състояние. В настоящата статия е представена иновативна сензорна система, използваща емисията на частици при едноосни деформации с цел следене и контролиране на признаците, предшестващи възникването на предаварийни и аварийни ситуации в планинските масиви.

## ЕМИСИЯ НА МИКРОРАЗМЕРНИ ЧАСТИЦИ ОТ СКАЛНИ СТРУКТУРИ

Възникването на микрочастици и създаването на наноструктури с предварително зададени свойства и характеристики е приоритетно технологично направление в много лаборатории. Добиването на полезни изкопаеми и особена на енергоносители с фосилен произход е съпроводено с отделянето на микродисперсни фракции и свръхфинен прах, които в общия случай са сериозни замърсители на околната среда, [8]. Независимо от постигнатите резултати, остава открит проблема – възможно ли е съществуването на възпроизводима закономерност, която интегрално да предоставя многокомпонентна информация, с която да се контролира деформационното състояние на скалните структури. Същевременно емисията на частици при структурните изменения в скалите при деформации е отдавна известен механизъм, [9]. Той се наблюдава както при натурните експерименти, свързани с взривяване на скални образувания в планините при прокарване на тунели и магистрали, в забоите при рудодобива, в лабораторните изпитвания на пробни тела при високи стойности на деформацията и др. Това явление е особено интензивно преди настъпване на разрушаването на структурите. Тези процеси обаче дълго време не са били обект на целенасочено изучаване. Ето защо фундаменталните изследвания за изясняване на физическите механизми, протичащи при отделянето на микро- и наночастици при високи едноосни деформации е актуален научно-приложен проблем.

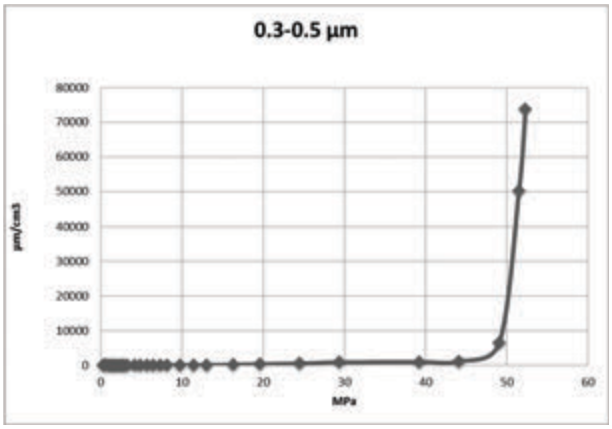
В провежданите от нас експерименти се използва иновативна експериментална постановка, съдържаща преса; пробно тяло с цилиндрична, паралелепипедна или кубична форма, разположено между плочите на пресата; в образеца се формира измервателно пространство с фиксиран обем или пробното тяло се поставя в специално конструирано за целта херметично затворено пространство, екипирано с вход и изход; единият отвор е свързан с въздушен филтър, който не позволява преминаването на частици от околната въздушна среда по-големи от 0.150 μm - 0.200 μm, нямащи отношение към новото явление, а другият отвор е съединен чрез шлаух с входа на електронен брояч - лазерен спектрометър на аерозолни частици от ново поколение. Изследвани са образци от гранит, доломит, мрамор, риолит, сиенит, варовик, шисти както и различни модификации бетон. Образците, например, гранит и доломит са доставени съответно от с. Богутево, Родопите, получен след взривни операции за прокарване на междуселищен път, а доломитът е от находище, намиращо се в землището на гр. Белово, Пловдивска област, разположено на десния склон на долината на р. Марица, в участъка между реките Яденица и Раковица. От скалните структури, които са с произволна конфигурация се изрязват по 5 еднакви образци. Подробни данни за експери-

менталната система, методологията на измерване и спецификата на апаратурата се съдържа в [7]. Тази информация позволява възпроизвеждане и надграждане на нашите резултати от други лаборатории. За пълнота ще спомена, че хидравличната преса е модел Bernardo BHP 200 с максимален натиск до F ≤ 200 t. Налягането F плавно се регулира в режими на нарастване и намаляване както и при статично фиксирана стойност на деформацията. Натискът се измерва с тензодатчик Laumas с точност 0.1%, снабден с цифров индикатор и софтуер. За измерването на емисията на микрочастиците се използва електронен брояч – лазерният спектрометър на аерозолни частици от ново поколение Haltech Hal-HPC601 - USA. Уредът позволява прецизно определяне на концентрацията на частиците в диапазона от 0.3 μm до 10.0 μm.

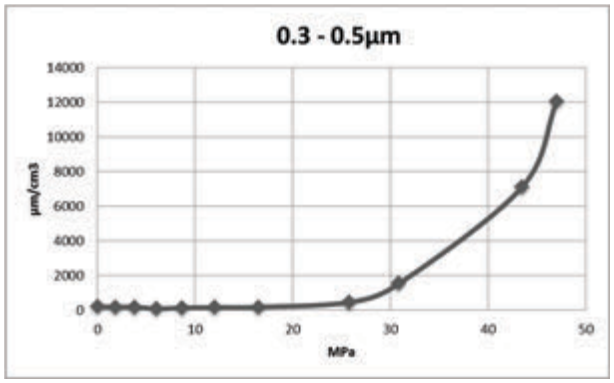


***Фиг. 1**. Хидравлична преса с измервателната система за изследване на емисиите на частици при едноосно деформиране на скални образци.*

Апаратът включва още вътрешен микропроцесор (MCU), позволяващ едновременното измерване на шест различни размера частици. Устройството е екипирано също и с помпа, засмукваща въздуха с емитираните частици от измервателния обем или повърхността на пробното тяло. На Фигура 1 е представена използваната в експерименттите хидравлична преса заедно с иновативното устройство. Типичните зависимости за емисията на частици са представени на Фиг. 2 и Фиг. 3.




***Фиг. 2**. Зависимост на количеството микрочастици от едноосен натиск за гранит в типичния за явлението обхват 0.3 μm – 0.5 μm*




***Фиг. 3**. Количество на емитираните частици при едноосно натоварване в характерния за новата закономерност диапазон 0.3 μm – 0.5 μm*

Проведените изследвания и получените резултати за това явление, [3-7], могат да се обобщят така: 1.) Еднозначно е доказано явлението генерация на частици при едноосно деформиране на твърдотелни материали със следната формула - експериментално е установена закономерност в твърдотелните структури, заключаваща се в емисия на частици при въздействие на едноосни деформации. Техният размер и количество зависят от физикомеханичните свойства на веществото и стойностите на налягането; 2.) Микрочастиците не са с произволни стойности, а са в обхвата 0.3 μm – 10 μm като емисията е както от обема, така и

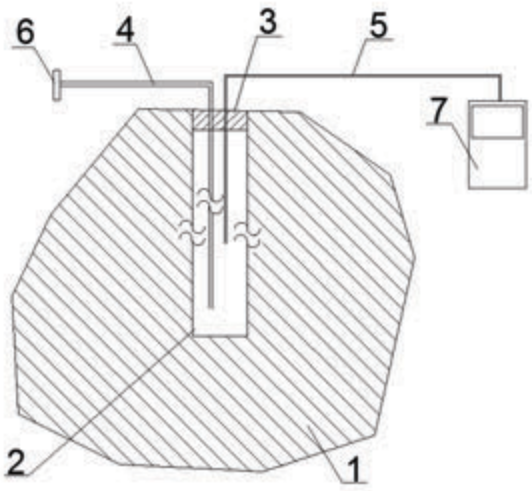
от повърхността на структурите; 3.) При доближаване на едноосното налягане до границата на здравина на пробните тела, възниква експоненциално нарастване на емисията на частици, което е интегрален критерий за предстоящо настъпване на макроразрушение на структурите; 4.) Новата закономерност се характеризира с неизвестна в други физикомеханични процеси особеност - едноосното деформиране на скалното тяло е еднопосочно. Дори стойността на налягането да е далече от разрушаване на конкретния вид скала, количеството на генерираните частици при намаляване на налягането F е винаги в режим на редуциране, т.е. на изтощение. Възпроизвеждане, т.е. повторение на наблюдавания процес на генерация на частици със същото пробно тяло е невъзможно.

## ПРОИЗХОД НА ГЕНЕРАЦИЯТА НА МИКРОЧАСТИЦИ В СКАЛИ

Анализът за произхода на емисията на частици включва факта, че скалите са неподредени или нехомогенни системи. Ето защо те се различават като поведение от металите, които са с регулярни кристални решетки. На този етап отсъства квантовомеханично описание на новото явление, въпреки че процесите са с квантова природа. При високо едноосно налягане взаимодействието между клъстерните образования и молекулите в скалните структури е анизотропно предвид силната деформация. Промяната в положението на електростатичните връзки е необратима, противно на ситуацията в металите. Това модифицира разположението между положително и отрицателно заредените групи частици. Ако "еластичното" възвратно поведение при едноосно налягане в металите е резултат от фиксираното и регулярно положение на атомите в кристалната решетка, при скалите възстановяване на състоянието след деформиране е невъзможно. Тяхната „памет" – т.е. „еластичността" за началното състояние отсъства. Развитието на този необратим процес води до възникване на микропукнатини в скалната структура. Нано- и/или микродефектите някъде в обема или на повърхността на образеца формират "кожух" от хаотично дислоцирани електрически заредени клъстерни конфигурации. Освободената енергия допълнително поляризира съседните молекулни групи като обменното взаимодействие вероятно е чрез сили на Van der Waals. Колкото е по-високо едноосното налягане, толкова повече нараства разкъсването на връзките. Крайният резултат от деформацията на скалата е емисията, т.е. генерацията на частици със съответен спектрален състав. Те първоначално напускат приповърхностните зони на образеца. При достигане на докритично състояние, частиците могат да се емитират и от обема към повърхността като този процес вероятно е вълнови с максимуми и минимуми. Най-същественото в този качествен модел е неговата т.н. "еднопосочност", т.е. необратимо изтощаване на генерационния процес. От предложената интерпретация се вижда, че явлението носи интегрален, т.е. колективен характер на поведение.

## СЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА КОНТРОЛ НА ДЕФОРМАЦИОННИТЕ ПРОЦЕСИ НА СКАЛИТЕ В ПЛАНИНСКИ МАСИВИ

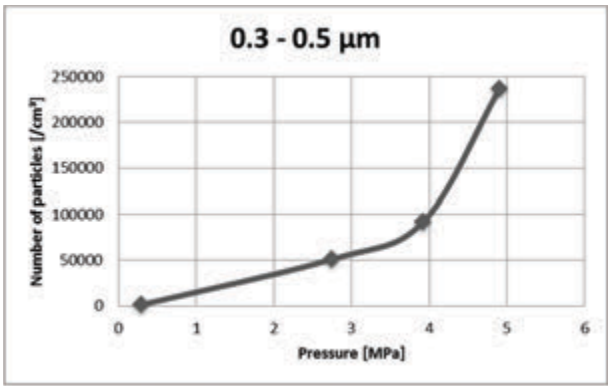
Независимо от многостранните и важни приложения на доказаната закономерност, възникваща при едноосно деформиране на скали и бетони, по наша оценка, тя е основа за създаване на иновативни сензорни технологии за ранно известяване и регистриране на предаварийни и аварийни състояния. Това е напълно осъществимо чрез перманентен мониторинг на количеството генерирани микрочастици. Постановката от Фиг. 1 е по същество сензорен метод за контрол на геодинамичните процеси. Конкретната реализация на сензорната система за изследване на деформационните процеси в скалните масиви е представена на Фиг. 4. В рисков, по оценка на геолози и инженер-геолози, планински масив 1 се пробива сондаж 2 с дълбочина, достигаща при възможност тектонската плоча. Дълбочината на сондажа следва да е не по-голяма от достигането на съответен воден хоризонт.




***Фиг. 4**. Сензорна система за непрекъснат мониторинг на деформационните процеси в скалните масиви; 1-скален масив, 2-дълбок сондаж, 3-отвор на сондажа, 4 и 5 – въздухопроводи, 6- въздушен филтър, 7- лазерен спектрометър за броене на частиците*

Това в повечето случаи е постижимо със съвременните дълбочинни сондажни машини, получили развитие при добива на течни енергийни носители, намиращи се под дъното на водните басейни. Отворът 3 на сондажа се затваря херметично с подходяща елестична тапа или се запушва с бетон. През нея преминават два въздухопровода 4 и 5. Първият 4 е съединен с описания вече въздушен филтър 6, а другият 5 прониква на максимална дълбочина и се присъединява към електронния брояч на аерозолните частици 7. Тази несложна сензорна система перманентно ще измерва отделянето на финни микрочастици от дъното на сондажа, т.е. от скалната зона, през която евентуално преминава тектонската плоча или рисковия геоложки хоризонт. За допълнителна информация на Фигура 5 са представени графичните зависимости за емисията на частици от варовик, доставен от зоната на разлома в Крупник. На основата на установената закономерност и получени резултати може да се направи оценка за степента на интегралната напрегнатост на скалния масив или на строителното съоражение. Получаваните данни за състоянието на масива се включват в модел, за да се направи прогноза за развитие на катастрофално явление или процес.

Тези изследвания имат директно отношение към изключително актуалното направление сеизмология с цел прогноза чрез интегрален сензорен метод на земетресенията. В случай на настъпване на предаварийно състояние (процес на начало на нагъване на съответния хоризонт) количеството на частиците, съгласно Фиг. 2, Фиг. 3 и Фиг. 5 нараства експоненциално.




***Фиг. 5**. Зависимост на количеството микрочастици при едноосен натиск за варовик в типичния за явлението обхват 0.3 µm – 0.5 µm*

Това е именно интегрално указание на системата от Фиг. 4 за настъпване на предаварийно състояние и своевременното му оповестяване. Освен това устройството е приложимо като ефективна сигнализация за настъпване на рязко нарастване на скалното налягане при рудодобива и въглищните мини в критични части на забоите и тунелите.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ИЗВОДИ

Получените резултати, свързани с генерацията на финодисперсни частици при високи едноосни деформации в скали и бетони, и описаната сензорна система са полезни за решаване на множество приложни задачи в областта на рудодобива, строителството, производството на фосилни горива и др. чрез интегралната оценка на напрегнатото състояние в условия, предшестващи предаварийни и аварийни събития. Предимствата на новата закономерност и предложеното устройство в сравнение с аналогични методи и апарати са: **а**) висока чувстви-

телност през цялото време на измервателния процес поради регистрацията на съществено количество микрочастици, емитирани от повърхността и обема на скалния образец или зона в масива; **б**) повишена измервателна точност от драстично нарастналото количество емитирани частици, преминаващи през електронния брояч от повишената излъчваща ги повърхност; **в**) опростена конструкция на експерименталното съоражение като действието на системата е безотказно.

Описаните приложения могат да бъдат осъществени чрез натурни изследвания с интегралното on-line определяне на напрегнато-деформираното състояние на планински масиви и инженерни съоражения. Описаната система е особено актуална за целите на сеизмологията и рудодобива, и е в съответствие с критериите на зелената трансформация. Нейното адаптиране в подземната инфраструктура, особено в тунелите на метрото, високото строителство, най-вече в основите на небостъргачите и контрола на здравината на язовирните стени са особено актуални в национален мащаб.

*Изказваме благодарност на акад. Чавдар Руменин за ползотворните дискусии и идеи, спомогнали за тези изследвания.*

*Резултатите са получени в лабораториите на Националния център за компетентност*
*QUASAR № BG05M2OP001-1.002-0006*

## REFERENCE

[1] Jones R. Non-destructive testing of concrete, Cambridge Engin. Series, Cambridge Univ. Press, 1968.

[2] Rjevski V. Technika controlia naprejenii i deformacii v gornih porodah, Nauka, 1978, p. 286.

[3] Lozanova SV, Roumenin CS. Device for investigation of deformation in rock structures, BG Patent № BG 67133 B1/30.09.2020.

[4] Lozanova SV, Ralchev ML, Roumenin CS. Device for evaluation of physical-chemistry state of rocks deformation and building materials, BG Patent № BG 1113370 A/18.05.2021.

[5] Victorov SD, Trubetskoi KN, Chanturia VN, et al. Method for state evaluation anterior the failure of rocks and building materials, and respective device for it, RF Patent № RF 2418165 B1/28.07.2009.

[6] Victorov SD, Odintchev VN, Kochanov AN, et al. Phenomenon of the emission of microparticles under quasi-static loading of rocks, The 7-th Intern. Conf. on phys. problems on rock destruction, China, 2011, pp. 3-5.

[7] Lozanova SV, Ralchev ML, Roumenin CS. Generation of microparticles in rock structures, Compt. Rendus BAS, 75(11) 2022, ISSN:1310–1331 (in press).

[8] National BG programme for control of air contamination 2020 – 2030, www-strategy.bg.documents, Decision of Council of Ministers № 541/13.09.2019.

[9] Macalimov IA, Urahaev FH. Vozmojnosti obrazovania nanorazmernih chastic v trestin, Sb. Fizikohimia ultradispersnih system, MIFI, 2002, p. 46-47.

НАПРАВЛЕНИЕ 3

# КОМУНИКАЦИОННА ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

SESSION 3

# COMMUNICATION ENGINEERING AND TECHNOLOGIES

# TRAFFIC INFORMATION ANALYSIS USING DEEP LEARNING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

**Ivelina Stefanova Balabanova, Teodora Valentinova Zhorova**

*Technical University of Gabrovo,*
*Department of Communications Equipment and Technologies,*
*Gabrovo, Bulgaria,*
*teddy.tedun@gmail.com*

**Abstract**

*The paper systematizes the results of a study of multilayer artificial neural networks for the analysis and identification of areas of Internet traffic data content. The object of the research is traffic data of corporate company customers in segmented time zones and geographical areas. The systematic procedures with deep learning techniques on backpropagation neural networks have been carried out in MATLAB software. Selected quality indicators from learning processes of multilayer structures at different applied ratios between neurons in hidden layers are analyzed. The network performance, correlation metrics and classification quality have were evaluated. High levels of accuracy in a correct recognition of the data inthe information sets have been established about the defined classification groups with maximum limitation of the Mean-Square Error, the Mean Absolute Error and etc.*

**Keywords:** Internet traffic; multilayer neural networks; deep learning; accuracy; mean-squared error.

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Анализът и параметричната оценка на Интернет трафика са важна задача, свързана с подобряване на качеството на обслужване на частни и корпоративни потребители по отношение на различни функции като:

- класификация и прогнозиране на мрежовия трафик;
- трафична маршрутизация и мрежова сигурност;
- контрол на грешките и претоварването на информационните трасета;
- QoS (Quality of Service) и QoE (Quality of Experience) управление [1].

Един от най-често използваните изчислителни апарати за целта се явяват изкуствените невронни мрежи. Налице е голямо разнообразие от научни изследвания, засягащи този аспект на управление в ИКТ системите.

Широко използвани за различни сценарии са комбинирани подходи с включване на конволюционни и рекурентни невронни мрежи [2, 3]. Други инструменти, използващи извлечени статистически трафични характеристики, са Naïve Bayes алгоритъм, метод на опорните вектори (Support Vector Machine), линейни и квадратични дискриминантни класификатори в [4, 5]. В огромната си част съществуващите проучвания засягат детектиране и установяване на типа на аномалии и нарушения в целостта на предаваната информация [6-8].

В настоящия доклад е предложен подход за идентификация на зони на потребление на Интернет съдържание чрез многослойни невронни мрежи с обратно разпространение на грешката с дълбоко обучение на базата на синтез на невронни структури при различно съотношение между изчислителните единици в скритите слоеве.

## 2. ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ЗОНИ НА ИНТЕРНЕТ ПОТРЕБЛЕНИЕ

Поставена е задачата за диагностика и идентификация на трафика чрез многослойни изкуствени невронни мрежи относно ин-

формационната извадка, обхващаща 78 WEB корпоративни компании клиенти за гр. Чикаго, САЩ. Обучаващото множество включва следните входни трафични променливи:

- Променлива №1: Flows, flows/s (kilo-);
- Променлива №2: IPv4 - Packet size, Mean;
- Променлива №3: IPv6 - Packet size, Mean;
- Променлива №4: Mean Transition Rate, pkts/s (kilo-), спрямо дефинирани класификационни групи:
- Клас №1: Chicago city area "1";
- Клас №2 или Class №2: Chicago city area "2".

В хода на проведен предварителен синтез бяха използвани класически изкуствени невронни мрежи с право разпространение на сигналите и обратно разпространения на грешката (Feed-Forward Neural Networks - FFNNs) при използване на Scaled Conjugate Gradient алгоритъм на обучение. Бяха изследвани невронни архитектури с приложена тангенс-сигмоидална и softmax функции на активация в междинния и изходния слой при три случая на разделяне на информационния набор за процесите на обучение, валидиране и тестване – 70:15:15, 60:20:20 и 50:25:25. Като най-подходящо беше установено третото зададено съотношение между данните в информационния масив, за което бяха наблюдавани удовлетворяващи нива на точността над 90.0 %.

С оглед на търсене на по-ефективни невронни архитектури се премина към процедури по увеличаване на броя на скритите слоеве и прилагане на принципите на „дълбокото обучение". За конкретния случай бяха поставени опции за вариране на съотношението между изчислителните единици в два структурни скрити слоя, както следва:

- Съотношение №1: „Едно към едно";
- Съотношение №2: „Едно към две";
- Съотношение №3: „Две към едно".

Освен „*точността*" за разлика от предходните случай при трислойните невронни архитектури бяха въведени допълнителни индикатори за качество при невронен синтез, респективно:

- „Средноквадратична грешка" (Mean Squared Error - MSE);
- „Средна абсолютна грешка" (Mean Absolute Error).

Относно задачата за обучение, оценка и синтез на многослойни FFNNs за идентификация на географски райони на Интернет потребление от клиентски корпоративни компании в гр. Чикаго (САЩ) бяха реализирани изследвания при фиксирано разпределение на данните от входния информационен набор, съответно 70 % за обучаващите, 15 % за валидиращите и 15 % за тестовите процедури. Проведените експериментални процедури по „дълбоко обучение" бяха базирани на алгоритъма на Levenberg-Marquardt. Използвани са базисни невронни архитектури при фиксиране на:

- Тангенс-сигмоидална активационна функция в първи скрит слой;
- Логаритмичен-сигмоидален активационен тип във втори междинен слой;
- Тангенс-сигмоидална активационна функция в изходния мрежови слой.

## 3. СИНТЕЗ НА МНОГОСЛОЙНИ НЕВРОННИ АРХИТЕКТУРИ ЗА РАЗПОЗНАВАНЕ НА ТРАФИЧНИ ЗОНИ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ

Резултатите от проучване на вариациите на избраните критерии „точност", „MSE" и „MAE" са поместени от таблица 1 до таблица 3. Във връзка с първото приложено съотношение между невроните в първи и втори скрит слой са регистрирани минимално 56.5 % и максимално показание за точността 100.0 % за модели с 10 и 7 до 9 изчислителни междинни единици.

***Таблица 1.*** *Изследване на FFNNs с дълбоко обучение за идентификация на зони на потребление на Интернет съдържание при съотношение между невроните в скритите слоеве 1:1*

| № | Скрит слой №1 | Скрит слой №2 | Точност, % | MSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|
| **1.** | 3 | 3 | 95.7 | 0.0397 | 0.1007 |
| **2.** | 4 | 4 | 78.3 | 0.1134 | 0.1821 |
| **3.** | 5 | 5 | 65.2 | 0.1855 | 0.2070 |
| **4.** | 6 | 6 | 95.7 | 0.0393 | 0.0627 |
| **5.** | 7 | 7 | 100.0 | 0.0151 | 0.0436 |
| **6.** | **8** | **8** | **100.0** | **0.0017** | **0.0200** |
| **7.** | 9 | 9 | 100.0 | 0.0222 | 0.1061 |
| **8.** | 10 | 10 | 56.5 | 0.2608 | 0.2684 |
| **9.** | 11 | 11 | 95.7 | 0.0463 | 0.0669 |

***Таблица 2.*** *Изследване на FFNNs с дълбоко обучение за идентификация на зони на потребление на Интернет съдържание при съотношение между невроните в скритите слоеве 1:2*

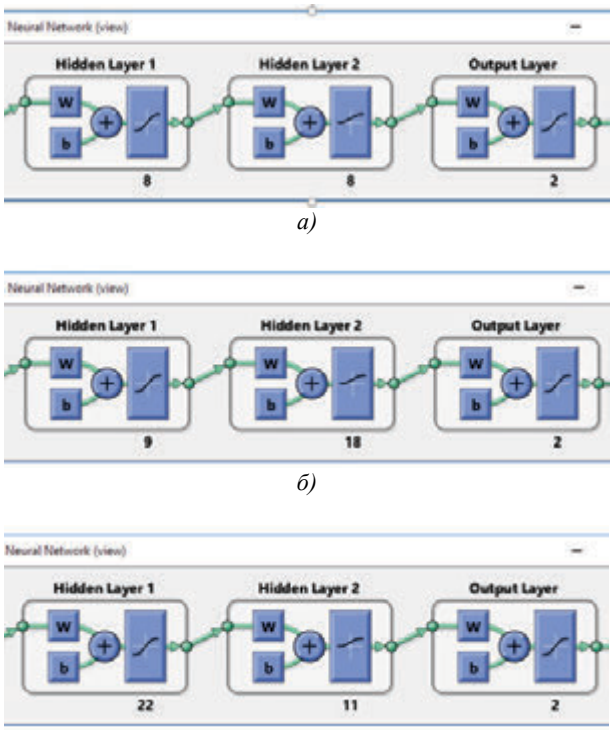
| № | Скрит слой №1 | Скрит слой №2 | Точност, % | MSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. | 3 | 6 | 95.7 | 0.0531 | 0.0609 |
| 2. | 4 | 8 | 95.7 | 0.0451 | 0.0641 |
| 3. | 5 | 10 | 47.8 | 0.2681 | 0.2848 |
| 4. | 6 | 12 | 95.7 | 0.0558 | 0.0900 |
| 5. | 7 | 14 | 87.0 | 0.1142 | 0.1811 |
| 6. | 8 | 16 | 43.5 | 0.4134 | 0.4874 |
| 7. | **9** | **18** | **100.0** | **0.0263** | **0.1145** |
| 8. | 10 | 20 | 95.7 | 0.0244 | 0.0616 |
| 9. | 11 | 22 | 95.7 | 0.0317 | 0.1211 |

***Таблица 3.*** *Изследване на FFNNs с дълбоко обучение за идентификация на зони на потребление на Интернет съдържание при съотношение между невроните в скритите слоеве 2:1*

| № | Скрит слой №1 | Скрит слой №2 | Точност, % | MSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|
| **1.** | 6 | 3 | 52.2 | 0.2394 | 0.2468 |
| **2.** | 8 | 4 | 87.0 | 0.0774 | 0.1402 |
| **3.** | 10 | 5 | 39.1 | 0.3102 | 0.3378 |
| **4.** | 12 | 6 | 95.7 | 0.0327 | 0.0792 |
| **5.** | 14 | 7 | 91.3 | 0.0859 | 0.1137 |
| **6.** | 16 | 8 | 95.7 | 0.0506 | 0.1303 |
| **7.** | 18 | 9 | 91.3 | 0.0671 | 0.1124 |
| **8.** | 20 | 10 | 82.6 | 0.1600 | 0.2364 |
| **9.** | **22** | **11** | **100.0** | **0.0073** | **0.0345** |

При средноквадратичната грешка бяха констатирани най-ниска 0.0017 и най-висока стойност 0.2628, респективно при зададени 8 и 10 скрити неврона. Намерените минимална и максимална MAE се равняват на 0.0200 и 0.2684, установени при същите FFNNs относно предходния индикатор за качество. Съобразно изложените резултати е избрана невронна архитектура с наличие на 8 невронна в структурните междинни слоеве.

По отношение на второто разгледано съотношение са намерени две архитектури, при които е получена точност под ниво от 50.0 %, както следва 43.5 % при 8 в първи и 16 неврона във втори скрит слой и 47.8 % за FFNN с 5 в първи и 10 скрити неврона във втори слой. Констатирано е еднократно достигане на пълно коректно разпознаване на обработваните информационни трафични еталони – точност 100.0 %, при структура с 9 и 18 неврона в първия и втория междинен слой. В рамките на описания случай бяха регистрирани и минимални MSE = 0.0263 и MAE = 0.1145. Максимални нива на средноквадратичната грешка 0.4134 и средната абсолютна грешка 0.4874 са наблюдавани за невронна архитектура при „8 в първия и 16 неврона във втория междинен слой“. Анализът на резултатите показва предимство на FFNN със съдържание на девет в първи и осемнадесет междинни неврона във втори скрит слой. Но имайки предвид в пъти по-ниските степени на MSE и MAE при първия разгледан случай в процедурния синтез, по-подходяща се оказва неговата употреба.




*а)*

*б)*

*в)*

***Фиг. 1.*** *Селектирани FFNNs за идентификация на географски зони на корпоративно Интернет потребление при съотношения между невроните в скритите слоеве а) „1:1“, б) „1:2“ и в) „2:1“*

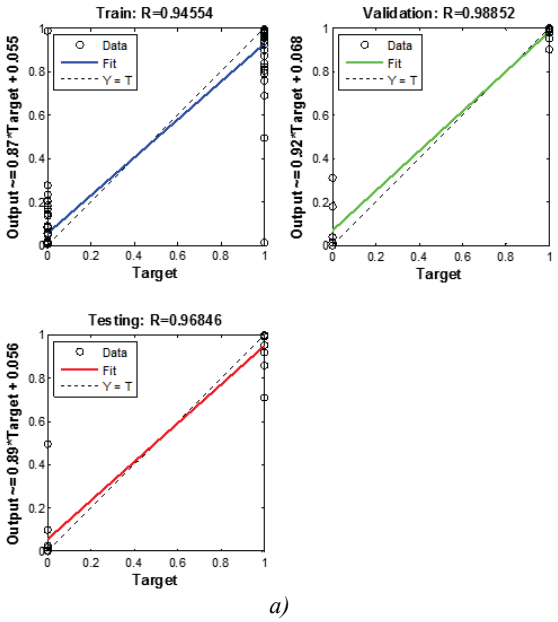
Съгласно последното приложено количествено съотношение между невроните в скритите слоеве отново е установена една комбинация, при която е постигната коректна идентификация на целевите зони на корпоративно Интернет потребление. Това е FFNN с наличие на 22 и 11 неврона, респективно в първи и втори скрит слой. По

отношение на указаната невронна структура бяха регистрирани най-ниски нива на MSE = 0.0073 и MAE = 0.0345. Най-възходящи вариации на грешките MSE = 0.3102 и MAE = 0.3378 са намерени в архитектура, при която са използвани 10 изчислителни единици за първия и 5 междинни неврона за втория скрит слой. От разгледните случай на невронен синтез тук е констатирана най-ниска класификационна точност, попадаща в порядъка 39.1 %.

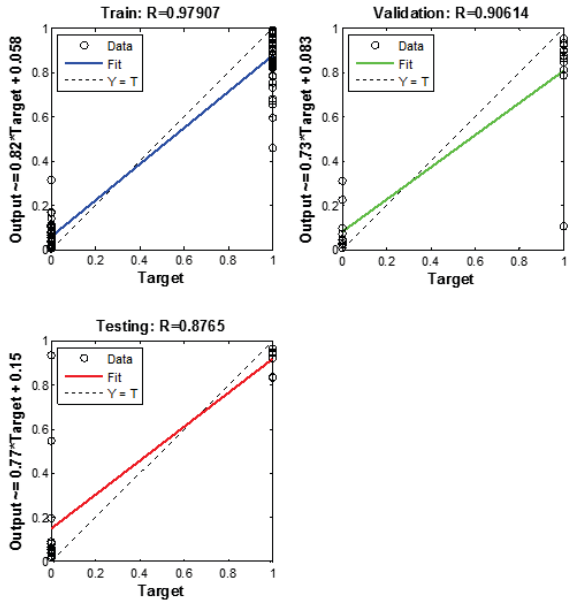
Сравнявайки нивата на грешките, може да се каже, че FFNNs при съотношение „2:1“ притежават по-добри качества спрямо тези, изградени на основата на съотношение „1:2“. Давайки оценка на синтезираните крайни модели на идентификация на трафични зони, дадени на фиг. 1 - архитектурата с идентично количество невронни изчислителни единици в междинните слоеве се определя като модел с най-висока мрежова производителност.

## 4. АНАЛИЗ НА ФУНЦИОНАЛНОСТТА НА МНОГОСЛОЙНИТЕ НЕВРОННИ МРЕЖИ ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРАФИЧНИ ЗОНИ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ

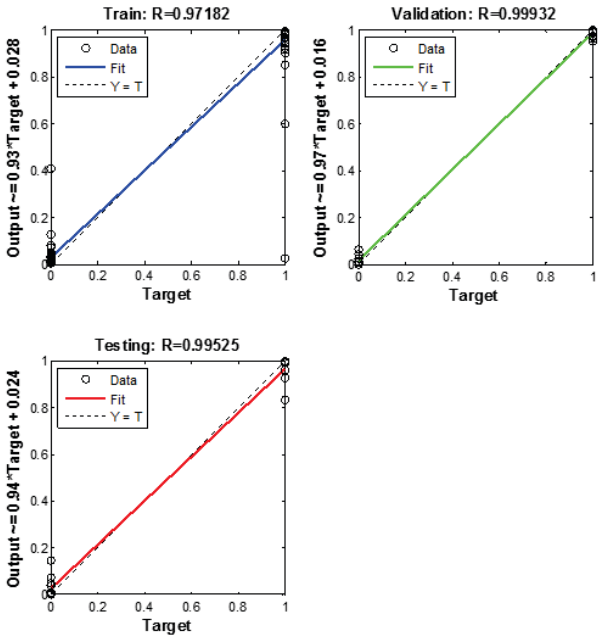
Фигура 2 представя линейните регресионни зависимости за базисните мрежови процеси на селектираните многослойни FFNNs. При идентичен брой на невроните в междинните слоеве се наблюдава известно отклонение между теоретичните и емпиричните линии на регресия за посочените случаи. Констатирани са високи стойности на корелационните коефициенти над нива „0.94“, „0.98“ и „0.96“ при обучаващите, валидиращите и тестовите процедури.




*а)*




*б)*

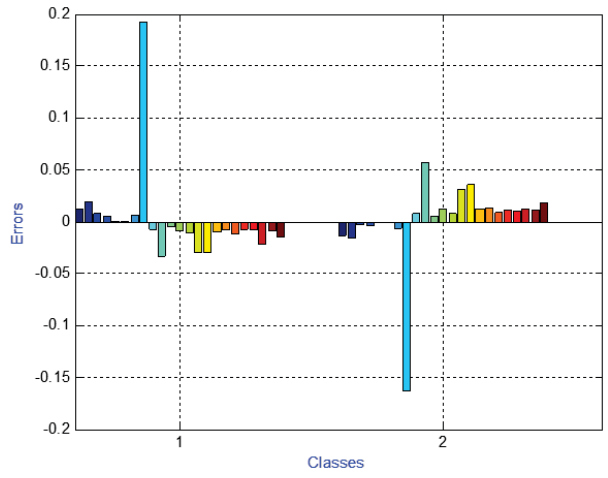



*в)*

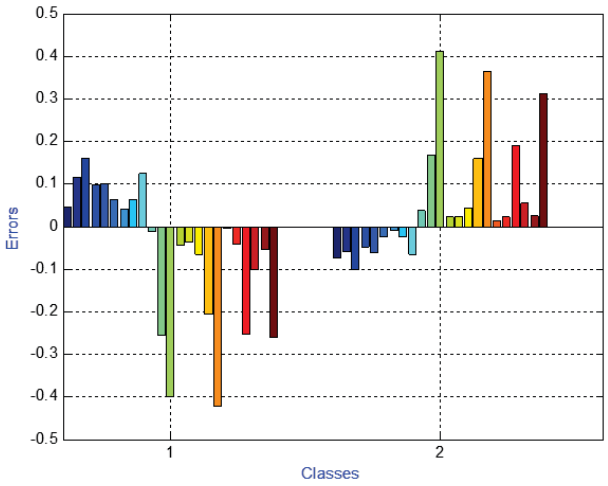
***Фиг. 2.*** *Линии на регресия за селектираните FFNNs за идентификация на географски зони на Интернет потребление при съотношения между невроните в скритите слоеве а) „1:1“, б) „1:2“ и в) „2:1“*

Разглеждайки зависимостите при второто приложено съотношение се виждат по-ниските степени на корелация при валидиране, тестване и изходите за синтезираната многослойна изкуствена невронна мрежа. Като при тестовите процедури R попада дори под изискваното минимално ниво от „0.9“ – тук R = 0.8765. Изключение е регистрирано при обучаващия процес, където R се равнява на „0.97907“. Забелязва се по-из-

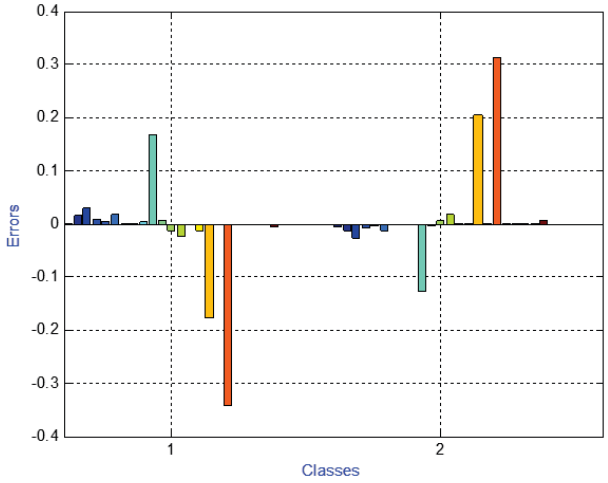
разеното отклонение между теоретичните и опитните линии на регресия.




*а)*




*б)*




*в)*

***Фиг. 3.*** *Диаграми на грешките за селектираните FFNNs за идентификация при съотношения между невроните в скритите слоеве а) „1:1“, б) „1:2“ и в) „2:1“*

Във връзка с последната разгледана многослойна невронна архитектура са регистрирани най-добри предимства по отношение на корелационните коефициенти спрямо предходните мрежи, респективно R = 0.97182 от обучение, R = 0.99932 при валидация и R = 0.99525 за тестовия процес. Забелязва се по-доброто близко разположение на емпиричните спрямо идеалните линии на регресия. Имайки предвид изложените показатели от проведения линеен регресионен анализ може да се каже, че при FFNN с приложено съотношение „2:1“ се наблюдават изразени предимства в сравнение с предходните две категории мрежови модели.

Диаграмите на мрежовите грешки, показани на фиг. 3, представляват вариациите на разликите между теоретично заложените и калкулираните посредством синтезираните многослойни модели резултати при манипулации с данните, включени в състава на тестовия поднабор. По дефиниция при пълно коректно разпознаване на тестовите еталони получените грешки следва да попадат в границите от „-0.5“ до „0.5“, каквито са регистрираните за конкретните случаи.

При анализираните многослойни невронни модели за идентификация на зони на корпоративно Интернет потребление са установени следните вариационни диапазони:

- -0.1627 до 0.1928 при FFNN с приложено съотношение между невроните в междинните слоеве “1:1”;
- -0.4241 до 0.4119 относно модела при задаване на 9 в първия и 18 изчислителни единици във втория скрит слой;
- -0.3428 до 0.3130 за многослойната невронна архитектура с използвано съотношение между невроните в скритите слоеве „2:1“.

Според оценка на констатираните вариации на мрежовите грешки се откроява предимството на модела при идентично количество неврони в двата междинни слоя, следвано от невронни архитектури с приложено съотношение „1:2“ и „2:1“. Представените грешки потвърждават предимствата на първата алтернатива за разпределение на невронните изчислителни единици относно разглежданата задача за идентификация.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представените резултати показват много добра приложимост на невронните мрежи с дълбоко обучение за разпознаване на географски зони на потребление на Интернет съдържание. Следваща фаза от изследванията е насочена към анализ на функционалността на вероятностни и рекурентни невронни мрежи, както и известни методи и алгоритми на машинното обучение. Някои от тях са k – най-близки съседи, дърво на решенията и т.н. Предвижда се обобщените резултати да бъдат използвани при систематизация на методика за идентификация, прогнозен анализ, оценка на тенденциите, установяване на аномалии и други по отношение на зони на потребление на мрежовия трафик на основата на изкуствен интелект, машинно обучение и приложна статистика.

## REFERENCE


[1] Shahraki A, Abbasi M, Taherkordi A, Jercut A. Active Learning for Network Traffic Classification: A Technical Study. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking 2021;8(1):422-439.

[2] Lopez-Martin M, Carro B, Sanchez-Esguevillas A, Lloret J. Network traffic classifier with convolutional and recurrent neural networks for Internet of Things. IEEE Access 2017;5:18042-18050.

[3] Salman O, Elhajj I, Kayssi A, Chehab A. Data representation for CNN based internet traffic classification: a comparative study. Multimedia Tools and Applications 2020;80: 16951–16977.

[4] Revendran R, Menon R. An efficient method for internet traffic classification and identification using statistical features. International Journal of Engineering Research & Technology 2015;4(7):297-303.

[5] Khater N, Overill R. Network traffic classification techniques and challenges. In: Proceedings of the tenth international conference on digital information management, vol. I, 2015, p. 43-48.

[6] Toupas P, D. Chamou D, K. M. Giannoutakis K, A. Drosou A, Tzovaras D. An intrusion detection system for multi-class classification based on deep neural networks. In: Proceedings of the eighteenth IEEE international conference on machine mearning and applications, vol. I, 2019, p. 1253-1258.

[7] Al-Turaiki I, Altwaijry N, Agil A, Aljodhi H, Alharbi S, Alqassem L. Anomaly-based network intrusion detection using bidirectional long short term memory and convolutional neural network. ISeSure 2020;12(3):37-44.

[8] Aouedi O, Piamrat K, Parrein B. Intelligent traffic management in next-generation networks. HAL Open Science Feature Internet 2022;14(44):1-35.

# TESTING THE EFFECTIVENESS OF THE CANNY ALGORITHM FOR EDGE

**Bojan Prlincevic[1], Zoran Milivojevic[2], Dijana Kostic[2]**

*[1]Kosovo and metohy academy of Applied studies, Leposavic, Serbia*
*[2]Academy of Applied Technical and Preschool Studies Nis, Serbia*

**Abstract**

*This paper presents measures the efficiency of edge detection algorithms based on the synthetic model for comparison. The first part of the paper describes the process of measuring. The testing method was carried out at the Canny algorithm. The results are given in the second part of the paper. The results were compared with results obtained by using the Sobel algorithm. The efficiency of the edge detection algorithms is determined by objective MSE, PSNR, and Merit (F), and subjective quality measures (visual comparison). The results are presented graphically.*

**Keywords:** edge detection, testing, quality measures, canny algorithm.

## INTRODUCTION

Edge detection is an essential tool in image processing. The edges in the image are important for determining the shape of the objects in the image as well as the boundaries between objects [1], [2]. The process of edge detection represents the first stage in image processing for object recognition, recognition of characters in the image, text, image quality correction, etc. The edge detector eliminates discontinued or independent pixels. The beginning of equal intensity valued pixels was marked for results. If a finder can detect edges without discontinuity, it succeeds [3]. In the last few decades, a large number of edge detection algorithms have been developed based on error minimization [4], application of fuzzy logic [5], genetic algorithms [6], neural networks [7], and Bayesian criterion [8].

The most often used algorithms that give the best results are based on gradient filtering such as Sobel's algorithm [9] and Cenny's algorithm [10]. The aim of the Canny algorithm is to satisfy the following criteria: a). Detection: The probability of detecting real edge points, which would achieve maximizing the signal-to-noise ratio; b). Localization: The detected edges are closed to the real edges; c) Number of responses: One real edge should respond with one detected edge.[11]

Measuring the quality and comparing edge detector operators is important. It can be performed on the basis of accuracy in results, edge continuity, noise level, edge relevancy, processing time, etc. In image processing, the most used quality measures are two metric standards that are universally followed, Mean Squared Error (MSE), and Peak Signal to Noise Ratio (PSNR). The MSE represents the cumulative squared error between the edge detected and the original image, and PSNR represents a measure of the peak error [4].

In the paper [3] author said that, if an operator gives a resultant image with less PSNR and high MSE, then comes to the conclusion that, the operator has high edge detection capability. In order to confirm this claim, the authors of this paper created image models and edge models. Using the model and using a subjective, visual quality of the detected edges, and an objective, algorithm for determining the matching of edges, the confirmation of using the mentioned measures (MSE and PSNR) can be established with certainty. As a measure of efficiency, the algorithm for determining the matching (Merit (F)) of edges defined in [12] was used.

This paper presents the results of applying Canny edge detection algorithms to synthetic images created by the author. A subjective (visual comparison of the original image and an image with detected edges) and objective (MSE, PSNR and *F*) analysis were performed, which includes the determination of the numerical value of the efficiency of the detected edges of the Canny algorithms. The results of the efficiency of the Canny algorithm are compared with the results of the efficiency of the Sobel algorithm obtained in the paper [13]. The results are shown graphically and the conclusion of the efficiency is given.

## EDGE DETECTORS

An edge is a boundary between the object and its background. The goal of every detector is to avoid false edges, and detected edges should be the closest to true edges [5]. The detector works by plotting continuous points (lines) on the edges of the virtual boundary between two objects. Segmentation of the Sobel algorithm is performed based on this operation.

### *A. Canny algorithm*

Canny's algorithm is based gradient operator used for finding edge strength and direction. The principle of the CANNY algorithm consists of three criteria of the edge detection. The first criterion is the criterion of SNR. The larger SNR represents the higher quality of the detection edge. The second criterion is the criterion of positioning accuracy. The larger the positioning accuracy represents the better result of edge detection. The third criterion is the criterion of the singleness edge response. This criterion gives information about it is ensure that the edge only have one response.

This algorithm is is executed in folowing steps [14]: 1) Use the Gaussian filter smoothing image to reduce the noise; 2) Use the finite difference of the first-order partial derivative for calculating the gradient magnitude $G(x,y)$ and the gradient direction $\theta(x,y)$ of the image; 3) Do non-macsimum supression for the gradient magnitude; 4) Double treshold; and 5) Edge linking. Edges are drawn in places where the gradient is the greatest.

### *B. Measuring method*

In order to objectively measure the efficiency of edge detection algorithms and the quality of extracted edges, an approach that ensures the same is proposed. In order to objectively determine the quality of the algorithm, a test image with known edges was created. Based on the data determined in this way, the resulting images are shown with detected edges that were visually evaluated. After that, the quality measures, that are the most often applied in image processing, MSE:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(I_1(i,j) - I_2(i,j)\right)^2}{M * N} \quad (1)$$

and Peak Sigal to Noise Ratio, PSNR are applied:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{R^2}{MSE} \quad (2)$$

where $R$ is maximal variation in the input image data (for 8-bit image $R$=255).

Finally the merit measure (depicted as $F$), that was established to measure the efficiency of separated edges, [12] were applied:

$$F = \frac{1}{max\left(N_I, N_{ref}\right)} \sum_{i=1}^{N_{ref}} \frac{1}{1 + \xi d_i^2} \quad (3)$$

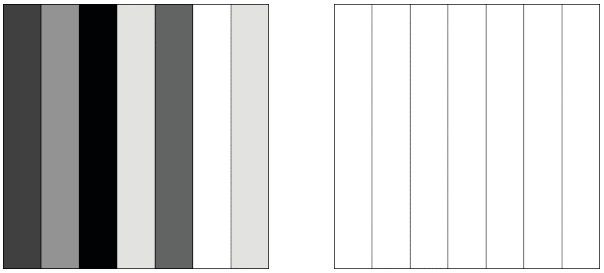
where $N_I$-where is the number of pixels belonging to the edges (detected by tested algorithm), $N_{ref}$ – the number of pixels belonging to the edges in the reference image, di the distance between the $i$-th pixel of the analyzed image that belongs to the set of edge pixels $I$ and the closest pixel of the ideal edge. The $\xi$ is a constant, which is equal to 1/9 [12], while $0 \leq F \leq 1$ is a measure of edge localization accuracy. Larger values of $F$ represent greater efficiency of the algorithm.

## EXPERIMENTAL RESULTS AND ANALYSES

In order to test the quality of detected edges using the Canny algorithm, an experiment was performed. A synthetic test image with 7 shades of gray was created, which was clearly separated by a black border (Fig. 1.a). Also, on the basis of this image, a synthetic edge image was created, which represents clearly defined edges (Fig. 1.b.).

*A. Experiment*

In the first part, the experiment was performed by changing the edge width ($E_w$). The edge width has been changed to determine how wide the border is recognized by the algorithm as a surface that has its own boundary. The width is varied in the range $E_w$={1,3,5,7,9}. After that, white gaussian noise (AWGN) was superimposed over the test image (with $E_w$=1). The noise is superimposed in the range of ratio with signal SNR = {-50, -20, -10, -5, -1, 0, 1, 5, 10, 20, 50, 100} (dB). The obtained results are presented visually, for the purpose of subjective assessment, and graphically using the measures, Mean Square Error (MSE) Peak Sigal to Noise Ratio (PSNR) and MERIT ($F$).

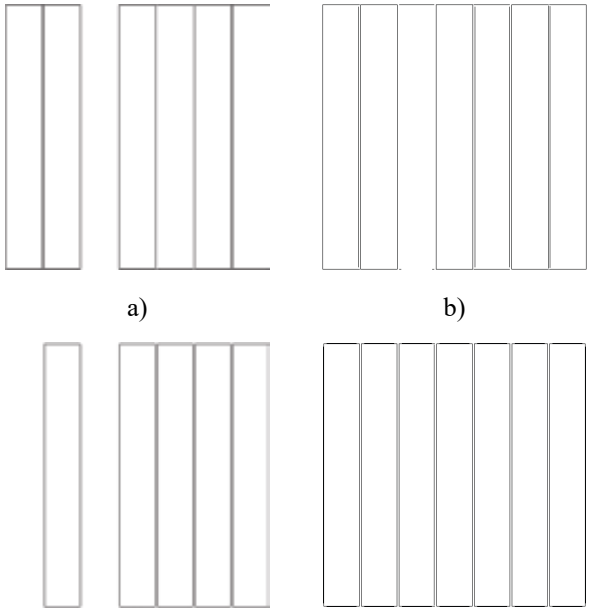


a) b)

***Fig. 1.*** *Syntetic image: a) gray image with shades, b) edge image.*

*B. Experimental results*

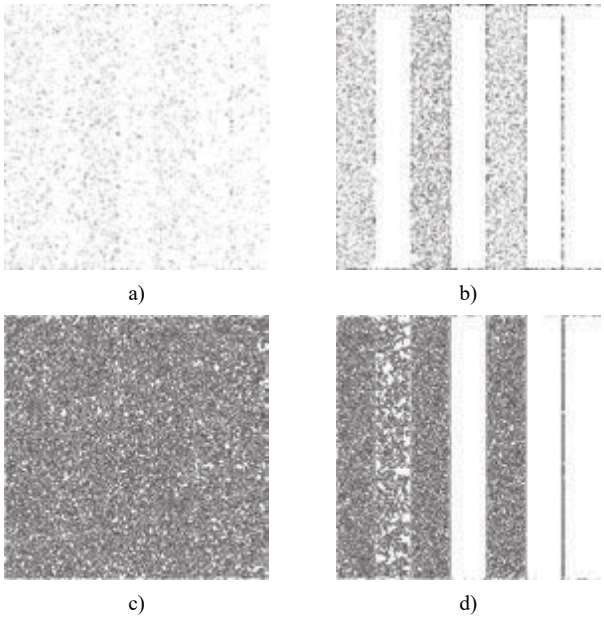
As a result of a performed experiment on fig 2. are presented images, created from the edge detected after performing Sobel (fig.2.-a,b) and Canny (fig.2.-c,d) algorithms. Fig 3. presents images, created from the edge detected after performing Sobel (fig.3.-a,b) and Canny (fig.3.-c,d) algorithms under images with superimposed AWGN noise. On fig.4. is presented quality measure $F$ for detected edges with varied $E_w$, for Sobel and Canny algorithm in presence of noise. Fig.5. shows MSE and PSNR for detected edges with varied $E_w$, using Sobel and Canny algorithm in presence of noise.



a) b)

c) d)

***Fig. 2.*** *Edge image, and detected edges with: a) $E_w$=1 (Sobel), b) $E_w$=1 (Canny), c) $E_w$=3 (Sobel), and d) $E_w$=3(Canny).*



a) b)

c) d)

***Fig. 3.*** *Image of detected edges ($E_w$=1 with AWGN ratio: a) SNR = - 50 (dB) (Sobel), b) SNR = - 20 (dB) (Sobel), c) SNR = - 50 (dB) (Canny), d) SNR = - 20 (dB) (Canny).*

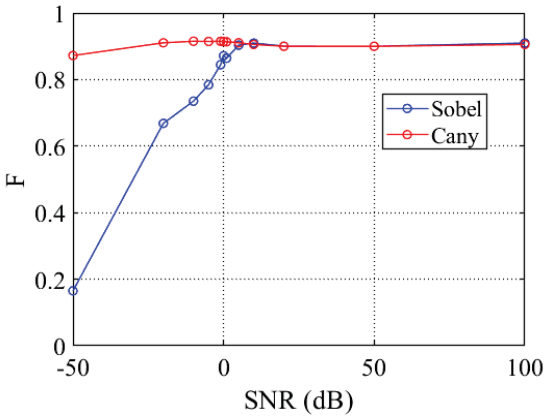



***Fig. 4.*** *Merit (F) for edge detecting model with different SNR (for Sobel and Canny algorithm).*

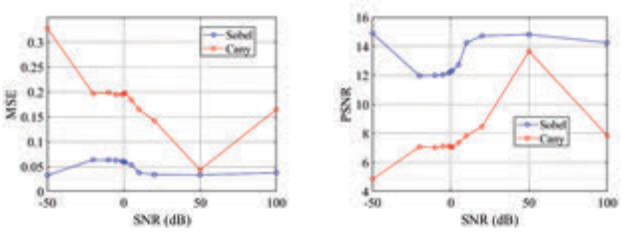



***Fig. 5.*** *Quality measures for edge detected from the model with different SNR: a) MSE, and b) PSNR.*

### *C. Analysis of results*

From the results presented on fig.3. we can conclude that: a) the edge between the field with the black color and the neighboring fields, and the field with the white color and real edge are not detected regardless of the edge width $E_w$ when applying both algorithms, b) After applying a Sobel algorithm on the synthetic image with a border 3 pixels wide or more, edges are detected as edges of different field, while when applying the Canny algorithm is better edge detection.

From the results presented on fig.4. we can conclude that the Canny algorithm is detcting edges with more efficienci in presence of noise, regarding Sobel algorithm. At a signal-to-noise ratio of SNR=10 dB, the algorithms detects edges with same efficiency.

The results from the diagram in fig. 5 show that the MSE and PSNR for Canny algorithm have the values which shows to as that the edge detection for all values of SNR is more efficient.

## CONCLUSION

This paper, are presented and tested Sobel and Canny algorithm for edge detection. In order to assess efficiency, objective and subjective quality measures were applied. By applying the synthetic model and combining the applied measures, by using quality assessment (MSE and PSNR) and MERIT (*F*) it was shown to as that the Canny algorithm is more efficient for edge detection in the presence of AWGN noise.

## REFERENCE

[1] V. Nalwa and T. O. Binford, “On Detecting Edges,” IEEE Tran. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, No. 6, pp. 699—714, November, 1986.

[2] A. Stevanovic, Z. Milivojevic and D. Brodic, “Performance of gravity algorithm for edge detection in the image,” INFOTEH-Jahorina, Vol.12, pp. 933-938, March 2013.

[3] D. Poobathy and R.M. Chezian, “Edge detection operators: Peak Signal to Noise Ratio based comparision,” I. J. Image, Graphics and Signal Processing, Vol.10, pp. 55-61., 2014.

[4] C. Spinu and J. Chassery, “Edge detection by estimation and minimization of errors,” Pattern Recognition Letters, Vol. 18, No. 9, pp. 695–704, August 1997.

[5] J. Wu, Z. Yin and Y. Xiong, “The fast multilevel fuzzy edge detection of blurry images,” IEEE Signal Processing Letters, Vol. 4, No. 5, pp. 344–347, May 2000.

[6] L. Caponetti, N. Abbattists and G. Carapella, “A genetic approac to edge detection,” in Int. Conf. Image Processing, Vol. 94, pp. 318–322, 1994.

[7] V. Srinivasan, P. Bhatia and S. Ong, “Edge detection using neural network,” Pattern Recognit., Vol. 27, No. 12, pp. 1653–1662, 1995.

[8] T. J. Hebert and D. Malagre, “Edge detection using a priori model”, in Int. Conf. Image Processing, Vol. 94, pp. 303–307, 1994.

[9] M. Jourlin and J. C. Pinoli, “Logarithmic Image Processing; The Mathematical and Physical Framework for the Representation and Processing of Transmitted Images”, Advances in Imaging and Electron Physics, Vol. 115, pp. 129—196, 2001.

[10] J. Canny, “A computational approach to edge detection,” IEEE Tranns. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. PAMI-8, pp. 679–697, June 1986.

[11] B. Wang and S. Fan, "An Improved CANNY Edge Detection Algorithm," 2009 Second International Workshop on Computer Science and Engineering, pp. 497-500, 2009.
[12] G. Sun, Q. Liu, Q. Liu, C. Yuan and X. Li, “A Novel Approach for Edge Detection Based On the Theory of Universal Gravity”, Pattern Recognition, Vol. 40, No. 10, pp. 2766-2775, Oct. 2007.
[13] B. Prlincevic, Z. Milivojevic, N. Savic and D. Kostic, “A new approach for measuring the efficiency of edge detection algorithms”, 31st International Electrotechnical and Computer Science Conference Portorož, Slovenija, 19. - 20. september 2022 (in press).
[14] D. Pan and B. Wo, "An Improved Canny Algorithm", Proceedings of the 27th Chinese Control Conference, pp. 456-459, 2008.

# THE EVALUATION QUALITY OF THE SPEECH INTELLIGIBILITY IN THE ORTHODOX CHURCH "HOLI GREAT MARTYR PROCOPIUS" IN KATUN

**Zoran Milivojević[1], Violeta Stojanović[2]**

[1,2] *The Academy of Applied Technical and Preschool Studies - Department Niš, Serbia*

**Abstract**

*This paper presents the evaluation of the quality of the objective and subjective intelligibility of speech for the unoccupied and occupied Serbian Orthodox Church "Holy Great Martyr Prokopija" in Katun. The first part of the paper includes a description of the Experiment, tabularly and graphically presented results of the calculated values, that is the reverberation time, $RT_{30}$, the objective index of speech transmission STI, the corresponding values of the subjective speech intelligibility for the unoccupied church, estimated values of the analyzed acoustic parameters for the occupied church, and the speech intelligibility quality of the analyzed unoccupied and occupied church determined according to Standard IEC 60268 - 16. The second part of the paper includes correlation and regression analyses of the results as well as the conclusion.*

**Keywords:** Reverberation, speech transmission index *STI*, intelligibility, correlation, regression, Standard IEC 60268 - 16**.**

## 1. INTRODUCTION

From the aspect of acoustic treatment in ortodox churches, there are three distinctive forms of audio information as part of sound components: a) chanting of a priest, b) polichronic chanting of a priest and a choir, and c) the sermons [1]. Acoustic design of a church must meet the requirements of all three sound forms, i.e. the most important parameter which is the reverberation time, *RT*.

Wallace Sabine introduced reverberation time, in 1922 as a measure of acoustic conditions in rooms [2]. Since then, this acoustic parameter has an irreplaceable role for the subjective experience of loudness, but it has an aesthetic function primarily, because it is one of the basic elements of responsiveness from the aspect of influence on the overall subjective experience of sound.

Speech intelligibility, *SI*, in churches can be increased by reducing the reverberation time due to the increase in sound absorption caused, among other things, by the presence of believers in the church premises [2]. Reverberation time, as well as other room acoustic parameters, can be obtained from the room impulse response, RIR [3].

The software package for Audio Real Time Analysis, ARTA, among other packages, is developed for the purpose of recording the impulse response of the room. ARTA from 2010., is the program for measuring impulse responses and analyzing the spectrum and the frequency response in real time [4].

In this paper, an evaluation of the quality of objective and subjective intelligibility of speech was performed for the unoccupied and occupied Serbian Orthodox Church "Holy Great Martyr Prokopija" in Katun. The values of the objective acoustic parameters, the reverberation time $RT_{30}$ and the speech transmission index, *STI*, on the basis of the measurement of acoustic impulse responses and the ARTA software package, were determined [5]. First a connection was established between the measured values of $RT_{30}$ at the central frequency $f_c$ = 2 kHz and the objective acoustic parameters of the *STI*. Next, using the Standard IEC 60268 - 16 the percentage values and the quality of the subjective speech intelligibility of sentences $SI_{sent}$, PB words, $SI_{PBw}$ and CVC (*C* - Consonant, *V* - Vocal) logatoms $SI_{CVC}$, were

determined [6]. Using the Matlab software package, the connection between subjective speech intelligibility and reverberation time was determined by correlation and regression analysis.

The paper is organized as follows. Section II explains the Experiment. Section III presents the experimental results and analysis. Section IV is the Conclusion.

## 2. THE EXPERIMENT

The experiment was carried out in Serbian Orthodox Church "Holy Great Martyr Prokopija" in Katun, East Serbian. Volume of the church is $V$ = 1659.68 m$^3$ and its area $S$ = 646.68 m$^2$. The interior walls and ceilings are covered with plaster (the coefficient of absorption $\alpha$ = 0.02). The floor is with the ceramic tiles (the coefficient of absorption $\alpha$ = 0.015).

The method used to calculate the $RT_{30unocc}$ and $STI_{unocc}$ of the unoccupied church is based on the measurement of *RIR* and the use of the ARTA software package. The recording procedure, as well as the evaluation of the parameters, were performed in accordance with the ISO 3382 [7].

The equipment used for the experiment is as follows: a) an omnidirectional microphone (PCB 130D20), with a diaphragm diameter of 7 mm; b) a B&K omnidirectional sound source type 4295 (dodecahedron loudspeaker); c) a B&K audio power amplifier, rated at 100W RMS, stereo, type 2716-C; d) a laptop, incorporating a Soundmax Integrated Digital Audio sound card from Analog Devices.

Measuring of the impulse response is carried out using incentive log-sweep signal with the duration of 5 s, sampling frequency $f_S$ = 44.1 kHz. For the purpose of analysis in this paper, *RIRs* are measured in $MP$ = 9 measuring points of the church were taken, the layout of which is shown in fig. 1. For each $MP$, 7 measurements were made, which makes a total of 63 files.

Based on classification of the ratio of speech intelligibility and the *STI* parameter established by the IEC 60268-16 – International Standard [6], the speech intelligibility were determined: $SI_{sent\text{-}unocc}$, $SI_{PBw\text{-}unocc}$ and $SI_{CVC}$ for each MP in the unoccupied church.

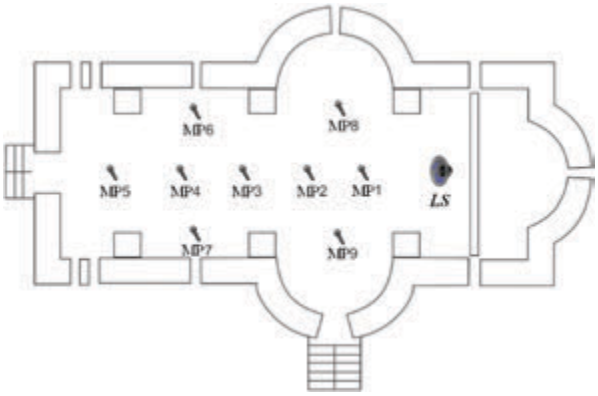



***Fig. 1.*** *The church where the impulse response is measured: LS the location of the sound source, MP 1-9 - measured points.*

Then, the mean and standard deviations of these quantities for all MP in the unoccupied church, were calculated. For the occupied church, for each MP measurement position, the following is calculated:

a) predicted reverberation time $RT_{30occ}$ using [8]:

$$RT_{occ} = RT_{unocc} - DT \,, \tag{1}$$

where $DT$ is Schultz diffusion time, and

b) estimation of speech transmission index parameter $STI_{occ}$ by [9]:

$$STI_{occ} = STI_{unocc} + \Delta STI \,. \tag{2}$$

$\Delta STI$ is a value calculated using the following formula:

$$\Delta STI = 0.45\, ln \frac{RT_{unocc}(2kHz)}{RT_{occ}(2kHz)} + 0.012 \,. \tag{3}$$

Using the IEC 60268-16 – International Standard [6], speech intelligibility: a) $SI_{sent\text{-}unocc}$, b) $SI_{PBw\text{-}unocc}$ and c) $SI_{CVC}$, for each MP measurement position in the occupied church, were determined. Then, the mean and standard deviations of these quantities for all MP measurement positions in the occupied church, were calculated. The assessment of the quality of speech in the church was based on IEC 60268-16 Standard [6]. The intensity of the connection between the objective parameters $RT_{30}$ and *STI* and the acoustic parameters, that qualify the subjective speech intelligibility: $SI_{sent}$, $SI_{PBw}$ and $SI_{CVC}$ for the unoccupied and

occupied church, at 2 kHz, was determined by regression and correlation analysis.

## 3. RESULTS OF THE EXPERIMENT AND ANALYSIS

### 3.1 THE RESULTS

Table 1 shows the numerical values of the following acoustic quantities at the central frequency $f$ = 2kHz: a) $RT_{30unocc}$, $STI_{unocc}$, $SI_{sent\text{-}unocc}$, $SI_{PBw\text{-}unocc}$ and $SI_{CVC\text{-}unocc}$ for each MP measurement position as well as the mean and standard deviations of these quantities for all MP measurement positions in the unoccupied church and b) $RT_{30occ}$, $STI_{occ}$, $SI_{sent\text{-}occ}$, $SI_{PBw\text{-}occ}$ and $SI_{CVC\text{-}occ}$ for each measurement position, MP, as well as the mean and standard deviations of these quantities for all MP in the occupied church. Table 1 also shows the quality rating of speech intelligibility that corresponds to certain values of objective and subjective acoustic parameters.

Fig. 2 - fig. 5 show regression lines for measures: $STI_{unocc}$ and $RT_{30unocc}$, $SI_{sent\text{-}unocc}$ and $RT_{30unocc}$, $SI_{PBw\text{-}unocc}$ and $RT_{30unocc}$ and $SI_{CVC\text{-}unocc}$ and $RT_{30unocc}$ at central frequency $f_c$ = 2 kHz for unoccupied church. Figs. 6 -9 show regression lines for measures: $STI_{occ}$ and $RT_{30occ}$, $SI_{sent\text{-}occ}$ and $RT_{30occ}$, $SI_{PBw\text{-}occ}$ and $RT_{30occ}$ and $SI_{CVC\text{-}occ}$ and $RT_{30occ}$ at central frequency $f_c$ = 2 kHz for occupied church.

### 3.2. ANALYSIS OF THE RESULTS

Based on the results shown in Table 1 and Figs 2 – 9 and IEC 60268-16 Standard, the following can be concluded:

1) for an unoccupied church: a) the mean of the reverberation time $\overline{RT_{30unocc,MP}}$ = 1.53 ± 0.1 s = 1.43 ÷ 1.63 s; b) the mean of the speech transfer index $\overline{STI_{unocc}}$ = 0.57 ± 0.05 = 0.52 ÷ 0.62 classifies speech intelligibility from fair to good; c) the $\overline{SI_{sent-unocc}}$ = 92.78 ± 4.15 % = 88.63 ÷ 96.93 % classifies the subjective intelligibility of sentences from bad to excellent; d) the $\overline{SI_{PBw-unocc}}$ = 90.33 ± 2.34 % = 87.99 ÷ 92.67 % classifies the subjective intelligibility of PB words as good, and e) the $\overline{SI_{CVC-unocc}}$ = 64.48 ± 3.32 % = 61.16 ÷ 67.8 % classifies the subjective intelligibility of CVC logatom from fair to good.

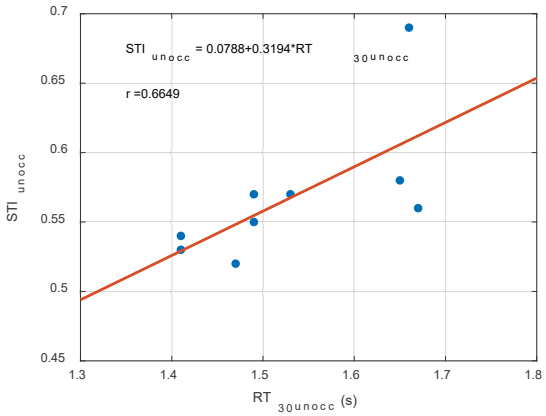



**Fig. 2.** *The regression line for $STI_{unocc}$ and $RT_{30unocc}$ for the unoccupied church at 2kHz*

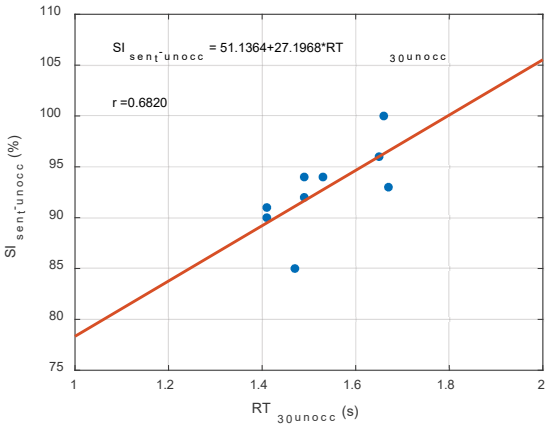



**Fig. 3.** *The regression line for $SI_{sent\text{-}unocc}$ and $RT_{30unocc}$ for the unoccupied church at 2kHz*

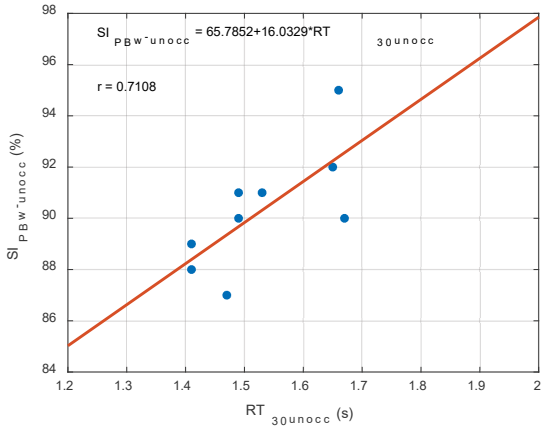



**Fig. 4.** *The regression line for $SI_{PBw\text{-}unocc}$ and $RT_{30unocc}$ at 2kHz for the unoccupied church*

2) for an unoccupied church the correlation and regression analysis gave the following connection of subjective speech intelligibility

***Table 1.*** *Reverberation time $RT_{30}$, objective speech transmission index STI, subjective speech intelligibility SI (sentence, PB words and CVC logatoms), their mean, standard deviations and speech quality for the unoccupied and the occupied church.*

| *MP* | $RT_{30unocc}$ (2 kHz) (s) | $STI_{unocc}$ | $SI_{sent\text{-}unocc}$ (%) | $SI_{PBw\text{-}unocc}$ (%) | $SI_{CVC\text{-}unocc}$ (%) | $RT_{30occ}$ (2 kHz) (s) | $STI_{occ}$ | $SI_{sent\text{-}occ}$ (%) | $SI_{PBw\text{-}occ}$ (%) | $SI_{CVC\text{-}occ}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1.66 | 0.69 | 100 | 95 | 72 | 1.4 | 0.78 | 100 | 97 | 84 |
| **2** | 1.49 | 0.55 | 92 | 90 | 64 | 1.34 | 0.61 | 97 | 93 | 70 |
| **3** | 1.41 | 0.54 | 91 | 89 | 63 | 1.32 | 0.58 | 96 | 92 | 66 |
| **4** | 1.47 | 0.52 | 85 | 87 | 60 | 1.34 | 0.57 | 94 | 91 | 65 |
| **5** | 1.41 | 0.53 | 90 | 88 | 62 | 1.32 | 0.57 | 94 | 91 | 65 |
| **6** | 1.53 | 0.57 | 94 | 91 | 65 | 1.36 | 0.64 | 98 | 93 | 73 |
| **7** | 1.49 | 0.57 | 94 | 91 | 65 | 1.34 | 0.63 | 98 | 93 | 71 |
| **8** | 1.65 | 0.58 | 96 | 92 | 66 | 1.39 | 0.67 | 99 | 95 | 75 |
| **9** | 1.67 | 0.56 | 93 | 90 | 64 | 1.4 | 0.65 | 98 | 94 | 73 |
| $\overline{RT_{30unocc,MP}}$ (2 kHz) (s) | | $\overline{STI_{unocc}}$ | $\overline{SI_{sent-unocc}}$ (%) | $\overline{SI_{PBw-unocc}}$ (%) | $\overline{SI_{CVC-unocc}}$ (%) | $\overline{RT_{30occ,M}}$ (2 kHz)(s) | $\overline{STI_{occ}}$ | $\overline{SI_{sen-occ}}$ (%) | $\overline{SI_{PBw-occ}}$ (%) | $\overline{SI_{CVC-occ}}$ (%) |
| 1.53 | | 0.57 | 92.78 | 90.33 | 64.48 | 1.36 | 0.63 | 97.11 | 93.22 | 71.33 |
| $\sigma_{RT_{30unocc,MP}}$ (2 kHz) (s) | | $\sigma_{STI_{unocc}}$ | $\sigma_{SI_{sent-unocc}}$ (%) | $\sigma_{SI_{PBw-unocc}}$ (%) | $\sigma_{SI_{CVC-unocc}}$ (%) | $\sigma_{RT_{30occ,M}}$ (2 kHz)(s) | $\sigma_{STI_{occ}}$ | $\sigma_{SI_{sent-occ}}$ (%) | $\sigma_{SI_{PBw-occ}}$ (%) | $\sigma_{SI_{CVC-occ}}$ (%) |
| 0.1 | | 0.05 | 4.15 | 2.34 | 3.32 | 0.03 | 0.07 | 2.09 | 1.92 | 6.02 |
| **Rating** | | | | | | | | | | |
| - | | fair good | bad excellent | good | fair good | - | fair good | good excellent | good excellent | fair good |

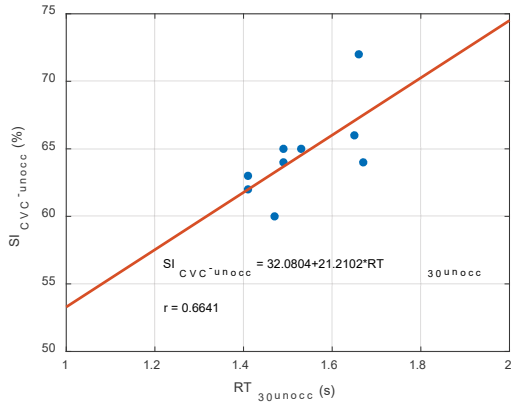



**Fig. 5.** *The regression line for $SI_{CVC\text{-}unocc}$ and $RT_{30unocc}$ at 2kHz for the unoccupied church*

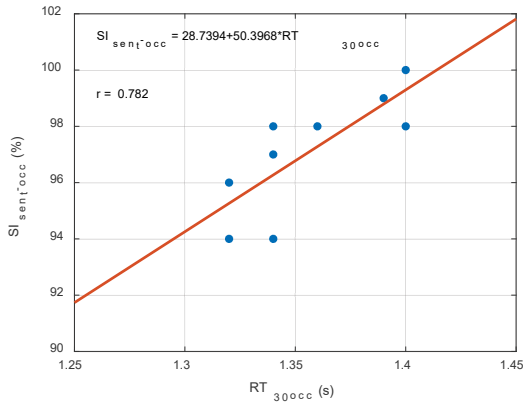



**Fig. 7.** *The regression line for $SI_{sent\text{-}occ}$ and $RT_{30occ}$ at 2kHz for the occupied church*

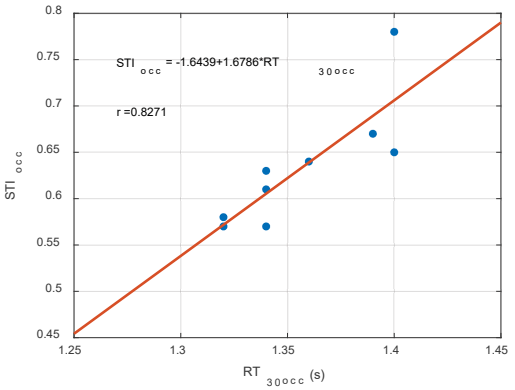



**Fig. 6.** *The regression line for $STI_{occ}$ and $RT_{30occ}$ for the occupied church at 2kHz*

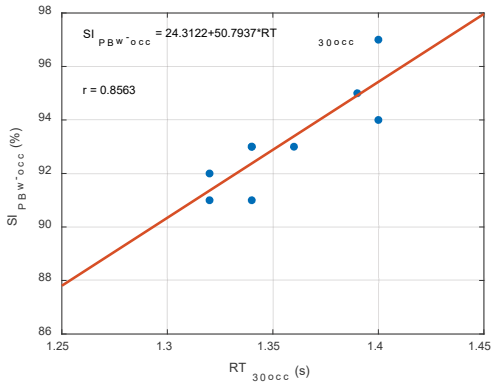



**Fig. 8.** *The regression line for $SI_{PBw\text{-}occ}$ and $RT_{30occ}$ at 2kHz for the occupied church*

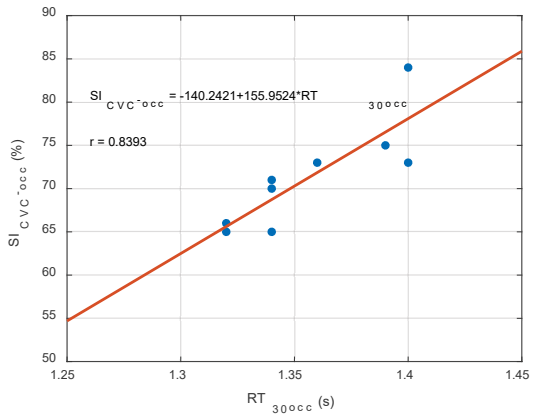



**Fig. 9.** *The regression line for $SI_{CVC\text{-}occ}$ and $RT_{30occ}$ at 2kHz for the occupied church*

and reverberation time with the corresponding Pearson coefficients at $f = 2$ kHz:

- $STI_{unocc} = 0.0788 + 0.3194\ RT_{30unocc}$, $r = 0.6649$;
- $SI_{sent\text{-}unocc} = 51.1364 + 27.1968\ RT_{30unocc}$, $r = 0.6820$;
- $SI_{PBw\text{-}unocc} = 65.7852 + 16.0329\ RT_{30unocc}$, $r = 0.7108$ and
- $SI_{CVC\text{-}unocc} = 32.0804+21.2102\ RT_{30unocc}$, $r = 0.6641$.

This analysis shows that for an unoccupied church there is a statistically positive, moderate linear connection between the subjective speech intelligibility: $SI_{sent\text{-}unocc}$, $SI_{PBw\text{-}unocc}$ and $SI_{CVC\text{-}unocc}$ and the reverberation time $RT_{30unocc}$.

3) for an occupied church: a) the mean of the reverberation time is $\overline{RT_{30occ,MP}} = 1.36 \pm 0.03$ s = 1.33 ÷ 1.39 s; b) the mean of the speech transfer index $\overline{STI_{occ}} = 0.63 \pm 0.07 = 0.56 \div 0.7$ classifies speech intelligibility from fair to good; c) the mean $\overline{SI_{sent-occ}} = 97.11 \pm 2.09$ % = 95.02 ÷ 99.2 % classifies the subjective intelligibility of sentences from good to excellent; d) the mean $\overline{SI_{PBw-occ}} = 93.22 \pm 1.92$ % = 91.3 ÷ 95.14 % classifies the subjective intelligibility of PB words from good to excellent and e) the mean value $\overline{SI_{CVC-occ}} = 71.33 \pm 6.02$ % = 65.31 ÷ 77.35 % classifies the subjective intelligibility of CVC logatom from fair to good.

4) for an occupied church the correlation and regression analysis gave the following connection of subjective speech intelligibility and reverberation time with the corresponding Pearson coefficients at $f = 2$ kHz:

- $STI_{occ} = -1.6439 + 1.6786\ RT_{30occ}$, $r = 0.8271$;
- $SI_{sent\text{-}occ} = 28.7394 + 50.3968\ RT_{30occ}$, $r = 0.782$;
- $SI_{PBw\text{-}occ} = 24.3122 + 50.7937\ RT_{30occ}$, $r = 0.8563$ and
- $SI_{CVC\text{-}occ} = -140.2421+155.9524\ RT_{30occ}$, $r = 0.8393$.

This analysis shows that for an occupied church there is a statistically positive, strong linear connection between the subjective speech intelligibility: $SI_{sent\text{-}occ}$, $SI_{PBw\text{-}occ}$ and $SI_{CVC\text{-}occ}$ and the reverberation time $RT_{30occ}$.

## CONCLUSION

In this paper, for the unoccupied and occupied Serbian Orthodox Church "Holy Great Martyr Prokopija" in Katun, the evaluation of the quality speech intelligibility is presented using estimation, comparison, as well as correlation, and regression analysis.

The mean of the reverberation time for the unoccupied church belongs to the range $\overline{RT_{30unocc,MP}} = 1.43 \div 1.63$ s. As believers enter the church, due to increased sound absorption, the values of this acoustic parameter decrease. Namely, for the occupied church, the mean of the reverberation time belongs to the range $\overline{RT_{30occ,MP}} = 1.33 \div 1.39$ s. Due to the reduction of reverberation time, the objective and subjective intelligibility of speech increases. The mean of the speech transmission index belong to the range of values: a) for the unoccupied church: $\overline{STI_{unocc}} = 0.52 \div 0.62$ and b) for the occupied church: $\overline{STI_{occ}} = 0.56 \div 0.7$ where intelligibility speech is classified from fair to good. Subjective intelligibility of speech (analyzed through subjective intelligibility of sentences, PB words and CVC logatoms determined by Standard IEC 60268-16), also significantly improves for the case of the occupied church. The mean of the subjective intelligibility of sentences belongs to the range: a) for the unoccupied church: $\overline{SI_{sent-unocc}} = 88.63 \div 96.93$ %, classifying speech intelligibility from bad to excellent, and b) for the occupied church: $\overline{SI_{sent-occ}} = 95.02 \div 99.2$ %, classifying speech intelligibility from good to excellent. The mean of the subjective intelligibility PB words belongs to the range: a) for the unoccupied church: $\overline{SI_{PBw-unocc}} = 87.99 \div 92.67$ %, classifying speech

intelligibility as good and b) for the occupied church: $\overline{SI_{PBw-occ}}$ = 91.3 ÷ 95.14 %, classifying speech intelligibility from good to excellent. The mean value of the subjective intelligibility CVC logatoms belongs to the range: a) for the unoccupied church: $\overline{SI_{CVC-unocc}}$ = 61.16 ÷ 67.8 % and b) for the occupied church: $\overline{SI_{CVC-occ}}$ = 65.31 ÷ 77.35 %, classifying speech intelligibility from fair to good.

A statistically positive, moderate linear connection for unoccupied church, and statistically positive strong linear correlation for occupied church, between reverberation time and speech intelligibility (objective and subjective) was confirmed by correlation and regression analysis.

## REFERENCE


[1] M. Mijić, Serbian Orthodox Church – An Acoustical View, *17th International Congress on Acoustics ICA*, Rome, 2001.

[2] Sabine, W., Collected Papers on Acoustics (1922). (*Harvard University Press. Reimpresión Dover*, 1964).

[3] H. Kuttruff, Room Acoustics, E&FN Spon, London, 2000.

[4] Mateljan, I., ARTA, software for acoustic measurements. *ARTALABS, Kastel Luksic*, Croatia.

[5] Z. Milivojević, V. Stojanović, Z. Veličković: The Statistical analysis of the Acoustic Parameters Obtained Using the Software Packages EASERA and ARTA, *International Scientific Conference – UNITECH 2015*., pp. II 106 – 111, Gabrovo, Bulgaria.

[6] International Electrotechnical Commission IEC 60268-16 – International Standard, "Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index", Switzerland: IEC, 2011.

[7] ISO 3382: Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters.

[8] M. Topa, N. Toma, B. Kirei, I. Saracut and A. Farina, Experimental Acoustic Evaluation of an Auditorium, *Hindawi Publishing Corporation Advances in Acoustics and Vibration*, Volume 2012.

[9] V. Desarnaulds, A. P. O. Carvalho, G. Monay, The effect of occupancy in the speech intelligibility in churches, *The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering The Hague*, The Netherlands, 2001.

# СЪСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ НА ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННИТЕ УСЛУГИ В БЪЛГАРИЯ

**Айсун Ахмед[1], Станимир Садинов[1]**
*[1]Технически университет - Габрово*

# STATE AND DEVELOPMENT OF TELECOMMUNICATION SERVICES IN BULGARIA

**Aysun Ahmed[1], Stanimir Sadinov[1]**
*[1] Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**
*The purpose of the report is to present the development of the telecommunications market and services in Bulgaria over the last five years. The development of technology, problems with the pandemic and the need to ensure secure access to the Internet have led to different rates of growth in certain services and decline in others. This is important for the investment intentions of the operators and the expansion and upgrading of their networks in order to meet the needs of subscribers. The advent of high-speed services in places upgraded with 5G technology has increased interest in accessing the Internet over mobile broadband networks. The problem is to find correct and effective solutions in the upgrade of operators to this standard in certain settlements, as well as the impact of the state, through its regulatory body Radio Communications Committee, to help ensure broadband access to services also in sparsely populated areas, except in urban areas. A comparative analysis of telecommunications services between individual operators at the moment and their revenues, investments and annual profits is presented.*

**Keywords:** Telecommunications, Mobile Services, Telecom Market, Vivacom, A1, Yettel

## ВЪВЕДЕНИЕ

Телекомуникациите са в основата на съвременните информационни услуги, включително стационарни телефони, мобилни услуги, компютърни мрежи и предаване на аудио, видео и данни през Интернет среда [5].

Според международните проучвания, телеком пазарът е много динамичен и през последните години расте с средно 10% годишно. Официално мобилните оператори в България към момента са три: Vivacom, A1 и Yettel. Като през 2021 г. общо пет предприятия имат издадени разрешения от Комитета за радио съобщения (КРС) за ползване на индивидуално определен ограничен ресурс – радиочестотен спектър (в обхвати 900 MHz, 1800 MHz и 2 GHz) за осъществяване на електронни съобщения чрез наземна мрежа, позволяваща предоставяне на мобилни електронни съобщителни услуги [2,3,4,6,7]. Това са операторите А1, БТК, Йеттел, „Булсатком“ ЕООД (Булсатком) и „Ти.Ком“ АД. Представените в КРС отчети за дейността по предоставяне на обществени електронни съобщения през 2021 г. показват, че четири от горепосочените пет фирми са предоставяли мобилна телефонна услуга през годината (А1, БТК, Булсатком и Йеттел) [1], като Булсатком е предоставял услугата до 15.12.2021 г., няма информация и за годишен отчет за дейността през 2021 г. от предприятието Ти.Ком, като то не е предоставяло мобилна телефонна услуга, а само мобилен достъп до интернет. С изтичане срока на действие на разрешението на Булсатком в средата на декември 2021 г., към 31.12.2021 г. броят на активните участници на пазара на мобилна телефонна услуга у нас е три: А1, БТК (Vivacom) и Йеттел.

От навлизането си на пазара на мобилна телефонна услуга през 2018 г., до напускането му в края на 2021 г., Булсатком не натрупва сериозна клиентска база, поради което и преразпределението на неговите абонати между оставащите три активни предприятия на пазара на мобилни услуги не оказва влияние върху пазарните им позиции. Към 31.12.2021 г., пазарните дялове на трите предприятия, изчислени на база брой абонати, са съответно: А1 – 37,3%, Йеттел – 33,0% и БТК – 29,7% [4].

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Реално отчетените приходи от телекомуникационни услуги на мобилните оператори у нас са 3.148 млрд. лева за изминалата календарна година. За периода от пет години, секторът отчита впечатляващия растеж от близо 27%. В него се обхваща и последния период на спад – 2017 г., когато пазарът се е свил с 1.5%. Оттогава насам, телеком сегментът върви уверено нагоре и дори увеличава темпа на растеж. Увеличението през 2018 и 2019 г. е сравнително умерено – 5.5% и 4% съответно, то набира скорост през 2020 г., когато достига 6.7% [4,6,7]. Изминалата година затвърждава стабилната положителна тенденция. Както ще видим при разбивката в основните сектори, този ръст на приходите не се дължи толкова на увеличение на абонатите. По-скоро става дума за увеличението на цените и предлагането на повече пакетни предложения. През 2021 г. все още се наблюдава леко увеличение на потребителите във фиксираните услуги, но при мобилните имаме пълна стагнация и насищане. Тенденция, която се следва плътно през последните няколко години. Друга такава е все по-водещата роля на преноса на данни, който формира близо половината от целия пазар. Мобилният пазар може да се каже, че е в стагнация от гледна точка на абонатите. Потребителите в България все повече разчитат на по една, максимум две SIM карти и затова техният брой през 2021 г. остава почти фиксиран на 7.9 млн. подобно на данните от предходната година. В рамките на последните пет години имаше всеобщ спад при всички телеком, заради изчистването на неактивни SIM карти и преминаването от предплатени към абонаментни планове. Към 31.12.2021 г., броят на абонатите на мобилна телефонна услуга (брой уникални SIM карти), възлиза на 7 902 756. В сравнение с предходната 2020 г. се отчита намаление в размер на 0,5% (към 31.12.2020 г. броят на абонатите е 7 945 739). Следва да бъде отбелязано, че спадът в броя на абонатите за 2021 г. е с 1,8 процентни пункта по-малък спрямо наблюдавания през 2020 г. (2,3%). Данните, предоставени в КРС от предприятията, показват, че към 31.12.2021 г. абонатите по договор са с почти 34 хил. бр. по-малко спрямо предходната година (спад с 0,5%), а броят на крайните ползватели на услугата с предплатени карти е намалял с 9 хил. спрямо края на 2020 г. (спад с 0,7%). За сравнение – през 2020 г. регистрираният спад при абонатите по договор е в размер на 1,7%, а при предплатените карти – с 5,7%. Тези данни показват, че отчетеното през 2020 г. негативно влияние, което пандемията от коронавирус оказа върху бизнеса и обикновените крайни ползватели (консолидация в използването на SIM карти от крайните ползватели и деактивиране с цел намаляване на разходите за телекомуникационни услуги на неизползваните SIM карти от бизнес абонатите), затихва през 2021 г. Броят на абонатите, които използват мобилна телефонна услуга в пакет с други електронни съобщителни услуги продължава да расте и към края на 2021 г. достига 5 984 743 бр. (фиг. 1), което представлява 75,7% от общия брой на абонатите на мобилна телефонна услуга в България към 31.12.2021 г. За последните пет години (2017 - 2021 г.) отчетеният ръст в броя на абонатите, използващи услугата в пакет, е 27,5%.




***Фиг. 1.*** *Брой на абонатите, които използват мобилна телефонна услуга в пакет с други електронни съобщителни услуги*

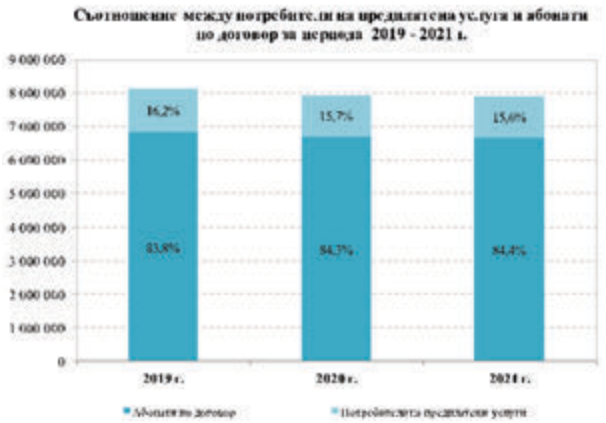
На следващата фиг. 2 е представена информация за броя на абонатите на мобилна телефонна услуга и проникването („мобилна телефонна плътност”) на услугата сред населението за периода 2019-2021 г. Видно от представените данни, наблюдаваната през последните години трайна тенденция на спад в проникването на услугата сред населението, през 2021 г. се трансформира в ръст от 6,3 процентни пункта (от 114,9% към 31.12.2020 г., проникването на мобилната телефонна услуга нараства до 121,2% към 31.12.2021 г.).




***Фиг. 2.*** *Броя на абонатите на мобилна телефонна услуга за периода 2019-2021г*

Наблюдаваният ръст в проникването на мобилната телефонна услуга през 2021 г. е резултат, преди всичко, от значителния спад в данните на НСИ за броя на населението в България. Съгласно предварителната оценка от проведеното през 2021 г. от НСИ преброяване на населението, към 7 септември 2021 г. този брой възлиза на 6 520 314 души, или с 5,7% по-малко, спрямо отчетеното в края на 2020 г. население.

Друг фактор, който също така допринася за нарастване на мобилната телефонна плътност през 2021 г. в страната, е сравнително по-малкият спад (с 0,5%) в броя на абонатите на мобилна телефонна услуга спрямо отчетения през 2020 г. (2,3%). На следващата фиг. 3 е представено съотношението между абонатите на предплатена мобилна телефонна услуга и тези, които използват услугата въз основа на сключен договор за месечен абонамент с мобилно предприятие.




***Фиг. 3****. Съотношение на абонатите ползващи различни услуги*

Видно от данните на горната фигура, към 31.12.2021 г. промяната при съотношението между абонатите на предплатена мобилна телефонна услуга и абонатите по договор, спрямо предходната година, е несъществена – с 0,1 процентен пункт. Делът на абонатите, използващи предплатена услуга, намалява до 15,6%, а 84,4% имат сключен договор за месечен абонамент с доставчик на услугата.

Общият обем на изходящия трафик от мобилни мрежи в страната за 2021 г. възлиза на 22 091,57 млн. минути, което представлява ръст от 0,6% в потреблението на мобилна телефонна услуга спрямо предходната 2020 г. Този ръст е символичен в сравнение с отчетения рекорден ръст от 12,1% през първата година на пандемията от COVID-19, но той показва, че „по-меките“ мерки през 2021 г. за социално дистанциране, не водят до спад в потреблението на услугата и тя продължава да има водеща роля и потенциал за развитието на сегмента на гласовите телефонни услуги у нас, както и на пазара на електронни съобщителни услуги като цяло. През 2021 г., за втора поредна година се наблюдава увеличение в броя на изговорените минути от мобилни към фиксирани мрежи в страната (с 0,9%), а увеличението в броя на изговорените минути към други мобилни мрежи в страната е с 2,4%. При броя на изговорените минути към мрежи в чужбина се наблюдава спад спрямо 2020 г. – с 8,3%, както и при потреблението на мобилни разговори в рамките на собствената мобилна мрежа – с 0,7%.

По отношение на международните повиквания следва да бъде отбелязано, че за разлика от отчетения през предходните две години ръст в потреблението на международни мобилни телефонни разговори към мрежи от държави от ЕС/ЕИЗ, в резултат на въведената от 15.05.2019 г. регулация на цените на международните повиквания към мрежи от тези държави, за 2021 г. е налице спад в потреблението на тези повиквания с 5,6%. По информация от мобилните предприятия, отчетеният спад е резултат от излизането на Великобритания от ЕС (т.нар. Brexit).

Делът на потреблението (брой изговорени минути) от абонати с предплатени SIM карти в общото потребление на мобилна телефонна услуга през 2021 г. продължава плавно да намалява, като достига 3,4% (при 3,6% за 2020 г.). При абонатите по договор този дял съответно се повишава до 96,6%. За разлика от предходната 2020 г., когато и при двете категории абонати се наблюдаваше ръст в общия обем на изговорените минути, през 2021 г. при абонатите по договор, макар и малко, отново има увеличение (с 0,9%), докато при абонатите с предплатени карти е налице спад с 6,7%. След отчетения ръст за 2020 г. от 9,4% при потреблението на мобилни разговори в рамките на собствената мобилна мрежа (on net), през 2021 г. обемът на този трафик бележи несъществен спад от 0,7% спрямо предходната 2020 г. Това обстоятелство води до слабо намаление – с 0,6 процентни пункта на дела, който този трафик заема в общия обем на генерирания трафик в мобилни мрежи в страната. Делът на on net трафика за поредна година намалява – от 54,6% за 2020 г. на 54,0% за 2021 г. Устойчивата тенденция на ръст при дела на трафика извън собствената мобилна мрежа (off net) се запазва за поредна година и през 2021 г. неговият дял достига до 43,6%. Тези данни показват, че условията и цените на дребно за повиквания към други мобилни мрежи в страната, които мобилните оператори предлагат на крайните потребители, са конкурентни на предлаганите за разговори в рамките на собствената им мрежа. Фактът, че крайните потребители разполагат с благоприятни условия, както за on net, така и за off net разговори, означава че продуктовите и ценовите стратегии на мобилните предприятия не водят до ограничаване на конкуренцията на пазара на мобилна гласова услуга чрез „затваряне на трафик" в рамките на собствената мрежа.

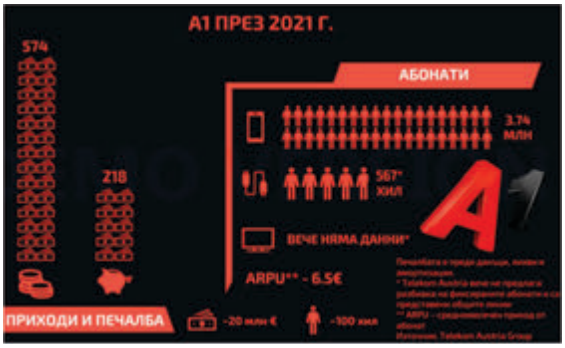
През последната година, общият брой на кратките текстови съобщения (SMS), изпратени от български абонати към мрежи в страната и чужбина, възлиза на 325,2 млн., а общият брой на изпратените кратки мултимедийни съобщения (MMS) на 2,9 млн. За първи път от години при кратките текстови съобщения се отчита ръст (с 5,0%), докато при MMS съобщенията за поредна година е налице спад (с 3,3%). По данни от мобилните оператори, отчетеният през 2021 г. ръст в обема на изпратените SMS съобщения е в резултат на промени в продуктовото им портфолио и предлагането на тарифни планове с включени в цената на месечния абонамент „безплатни" SMS съобщения. Броят на изпратените в роуминг SMS съобщения продължава да намалява и през 2021 г. това намаление е с 3,2%, докато при MMS съобщенията се отчита ръст с 80,8%.

Години наред „Виваком" носеше короната за най-голям телеком, като основният показател по това бяха годишните приходи. Изминалата 2021 г. промени тази дългогодишна тенденция. Въпреки увеличените парични потоци и печалба на „Виваком", както и редицата придобивания, които бяха предприети, компанията вече не е номер 1 по приходи. Така може да обобщим годишните финансови резултати на телекома, които бяха обявени пред инвеститорите на компанията [2]. Изминалата 2021 г. бележи увеличение на всички ключови показатели на „Виваком" – фиг. 4. Приходите нарастват с 6% на годишна база до 549 млн. евро според годишния доклад. „А1 България" отчете 574 млн. евро през изминалата година и така най-накрая взима титлата за най-голям телеком в страната. А1 записва ръст на приходите и печалбата, както през последното тримесечие, така и през цялата година. В същия момент, компанията работи усилено да спази намеренията си за пълна подмяна на мрежата, като удвоява инвестициите си в тази насока. Това показват фи-

нансовите отчети на собственика на българския оператор – Telekom Austria Group. Да припомним, че през 2020 г. телекомът постигна минимален ръст от под 1% на годишна база, което показва, че компанията е на здравословни нива на растеж. В левово изражение, телекомът е вече стабилно с над 1 млрд. лева приходи на година – 1.122 млрд. лева. През последното тримесечие, постъпленията следват темпа на увеличение за 2021 г. Те нарастват с 11% до 151.9 млн. евро. „Виваком“ запазва по-високите нива на печалба преди лихви, данъци и амортизации (EBITDA). За периода тя е 231 млн. евро или се увеличава с 12% спрямо 2020 г., докато тази на „А1 България“ е 218 млн. евро. „Виваком“ също така формира 33% от годишната EBITDA на цялата United Group, което допълнително подчертава ефективността на дружеството. „Теленор България" отчита по-високи продажби и приход от абонат, но понижение на печалбата си за изминалата година, показват резултатите на чешката компания майка PPF Telecom Group. Приходите на българския мобилен оператор са нараснали с 4.3% до 400 млн. евро, а печалбата преди лихви, данъци и амортизации (EBITDA) е спаднала със 1.7% до 177 млн. евро.




***Фиг. 4.*** *Отчетени приходи и абонати през 2021 г. на Виваком*




***Фиг. 5.*** *Отчетени приходи и абонати през 2021 г. на А1*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение може да се констатира, че през втората година от началото на пандемията от COVID-19 се наблюдава ръст в потреблението на телефонните разговори в мобилни мрежи в страната. При броя на абонатите е налице значително по-малък спад в сравнение с предходната 2020 г., което показва, че отчетеното негативно влияние върху показателя през първата година на кризата отслабва през 2021 г. Общият обем на приходите от предоставяне на мобилна телефонна услуга на дребно е повлиян негативно от ръста в броя на абонатите, които използват услугата в пакет с мобилен достъп до интернет, тъй като той заема все по-голям дял в общата цена на месечния абонамент, заплащана от абонатите за пакетна услуга. Общият обем на приходите от предоставяне на мобилна телефонна услуга бележи ръст за четвърта поредна година, като ефектът, който оказват върху него прилаганите от 1 юли до 31 декември 2021 г. нови, но сравнително еднакви спрямо прилаганите в България преди това цени на едро за терминиране на гласови повиквания в мобилни мрежи (съгласно Делегиран Регламент (ЕС) 2021/654), е сравнително малък. Въпреки „по-меките“ противоепидимични мерки и възможността за пътуване в чужбина при определени условия (притежаване на ваксинационен сертификат или отрицателен тест за COVID-19), през 2021 г. отново се наблюдава спад в потреблението и приходите от мобилни разговори в роуминг, макар и в значително по-малък размер. За напред пазара ще е още по динамичен с оглед отпадането на пандемичната ситуация и внедряването и използването на новата 5G технология и въвеждането на нови абонаментни планове, свързани с високоскоростен интернет, както и разширяване на спектъра на услуги от телеком операторите свързани с IoT и Smart Home.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Планиране, проектиране и оптимизация на безжични комуникационни платформи, услуги и решения за 5G и IoT приложения”, договор 2205Е/2022 г. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.

## REFERENCE


[1]https://www.yettel.bg/bg/content/%D0%B4%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%B8-%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D1%83%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B8-%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8

[2]https://www.techtrends.bg/2022/04/29/vivacom-2021-overview-12629/

[3]https://www.capital.bg/biznes/telekomi/2021/03/23/4189072_telenor_bulgariia_uvelichava_oborota_i_sredniia_prihod/

[4]https://crc.bg/files/%D0%92%D0%9E%D0%9F/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%88%D0%B5%D0%BD%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20%D0%BD%D0%B0%20%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%B8%D1%8F%D1%82%D0%B0%20%D0%B7%D0%B0%20%D1%80%D0%B5%D0%B3%D1%83%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B5%20%D0%BD%D0%B0%20%D1%81%D1%8A%D0%BE%D0%B1%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%D1%82%D0%B0%20%D0%B7%D0%B0%202021%20%D0%B3..pdf

[5]https://bg.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%8A%D0%BE%D0%B1%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F

[6]https://manager.bg/biznes/telekomunikaciite-se-prevrnaha-v-zadlzhitelen-produkt-na-ezhednevieto

[7]https://www.techtrends.bg/2022/07/13/a1-bulgaria-q2-2022-13158/

# СИМУЛАЦИЯ НА ФИЛТЪР ЗА МНОГОФАЗНО-ТОКОВ СЕНЗОР С ВГРАДЕНА КОМПЕНСАЦИЯ НА ШУМА ЗА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА

**Ивайло Стоянов[1], Теодор Илиев[2], Григор Михайлов[3]**

*[1]Русенски университет „Ангел Кънчев“, катедра Електроснабдяване и електрообзавеждане*
*[2]Русенски университет „Ангел Кънчев“, катедра Телекомуникации*
*[3]Висше училище по телекомуникации и пощи, катедра Телекомуникации*

# FILTER SIMULATION FOR MULTI-PHASE CURRENT SENSOR WITH INTEGRATED NOISE COMPENSATION FOR ELECTRIC VEHICLES

**Ivaylo Stoyanov[1], Teodor Iliev[2], Grigor Mihaylov[3]**

*[1] University of Ruse, Department of Electrical Power Engineering, Ruse, Bulgaria*
*[2] University of Ruse, Department of Telecommunication, Ruse, Bulgaria*
*[3] University of Telecommunications and Post, Department of Telecommunication, Sofia, Bulgaria*

**Abstract**

*In modern power electronic systems high switching frequencies are implemented to increase the power of density, but electromagnetic compatibility (EMC) filtering components are responsible for a large number to the occupation of the power system. In a world where space gets expensive, the volumetric reduction of the components in EMC filters are of great importance, aiming for reduced dimensions. In order for an item of electronics equipment to pass its testing and gain its EMC compliance, it is necessary to incorporate various elements into the design. The main goal of the paper is to design a simulation of filter up to 5 kHz to meet the requirements of electromagnetic compatibility and EMC harmonics through which, the current sensor of the EMC has a lower measurement mistake.*

**Keywords:** electric cars, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, emc filters.

## ВЪВЕДЕНИЕ

През последното десетилетие се наблюдава бързо нарастване на информационните системи от всякакъв вид и намаляване на полезните нива на сигнала, като същевременно се увеличи броят и мощността на различните електрически съоръжения, които могат да генерират високи нива на смущения. Ако не бъдат предприети необходимите мерки, проблемът с електромагнитната съвместимост (ЕМС) може да се влоши в бъдеще [1].

В допълнение, смущенията в работата на електронните устройства могат да бъдат причинени от мощни радиопредаватели или източници на сигнал в непосредствена близост (като телекомуникационните устройства). [2]

Примери за въздействието на ЕМС параметри върху безопасността на електронното оборудване са:

- Пълен срив и откази на системите за управление на технологични производствени процеси;
- Отказ на системи за електронно управление и контрол на транспорта поради външно електромагнитно излъчване и електромагнитна несъвместимост на бордовите елементи;

- Отказ на системите за насочване и кацане на самолета и др.

Неспазването на изискванията за ЕМС за медицинско оборудване за диагностика и поддържане на човешкия живот, като сърдечен пейсмейкър или хемодиализа и др., също е много опасно.

Фиг. 1 показва възможните източници на електромагнитни смущения.

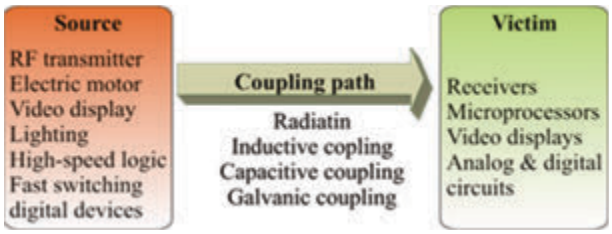



***Фиг. 1**. Възможни източници на електромагнитни смущения*

Както много други електронни устройства, електрическите превозни средства имат и един специфичен проблем по време на функционалността, което е високото ниво на хармонични и честотна несъвместимост в цялата система. Въпреки това, благодарение на технологичния напредък от последните години, филтрите са предназначени да намалят нивото на хармоници и да постигнат добра електромагнитна съвместимост (ЕМС).

Целта на доклада е да се разработи нов тип токов сензор, който е оптимално адаптиран към специалните изисквания на електрическата мобилност. Основното сред тях е много малка грешка в измерването и висока ЕМС. Чрез използването на нови алгоритми, комбинирани с едновременното измерване на токовете в проводниците за захранване, измерването на тока да се направи точно и по-ефективни. [1]

Има голям процент електронни устройства, използвани в нашия живот, като мобилни телефони, AV устройства, персонални компютри, копирни машини и факс машини. Ако ЕМС мерките са напълно пренебрегвани в развитието на устройство, проблеми с ЕМС ще се появят в почти всеки случай, както е показано на Фиг. 2 [3, 4]




***Фиг. 2**. Основен ЕМС модел*

- *Източник* на електромагнитния шум може да бъде всяка верига, която работи с променлив ток;
- *Път*, където шумовата енергия генерира между източника и приемника (жертвата);
- *Жертва*, където се измерва шумът или когато смущенията (шумове) могат да повлияят върху правилното функциониране на самата верига или други устройства около нея.

Други електромагнитни източници са GSM или Wi-Fi мрежи [5]. Получените резултати показват, че по време на процеса на комуникация има повишено ниво на интензитет на електромагнитното поле. Електромагнитното излъчване на 4G е два пъти по-голяма от 3G и до 5 пъти повече от Wi-Fi мрежите.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Тъй като новите превозни средства са оборудвани с все повече електронни устройства, така че нуждите на ЕМС се увеличават. В новите автомобили има много електронни блокове за управление и сензори, които са източници на електромагнитно поле (ЕМП), както е показано на Фиг. 4 [5].




***Фиг. 3**. Електронни системи на новите автомобили*

Всички нови превозни средства имат устройства и сензори за безопасност, навигационно устройство, мултимедиен център, управляващ модул, индикатор за разстояние, безжчна камера за задно виждане и др. В днешно време милиони шофьори носят мобилни устройства, които имат Глобалната система за позициониране (GPS) и имат достъп до данни. Превозните средства споделят своите данни за сензорите и текущото си положение с други превозни средства. От друга страна, новите автомобили могат да получават данни от пътното платно, което може да намали вероятността от инциденти и да подобри мобилността (напр. намаляване на закъсненията). [6]

Може да се обобщи, че основният източник на ЕМП е електрическото табло. Други източници на електромагнитните смущения са относително високите токове и индуктивното зареждане на батериите, използвани в електрическите автомобили. Това се отнася основно за електрическите автомобили с тяхната допълнителна енергия за инверторите и електродвигателите [4]. Независимо дали новите автомобили са хибридни или изцяло електрически, те са оборудвани с толкова много електронни системи, които далеч надхвърлят стойностите, познати от двигателите с вътрешно горене в отношенията на количеството и техническата спецификация. В допълнение към все по-сложните системи за безопасност, системи за комфорт и комуникация, използването на електронни системи изисква системи за задвижване на превозните средства, за да се включат електрически двигатели, батерии или горивни клетки, инвертор и др. Така, първият приоритет при конструирането на такива електронни автомобили е да се гарантира, че специфичните електронни системи, поставени в ограничени пространства, не причиняват взаимни смущения. [2, 4]

Филтрирането може да се използва като основно средство за намаляване на смущенията, създадени в източници на захранване, и процесите на превключване на постоянни и променливите токове на радио оборудването.

Използваните за тези цели филтри за потискане на шума намаляват нивото на смущения както от външни, така и от вътрешни източници (например от страната на захранването и от страната на натоварването). Ефективността се определя от затихването на филтъра чрез напрежение или ток, dB:

$$S = 20\lg\left|U_1/U_2\right| \text{ или } S = 20\lg\left|I_1/I_2\right| \qquad (1)$$

където $U_1$, $I_1$ са смущенията на напрежението и тока при натоварването в първоначалното състояние, $U_2$, $I_2$ са напрежението и токовите смущения при натоварването във филтърната верига.

Основните изисквания за филтъра могат да бъдат обобщени, както следва:

1) предоставяне на дадена стойност на ефективността на филтриране *S(f)* в желания честотен диапазон, като се вземат предвид вътрешното съпротивление и натоварването на веригата;

2) минимизиране на падащото напрежение през филтъра (AC или DC) при максимален ток на натоварване;

3) не превишава допустимата стойност на реактивния компонент на тока при основната честота;

4) не надвишава допустимите нелинейни изкривявания на захранващото напрежение, които определят изискванията за линейност на филтъра;

5) избор на филтърни елементи, като се вземат предвид номиналните токове и напрежения на веригата, както и възможните токове и напрежения, причинени от нестабилността на захранването и преходни състояния.

6) конструктивен: ефективност на екраниране, минимални размери и тегло, осигуряване на нормални термични условия, устойчивост на механични и климатични влияния и др.

Като цяло критериите за предоставяне на ЕМС могат да бъдат определени чрез:

$$\left(S/I\right)_{input} = k\left(S/I\right)_{output} \qquad (2)$$

където $k$ е коефициентът на намаляване на ефекта от смущенията в съвместното предаване на сигнала от входа към изхода на устройството.

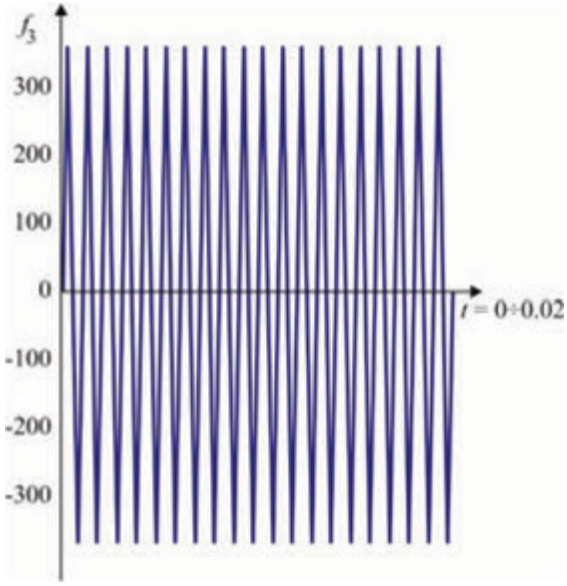
Основната цел на доклада е да представи създаването на високочестотен фил-

тър с честотен диапазон до 5 KHz. За да се постигне това, е използван софтуерът "Maple 18".

$$f_1 = \sqrt{1+\frac{1}{\left(2\pi x.100\frac{1}{2\pi.100.5000}\right)\cdot\left(2\pi x.100\frac{1}{2\pi.100.5000}\right)}} \quad (3)$$

$$f_1 := \sqrt{1+\frac{25000000}{x^2}} \quad (4)$$

$$plot\left(\frac{1}{f_1}, x = 1...10000\right) \quad (5)$$




***Фиг. 4**. Симулация на високочестотен филтър (повишена честота над 5 kHz)*

Както виждаме на Фиг. 4, силно се препоръчва амплитудата да бъде 400 и гранична честота от 2 Hz.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тази статия е насочена към създаването на симулация на обикновен високочестотен филтър от първи ред, който би намалил отрицателните електромагнитни шумове в електрическите автомобили. Техническите характеристики на реалното експериментално устройство могат да бъдат различни от тези на симулацията и по този начин резултатите от симулацията могат да се различават от експерименталните резултати. Получените резултати могат да се използват за подобряване на електромагнитната система на електрическите превозни средства чрез симулиране на филтри за многофазни датчици с вградена компенсация на шума.

## REFERENCE


[1] PIERCE J. D. Jr., Electromagnetic compatibility (EMC) requirement for military and commercial equipment, (MSc thesis), Naval Postgraduate School, 2009, [accessed 2019-10-15], Available from: https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a509335.pdf

[2] GRÄBNER F., E Mobility for components and EMC simulation and measurement, EEPower, Technical Articles [online], 2016, [accessed 2020-02-17]. Available from: https://eepower.com/technical-articles/e-mobility-for-components-and-emc-simulation-and-measurement/

[3] KOHAN, M., SPRONGLOVA M., VISNOVCOVA N., MISEK J., SPANIKOVA G., JAKUSOVA V., JAKUS J. Monitoring of Data Transmission and Changes in Values of Electromagnetic Field in Living Environment. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, [online]. 2020, 22(1), pp. 71-76. ISSN: 2585-7878. Available from: http://komunikacie.uniza.sk/index.php/communications/article/view/1535

[4] KESEEV V., MIHAYLOV Gr., IVANOVA E., ILIEV T. Competitiveness of Electric Vehicles. In: 12th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, Romania, 2016, ISBN 978-1-5090-3746-1, pp. 3-6.

[5] TDK Electronics (2016), Innovative filter solutions for e-mobility, [online]. [Accessed 2019-12-17]. Available from: https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/373562/tech-library/articles/applications---cases/applications---cases/innovative-filter-solutions-for-e-mobility/1311962

[6] BDS EN 55016-1-4:2010/A1:2012. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antennas and test sites for radiated disturbance measurements (CISPR 16-1-4:2010/A1:2012), p. 49.

# ПРИМЕРНО ПРОЕКТИРАНЕ, ИЗГРАЖДЕНЕ И ЕКСПЛОАТАЦИОННИ ИЗМЕРВАНИЯ НА ПАСИВНА ОПТИЧНА МРЕЖА ПО LOG ТЕХНОЛОГИЯ

**Станимир Садинов**[1]

[1] *Технически Университет Габрово, България*

# EXAMPLE DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATIONAL MEASUREMENTS OF A PASSIVE OPTICAL NETWORK USING LOG TECHNOLOGY

**Stanimir Sadinov**[1]

[1] *Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**

*This paper presents an example project for the construction of a passive optical network (PON) in urban conditions with a capacity of about 2000 users. The model implemented in this project is FTTB (fiber to the build), and the technology used is LOG (Lan Over G-PON). Given the current infrastructure and the very technology of building a LOG communication network, we need a topology of the type providing access to Ethernet, IPTV, to a not very large number of users. An example network architecture and its main elements are presented. Experimental studies of problem areas have been made and solutions for corrections have been proposed.*

**Keywords:** PON, LOG, OLT, OTDR.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Основата на съставянето на план за конструирането на една комуникационна мрежа от какъвто и да е тип е избора на топология, която се влияе от няколко основни фактора - брой на потенциални потребители и архитектура на терена [1,7,9,10].

Инвестиционните проекти за изграждане на мрежи се изработват от проектанти, притежаващи пълна проектантска правоспособност и се проектират, съгласуват, одобряват, изграждат и въвеждат в експлоатация съгласно определени и регламентирани от закона правила [2,5,6,9,10]. Строителството на оптични кабелни линии се извършва единствено и само при одобрен инвестиционен проект. Съдържанието на инвестиционният проект включва следните части:

- Архитектура и конструкции:
- ❖ Архитектурна и конструктивна документация;
- ❖ Инсталации и мрежи на техническата инфраструктура;
- ❖ Отклонения от общите мрежи и техническата инфраструктура ;
- Геодезическа:
- ❖ Трасировъчен план ;
- Технологична :
- ❖ Вертикална планировка;
- ❖ Проект за организация и изпълнение на строителството;
- ❖ Организация, трудова и здравна безопасност;
- ❖ Специфични обекти;
- ❖ Други, при сложни и комплексни обекти.

## ПРЕДСТВЯНЕ НА ПРИМЕРЕН ПРОЕКТ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ПАСИВНА ОПТИЧНА МРЕЖА (PON) В ГРАДСКИ РАЙОН

В този проект се представя проект и реализация на PON мрежа за примерен градски регион с капацитет около 2000 потребителя. Предвид настоящата инфраструктура и самата технология на изграждане на LOG комуникационна мрежа ни е необходима топология от тип, предоставящ достъп до Ethernet, IPTV, на немного голям брой потребители – фиг.1. Планирано е тук да се привлекат около 30% от домакинствата в района, имайки в предвид конкуренцията на минимум два други доставчика на подобни услуги. Като е предвиден ресурс и за изграждане на мрежа в съседни населени места.



***Фиг. 1.*** *Наземна карта на населеното място за изграждане на PON мрежата*

Предвижда се капацитетът на положените кабели да е по-голям, за да може да се изгради оптичен пръстен между базовите станции и свързването им в Backbone мрежата на оператора А1. В главното сървърно има монтирано OLT (Optical Line Termination) Huawei MA5600T – фиг. 2.

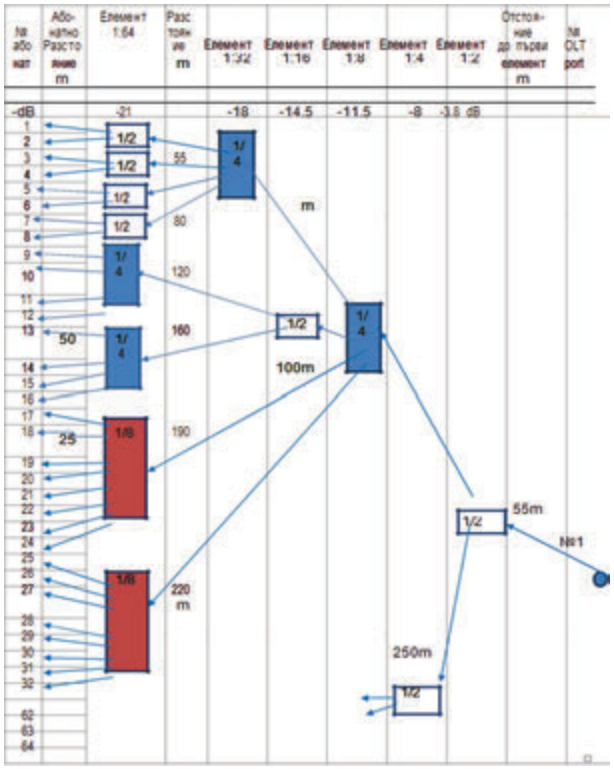



***Фиг. 2.*** *Външен вид на сървърно помещение с OLT Huawei MA5600T*

По спецификация на Huawei MA5600T изходната му мощност е от порядъка на +4 до +5dB според натоварването. Вземаме най-високата стойност при максимално натоварване +5dB и пресмятаме:

OLT+1x2+1x4+1x16=+5–4.0–7.3–13.8=20.1dB

Тази стойност напълно покрива поставените изисквания за горна граница на затихването от -30dB и дава възможност за подмяна на крайният разклонител 1x4 с 1x8 при евентуално запълване на капацитета на първия и включване на допълнителен брой потребители – фиг.3. Проблемът при тази ситуация, е че променяме съотношението 1:128 и OLT няма да разпознае клиентите над 128 поради тази причина, ще трябва да се добавят или нови платки към съществуващото вече OLT или да бъде закупено ново устройство, от което да бъдат захранено другите 128 клиента от сплитерите 1x8. Със същата идея и оставяме двоен запас при полагане на оптичните кабели.




***Фиг. 3.*** *Примерна архитектура на PON мрежата*

Също така на самото OLT се аранжират портове, които се използват за корпоративни клиенти, на които се изгражда FTTH-изцяло оптична свързаност [3,4,8]. В посочения пример са използвани захранващи оптични кабели с капацитет от 96 влакна, които физически се разплитат на оптиен пач панел - ODF (Optical Distribution Frame) 2U, SUBRA- 8x12 port, simplex, който се разполагат в рака на самото OLT. Поради малкия брой на живущи в района, максималния капацитет на кабелни влакна е 48FO – фиг. 4.



***Фиг. 4.*** *ODF(Optical Distribution Frame) 2U*

Заради инфраструктурата на квартала и не изградената канална мрежа, изграждането на комуникационната мрежа е въздушно. Кабелите изтеглени между стълбовете са с метален силов елемент, който не позволява разтягането им, което може да се получи от температурната разлика в сезоните. Муфите, използвани в проекта, също са монтирани на стълбове, като капацитета им е за минимум осем кабела. Схемата на аранжиране на оптичната част от мрежата се базира на покриването на всяко едно домакинство във входа и броя кутии необходими за закачането им на 100%. За пример ако на дадена улица има 16 домакинства делим на 8 (максималния брой клиенти които се включват в една кутия) и така получаваме необходимата бройка кутии. Така в този пример се получава, че до всяка кутия трябва да се аранжират 2 оптични влакна. Тези оптични влакна се терминират в кутия намираща се в шкафа, а оптично влакно се използва за захранване на всяко устройство. Така влакната на всеки вход биват изведени в SC конектор на ODF, в който се терминират и се облъчват. До този SC от техническия център на оператора стигат влакна от OLT , сплитнати през сплитер 1:16 или 1:64. По този начин в техническия център се монтира и ODF със сплитери и така се спестяват директни портове от OLT. Директен порт се ползва за клиенти на разстояние над 10 км. Използваните сплитери са 1:8 с внесено затихване от 10 dB и 1:16 с внесено затихване 16 dB. на всеки един от тях. Изчисленията са направени при Split ratio per PON port 1:64. Възможно е изчисленията да се направят на Split ratio - 1:128, което ще наложи първото ниво на сплитване в SC конектора да е на 1:16 сплитер, което ще доведе до намаляване на оптичния бюджет и съответно скъсяване на разстоянието от Техническия център до крайния абонат. Респективно това би довело до увеличаване броя на техническите центрове. При оптичен бюджет на GPON технологията от около 28 dB., се получава, така че при това двойно сплитване на 1:8, ни остава запас от оптичен бюджет от около 8 dB, който се разпределя както следва:

- Взема се стандартна стойност на затихването в оптичния кабел при 1310nm – 0.33 dB/km, като тази стойност се умножава по дължината на трасето от техническия център до клиента;
- Затихване генерирано от оптични съединители на обща стойност от 2.7dB (9 бр.

съединения по трасето). С цел предоставяне на качествена услуга е необходимо да се има запас от оптична мощност и да не се работи на горната граница на бюджета, затова се приема, че най-отдалечената кутия, може да се намира на не повече от 10 км (т.е. затихване по оптичното трасе да е максимум 6dB) от технически център. По тази схема стойността на оптичния бюджет се получава: 57 10 + 10 + 6 = 26 dB, което е напълно в нормите за предоставяне на качествена услуга. В този случай в техническия център са ни нужни около 12-16 порта на OLT. Това значително намалява разхода за оборудване.

## ПРЕДСТВЯНЕ НА ПРИМЕРНИ ИЗМЕРВАНИЯ В ИЗГРАЖДАНЕ НА ПАСИВНА ОПТИЧНА МРЕЖА (PON) В ГРАДСКИ РАЙОН

Измерванията се извършват на всяко едно от оптичните влакна, изграждащо оптична връзка от ODF А до ODF Б, при λ=1310 nm и λ=1550 nm (фиг.5). Примерен протокол е показан на фиг.6. Измерването става с рефлектометър JDSU MTS 4000.



***Фиг. 5**. Външен вид на рефлектометър OTDR- JDSU MTS 4000*

Максималното оптичното затихване се определя в зависимост от дължината на оптичната линия L, броя на сплайсванията N и на оптичните съединители n : amax = α.L + as. N + ac.n, dB.

Допустими стойности според препоръките на G651 ÷ G655 на ITU-T ( Международен съюз по Телекомуникации) са:

за λ = 1310nm α≤0.4 dB

за λ = 1550nm α≤0.25 dB

L – дължина на оптичната линия в километри;

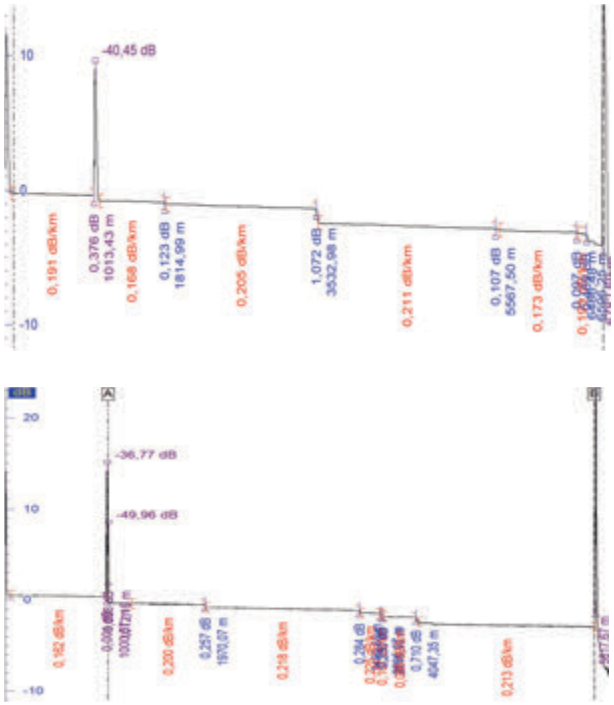
$a_s$ - максимално средно затихване от една заварка $a_s$≤0.15 dB в една посока;

N – брой на оптичните заварки;

$a_c$ - максимално внесено затихване от един оптичен съединител $a_c$ ≤0.35 dB;

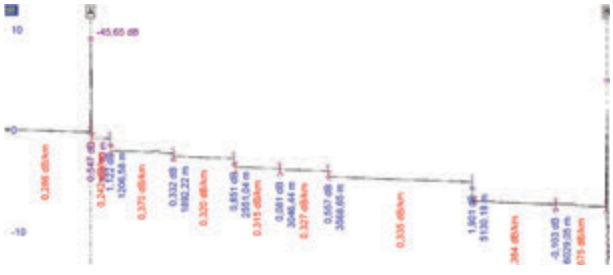
n – брой на оптичните съединители по дължината на линията;

Внесено затихване от заварките по абсолютна стойност не трябва да надвишава 0.1 dB при осредняване за една заварка в двете посоки на измерване или 0.15 dB при измерване само в едната посока. След приключване на строително-монтажните работи трябва да се представят съответните протоколи съгласно инструкцията за строителство на оптични кабелни линии.



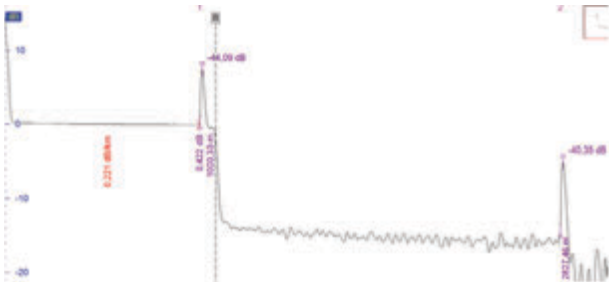

***Фиг. 6**. Примерни рефлектограми от изградената трасе*

На следващите фигури съм показал няколко рефлектограми с проблем, естеството на проблема и неговото отстраняване:



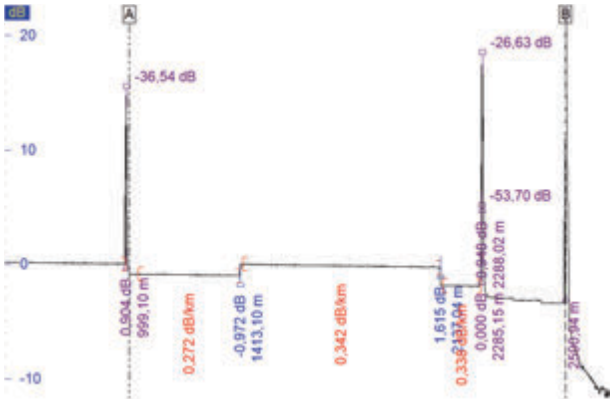
***Фиг. 7.** Рефлектограма с проблем в заварките*

На фиг.7 има проблеми със заварки на 1206м,2551м,3568м и 5130м. Тези заварки не бяха по стандарта и се наложи тяхното презаваряване.



***Фиг.8.*** *Рефлектограма с проблем в сплитерите*

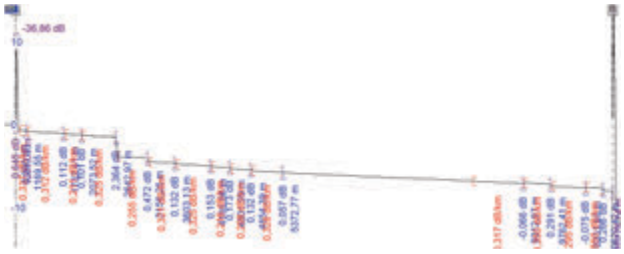
На Фиг.8 се вижда оптично трасе с монтиран сплитер 1:2 и 1:8 след него. Затихването е по стандарт -11dBm.




***Фиг.9.*** *Рефлектограми с проблем в препачването*

На фиг.9 съм представил рефлектограма с проблем в препачването в шкаф. Проблемът се решава като се почистят адаптерите със спирт под налягане и Fujikura one click cleaner.

Почистват се челата на конектора и се пръска със спирт. Може да се наложи смяна на пачкордата или преправяне на заварка в кутията. На тази рефлектограма може да се види и NZ влакно между 1413м. и 2137м.



***Фиг.10.*** *Рефлектограма с проблем в оптичното влакно на 2642 м*

На фиг.10 се вижда проблем на оптичното влакно на 2642м. Оказа се проблем на влакното между две муфи - дефект във влакното. Поради аванса от влакна, услугата беше прехвърлена по следващо свободно.



***Фиг.11.*** *Рефлектограма с двоен проблем*

На фиг.11 има два проблема. Първият е в изходящият ODF, като се наложи смяна на оптичната опашка (pigtail). Другият е сгънато влакно при аранжиране на оптичната муфа. След преаранжиране на сплайс касетата в муфата, проблема беше отстранен.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптичните мрежи са иновацията на новият век в областта на телекомуникациите, чиито пълен капацитет все още не сме достигнали. От технологична гледна точка те предоставят една напълно нова среда за развитие на технологиите.

Методиката за проектиране на LOG оптична мрежа, която съм представил в този проект е една от много възможни вариации. Но тя предоставя възможност за лесна редакция и промяна на трасирането на оптичните влакна, както при евентуална повреда при OLT, по трасираната линия така и при крайният клиент. Лесната актуализация и преминаването на по-старите стандарти на пасивните оптични мрежи към гигабитовият вариант също е едно от основните предимства на метода, тъй като при изграждането му активните устройства се намират в началото и непосредствено преди абонатната мрежа, само с подмяната им преминаваме от една към друга технология, което е поредното доказателство за гъвкавостта и креативността на този тип мрежи.

По-голямата част от фирмите предоставящи достъп до интернет и фиксирани услуги, проектиращи мрежи от подобен тип използват именно тази вариация, което само по себе си доказва, че тя има реално

приложение . С оглед на така поставеният проект, LOG технологията оставя отворена врата за иновации в областта на телекомуникациите.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Планиране, проектиране и оптимизация на безжични комуникационни платформи, услуги и решения за 5G и IoT приложения", договор 2205Е/2022 г. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.

## REFERENCE

[1] https://bitcoms.eu
[2] http://m.bg.opticomfiber.com
[3] https://www.researchgate.net/figure/Architecture-of-HFC-network_fig1_3041197
[4] https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.109.6370&rep=rep1&type=pdf
[5] https://www.ccexpert.us/telecommunications/the-hybrid-fibercoaxial-hfc-network.html
[6] http://summittelecom.en.hisupplier.com/product-1928021-Optical-Fiber-Distribution-Box-Rotate-Type-12-24-36-48-72-96-Core-19-Inch-Rotating-ODF-Fiber-Termination-Rotate-Shelf.html
[7] Harlov B., O. Velchev "Design of optical network structures when switching from LAN to PON networks in our conditions" "MULTIMEDIA BG" EOOD XXIV TELECOM 2016, Sofia, BULGARIA
[8] Angelov K, S Sadinov, P Kogias, 2017 Practical Model for Management, Monitoring and Research of Passive Optical Network, Proc. XXVI International Scientific Conference Electronics - ET2017, Sozopol, Bulgaria,
[9] Mirchev S. Digital communication communication systems. New Knowledge, Sofia 2001.
[10] Tsankov B. Telecommunications-fixed, mobile and IP. New Knowledge, Sofia 2006.

# ИЗСЛЕДВАНЕ И ОЦЕНКА НА ОБХВАТА И КАЧЕСТВОТО НА БЕЗЖИЧНО РАДИОПОКРИТИЕ В LORAWAN КОМУНИКАЦИОННА МРЕЖА

# SURVEY AND ASSESSMENT OF THE RANGE AND QUALITY OF WIRELESS RADIO COVERAGE IN A LORAWAN COMMUNICATION NETWORK

**Assist. Prof. Nikolay Manchev [1]**

[1] *Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**

*This paper discusses the specifics of radio coverage planning for narrowband communication in the LoRaWAN network. This type of communication is used in the deployment of Internet of Things and Industrial Internet of Things networks in smart cities, smart factories, etc., as well as for industrial communications. Data transmission is possible over long distances at low speeds and extremely low levels of transmitted signals. This defined the LoRa link as very reliable. In the second part of the article, based on simulation models predicting the range of wireless coverage and real measurements in the same area, the quality of the already implemented telecommunications network is evaluated.*

**Keywords:** LoRa, LoRaWAN, LPWAN, Radio Mobile, TTN Mapper, IoT.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Комуникационните мрежи за Интернет на нещата (IoT) добиха известност след въвеждането на IoT услуги - Интернет, WEB 2.0, "Машина към Машина" (M2M) и др. [1], [12], [19-23].

Идентификацията, отчитането, комуникацията, изчисление и семантика са IoT услуги и елементи от цялостната платформа. Основната цел на Интернет на нещата е да събира данни чрез свързване на различни обекти, основно чрез безжични комуникационни технологии. Тъй като IoT крайните устройства са по своята същност повсеместни, устройствата трябва да работят на места без постоянен източник на енергия. Те трябва да работят в големи райони, което по същество включва комуникация на големи разстояния от няколко километра в градските райони до десетки километри в селските райони. В резултат на това е необходима безжична свързаност и мрежово интегриране на крайните устройства. Има много приложения и доставчици на услуги, които днес използват IoT технологии – общите приложения включват дистанционно управление, телеметрия, интелигентни градове, здравеопазване и интелигентно селско стопанство [2-4], [24], [25].

Както беше посочено по-горе, IoT устройствата са ограничени по отношение на ниска цена, ниска консумация на енергия и способност да работя в отдалечени райони. В тази връзка, този доклад представя основните стъпки на планиране и изграждане, изследване и оценка на обхвата и качеството на експериментална зона на радио покритие в LoRaWAN мрежа при честота 868MHz (Европа). Представени са резултати от симулационно и експериментално радио покритие за градска и за извънградска зона.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Комуникационната архитектура на LoRaWAN мрежа е показана на фиг. 1.

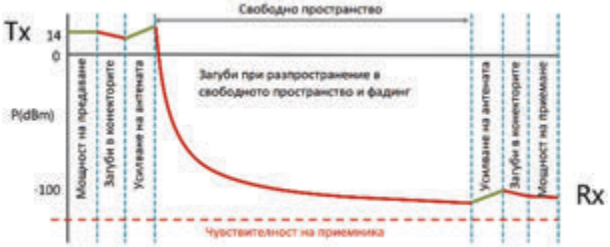
Технически, спецификацията LoRaWAN [10] включва три основни компонента, а именно физически слой (PHY), слой на връзката и мрежова архитектура.




***Фиг. 1.*** *Архитектура на LoRa мрежа*

**Физически слой:**

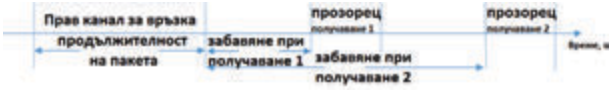
Комуникацията между крайните устройства и шлюза е на честоти под 1GHz в зависимост от местните разпоредби. В този доклад разглеждаме конкретно работата в промишлената, научна и медицинска (ISM) честотна лента 868 MHz на ЕС. За тази лента спецификацията LoRaWAN позволява осем честотни канала. Шест от тях са базирани на LoRa модулация със SF между 7 и 12 и с честотна лента 125 kHz. Едната опция е базирана на честотна лента от 250 kHz и SF 7 с LoRa модулация, а осмият канал е с модулация Gaussian frequency-shift keying (GFSK) със скорост на предаване на данни 50 kbps. Модулацията LoRa се основава на схема с разширен спектър Chirp Spread Spectrum (CSS), която използва широколентови линейно честотно модулирани импулси, чиято честота намалява или се увеличава за определен период от време въз основа на кодираната информация [8]. Използването на продукт с висока честотна лента прави радиосигналите устойчиви на смущения в обхвата и извън обхвата, докато използването на достатъчно широколентови методи позволява да се подобри устойчивостта срещу многолъчево затихване [9]. Това води до максимален бюджет на връзката от около 157 dB, което позволява постигане на дълги комуникационни обхвати или намаляване на предавателната мощност, като по този начин спестява енергия на крайните устройства – фиг. 2. Използваната модулационна схема също се очаква да помогне за смекчаване на ефекта на Доплер.




***Фиг. 2.*** *Определяне на енергийния бюджет на връзката*

**Слой на връзката:**

Протоколът MAC във версия 1.0 на спецификацията LoRaWAN [10] определя, че крайните устройства имат достъп до средата за предаване на техните пакети по чист начин Aloha. MAC слоят също дефинира три опции за планиране на слотовете за прозорец за получаване за връзка надолу, които са именувани като клас A, B и C. Крайното устройство трябва да има поддръжка за клас A, но поддръжката за класове B и C не е задължителна. Както е показано на фиг. 3, два прозореца за получаване се отварят след всяко предаване на връзка нагоре в клас A. В допълнение към двата приемни времеви слота след всеки кадър на връзка нагоре, в клас B се отваря допълнителен прозорец за получаване в планирани часове. За да има поддръжка за клас B, шлюзът периодично предава пакети за местоположение, използвайки GPS антената и приемника си за осигуряване на референтен час и поддържане на синхронизацията. Устройствата от клас C остават в режим на приемане, освен ако не предават. В този документ се разглеждат изрично крайни устройства от клас A.




***Фиг. 3.*** *Комуникационни фази на LoRaWAN устройство работещо в клас A*

**Мрежова архитектура:**

Мрежите LoRaWAN обикновено използват топология звезда от звезди, където шлюзовете препредават съобщения с данни между крайните устройства и мрежовия сървър, както е показано на фиг. 1. Важна характеристика на технологията LoRa, наречена адаптивна скорост на предаване на данни (ADR), се намира в мрежовия сървър. ADR позволява адаптиране и оптимизиране на скоростта на данни за статичните крайни устройства. Мобилните крайни устройства трябва да използват фиксирана скорост на предаване на данни, тъй като мобилността може да причини значителни времеви вариации за характеристиките на радиоканала [10]. Въпреки това, в много мобилни приложения крайните устройства всъщност са статични през повечето време, което им

позволява да използват опцията ADR от мрежовия сървър и той да оптимизира скоростта на данни, като основаната цел е да не се губят данни. Например, ако крайно устройство, монтирано към капака на кофа за смет се премества, когато там се поставят кошчета или се изхвърля сметта, но остава статичен през останалото време. Друг важен компонент на мрежовия сървър е механизъм, използван за филтриране на излишните пакети. Тъй като технологията не използва никакъв метод за предаване, единичен пакет, предаден от крайно устройство, може да получи дублиране на пакети от няколко шлюза, всеки от които ще препрати такъв пакет към сървъра. Въпреки това, техническото решение неизбежно въвежда излишък по отношение на опорната комуникация, позволява да се елиминира сигнализирането, свързано с предаването, което води до някои икономии на енергия. Мрежовият сървър също отговаря за сигурност, диагностика и потвърждения за постъпили пакети от данни [11].

**Доплеров ефект:**

За обхвата и качеството на безжичното радио покритие при LoRaWAN мрежите съществено влияние оказва Доплеровия ефект.

Да приемем, че сигнал, който се предава от движещо се крайно устройство, се дава от [13]

$$s(t) = \begin{cases} A(t)cos\left[(\omega_0 + \omega_D)\, t + \frac{\mu t^2}{2}\right], -T/2 < t < T/2 \end{cases} \quad (1)$$

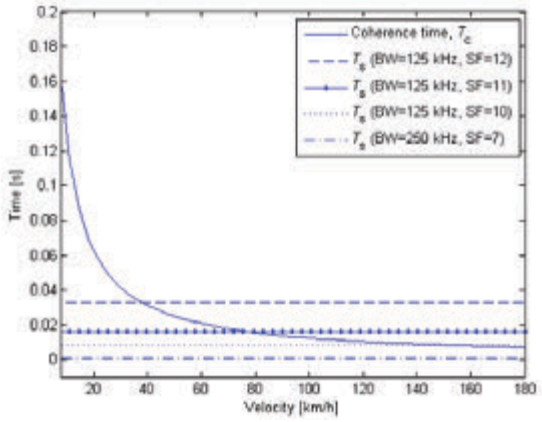
където A е амплитудата на сигнала, $\omega_0$ е ъгловата носеща честота, $\omega_D$е изместването на ъгловата честота причинено от ефекта на Доплер, t е времето, μ е скоростта на импулса и T е продължителността на инпулса. Този CSS сигнал се нарича upchirp, когато честотата линейно нараства (μ > 0) и downchirp, когато честотата намалява (μ < 0). Изместването на честотата, дължащо се на ефекта на Доплер, води до изместване на автокорелационния пик на приемника по време. Изместването във времето може да се изчисли като ωD/μ [13]. Ако честотата на чипване (квантуване) е голяма, изместването във времето е толкова малко, че може да се пренебрегне. Това кара CSS да работи добре при наличие на ефект на Доплер. Въпреки това, LoRa/LoRaWAN технологията осигурява комуникационна връзка с голям обхват на покритие, но с ниска скорост на предаване на данни. Това неминуемо оказва влияние върху скоростта на тактуване. При ниска честота на предаване (863MHz), изместването във времето се увеличава, което прави получаването на пакети правилно, но доста по-трудно. Друг подход за анализиране на ефективността на технологията LoRa е да се сравни времето за кохерентност (Tc) и символно време (Ts). Времето на кохерентност е обратно пропорционално на ефекта на Доплер. (2)

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_D} \quad (2)$$

Ако Ts > Tc, възниква бързо затихване поради ефекта на Доплер, който води до изкривяване на сигнала. [14]. Продължителността на силвола при LoRa модулацията може да се изчисли като [9]

$$T_s = \frac{2^{SF}}{БW} \quad (3)$$

където SF(Spreading Factor) е факторът на разпространение, а BW е честотната лента. Както може да се забележи от (3), Ts се удвоява, когато SF се увеличава с единица, като се има предвид, че честотната лента не се променя.



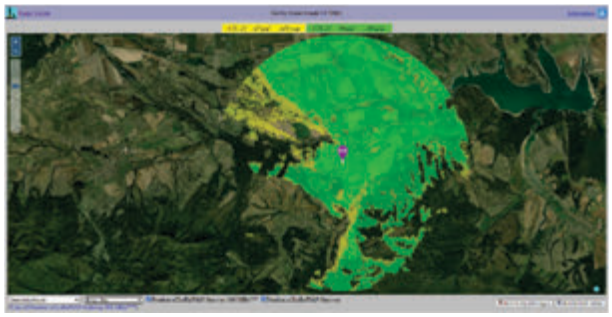

***Фиг.4**. Сравнение на времето на кохерентност и времето на продължителност на символ за LoRa сигнали с различни фактори на разпространение*

За да се види кога настъпва бързо затихване, на фиг. 4 е показана зависимостта на кохерентното време на LoRa модулирани

символи при централна честота от 868 MHz за различни скорости, при различни SF фактори и широчина на честотната лента. Когато скоростта е под 38 km/h, Tc е по-голям от Ts с показаните SF. На 38 km/h и 76 km/h, Tc и Ts криви със SF=12 и SF=11 са съответно кръстосани. От това следва, че LoRa технологията може да изпита загуби на пакети при относително ниски скорости с тези SF. По-ниските SF могат да понасят по-високи скорости.

## РЕЗУЛТАТИ

Планираното безжично покритие в LoRaWAN мрежа се реализира за централната част на гр. Павел баня. В тази част на града са налични множество препятствия, които могат да попречат на осъществяването на радиокомуникацията в LoRaWAN мрежата, но тъй като LoRa технологията е достатъчно усъвършенствана няма проблем да се прилага в градска среда дори и при силно застроена градска част, както и при големи разлики във височините на точката за достъп и точката, където се намира крайното устройството. На фиг. 5 е показана софтуерната симулация на радиопокритие реализирано със софтуера Radio Mobile [18] т.е това е зоната, в която шлюза ще успява да приема и предава съобщения от крайните устройства. Заложената планирана зона е с радиус 5 км. около шлюза, като в зелен цвят се оцветява сигнала със стойност в приемната страна -100dBm, а в жълт сигнал със стойност -120dBm. Като критичното ниво на чувствителност на приемника на шлюза и на крайното устройство е -139dBm.



***Фиг. 5.*** *Резултати от планираното покритие за централната част на гр. Павел баня*

Това е симулационното покритие, като в него са заложени реалните радио-параметри на шлюза и на крайното устройство, с които са направени и реални измервания с цел сравнение на симулационното с реалното радиопокритие в същата зона.

Параметри на шлюза:

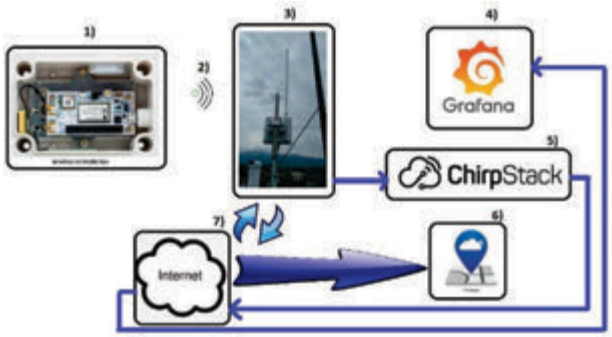
- Усилване на антената: 3dB
- Диаграма на антената: кръгова 360º
- Затихване във фидерната линия: 1,5dB
- Височина на монтаж: 12m.
- Чувствителност на приемника: 139dBm

Параметри на крайното устройство:

- Усилване на антената: 3dB
- Излъчена антенна мощност: 0.6W
- Диаграма на антената: кръгова 360o
- Височина на антената: 1m.

Според резултатите от симулационните изследвания изведени от софтуера Radio Mobile [18] радио покритието в съответната зона, спрямо релефа и надморската височина в тази точка не са проблем за покриването на 5 км. зона с радиопокритие около LoRaWAN шлюза.

На фиг. 6 е показана схемата на експерименталната постановка, изградена на територията на гр. Павел баня.



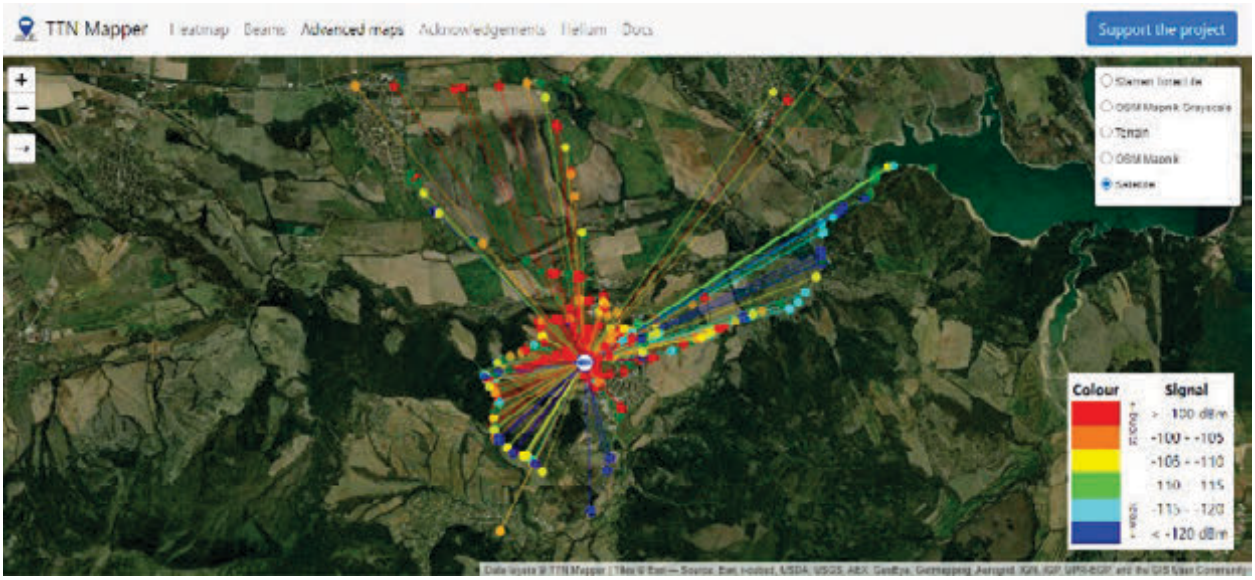

***Фиг. 6.*** *Схема на експерименталната постановка*

Схемата на експерименталната постановка включва в себе си следните елементи:

1) Крайно устройство;
2) LoRaWAN трафик;
3) LoRaWAN Шлюз;
4) Уеб платформа за визуализация[16];
5) LoRaWAN мрежови сървър с отворен код [17];
6) Облачна услуга на TTN за TTN Maper [15];
7) Глобална Интернет Мрежа;




***Фиг. 7.*** *Стойности на параметрите RSSI и SNR за множеството измервания в LoRaWAN мрежата*




***Фиг. 8.*** *Контролни точки засечени по маршрута*

Експерименталното изследване се извърши, като бе обходен маршрут в централната част на гр. Павел баня. Резултатите за състоянието на параметрите RSSI (в относителни dBm) и SNR (в dB), отчетени чрез директно извличане на данните и визуализацията им в платформата Grafana [16] и те са показани на фиг. 7. Реализирани са голям брой отчети на нивото на сигнала в различни точки от централната и крайната част на града.

На фиг. 8 е показана карта на направените практически измервания в същата зона, като те практически потвърждават симулационните изследвания за тази точка. От което следва, че софтуера Radio Mobile[18] е подходящ за планиране на радиопокритие при LoRaWAN мрежи, стига да се знаят точно затихванията във фидерната линия на приемника съответно и на предавателя, също излъчената мощност на крайното устройство, и типа използвани антени при двете устройства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Както вече бе споменато, LoRaWAN е технология за радиочестотна комуникация на далечни разстояния, която позволява устройствата да се свързват с Интернет директно с голям обхват и с ниска консумация на енергия. Това решава редица проблеми в сегашната екосистема „Интернет на нещата“, „Индустриален Интернет на Нещата“ и „Industry 4.0“. С дълъг живот на батерията, до 5 години, съчетан с намалена цена за

поддръжка на сензорната мрежа, LoRaWAN придвижва напред всички видове нови случаи на употреба.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Синтез на интелигентни системи за разпознаване на обекти в информационно-комуникационни структури”, договор 2208Е / 2022г. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.

## REFERENCE

[1] R. Sanchez-Iborra and M.-D. Cano, ‘‘State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services,’’ *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 708, May 2016.

[2] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, ‘‘Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios,’’ *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, Oct. 2016.

[3] D. Chaves-Diéguez, A. Pellitero-Rivero, D. García-Coego, F. González-Castaño, P. Rodríguez-Hernández, Ó. Piñeiro-Gómez, F. Gil-Castiñeira, and E. Costa-Montenegro, ‘‘Providing IoT services in smart cities through dynamic augmented reality markers,’’ *Sensors*, vol. 15, no. 7, pp. 16083–16104, Jul. 2015.

[4] G. Margelis, R. Piechocki, D. Kaleshi, and P. Thomas, ‘‘Low throughput networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations,’’ in *Proc. IEEE 2nd World Forum Internet Things (WF-IoT)*, Dec. 2015, pp. 181–186.

[5] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, M. Hämäläinen, and J. Iinatti, ‘‘Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring,’’ in Proc. 10th Int. Symp. Med. Inf. Commun. Technol. (ISMICT), 2016, pp. 1–5.

[6] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, ‘‘Internet of Things for smart cities,’’ IEEE Internet Things J., vol. 1, no. 1, pp. 22–32, Feb. 2014.

[7] D. H. Kim, J. B. Park, J. H. Shin, and J. D. Kim, ‘‘Design and implementation of object tracking system based on LoRa,’’ in Proc. Int. Conf. Inf. Netw. (ICOIN), Jan. 2017, pp. 463–467.

[8] Semtech. SX1272/3/6/7/8 LoRa modem design guide, AN1200.13, Revision 1. July 2013.

[9] Semtech. LoRa modulation basics, AN1200.13, Revision 1. January 2015

[10] Semtech. LoRaWAN specification v1.0. January 2015.

[11] LoRa Alliance. A technical overview of LoRa and LoRaWAN, White paper, November 2015.

[12] L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, ‘‘Long-range IoT technologies: The dawn of LoRa,’’ in *Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures*, V. Atanasovski and A. Leon-Garcia, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2015, pp. 51–58.

[13] Zhang P., Liu H. An ultra-wide band system with chirp spread spectrum transmission technique. In: Intelligent Transportation Systems Telecommunications, 2006, pp.294-297.

[14] Rappaport T. S. Mobile radio propagation: Small-scale fading and multipath. In: Wireless Communications – Principles and Practice. IEEE Press, USA, 1996, pp. 139 – 196

[15] https://ttnmapper.org/

[16] https://grafana.com/

[17] https://www.chirpstack.io/

[18] http://www.ve2dbe.com/english1.html

[19] J. Butler, E. Pietrosemoli, M. Zennaro, C. Fonda, S. Okay, and C. Aichele, *Wireless Networking in the Developing World*, 3rd ed. Copenhagen, Denmark: BookSprint, 2013.

[20] L. Krupka, L. Vojtech, and M. Neruda, ‘‘The issue of LPWAN technology coexistence in IoT environment,’’ in *Proc. 17th Int. Conf. Mechatronics* 890 *Mechatronika (ME)*, Dec. 2016, pp. 1–8.

[21] K. Benson, C. Fracchia, G. Wang, Q. Zhu, S. Almomen, J. Cohn, L. D’arcy, D. Hoffman, M. Makai, J. Stamatakis, and N. Venkatasubramanian, ‘‘SCALE: Safe community awareness and alerting leveraging the Internet of Things,’’ *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 12, pp. 27–34,Dec. 2015.

[22] Z. D. R. Gnimpieba, A. Nait-Sidi-Moh, D. Durand, and J. Fortin, ‘‘Using Internet of Things technologies for a collaborative supply chain: Application to tracking of pallets and containers,’’ *Proc. Comput. Sci.*, vol. 56, pp. 550–557, Jan. 2015.

[23] A. Ali, G. A. Shah, and J. Arshad, ‘‘Energy efficient techniques for 902 M2M communication: A survey,’’ *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 68, pp. 42–55, Jun. 2016.

[24] M. Blackstock and R. Lea, ‘‘IoT interoperability: A hub-based approach,’’ in *Proc. Int. Conf. Internet Things (IoT)*, Oct. 2014, pp. 79–84.

[25] C. Goursaud and J. M. Gorce, ‘‘Dedicated networks for IoT: PHY/MAC 908 state of the art and challenges,’’ *EAI Endorsed Trans. Internet of Things*, vol. 1, no. 1, Oct. 2015, Art. no. 150597.

# ANALYSIS OF SC, EGC AND MRC MACRO DIVERSITY SYSTEMS

**Borivoje Milosevic**
*University MB, Belgrade, Serbia*

**Dusan Regodic**
*University MB, Belgrade, Serbia*

**Slobodan Obradovic**
*ITS, Belgrade, Serbia*

**Abstract:** *This paper will consider the analysis of signal transmission in the presence of a number of different noises and disturbances - fading. To reduce the impact of fading on system performance, MRC, EGC and SC diversity techniques will be used. The paper will show that the quality of the transmission can be significantly improved with the diversity technique. This method of improving the quality of signal transmission is successfully applied in wireless telecommunication systems and mobile telephony.*

**Keywords:** Signal Propagation, Diversity, SC, EGC, MRC, PDF, CDF, BER acquirement.

## INTRODUCTION

Digital telecommunication signals, during their propagation through space, encounter different types of interference - fading. Various methods are used to improve signal performance, but the most commonly used are diversity techniques. The most commonly used combining techniques are: SC - Selective Combining, MRC - Maximal Ratio Combining and EGC - Equal Gain Combining [1].

MRC diversity technique gives the best results [2,3]. This technique effectively reduces the impact of fading on system performance and gives the greatest diversity gain. The signal-to-noise ratio at the output of the MRC receiver is equal to the sum of the signal-to-noise ratio at its inputs. If the noise power is the same in all diversity branches, then the square of the signal at the output is equal to the sum of the square of the signal at its inputs. This method requires that the signals at the inputs be brought into phase. That is why this way of combining is complex and expensive for practical implementation, Figure 1.

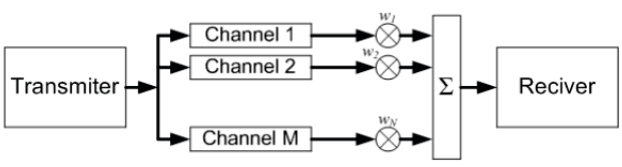



*Fig. 1. MRC diversity system*

EGC diversity technique is a compromise solution. It gives better performance than SC receiver and worse than MRC receiver. The signal envelope at the output of the EGC receiver is equal to the sum of the signal envelopes at its inputs. The EGC receiver requires information about the channel and requires that the signals at the inputs to the EGC diversity receiver are brought into phase, Figure 2.

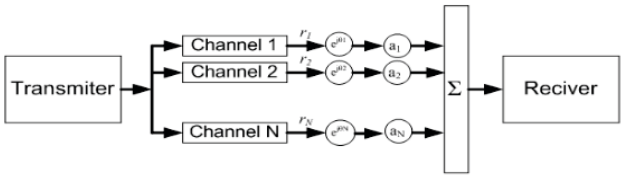



*Fig. 2. EGC diversity system*

The SC diversity technique is simple for practical implementation because the processing is done only on one diversity branch. The SC receiver selects the branch with the highest signal-to-noise ratio. If the noise power is the same in all branches, then the SC receiver selects the branch with the strongest signal, Figure 3.

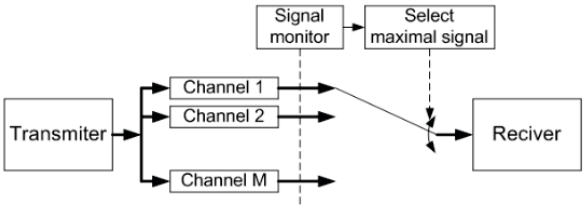



*Fig. 3. SC diversity system*

## EXPOSITION

The paper analyzes a macro diversity system consisting of three SC micro diversity systems with three inputs each. Each micro-diversity system has three inputs and each output from the micro-diversity system is connected to the input of the macro-diversity combiner [4,5]. The micro-diversity combiner of the system is of the form SC and the macro-diversity combiner of the system is the selective SC, by power and by channel. Nakagami - m fading appears at the input of the first micro diversity combiner, Rayleigh fading at the input of the second micro diversity combiner, and Rice fading at the input of the third micro diversity combiner. All signals at the inputs to the combiner are independent. The power of Nakagami - m fading is Ω1, the power of Rayleigh fading is Ω2, and the power of Rice fading is Ω3, they are dependent, i.e. correlated, and variable. Powers Ω1, Ω2 and Ω3 have a log-normal probability density, Figure 4.

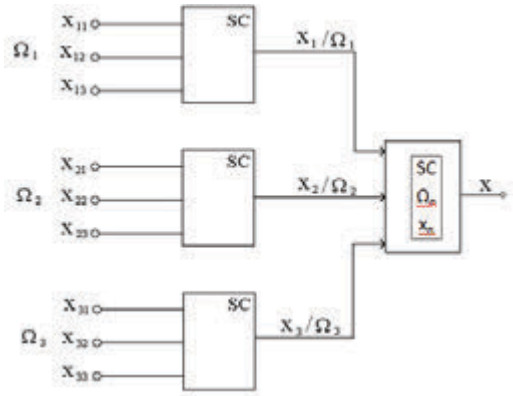



*Fig. 4 System model*

The signals at the inputs of the first micro diversity system are $x_{11}$,$x_{12}$ and $x_{13}$. These signals are mutually independent and have an identical Nakagami distribution. Also, these signals at the input of the first micro diversity system have the same strength $\Omega_1$. The first micro diversity combiner is used to reduce the impact of Nakagami fading on system performance. Signal probability densities are, equation 1:

$$p_{x_{11}}(x_{11}) = \frac{2}{\Gamma(m)}\left(\frac{m}{\Omega_1}\right)^m x_{11}^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega_1}x_{11}}$$
$$p_{x_{12}}(x_{12}) = \frac{2}{\Gamma(m)}\left(\frac{m}{\Omega_1}\right)^m x_{12}^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega_1}x_{12}}$$
$$p_{x_{13}}(x_{13}) = \frac{2}{\Gamma(m)}\left(\frac{m}{\Omega_1}\right)^m x_{13}^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega_1}x_{13}} \quad (1)$$

where $m$ is the fading sharpness.

The signals at the inputs of the second micro diversity combiners are $x_{21}$,$x_{22}$ and $x_{23}$. These signals are mutually independent and have identical Rayleigh probability density function. Model is used to mitigate the effect of Rayleigh fading on system performance. Signal strengths at the inputs of this micro diversity combiner are $\Omega_2$. The signal probability densities are, equation 2:

$$p_{x_{21}}(x_{21}) = \frac{x_{21}}{\Omega_2} e^{-\frac{x_{21}^2}{2\Omega_2}}$$
$$p_{x_{22}}(x_{22}) = \frac{x_{22}}{\Omega_2} e^{-\frac{x_{22}^2}{2\Omega_2}}$$
$$p_{x_{23}}(x_{23}) = \frac{x_{23}}{\Omega_2} e^{-\frac{x_{23}^2}{2\Omega_2}} \quad (2)$$

The signals at the inputs of the third micro diversity combine are $x_{31}$,$x_{32}$ and $x_{33}$ . These signals are mutually independent and have identical Rice probability density. A third micro diversity system is used to reduce the effect of Rice fading on system performance. Signal strengths at the inputs of this micro diversity combiner are $\Omega_3$. Signal probability densities are, equation 3:

$$p_{x_{31}}(x_{31}) = \frac{x_{31}}{\Omega_3} \cdot \exp\left(-\frac{x_{31}^2 + A^2}{2\Omega_3}\right) \cdot I_0\left(\frac{x_{31}A}{\Omega_3}\right)$$
$$p_{x_{32}}(x_{32}) = \frac{x_{32}}{\Omega_3} \cdot \exp\left(-\frac{x_{32}^2 + A^2}{2\Omega_3}\right) \cdot I_0\left(\frac{x_{32}A}{\Omega_3}\right)$$
$$p_{x_{33}}(x_{33}) = \frac{x_{33}}{\Omega_3} \cdot \exp\left(-\frac{x_{33}^2 + A^2}{2\Omega_3}\right) \cdot I_0\left(\frac{x_{33}A}{\Omega_3}\right) \quad (3)$$

where A is the amplitude of the dominant component.

The cumulative probability of a random variable is defined as the probability that this random variable is less than some value. Cumulative probabilities for random variables $x_{11}$,$x_{12}$ and $x_{13}$ are, equation 4 :

$$F_{x_{11}}(x_{11}) = \frac{1}{\Gamma(m)} \cdot \gamma\left(m, x_{11}^{\,2} \frac{m}{\Omega_1}\right)$$
$$F_{x_{12}}(x_{12}) = \frac{1}{\Gamma(m)} \cdot \gamma\left(m, x_{12}^{\,2} \frac{m}{\Omega_1}\right)$$
$$F_{x_{13}}(x_{13}) = \frac{1}{\Gamma(m)} \cdot \gamma\left(m, x_{13}^{\,2} \frac{m}{\Omega_1}\right) \quad (4)$$

where γ(a,x) incomplete (Gamma) function. Cumulative probabilities for Rayleigh random variables $x_{21}$,$x_{22}$ and $x_{23}$ are, equation 5:

$$F_{x_{21}}(x_{21}) = 1 - e^{-\frac{x_{21}^{\,2}}{2\Omega_2}}$$
$$F_{x_{22}}(x_{22}) = 1 - e^{-\frac{x_{22}^{\,2}}{2\Omega_2}}$$
$$F_{x_{23}}(x_{23}) = 1 - e^{-\frac{x_{23}^{\,2}}{2\Omega_2}} \quad (5)$$

The cumulative probabilities for Rice's random variables $x_{31}$,$x_{32}$ and $x_{33}$ are, equation 6:

$$F_{x_{31}}(x_{31}) = \frac{1}{\Omega_3} e^{-\frac{A^2}{2\Omega_3}} \int_0^{x_{31}} e^{-\frac{x^2}{2\Omega_3}} \cdot x \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{A}{2\Omega_3}\right)^{2k} \frac{1}{k!} x^{2k} dx =$$
$$= \frac{1}{\Omega_3} e^{-\frac{A^2}{2\Omega_3}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{A}{2\Omega_3}\right)^{2k} \cdot \frac{1}{2k!} \cdot (2\Omega_3)^{1+k} \gamma\left(1+k, -\frac{x_{31}^{\,2}}{2\Omega_3}\right)$$
$$F_{x_{32}}(x_{32}) = \frac{1}{\Omega_3} e^{-\frac{A^2}{2\Omega_3}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{A}{2\Omega_3}\right)^{2k} \cdot \frac{1}{2k!} \cdot (2\Omega_3)^{1+k} \gamma\left(1+k, -\frac{x_{32}^{\,2}}{2\Omega_3}\right)$$
$$F_{x_{33}}(x_{33}) = \frac{1}{\Omega_3} e^{-\frac{A^2}{2\Omega_3}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{A}{2\Omega_3}\right)^{2k} \cdot \frac{1}{2k!} \cdot (2\Omega_3)^{1+k} \gamma\left(1+k, -\frac{x_{33}^{\,2}}{2\Omega_3}\right) \quad (6)$$

The signal at the output of the first micro diversity combiner is $x_1$. Micro diversity combiner is selective. This means that the signal is $x_1=\max(x_{11},x_{12},x_{13})$. Based on this, the conditional probability density of the signal $x_1$, conditional on power $\Omega_1$, is equal to, equation 7:

$$p_{x_1}(x_1/\Omega_1) = p_{x_{11}}(x_1/\Omega_1) \cdot F_{x_{12}}(x_1/\Omega_1) \cdot F_{x_{13}}(x_1/\Omega_1) +$$
$$+ p_{x_{12}}(x_1/\Omega_1) \cdot F_{x_{11}}(x_1/\Omega_1) \cdot F_{x_{13}}(x_1/\Omega_1) +$$
$$+ p_{x_{13}}(x_1/\Omega_1) \cdot F_{x_{11}}(x_1/\Omega_1) \cdot F_{x_{12}}(x_1/\Omega_1) =$$
$$= \frac{2}{\Gamma(m)} \cdot \left(\frac{m}{\Omega_1}\right)^m \cdot x_1^{2m-1} \cdot e^{-\frac{m}{\Omega_1} x_1^2} \cdot \frac{1}{\Gamma(m)} \cdot \gamma\left(m, \frac{m}{\Omega_1} x_1^{\,2}\right) \cdot \frac{1}{\Gamma(m)} \cdot \gamma\left(m, \frac{m}{\Omega_1} x_1^{\,2}\right) \cdot 3 =$$
$$= \frac{6}{\Gamma(m)} \cdot \left(\frac{m}{\Omega_1}\right)^m \cdot x_1^{2m-1} \cdot e^{-\frac{m}{\Omega_1} x_1^2} \cdot \frac{1}{\Gamma^2(m)} \cdot \gamma^2\left(m, \frac{m}{\Omega_1} x_1^{\,2}\right) \quad (7)$$

Based on the above, the probability density of the signal $x_2$ can be written, equation 8:

$$p_{x_2}(x_2/\Omega_2) = p_{x_{21}}(x_2/\Omega_2) \cdot F_{x_{22}}(x_2/\Omega_2) \cdot F_{x_{23}}(x_2/\Omega_2) +$$
$$+ p_{x_{22}}(x_2/\Omega_2) \cdot F_{x_{21}}(x_2/\Omega_2) \cdot F_{x_{23}}(x_2/\Omega_2) +$$
$$+ p_{x_{23}}(x_2/\Omega_2) \cdot F_{x_{21}}(x_2/\Omega_2) \cdot F_{x_{22}}(x_2/\Omega_2) =$$
$$= \frac{3x_2}{\Omega_2} e^{-\frac{x_2^2}{2\Omega_2}} \left(1 - e^{-\frac{x_2^2}{2\Omega_2}}\right)^2 \quad (8)$$

Based on this, the probability density of the signal $x_3$ is, equation 9:

$$p_{x_3}(x_3/\Omega_3) = p_{x_{31}}(x_3/\Omega_3) \cdot F_{x_{32}}(x_3/\Omega_3) \cdot F_{x_{33}}(x_3/\Omega_3) +$$
$$+ p_{x_{32}}(x_3/\Omega_3) \cdot F_{x_{31}}(x_3/\Omega_3) \cdot F_{x_{33}}(x_3/\Omega_3) +$$
$$+ p_{x_{33}}(x_3/\Omega_3) \cdot F_{x_{31}}(x_3/\Omega_3) \cdot F_{x_{32}}(x_3/\Omega_3) =$$
$$= 3 \cdot \frac{x_3}{\Omega_3} \cdot e^{-\frac{x_3^2 + A^2}{2\Omega_3}} \cdot I_0\left(\frac{x_3 A}{\Omega_3}\right) \cdot \left[\frac{1}{\Omega_3} \cdot e^{-\frac{A^2}{2\Omega_3}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{A}{2\Omega_3}\right)^2 \frac{1}{k!} (2\Omega_3)^{1+k} \cdot \gamma\left(1+k, -\frac{x_3^2}{2\Omega_3}\right)\right]^2 \quad (9)$$

Signal strengths $\Omega_1$,$\Omega_2$ and $\Omega_3$ are variable due to the influence of slow fading caused by the shadow effect. The distance between macro diversities of the system is such that the powers $\Omega_1$,$\Omega_2$ and $\Omega_3$ are correlated. A macro diversity system is used to reduce the impact of slow fading on system performance. The combined probability density of the signal power $\Omega_1$,$\Omega_2$ and $\Omega_3$ is log-normal and is equal to, equation 10:

$$p_{\Omega_1\Omega_2\Omega_3}(\Omega_1\Omega_2\Omega_3) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\right)^3 \sigma^3 \sqrt{1-r}\,\Omega_1\Omega_2\Omega_3} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2(1-r)} \cdot \left[(\ln\Omega_1 - \mu_1)^2 + (\ln\Omega_2 - \mu_2)^2 + \right.\right.$$
$$\left.\left. + (\ln\Omega_3 - \mu_3)^2 - 2r_{12}(\ln\Omega_1 - \mu_1)(\ln\Omega_2 - \mu_2) - 2r_{13}(\ln\Omega_1 - \mu_1)(\ln\Omega_3 - \mu_3) - 2r_{23}(\ln\Omega_2 - \mu_2)(\ln\Omega_3 - \mu_3)\right]\right\} \quad (10)$$

The signals $x_1$,$x_2$ and $x_3$ are connected to the inputs of the combiner macro diversity system. The signal at the output of the macro diversity system is x. This combiner can be selective by the strength of the input signals and by the amplitude of the signal at the output

of the micro diversity combiner. First, the case is considered when the macro diversity combiner decides according to the signal strength at the inputs of the micro diversity combiner.

Based on this, the probability density of the signal x at the output of the macro diversity combine is equal to, equation 11:

$$p_x(x) = \int_0^{\infty} d\Omega_1 \int_0^{\Omega_1} d\Omega_2 \int_0^{\Omega_1} d\Omega_3 \cdot p_{x_1}(x_1/\Omega_1) \cdot p_{\Omega_1\Omega_2\Omega_3}(\Omega_1\Omega_2\Omega_3) + \\ + \int_0^{\infty} d\Omega_2 \int_0^{\Omega_2} d\Omega_1 \int_0^{\Omega_2} d\Omega_3 \cdot p_{x_2}(x_2/\Omega_2) \cdot p_{\Omega_1\Omega_2\Omega_3}(\Omega_1\Omega_2\Omega_3) + \\ + \int_0^{\infty} d\Omega_3 \int_0^{\Omega_3} d\Omega_1 \int_0^{\Omega_3} d\Omega_2 \cdot p_{x_3}(x_3/\Omega_3) \cdot p_{\Omega_1\Omega_2\Omega_3}(\Omega_1\Omega_2\Omega_3) \quad (11)$$

If the macro diversity combiner decides according to the amplitude of the output signals of the micro diversity combiner, then the probability density of the signal x is equal to, equation 12:

$$p_x(x) = \int_0^{\infty} d\Omega_1 \int_0^{\infty} d\Omega_2 \int_0^{\infty} d\Omega_3 \cdot p_{\Omega_1\Omega_2\Omega_3}(\Omega_1\Omega_2\Omega_3) \cdot p_{x_1}(x/\Omega_1) \cdot F_{x_2}(x/\Omega_2) \cdot F_{x_3}(x/\Omega_3) + \\ + \int_0^{\infty} d\Omega_1 \int_0^{\infty} d\Omega_2 \int_0^{\infty} d\Omega_3 \cdot p_{\Omega_1\Omega_2\Omega_3}(\Omega_1\Omega_2\Omega_3) \cdot p_{x_2}(x/\Omega_2) \cdot F_{x_1}(x/\Omega_1) \cdot F_{x_3}(x/\Omega_3) + \\ + \int_0^{\infty} d\Omega_1 \int_0^{\infty} d\Omega_2 \int_0^{\infty} d\Omega_3 \cdot p_{\Omega_1\Omega_2\Omega_3}(\Omega_1\Omega_2\Omega_3) \cdot p_{x_3}(x/\Omega_3) \cdot F_{x_1}(x/\Omega_1) \cdot F_{x_2}(x/\Omega_2) \quad (12)$$

Cumulative probabilities of signals $x_1$,$x_2$ and $x_3$ are calculated according to the following equation 13:

$$F_{x_1}\left(\frac{x_1}{\Omega_1}\right) = \int_0^{x_1} p_{x_1}\left(\frac{t}{\Omega_1}\right) dt = \int_o^{x_1} \left\{ \frac{6}{\Gamma(m)} \cdot \left(\frac{m}{\Omega_1}\right)^m \cdot x_1^{2m-1} \cdot e^{-\frac{m}{\Omega_1}x_1^2} \cdot \frac{1}{\Gamma^2(m)} \cdot \gamma^2\left(m, \frac{m}{\Omega_1}x_1^2\right) \right\} dt$$

$$F_{x_2}\left(\frac{x_2}{\Omega_2}\right) = \int_0^{x_2} p_{x_2}\left(\frac{t}{\Omega_2}\right) dt = \int_o^{x_2} \left\{ \frac{3x_2}{\Omega_2} \cdot e^{-\frac{x_2^2}{2\Omega_2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{x_2^2}{2\Omega_2}}\right)^2 \right\} dt$$

$$F_{x_3}\left(\frac{x_3}{\Omega_3}\right) = \int_0^{x_3} p_{x_3}\left(\frac{t}{\Omega_3}\right) dt = \int_o^{x_3} \left\{ \frac{3 \cdot x_3}{\Omega_3} \cdot e^{-\frac{x_3^2+A^2}{2\Omega_3}} \cdot I_0\left(\frac{x_3 A}{\Omega_3}\right) \cdot \left[ \frac{1}{\Omega_3} e^{-\frac{A^2}{2\Omega_3}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{A}{2\Omega_3}\right)^2 \frac{1}{k!} (2\Omega_3)^{1+k} \cdot \gamma\left(1+k, -\frac{x_3^2}{2\Omega_3}\right) \right]^2 \right\} dt \quad (13)$$

Table 1 shows the results for different L-branch diversities with MRC, SC and EGC combining in the Rayleigh channel and BPSK modulation with L branches.

Table 1

| Summary results for the Rayleigh channel | | | |
|---|---|---|---|
| Sr. No. | SC | ECG | MRC |
| L1 | 8.95E-02 | 8.90E-02 | 8.00E-02 |
| L2 | 1.56E-02 | 9.99E-03 | 9.83E-03 |
| L3 | 6.75E-03 | 9.89E -04 | 9.10E -04 |
| L4 | 4.33E-03 | 1.95E-05 | 1.05E-05 |

The following MATLAB figure 5 determines the comparative characteristics of SC, EGC and MRC combining in Rayleigh channel and BPSK modulation.

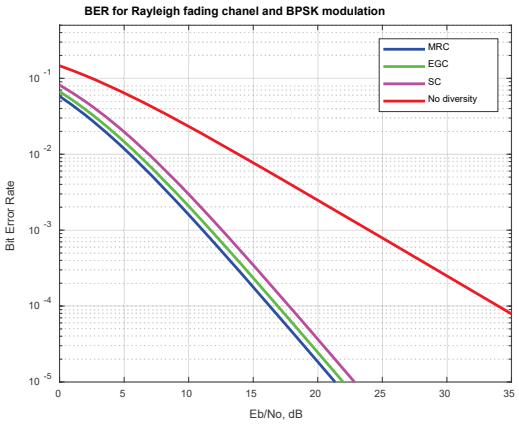



*Fig. 5 Advantages of SC, EGC and MRC combination*

We can conclude that compared to the theoretical curve, a significant reduction in fading has been achieved. It can be seen that by applying the EGC and SC combination, the BER curve gives less favorable results than the MRC.

Figure 6 represents the BER diversity gain in relation to the maximum signal values.

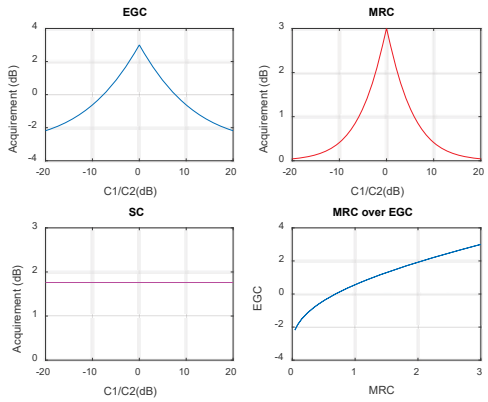



*Fig. 6 Advantages of divesity acquirement*

Probability density function can be used to calculate the error probability of a modulated signal [6]. The probability density of the signal at the output of the digital system can be used to determine the probability of system failure.

Using the bit error probability and the failure probability, the signal strength will be determined depending on the interference parameters.

## REFERENCE


[1] A. Annamalai, C. Tellambura, and Vijay K. Bhargava, ''Equal gain diversity receiver performance in wirless channels'', IEEE Trans. Communic. vol 48, Oct 2000.

[2] L. Fang, G. Biand A.C.Kot,''New method of performance analysis for diversity reception with correlated Rayleigh fading signals'', IEEE Trans.Veh.Technol.vol 49, Sept. 2000.

[3] B. Milosevic, J.Srdjan, M., " Categories of fading effects and diversity solutions", UNITECH 2007, Gabrovo, Bulgaria.

[4] G. M. Vitetta, U. Mengali, and D. P. Taylor, "An error probability formula for noncoherent orthogonal binary FSK with dual diversity on correlated Rician channels'', IEEE Trans. Commun., Lett.Feb. 1999.

[5] S.Jovković, B.Milošević, S.Obradović, "Interferences in wireless channel model of a body area network",UNITECH 2016 – Gabrovo, Bulgaria

[6] A. Annamalai, C. Tellambura, and V. K. Bhargava, "Unified analysis of MPSK and MDPSK with diversity reception in different fading environments," Electron. Lett., pp. 1564–1565, Aug. 1998.

# RECOGNITION OF FINGERPRINTS BY DISCRETE COSINE TRANSFORM AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

**Ivelina Stefanova Balabanova, Kristina Maksimova Sidorova**

*Technical University of Gabrovo,*
*Department of Communications Equipment and Technologies,*
*Gabrovo, Bulgaria,*
*kristina.sidorova@mail.bg*

**Abstract**

*The paper proposes an approach for identification of natural persons by means of fingerprints based on Discrete Cosine Transform and Backpropagation Neural Networks at Levenberg-Marquardt training procedures in access control systems. The applied transformation compresses the registered fingerprints. The compressed image types were used as input variables to neural networks image recognition. Neural training procedures using hyperbolic tangent and softmax transfer functions in hidden and output network layers were performed. A selection of backpropagation network structures for the recognition of fingerprint biometric data by evaluating the Cross-Entropy and Accuracy performance indices was made. An analysis of the quality of classification regarding the test fingerprint images with positive indications found in relation to the applied approach was conducted.*

**Keywords:** fingerprint identification, discrete cosine transform, backpropagation neural networks, Levenberg-Marquardt algorithm, transfer function.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Анализът на биометрични пръстови данни е един от съществените аспекти в съвременните системи за контрол на достъпа. Възможно е да бъде комбиниран с инструменти за лицево разпознаване или гласова идентификация в цялостна концептуална система за управление на сигурността в административни, бизнес и индустриални центрове, учреждения и т.н.

Според някои проучвания идентификацията на пръстови отпечатъци се разделя на три нива – диагностика на целия отпечатък по отношение на ляв/десен контур, спираловидна извивка, набраздяване и др., детайлно изследване на целеви сегменти или участъци от отпечатъка и микроскопски анализ като анализ на пори, гънки, израствания и др. Обикновено на второ ниво се извличат базисни комплексни и индивидуални характеристики (termination, bifurcation, enclosure, overlap, bridge, dock, spike и др.), които се използват в ролята на информативни признаци с цел разпознаване [1-3].

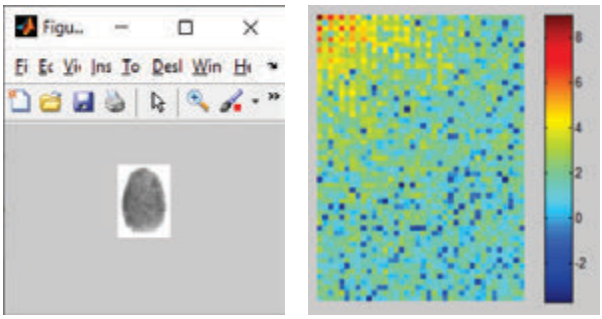
Често използвани в сферата на пръстовата биометрия се прилагат конволюционните изкуствени мрежи (Convolutional Neural Networks - CNNs), където се използват разнообразни филтри за подобряване на изображенията на обработвани отпечатъци като Prewitt, Laplacian of Gaussian, Finger Code и т.н. [4-6]. Освен за идентификация CNN служат като инструменти за извличане на характеристики към други подходи за разпознаване като k – най-близки съседи, логистична регресия, Naïve Bayes [7].

Докладът представя комбиниран подход за предварително компресиране чрез Дискретна косинусова трансформация и разпознаване на пръстови отпечатъци използвайки изкуствени невронни мрежи с право разпространение на сигналите и обратно разпространение на грешката.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

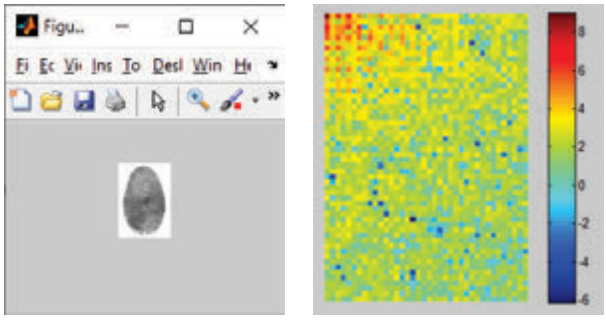
Във връзка с демонстриране на възможностите на изкуствения интелект като техническо средство за биометрична пръстова

диагностика е разгледана задачата за идентификация на три реални физически лица при снети изображения на техни отпечатъци. По отношение на тестовите пръстови отпечатъци бяха проведени процедури по редуциране на техните размери и RGB към Grayscale преобразуване - 3D към 2D трансформация. Впоследствие беше приложено Дискретно косинусово преобразуване (Discrete Cosine Transform - DCT), служещо за премахване на зони от изображението, където са налице резки промени на яркостта на пикселите. След DCT процеса се получава компресирано изображение, което може да бъде визуализирано използвайки логаритмично мащабиране. Снетите пръстови отпечатъци и резултата от приложението DCT обработката са представени от фиг. 1 до фиг. 3.



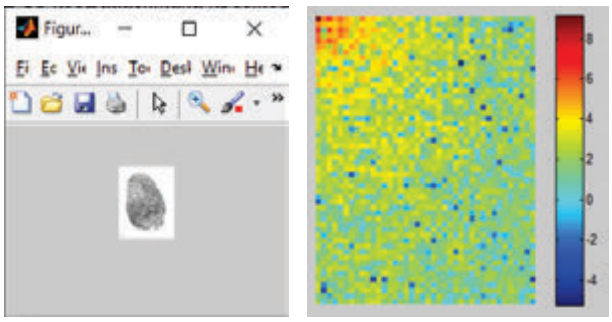
*а)* *б)*

***Фиг. 1.*** *Пръстов отпечатък а) и диаграма на компресираното с DCT изображение б) на първо персонализирано лице*



*а)* *б)*

***Фиг. 2.*** *Пръстов отпечатък а) и диаграма на компресираното с DCT изображение б) на второ физическо лице*

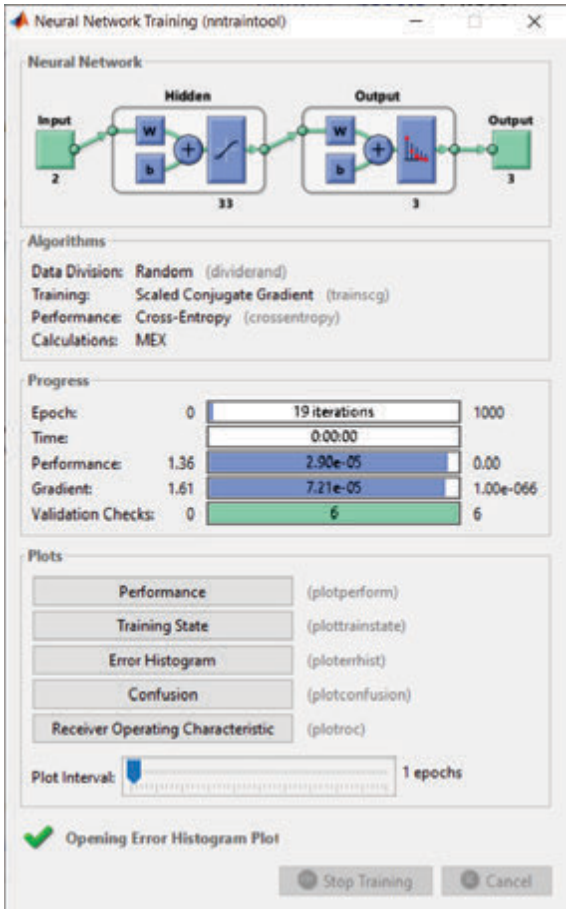


*а)* *б)*

***Фиг. 3.*** *Пръстов отпечатък а) и диаграма на компресираното с DCT изображение б) на трето лице*

По отношение на обучението на изкуствени невронни мрежи за биометрична пръстова идентификация на физически лица се прилагат два базисни информативни признака, съответно:

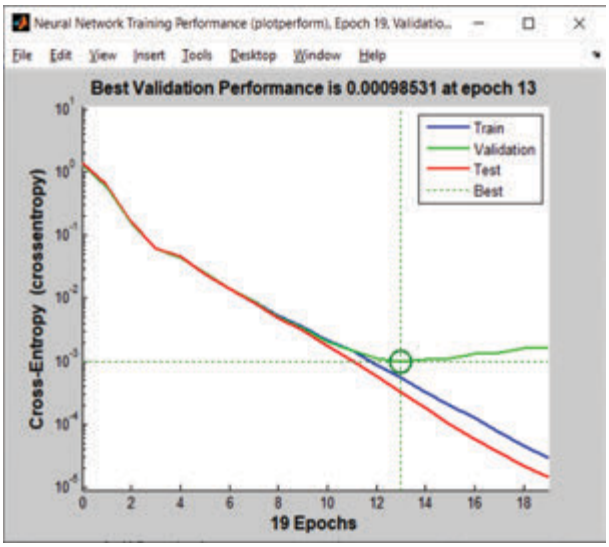
- "персонален идентификационен номер";
- "DCT компресирано изображение, конвертирано от двумерен към едномерен формат".




***Фиг. 4.*** *Ход на обучение за ИНМ за персонална идентификация при анализ пръстови отпечатъци*

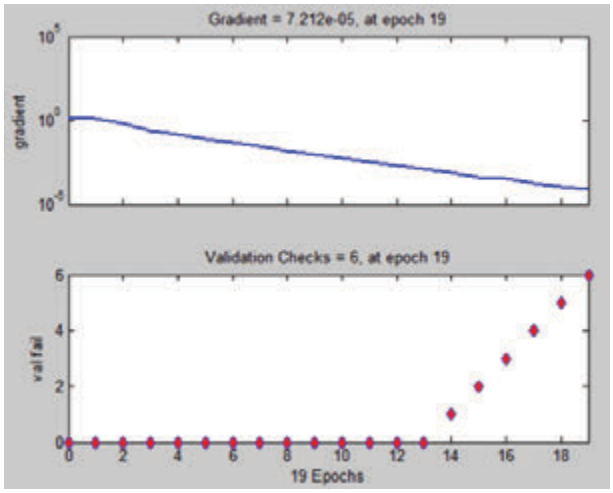
Експериментирано е с трислойни архитектури на изкуствени невронни мрежи с право разпространение на сигналите и обратно разпространение на грешката. Проведени са тестове на невронни модели с използване на най-бързия обучаващ алгоритъм, този на Levenberg-Marquard, в среда за визуално програмиране MATLAB. Процесът на подбор на архитектура за разпознаване на персонализирани пръстови отпечатъци и идентификация на физически лица е направен спрямо анализ на критерия Cross-Entropy и точността на разпознаване. Целевите обекти са изкуствени невронни мрежи с тангенс-сигмоидална и softmax функции на активация в междинния (скрития) и изходния слой.

На фиг. 4 е представен хода от обучение на синтезирания невронен модел при 33 скрити невронни изчислителни единици с най-добри индикации за качество, респективно ниска ентропия и максимална класификационна точност при анализ на биометрични данни.




***Фиг. 5.*** *Cross-Entropy при обучение, валидиране и тестване на ИНМ при анализ на пръстови отпечатъци*

По отношение на селектираната архитектура са приложени допълнителни дейности по анализ и представяне на функционалността във връзка с изменението на ентропията при обучение, валидиране и тестване, както и вариациите на градиента и параметъра mu, участващ при калкулация на стъпката за минимизация на Cross-Entropy след всяка изпълнена итерация – фиг. 5 и фиг. 6.




***Фиг. 6.*** *Състояние на обучение при синтез на ИНМ за персонална идентификация при анализ на пръстови отпечатъци*

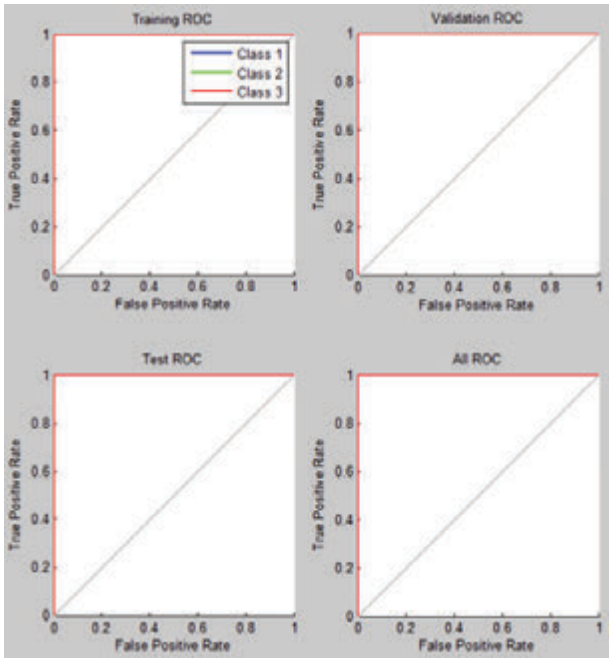



***Фиг. 7.*** *Матрици на коректните и некоректните класификации при синтез на ИНМ за персонална идентификация при анализ на пръстови отпечатъци*

Установено е, че обучаващите процедури протичат в рамките на 19 цикъла като най-добра мрежова валидираща производителност 0.00098531 е достигната при 13-та итерация. Наблюдавано е почти идентично поведение на мрежата при обучаващия и валидиращия процес като не са констатирани индикации за преобучение на модела. Констатирано е плавно намаляване на гра-

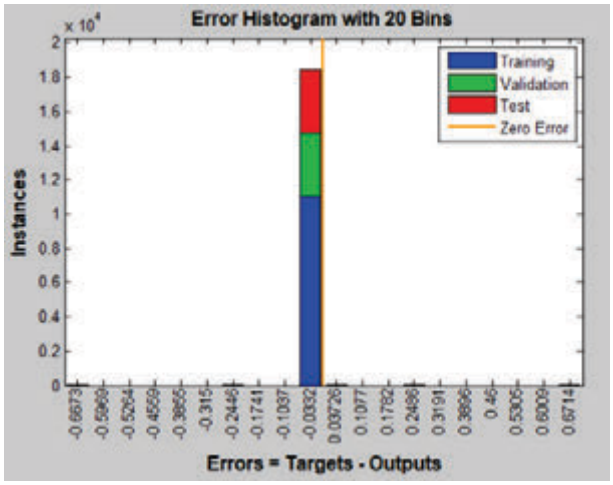
диента и завършени 6 валидиращи проверки по отношение на  момента на последната итерация.

Относно анализа на качеството на класификация са построени матрици на коректните и некоректните класификации и ROC (Receiver Operating Characteristics) криви на фиг. 7 и фиг. 8. Матриците показват разпределението на информационни биометрични еталони с правилно и неправилно определена принадлежност към дефинираните класове.

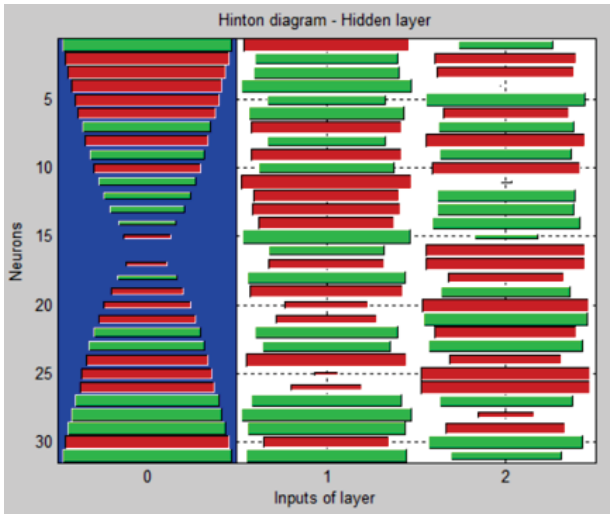



***Фиг. 8.*** *ROC криви във връзка с ИНМ за персонална идентификация при анализ на пръстови отпечатъци*

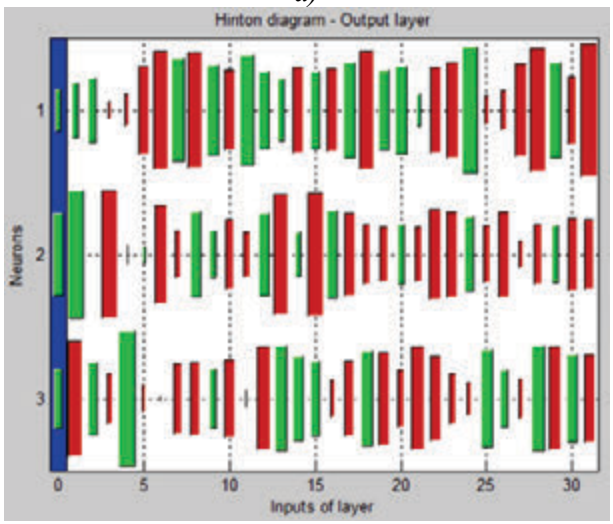
Получени са изходни точности 100.0 %, 99.9 % и 100.0 % за основните мрежови процеси, както и крайна максимална точност на разпознаване на анализираните пръстови отпечатъци. Постигнато е напълно коректно качество на класификация, потвърждаващо се от установените директни направления на ROC характеристиките от обучение, валидация и тестване от долен към горен ляв ъгъл, последван от горен десен ъгъл.




***Фиг. 9.*** *Хистограма на грешките във връзка с ИНМ за персонална идентификация при анализ на пръстови отпечатъци*




*а)*




*б)*

***Фиг. 10.*** *Графично представяне на тегловните матрици и матриците на отместванията за а) междинния (скрития) слой и б) изходния слой на ИНМ за персонална идентификация при анализ на пръстови отпечатъци*

Представени са заеманите нива на мрежовите грешки за трите основни процеса на генерираната хистограма на фиг. 9. Наблюдавана е непосредствена близост на грешките за значителна част от приложена биометрична информационна извадка, попадащи на ниво -0.0.332.

Направена е графична визуална интерпретация на тегловните коефициенти и отместванията във връзка със скрития и изходния мрежови слой чрез така наречените диаграми на Hinton на фиг. 10. Тук всеки коефициент се изобразява във вид на геометрична фигура с определен цвят и размер, зависещ от неговата количествена стойност. Посредством червени и зелени правоъгълници се извършва кодиране на отрицателните и положителните тегла и отмествания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложеният подход за идентификация на пръстови биометрични данни илюстрира добра приложимост на избрания невронен апарат с обратно разпространение на грешката. Във връзка с изследванията на следващ етап ще бъдат въведени допълнителни технически подходи за обработка и извличане на информативни признаци като Дискретната уейвлет трансформация и Бързото преобразуване на Фурие. Предвидена е оценка на множество методи и алгоритми на Машинното обучение при разпознаване на пръстови отпечатъци в системни звена на информационни инфраструктури за мониторинг на достъпа и сигурността.

## REFERENCE


[1] Marak P. Fingerprint recognition system using artificial neural network as feature extractor: Design and performance evaluation. Tatra Mathematical Publication 2016;67:117-134.

[2] Dhannoon B. Fingerprint recognition by using extract level 3 feature. International Journal of Advanced Computer Technology 2016;5(5):1-7.

[3] Abhishek K, Yogi A. A minutiae count based method for fake fingerprint detection. Procedia Computer Science 2015;58:447-452.

[4] Lazaresku A, Moldovano S, Moraru L. A fingerprint matching algorithm using the combination of edge features and convolution neural networks. MDPI Inventions 2022;7(39):1-13.

[5] Chowdhury A, Imtiaz M. Contactless fingerprint recognition using deep learning - A systematic review. Journal of Cybersecurity and Privacy 2022;2:714-730.

[6] Peralta D, Triguero I, Garsia S, Saeys Y, Benitez J, Herrera F. On the use of convolutional neural networks for robust classification of multiple fingerprint captures. Wiley International Journal of Intelligence Systems 2018;33:213-230.

[7] Kumar A, Ravi V, Viriyar S, Vishvanathan S. Convolutional neural networks for fingerprint liveness detection system. In: Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, vol. I, 2019, p. 243-246.

# МОДЕЛИРАНЕ И ОЦЕНКА НА НАДЕЖДНОСТТА НА LORAWAN МРЕЖИ

**Красен Ангелов[1], Пламен Ташев[1], Панайотис Когиас[2]**

*[1] Технически университет – Габрово, България*
*[2] Международен Елински Университет - Кавала, Гърция*

# MODELING AND RELIABILITY ASSESSMENT OF LORAWAN NETWORKS

**Krasen Angelov[1], Plamen Tashev[1], Panagiotis Kogias[2]**

*[1] Technical University of Gabrovo, Bulgaria*
*[2] International Hellenic University - Kavala Campus, Greece*

**Abstract**

*The rapid development of the Internet of Things has led to the emergence of many low-power, long-range, and low-bitrate wireless networking technologies. One of the widely applied technologies is LoRaWAN. It is a convenient solution for communication in sensor networks applied to build the infrastructure for smart cities. Despite the great advantages of LoRaWAN technology, its potential is still not well explored and its limitations are unclear, as not enough research has been done in this direction yet. This report explores and analyzes the performance of LoRaWAN, focusing on reliability assessment from the perspective of channel access in the physical layer of the network.*

**Keywords:** LoRaWAN, performance analysis, reliability assessment, PER, PLR.

## ВЪВЕДЕНИЕ

За да уловят вълната на Интернет на нещата, много компании разработват нови приложения и услуги, които се нуждаят от огромен брой устройства с ниска мощност, за да бъдат свързани помежду си. Липсата на комуникационни технологии, приложими за такива сценарии, привлече голям интерес от световните органи за стандартизация като 3GPP или IEEE Standard Committee, както и от малките и средни предприятия (МСП). Докато първите се опитват да разработят общи технологии, които могат да се използват в широк набор от сценарии, напр. NB-IoT [1] и WiFi HaLow [2], МСП се фокусират върху бързото развитие на нишови технологии, за да овладеят нововъзникващия пазар преди телекомуникационните лидери. Сред такива нишови технологии са Sigfox [3] и LoRa/LoRaWAN. Както Sigfox, така и LoRa са патентовани технологии. Въпреки това Semtech, разработчикът на LoRa, публикува спецификация за LoRaWAN [4], отваряйки вратата за дълбока независима оценка на ефективността.

Тъй като спецификацията на LoRaWAN [4] беше публикувана през 2015 г., все още няма достатъчно яснота и изследвания по отношение на нейната ефективност. По-конкретно, [5-7] представят накратко LoRa, като се фокусират основно върху неговите приложения и физическия (PHY) слой и обръщат малко внимание на протокола за контрол на достъпа до средата (MAC). Някои резултати от изпитвания и симулация в сценарий с малък брой устройства са представени в [8,9]. В [10,11] е използван класическия подход, подобен на ALOHA, за оценка на ефективността на LoRaWAN в сценарий с голям брой устройства, но не е осигурено валидиране чрез симулация или експериментално. Такъв подход е неприложим и

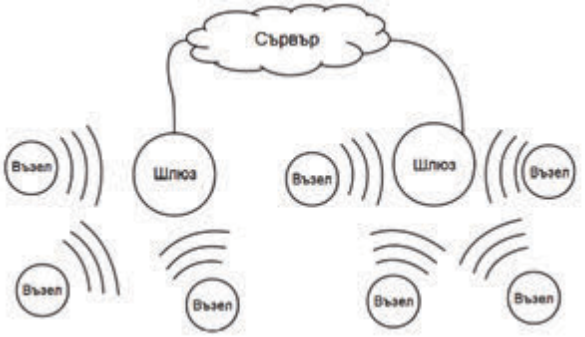
многократно надценява капацитета на мрежата. В този доклад се оценява производителността и надеждността на LoRaWAN мрежа при много по-реалистични условия.

## ФАКТОРИ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ НАДЕЖДНОСТТА

По-надолу ще бъдат изброени и разгледани накратко основните фактори, които пряко влияят върху надеждността и производителността на LoRaWAN мрежите:

*А) LoRaWAN мрежова архитектура*

Типичната LoRaWAN мрежа се състои от крайни устройства (сензори или задвижващи механизми, наричани още възли), шлюзове и сървър, който събира и анализира информация, извлечена от възлите [12]. Топологията на мрежата е тип „звезда“, което означава, че групи от възли са свързани към шлюзове чрез безжична LoRa връзка, докато шлюзовете са свързани към отдалечен сървър чрез IP мрежа (фиг. 1). Сървърът може да е облачно базиран.




***Фиг. 1**. Топология на LoRaWAN мрежа*

LoRaWAN възлите са разделени в три класа: A, B, C.

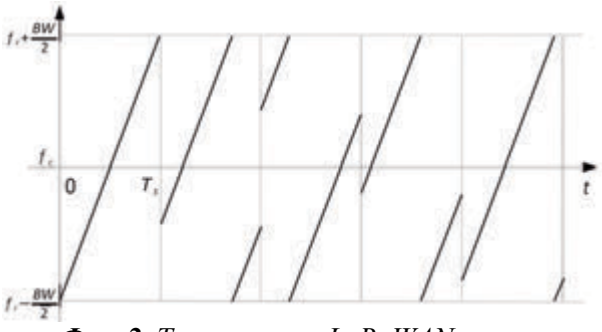
Клас А поддържа основната LoRaWAN функционалност, задължителна за всички устройства. Клас А позволява двупосочна комуникация. Ако натоварването на мрежата е ниско, клас А осигурява най-ниската консумация на енергия за възлите, но са възможни дълги закъснения в даунлинк канала. Клас В реализира двупосочна комуникация в предварително резервирани времеви слотове в даунлинк канала. Разпространението на слотовете се извършва от шлюза. Устройствата от клас С прослушват канала непрекъснато, като по този начин осигуряват най-ниската латентност в даунлинк канала, но изискват изключително висока консумация на енергия.

В този доклад се разглежда работата на LoRaWAN устройства от клас А.

*Б) LoRaWAN модулация*

LoRaWAN използва модулационна схема, която е адаптация на Chirp-Spread Spectrum (CSS) модулацията [13]. Първоначално проектирана през 1940 г. за радари, CSS се използва широко във военните и защитени комуникации поради относително ниските си изисквания за мощност при предаване и присъщата устойчивост от смущаващи ефекти, като многолъчево разпространение на сигналите, фадинга, Доплеровия ефект и интерференцията в честотната лента [14].

В LoRa всеки символ може да бъде представен като синусоидален сигнал, честотата на който се променя циклично в рамките на прозореца $BW$ около централната честота $f_c$. По-конкретно, вариацията на честотата започва с някаква стойност, след което се увеличава до максималната си стойност $f_c + BW/2$, а след това пада до минимума $f_c - BW/2$ и продължава да расте до достигане на първоначалната си стойност (фиг. 2). Броят на възможните начални стойности е $2^{SF}$, където факторът на разпространение $SF$ определя броя на предадените битове в символ.




***Фиг. 2**. Топология на LoRaWAN мрежа*

Поради кодирането за корекция на грешки, броят на информационните битове е по-малък и скоростта на битовете е равна на

$$R_b = \frac{SF}{T_s} CR = \frac{SF.BW}{2^{SF}} CR \qquad (1)$$

където $CR$ е дълбочината на кода за корекция на грешки, която може да бъде 4/5,

4/6, 4.7 или 4/8, а $T_s$ е продължителността на символа, която зависи както от SF, така и от честотната лента, както следва:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2)$$

По този начин трите параметъра *BW*, *SF* и *CR* ще определят скоростта на предаване на LoRa връзка от точка до точка. По-високите SF стойности водят до по-ниска скорост, но в същото време по-висока чувствителност. Например, съгласно [15], в 125kHz канал Semtech SX1276 LoRa устройство може да получи пакет при –125 dBm, когато *SF* = 7, но когато *SF* = 12, чувствителността е –137 dBm. За дълбочина на кода 4/5 битовата скорост е съответно 293 bps и 5468 bps, съответно за *SF* = 12 и *SF* = 7.

Забележителна характеристика на такава модулационна и кодираща схема е, че LoRa устройството може правилно да получи две припокриващи се предавания с различни коефициенти на разширение в един и същи канал.

Наборът от налични скорости на данните зависи от регионалните спецификации. Таблица 1 изброява възможните скорости на данни за ISM честотната лента за Европа EU 863-880 MHz.

***Таблица 1**. Скорост на данните в ISM честотната лента EU 863-880 MHz*

| № | Коефициент на разширение SF | Широчина на канала BW, kHz | Дълбочина на кода CR | PHY скорост, bps | RF чувствителност, dBm |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 12 | 125 | 4/6 | 250 | -137 |
| 1 | 11 | 125 | 4/6 | 440 | -136 |
| 2 | 10 | 125 | 4/5 | 980 | -134 |
| 3 | 9 | 125 | 4/5 | 1760 | -131 |
| 4 | 8 | 125 | 4/5 | 3125 | -128 |
| 5 | 7 | 125 | 4/5 | 5470 | -125 |
| 6 | 7 | 250 | 4/5 | 11000 | -122 |

*В) Структура на рамката*

Тъй като LoRaWAN е проектиран за комуникация с ниска мощност и ниска скорост, използването на тежък TCP/IP протокол едва ли е препоръчително. По тази причина LoRaWAN е олекотен протокол, който може директно да се използва от сензорни и контролни приложения за комуникация с шлюза.

*Г) Достъп до канала*

LoRaWAN мрежата работи в няколко честотни канала, които се определят от конфигурацията на шлюза. Броят на разпределените канали зависи от регионалните ограничения и мрежовите опции. Някои канали са запазени за предаване на данни, един канал е запазен за отговорите на шлюза за рамки, а някои канали се използват за предаване на заявки за присъединяване към шлюза.

*Д) Скорост на данните*

Както вече бе споменато по-горе, в LoRaWAN мрежите възлите могат индивидуално да използват всяка от възможните скорости на данни и те ще определят от комбинация от чирочина на честотната лента и коефициент на разширение. Мрежата може да използва механизъм за адаптивен контрол на скоростта на данни, който позволява на контрол на скоростта на крайните устройства чрез съответни MAC команди. Спецификацията обаче не описва точно механизма и все още е открит въпросът кои измервания трябва да се вземат предвид, когато се решава дали дадено устройство трябва да превключи от една скорост на предаване на данни към друга [16]. Скоростта на данни, използвана за предаване на данните по даунлинк канала, зависи от скоростта на връзката по ъплинк канала и от конфигурируемия мрежов параметър *RX1DROffset*, който варира от 0 до 5

*Е) Работен цикъл*

В работния цикъл има ограничение, според което дадено устройство не може да използва честотна лента за определен период от време след предаване в тази лента. Ако времето за предаване е с продължителност *TimeOnAir* и работният цикъл е равен на *DutyCycle*, тогава каналът не е достъпен за период от

$$T_{off} = \frac{TimeOnAir}{DytiCycle} - TimeOnAir \quad (3)$$

Например, ако дадено устройство предава рамка с дължина 1s и коефициентът на запълване е равен на 1%, тогава лентата е недостъпна за 99 s.

*Ж) Съществуващи проблеми*

Един по-подробен анализ на механизмите за регулиране на скоростта, достъпа до канала и логическата обмяна на данни в работния цикъл показва, че съществуват известно количество проблеми, които значително ще влияят върху производителността и надеждността на мрежата.

Първият проблем е свързан с това дали шлюзът трябва да прослушва канала по време на интервала между приемането на рамка и предаването на отговор. Ако шлюзът трябва да прослушва канала, стандартът не определя поведението на шлюза, когато трябва да предаде отговор а каналът изглежда зает с някакво предаване. Възможно решение е да се отмени чакащо предаване в главния канал, тъй като може да създаде колизия във възела, и да се предаде отговорът само в даунлинк канала. Друго решение е да се избере такава скорост на данни за отговора, която позволява да се избегнат две припокриващи се предавания при една и съща скорост на данни.

Подобен проблем възниква, когато две рамки се предават в припокриващи се интервали от време в различни канали (или в един и същ канал с различни коефициенти на разширение). Ако шлюзът има само един даунлинк канал, той не може да предава отговори на двете рамки по време на съответните втори прозорци за получаване, тъй като тези отговори трябва да се предават с минималната (същата) скорост на предаване на данни.

Третият въпрос е политиката за препредаване. Препоръчителното поведение за повторно предаване е да се избере произволно забавяне между 1 и 3 секунди. Въпреки това, продължителността на рамката и на потвърждението може да бъде повече от 1 секунда, което води до голяма вероятност от повторна колизия с рамка или с потвърждение. Използването на множество канали за предаване на рамки подобрява ситуацията, като на практика увеличава интервала за произволен избор на забавяне, но този интервал все още е фиксиран, което ограничава скалируемостта на мрежата. Може да е по-добре да се използва процедурата за двоично експоненциално забавяне, подобна на тази, използвана в Wi-Fi мрежите.

Четвъртият проблем е политиката за избор на скорост на данни за препредаване. От една страна, намалявайки скоростта на данни, подобряваме надеждността на предаването. От друга страна, ако устройствата намалят скоростта на данни за повторно предаване, всички те могат да завършат на най-ниската скорост на данни, което значително увеличава вероятността от колизии.

Споменатите проблеми са особено важни при силно натоварени мрежи, но те обикновено се пропускат от разработчиците и операторите на LoRaWAN при изграждане на мрежа с малък брой устройства и нисък трафик. По-нататъшното нарастване на популярността на IoT обаче ще увеличи както броя на устройствата, така и броя на мрежите на различни оператори, работещи в една и съща зона в нелицензиран спектър, следователно подобни проблеми не трябва да се пренебрегват.

## СЦЕНАРИЙ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

За да се оцени надеждността и ефективността на LoRaWAN протокола, се разглежда следния сценарий:

Мрежата се състои от $N$ възела, свързани към шлюз. Те работят в 3 основни канала и един даунлинк канал за връзка, като всички канали са с ширина 125 kHz, което е типична конфигурация за ЕС. Устройствата използват скорости на данни от 0 ($SF$ = 12) до 5 ($SF$ = 7), зададени от шлюза по време на инициализацията на мрежата според мощността на сигнала от крайните устройства.

Както в [8], тук се разглеждат следните вероятности за възел да предава с помощта на специфична скорост на данни: $p_0$ = 0,28, $p_1$ = 0,2, $p_2$ = 0,14, $p_3$ = 0,1, $p_4$ = 0,08 и $p_5$ = 0,2, което съответства на случай, когато крайните устройства са разпределени равномерно в кръгова област около шлюза и загубата от разпространение се описват от модела на Окомура-Хата. Счита се, че възниква колизия, ако поне две предавания с една и съща скорост на данни се припокриват във времето.

Всички възли предават рамки с 64-байтов PHY полезен товар (51-байтов полезен товар на рамка), който съответства на най-големия полезен товар, който може да побере рамка при най-ниската скорост на предаване на данни. Рамките се предават в режим с потвърждение, рамките за потвърждение не пренасят полезен товар. Разглеждаме ситуация, когато възела няма опашка, т.е. ако се генерират две съобщения, той предава най-новото. Съобщенията се генерират по веро-

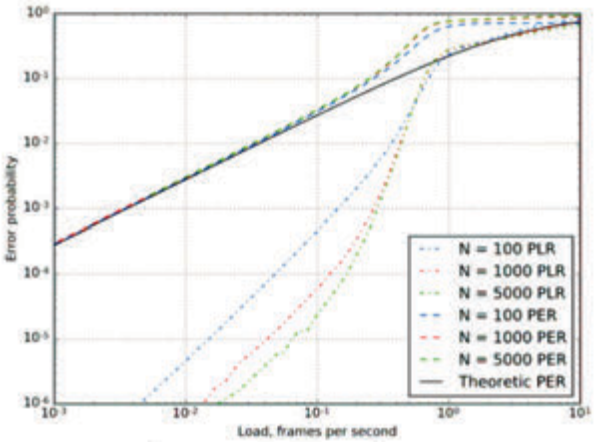
ятностно разпределението на Поасон, т.е. с експоненциално разпределено време между пристиганията им.

Целта на изследването е да се проучи как надеждността на предаване зависи от броя на възлите и натоварването, т.е. броят на пакетите, които се генерират от възлите и да се определи капацитетът на мрежата.

## РЕЗУЛТАТИ

Обръща се основно внимание на честотата на грешките на пакетите (PER) и коефициента на загуба на пакети (PLR), а не на максимално добрата пропускателна способност, която мрежата може да осигури. Коефициента на пакетна грешка PER е вероятността предаването на пакет да е неуспешно. Коефициентът на загуба на пакети PLR е вероятността генерираният пакет да не бъде доставен или защото е достигнат лимитът за повторен опит, или защото пакетът е бил изпуснат поради пристигането на нов пакет.

На фиг. 3 са показани получените резултати от симулация за различни стойности на мрежовото натоварване и броя $N$ на възлите. Фигурата също така представя резултати, получени с математически модел за безкраен брой възли.




***Фиг. 3**. PER и PLR във функция от натоварването на LoRaWAN мрежата*

При натоварване по-малко от 0,1 pps (пакета в секунда), коефициентът на загуба на пакети PLR е пренебрежимо малък (под 0,001) и може да се каже, че комуникацията е доста надеждна. Важно е да се отбележи, че за да се постигне такова ниско натоварване в мрежа със 100 възела, средно всеки възел ще генерира пакет по-рядко от веднъж на 20 минути. Ако $N$ = 5000, средно всеки възел ще генерира пакет по-рядко от 2 пакета на ден.

Когато натоварването се увеличи, както PER, така и PLR се увеличават значително по две причини. Първо, подходът за разрешаване на колизии, използван в LoRaWAN, е неефективен с голям брой възли и води до лавина от колизии. Единственият начин да се спре тази лавина е съвместното използване на ограничен лимит за повторен опит и малък размер на опашката (в симулацията е 1). Втората причина е, че пакетите пристигат в непразна опашка, което води до изпускане на пакети.

Разработеният математически модел може да се използва за изчисляване на PER, ако натоварването е ниско, и PLR, ако натоварването е високо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладът е представен анализ на LoRaWAN технологията и изследване за оценка на нейната производителност и надеждност в мрежа с голям брой възли. Установи се, че дори с 3 основни канала и 6 скорости на данни (т.е. 18 виртуални канала за предаване), капацитетът на мрежата е около 0,1 51-байтови (Frame Payload) съобщения в секунда. Например, този капацитет съответства на генерирания трафик в мрежа с 5000 възли, всеки от които генерира 2 съобщения на ден. Това силно ограничава възможността за използване на LoRaWAN технологията в много сценарии на интелигентен град.

Възможно решение на този проблем е да се увеличи плътността на LoRaWAN шлюзовете. Това обаче може да доведе до междумрежови смущения. Като бъдеща работа може да се обърне и внимание на точната оценка на ефективността на LoRaWAN мрежа в такъв сценарий, съобразен с наличието на интерференция.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Планиране, проектиране и оптимизация на безжични комуникационни платформи, услуги и решения за 5G и IoT приложения”, договор 2205Е/2022 г. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.

## REFERENCE


[1] NB-IOT: Enabling business opportunities. White paper, Huawei, 2015.

[2] Khorov E., A. Lyakhov, A. Krotov, and A. Guschin, A survey on IEEE 802.11ah: An enabling networking technology for smart cities, Computer Communications, Special Issue on Networking and Communications for Smart Cities, vol. 58, pp. 53 - 69, 2015.

[3] SIGFOX - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things.

[4] LoRa Alliance, LoRaWAN Specification, 2015.

[5] Centenaro M., L. Vangelista, A. Zanella, M. Zorzi, Long- Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios, arXiv preprint arXiv:1510.00620, 2015.

[6] Vangelista L., A. Zanella, M. Zorzi, Long-Range IoT Technologies: The Dawn of LoRaTM," in Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures, pp. 51-58, Springer, 2015.

[7] Goursaud C., J. Gorce, Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges, EAI endorsed transactions on Internet of Things, 2015.

[8] Augustin A., J. Yi, T. Clausen, W. Townsley, A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things, Sensors, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016.

[9] Tashev P., N. Manchev, K. Angelov, Study and comparative performance analysis of LoRa end devices for street lighting monitoring, Proc. of papers TechCo– Lovech 2022, pp. 47 – 52, 2022 (ISSN: 2535-079X).

[10] Adelantado F., X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, and J. Melia, Understanding the Limits of LoRaWAN, arXiv preprint arXiv:1607.08011, 2016.

[11] Tashev P., K. Angelov, N. Manchev, Comparative Analysis of LoRa Modulation Performance for IoT Applications, Proc. of papers UNITECH 2021, 19 November 2021, Gabrovo, Bulgaria, vol. 1, pp. I-163-168, 2021, ISSN: 1313-230X.

[12] Manchev N., K. Angelov, P. Kogias and S. Sadinov, Development of Multichannel LoRaWAN Gateway for Educational Applications in Low-Power Wireless Communications, 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2019, Electronic ISBN: 978-1-7281-2574-9 (DOI: 10.1109/ET.2019.8878492)

[13] LoRa™ Modulation Basics, Wireless, Sensing & Timing Producst, Application Note, AN1200.22, Rev.2 Semtech Corporation, USA, 2015.

[14] AN1200.22 LoRaTM Modulation Basics, Rev. 2, Semtech, May 2015.

[15] LoRa SX1276/77/78/79 Datasheet, Rev. 4., Semtech, March 2015.

[16] Petric T., M. Goessens, L. Nuaymi, A. Pelov, L. Toutain, Measurements, Performance and Analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN, in 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), pp. 104-110, IEEE, 2016.

# ПРИЛОЖЕНИЕ НА LORA ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ПЛАТФОРМА ЗА ДОМАШНА АВТОМАТИЗАЦИЯ В ИНТЕРНЕТ НА НЕЩАТА

**Красен Ангелов[1], Николай Манчев[1], Станимир Садинов[1], Михаил Ангелакис[1]**

*[1] Технически университет – Габрово, България*

# APPLICATION OF LORA IN IOT HOME AUTOMATION PLATFORM

**Krasen Angelov[1], Nikolay Manchev[1], Stanimir Sadinov[1], Michail Angelakis[1]**

*[1] Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**

*Home automation is responsible for providing a safe and stylish smart home. This paper examines the application of LoRaWAN technology in IoT platforms for home automation. For this purpose, an example architecture has been developed, including a server-based LoRa gateway and Bluetooth connectivity for remote intelligent control and management of home appliances. An analysis of the expected performance of the proposed architecture was performed by evaluating the time delays, RSSI and SNR values of the signal.*

**Keywords:** LoRa, home automation, time delay, RSSI, SNR.

## ВЪВЕДЕНИЕ

LoRa е модулационна техника, базирана на спектрално разширяване, което се реализира чрез технология, наречена Chirp Spread Spectrum (CSS) [1, 2, 3]. Технологията LoRa използва протокола LoRa Wide Area Network (LoRaWAN) за комуникация в системите за Интернет на нещата. Функционалните области с приложение на тази комуникационна технология са домашната автоматизация, интелигентните градове, интелигентната телеметрия и др. Около 100 милиона устройства в 100 държави са свързани към мрежата на LoRa. Така LoRa се превърна в неразделна част от IoT приложенията [4].

Комуникационните мрежи с ниска мощност, използвани за безжичните IoT комуникации може да се категоризират в две групи [5]:

– локални мрежи (LAN) с обхват по-малък от 1000 m. – мрежи с малък обхват (за малки разстояния), използвани в PAN (personal area network) устройствата и преносимите устройства като Bluetooth, IEEE 802.15.4 и IEEE P802.1ah.
– глобални мрежи (WAN) с обхват над 1000 m – Lora WAN, Sigfox и DASH7 и др.

LoRaWAN донесе революционни промени в областта на IoT, като позволи комуникация на дълги разстояния, използвайки много малко енергия. Клетъчните и Wi-Fi базираните мрежи, изискват много широка честотна лента и голяма консумация на енергия. От друга страна, LoRaWAN технологията предлага радиокомуникация при ниска консумация на енергия.

Домашната автоматизация се отнася до автоматизацията на сгради – внедряване на приложения за Интелигентен дом [4, 6]. Технологиите за домашна автоматизация се използват за управление на електронни компоненти, развлекателни системи, както и домашни уреди. Системата за домашна автоматизация включва и система за сигурност, безопасност и контролна достъпа. Когато цялата система е свързана към интернет, съответната операция е станала част от

IoT. По този начин глобалният пазар за домашна автоматизация се увеличава с всеки изминал ден. Анализ, представен в [7], показва, че растежът на пазара на домашна автоматизация от 5,77 милиарда американски долара през 2013 г. е нараснал до 12,81 милиарда долара през 2020 г. Почти 81% процента от купувачите на жилища са готови да закупят автоматизирана технология в своите домашни приложения. Статистиката показва, че докато през 2013 г. са били налични 2,4 милиона безжични крушки и осветителни тела, производство им до 2020 г. в нараснало до 100 милиона. Тази статистика отбелязва как системата за домашна автоматизация значително се е превърнала в съществена част от интелигентните решения.

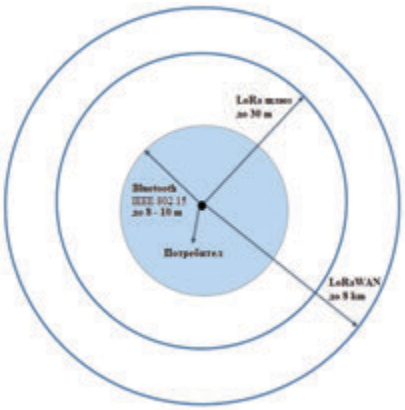
Предложената в този доклад схема прилага интелигентно решение, при което потребителите могат да контролират всички домашни уреди чрез пълен пакет за домашна автоматизация. Предложената платформа осигурява следното:

– цялата архитектура представлява пълна домашна автоматизация, използваща множество комуникационни технологии като LoRa, сървърно базиран LoRa шлюз и Bluetooth свързаност;

– автоматизирана система, в която потребителите могат да контролират домашните уреди чрез радиокомуникация, използвайки LoRaWAN технологията и Bluetooth връзка.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

В така предложена система се обединяват три комуникационни технологии, за да се осигури интелигентно решение в областта на домашната автоматизация. В предложения модел, Bluetooth се използва за комуникация на къси разстояния [8]. Wi-Fi се използва за комуникация на среден обхват, а LoRa и LoRa шлюзът се използват за комуникация на дълги разстояния в системата за домашна автоматизация [9, 10].




***Фиг. 1**. Обхват на предложената система за домашна автоматизация*

На фиг. 1 е показана блоковата диаграма на обхвата на системата за автоматизация по предложения метод. Обхватът на Bluetooth варира от до 8-10 m, на LoRa шлюза – до 30 m, а на LoRaWAN – до 8 km [10, 11].

*А) Домашна автоматизация с помощта на LoRaWAN и Bluetooth технология*

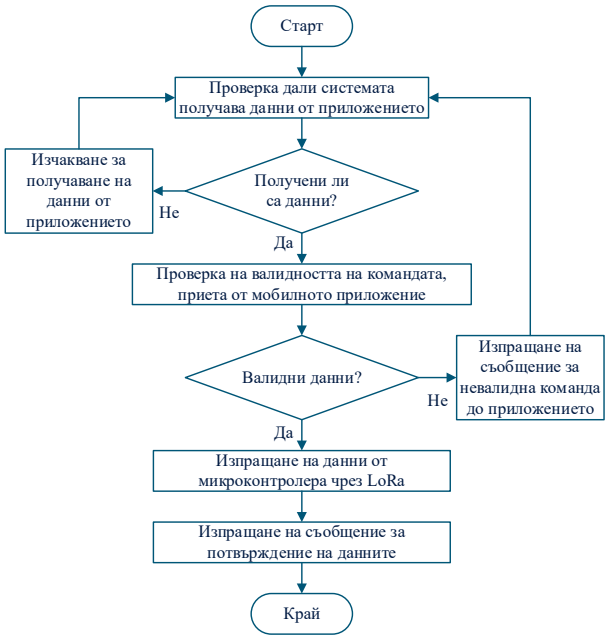
Системата за домашната автоматизация се сегментира с помощта на LoRaWAN на три взаимосвързани части. Комуникационната среда, използвана в LoRaWAN, е радиокомуникационна технология. За да осигурим безжично предаване на данни между приложението и микроконтролера, се използва Bluetooth технология. За връзката между потребител и съответна хардуерна верига може да се използва, например, Android-базирано приложение. И двете станции включително (изпращащата и приемащата), може да имат мобилно приложение, което за изпращащата станция е задължително, но за приемната – не е задължително.




***Фиг. 2**. Алгоритъм на изпращане на данни от потребителско мобилно приложение*

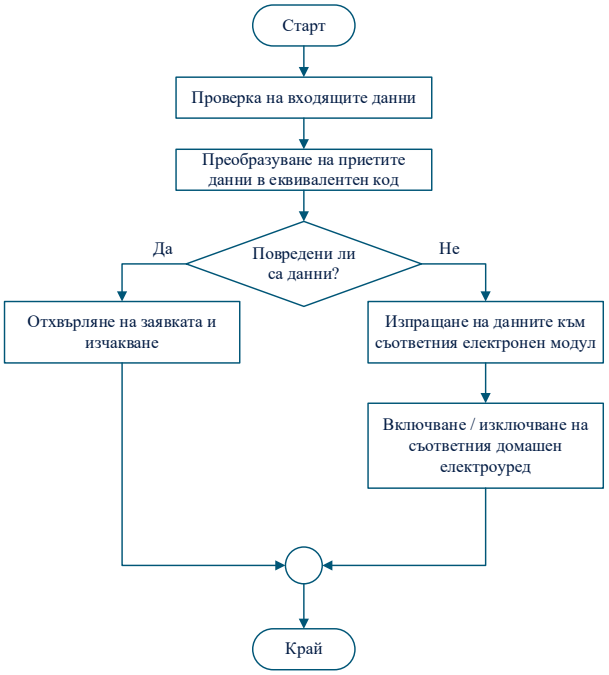
На фиг. 2 е показано как потребителят ще може да изпраща данни от приложението до изпращащата станция, използвайки Bluetooth връзка с малък обхват. В началото на този алгоритъм потребителите трябва да отворят съответното мобилно приложение. Настройката на Bluetooth връзката е жизненоважен момент в този модел. Потребителите трябва да имат Bluetooth връзка между съответната верига и мобилния телефон. Ако Bluetooth е наличен, системата ще изпрати данни към микроконтролер или изпращаща станция.

На фиг. 3 е представен алгоритъмът за изпращане на данни от изпращащата станция. Тук системата ще провери дали микроконтролерът получава данни от мобилното приложение. Ако има налични данни от приложението, системата ще премине към следващите стъпки. Отрицателният отговор ще доведе до изчакване на данни от приложението. След това системата ще провери валидността на данните. Потвърждение на валидирането на данни ще се осъществи чрез изпращане на данните от изпращащата станция с помощта на микроконтролера. Системата ще изпрати известие до Android приложението за да гарантира правилната команда.




***Фиг. 3**. Алгоритъм на изпращане на данни от изпращащата станция*

LoRa ще събира данни, предавани от изпращащата станция по следния механизъм: LoRa ще получи уникален символ от изпращача и ще прехвърли данните за символа към микроконтролера на получателя. Когато микроконтролерът приеме данни от LoRa, той ще реши кой компонент да бъде включен/изключен. Фиг. 4 показва алгоритъма на работа на приемната станция. Тук в началото системата ще проверява входящите данни, изпращани през LoRa. След това системата ще конвертира получените данни в съответен код. Ако процесът се захранва с повредени данни, системата ще отхвърли заявката и няма да бъдат предприети никакви действия. Ако системата намери желания отговор, тя ще изпрати данни до съответните електронни компоненти, за да изпълни инструкциите на потребителя. За целта LoRa ще получи уникален символ от изпращача и ще прехвърли данните за символа към микроконтролера на получателя. Когато микроконтролерът приеме данни от LoRa, той ще реши кой компонент да бъде включен/изключен.

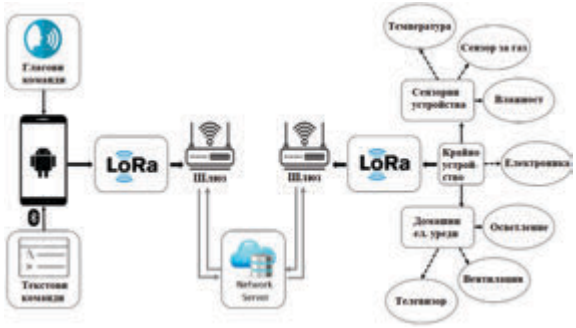



***Фиг. 4**. Алгоритъм на получаване на данни в приемната станция*

*Б) Домашна автоматизация с помощта на LoRa шлюз*

Фиг. 5 показва съответната цялостна блокова диаграма на системата за домашна автоматизация, използваща LoRa шлюз. Първоначалната команда от Android-приложението се изпраща чрез LoRaWAN към

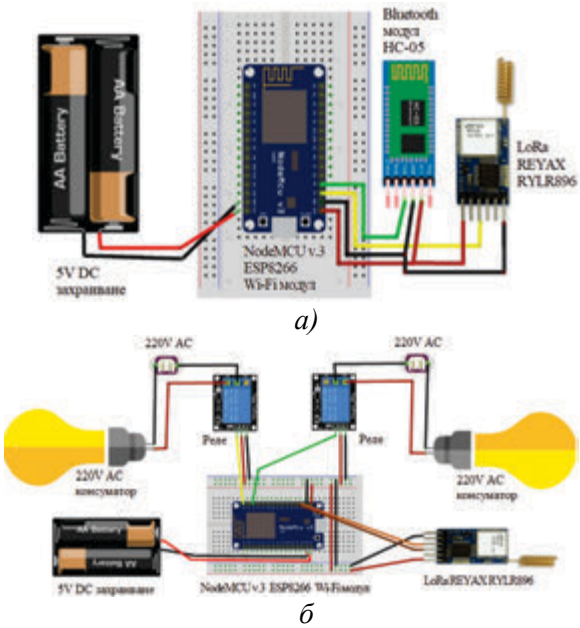
шлюза. След това шлюзът ще предаде командата до мрежовия сървър. Мрежовият сървър ще изпълни командата в определен шлюз, свързан към LoRaWAN. В хардуерния интерфейс всички домашни уреди и LoRa са свързани към централния микроконтролер, за да се управлява цялостната операция. Микроконтролерът ще изпълнява действията въз основа на командата, получена от LoRa от шлюза. Тъй като LoRa може да работи само при ниско напрежение, използва се набор от релейни вериги, отговорни за преобразуването на 220V AC напрежение в 5V DC напрежение.




***Фиг. 5**. Блокова схема на система за домашна автоматизация, използваща LoRa шлюз и LAN*

*B) Хардуерна реализация на предложения модел*

На фиг. 6 е показана хардуерна реализация на предавателя и приемника от предложения модел.




*а)*

*б)*

***Фиг. 6**. Хардуерна реализация на предложения модел: а) изпращащата станция (b) приемна станция*

Фиг. 6а) показва съответната предложена хардуерна реализация на изпращащата станция. Използва се NodeMCU v.3 (изграден с ESP8266 базиран WiFi модул) като микроконтролер [12]. Свързаният към него Bluetooth модул HC-05 [13] е отговорен за поддържането на безжична връзка между приложението и микроконтролера, а LoRa REYAX RYLR896 [14] е отговорен за радиопредаването на данни. Използва се и 5 V DC захранващ източник.

Фиг. 6б) показва предложената хардуерна реализация на приемната станция. Използва се отново NodeMCU v.3 като микроконтролер и LoRa REYAX RYLR896 като приемна станция. Моделът също така включва две или повече релейни вериги за работа с 220V AC захранване за управление на AC електронни компоненти. Захранването от 5V DC осигурява захранването на микроконтролера.

## РЕЗУЛТАТИ

Таблица 1 показва измерените времезакъснения, отчетени при 10 последователни предавания на данни в системата. След успешно завършване на десет последователни теста се вижда, че средното времезакъснение от край до край при LoRa връзка е 1,19 s, средното времезакъснение за Wi-Fi е 0,101 s, а средното времезакъснение за Bluetooth е 0,36 s. Таблицата ясно показва, че времезакъснението при Wi-Fi връзка е по-малко от базираните на LoRa и Bluetooth решения. Но това решение е енергийно неефективно, което налага прилагането на енергийно-ефективната LoRa технология заедно с Bluetooth – решение, което не изисква интернет свързаност за интерактивна система за домашна автоматизация.

*Таблица 1. Измерено времезакъснение в комуникацията*

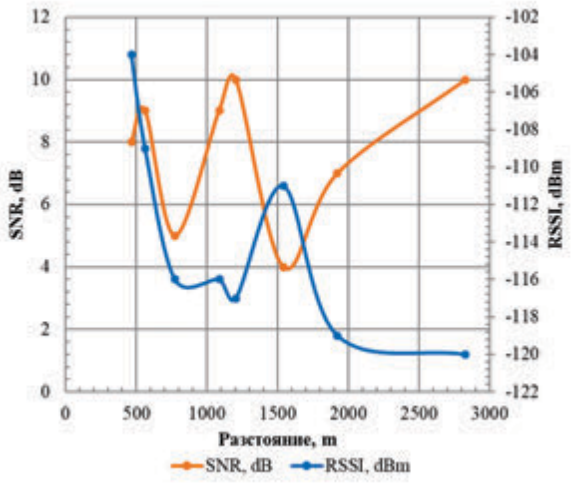
| Т. № | Времезакъснение в комуникацията, s | | |
|---|---|---|---|
| | LoRa | Wi-Fi | BT |
| 1 | 1,01 | 0,10 | 0,40 |
| 2 | 1,30 | 0,12 | 0,36 |
| 3 | 1,10 | 0,11 | 0,40 |
| 4 | 1,40 | 0,08 | 0,39 |
| 5 | 1,30 | 0,09 | 0,20 |
| 6 | 1,40 | 0,10 | 0,39 |
| 7 | 1,20 | 0,11 | 0,30 |
| 8 | 1,20 | 0,10 | 0,42 |
| 9 | 1,02 | 0,08 | 0,42 |
| 10 | 1,00 | 0,12 | 5,32 |

В следващата група експерименти се извършва оценка на измерените стойности на RSSI и SNR параметрите на сигнала при LoRa комуникация. За целта са проведени 13 измервания в различни точки за различни разстояния на комуникация в сценарий на открито в градска среда и в сценарий на закрита многоетажна сграда.

В таблица 2 са показани отчетените стойности от експеримента в сценарий на открито в градска среда. От резултатите се вижда, че най-големия обхват е 2828 m от приемната станция, въпреки наличието на препятствия като сгради, дървета, стени, къщи и т.н. Фиг. 7 съответно показва приблизително изменението на стойностите на RSSI и SNR при LoRa комуникация във функция от разстоянието. Независимо от наличните естествени и изкуствени препятствия, стойностите на RSSI и SNR винаги остават по-близо едни до други.

*Таблица 2. Измерени стойности на RSSI и SNR при LoRa комуникация във функция от разстоянието*

| КТ № | RSSI, dBm | SNR, dB | Разстояние, m |
|---|---|---|---|
| 1 | -104 | 8 | 466 |
| 2 | -109 | 9 | 563 |
| 3 | -116 | 5 | 774 |
| 4 | -116 | 9 | 1086 |
| 5 | -117 | 10 | 1204 |
| 6 | -111 | 4 | 1539 |
| 7 | -119 | 7 | 1922 |
| 8 | -120 | 10 | 2828 |




***Фиг. 7**. Графична зависимост на изменението на RSSI и SNR при LoRa комуникация във функция от разстоянието*

Отчетените резултати от проведените експерименти с измерване на стойностите на RSSI и SNR при LoRa в рамките на многоетажна сграда са изведени в Таблица 3.

*Таблица 3. Измерени стойности на RSSI и SNR при LoRa комуникация многоетажна сграда*

| КТ № | Етаж | RSSI, dBm | SNR, dB |
|---|---|---|---|
| 1 | Партер | -117 | 5 |
| 2 | 1-ви | -116 | 5 |
| 3 | 2-ри | -112 | 9 |
| 4 | 3-ти | -104 | 10 |
| 5 | 4-ти | -103 | 9 |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада беше представен модел на платформа на цялостна система за домашна автоматизация. Потребителите могат лесно да си позволят това решение в ежедневните си дейности. Използването на потребителско приложение за мобилни устройства позволява на потребителите да работят с всички електронни компоненти. За да се осигури цялостната домашна автоматизация, се използва LoRaWAN технология базирана на LoRa шлюз и Bluetooth свързаност. Ако даден потребител остане в близко разстояние, като комуникация ще се използва Bluetooth свързаността. В случай на липса на Bluetooth връзка, ще се премине към използване на LoRa шлюза. Ако даден потребител остане извън безжичната комуникация на къси и средни разстояния, тя ще се управлява от LoRa. Резултатите са насочени към оценка на ефективността на предложената система. За да се проследи поведението на системата, е извършена оценка на времезакъснението при предаване от тези комуникационни устройства, определяне на обхвата на зоната на покритие за LoRa заедно със отчитане на измерените стойности на RSSI и SNR.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Планиране, проектиране и оптимизация на безжични комуникационни платформи, услуги и решения за 5G и IoT приложения", договор 2205Е/2022 г. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.

## REFERENCE


[1] LoRa™ Modulation Basics, Wireless, Sensing & Timing Products, Application Note, AN1200.22, Rev.2 Semtech Corporation, USA, 2015.

[2] LoRa Alliance, LoRaWAN Specification, 2015.

[2] https://www.semtech.com/lora/what-is-lora – SEMTECH, 2020. What is LoRa 2020 (cited 20.10.2022).

[3] Dawson M., D. Walker, S. Cleveland, Systems usability in developing countries: case of computing use in Guinea. Int. J. ICT Res. Afr. Middle East (IJICTRAME) 8 (1), 2019, pp. 31-40.

[4] Stojkoska R., K. Trivodaliev, A review of Internet of Things for smart home: challenges and solutions. J. Cleaner Prod. 140, 2017, pp. 1454-1464.

[5] Angelov K., S. Sadinov, P. Kogias, Deployment of Mesh Network in an Indoor Scenario for Application in IoT Communications, CIEES 2020, November 26 – 29, Borovets, Bulgaria, 2020, pp. 1-6.

[6] https://innotechtoday.com/smart-home-statistics/.68898 - Innotechtoday, Smart Home Statistics, 2020 (cited 20.10.2022).

[7] https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/home-automation-control-systems.asp – Home Automation System Market, SE 3065, 11.2020, (cited 20.10.2022).

[8] Amoran A., A. Oluwole, E. Fagorola, R. Diarah, Home automated system using Bluetooth and an android application, Scientific African, Vol. 11, 2021, e00711, ISSN 2468-2276 (DOI:10.1016/j.sciaf.2021.e00711).

[9] Kalnoskas A., Design guide on Wi-Fi and the IoT, Silicon Labs, WTWH Media, 2022.

[10] Manchev N., K. Angelov, P. Kogias and S. Sadinov, Development of Multichannel LoRaWAN Gateway for Educational Applications in Low-Power Wireless Communications, 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2019, Electronic ISBN: 978-1-7281-2574-9 (DOI: 10.1109/ET.2019.8878492)

[11] Tashev P., K. Angelov, N. Manchev, Comparative Analysis of LoRa Modulation Performance for IoT Applications, Proc. of papers UNITECH 2021, 19 November 2021, Gabrovo, Bulgaria, vol. 1, pp. I-163-168, 2021, ISSN: 1313-230X.

[12] https://www.nodemcu.com/index_en.html - NodeMcu Connect Things EASY (cited 20.10.2022)

[13] HC-05 Bluetooth Module, HC-05 Bluetooth Module User's Manual V1.0, Guangzhou HC Information Technology Co., Ltd, 2021.

[14] REYAX RYLR896 – 868/915MHz Lora Antenna Transceiver Module. LoRa device User Manual, REYAX Technology Corp. Ltd, 2018.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF PRECISION OF SINE SIGNALS INTERPOLATION USING OF THE FIFTH AND SEVENTH ORDER POLYNOMIAL INTERPOLATION KERNELS

**Nataša Savić[1], Zoran Milivojević[1], Bojan Prlinčević[2]**

*[1] Academy of Applied Technical and Preschool Studies, Niš, Serbia*
*[2] Kosovo and Metohija Academy of Applied Studies, Leposavić, Serbia*

**Abstract**

*In the first part of this paper, one-parameter polynomial interpolation kernels of the fifth and seventh order are described. After that, an Experiment, which was realized with the aim of determining the higher precision of the interpolation of sine signal, between the fifth and seventh order kernels, was described. The interpolation accuracy was analyzed using MSE. The optimal value of the kernel parameter is determined by minimizing the MSE. The results of the Experiment are presented using graphs and tables. At the end, a comparative analysis of the results was performed. Based on the analysis, a recommendation on which kernel should be used, was made.*

**Keywords:** convolution, interpolation, interpolation kernel, kernel parameter.

## 1. INTRODUCTION

In order to increase the speed of the interpolation, as well as the precision of interpolation in digital signal processing and digital image processing, the convolutional interpolation is intensively used. Convolutional interpolation is performed using the interpolation kernel [1]. The ideal interpolation kernel is with form $r(x) = \sin \pi x / \pi x$ (*sinc* function), where is $x$ = -∞ to +∞. The spectral characteristic of the ideal interpolation kernel is a box function. In the practical realization of the ideal kernel, the basic problem is infinite length of the kernel. That is why there is a need to shorten the length of the interpolation kernel. Shortening the length of the kernel causes a deviation of the spectral characteristic in relation to the box function. The deviation manifests itself in the form of a ripple of the spectral characteristic in the pass-band and stop-band. As a consequence of the described characteristics of the physically realizable kernel, an increase in the interpolation error appears. That is why intensive work is being done on the construction of the interpolation kernel with finite length. The *sinc* function is approximated by polynomial functions of low order ($n$ < 9). The implementation of the polynomial kernels enables lower numerical complexity of the interpolation algorithms, and thus, higher interpolation speed. In order to minimize the interpolation error, and adapt it to the specific signal being interpolated, the kernel is parameterized [2]. A one-parameter (1P), third-order polynomial interpolation kernel was described by Keys in paper [3]. After that, in the scientific literature, this kernel was called the 1P Keys kernel. By choosing the value of the kernel parameter, $\alpha$, it is possible to minimize of the interpolation error. Therefore, optimization of the kernel parameter, $\alpha_{opt}$, was performed. Further scientific activities in the field of polynomial kernels went towards reducing of the interpolation error, by creating two-parameter (2P) Keys kernels [4]. For now, the highest precision of the interpolation of the audio signals (musical signals, speech signals,...) has been achieved using the three-parameter (3P) Keys kernel [5]. The polynomial 1P interpolation kernels of the fifth and seventh order are shown in [6].

In this paper, experimental results of interpolation precision, in the case of

implementation of the 1P interpolation polynomial kernels of the fifth and seventh order, are shown. An Experiment was carried out in which the Test signal Base was formed. The Test signals, of time sinusoidal form, based on mathematical definitions are created. Sine Test signals are created by superposition of the Sine signal with the basic, fundamental, frequency $f_0$ and the sine signal with a frequency $nf_0$ ($n$ = 2, ..., 10). In this way, the Sine test signal has become harmonic, and thus it becomes a synthetic music signal. The Test signal Base is created from Sine test signals that correspond to musical signals G1 - G7. The precision of interpolation, using mean square interpolation error, *MSE*, was analyzed. The results are presented using tables and graphs. Finally, by applying a comparative analysis, the precision of interpolation of the 1P kernels of the fifth and seventh order was evaluated.

The further organization of this paper is as follows. In Section 2, 1P kernels of fifth and seventh order are described. Experimental results and comparative analysis of the results are presented in Section 3. Section 4 is the Conclusion.

## 2. 1P INTERPOLATION KERNEL

### 2.1 Fifth order 1P interpolation kernel

The convolutional, 1P interpolation kernel of the fifth order, length $L$ = 6, is defined in the paper [1]:

$$r_5(x)=\begin{cases}\left(10\alpha-\frac{21}{16}\right)|x|^5-\left(18\alpha-\frac{45}{16}\right)|x|^4 & \\ +\left(8\alpha-\frac{5}{2}\right)|x|^2+1, & |x|\le 1\\ \left(11\alpha-\frac{5}{16}\right)|x|^5-\left(88\alpha-\frac{45}{16}\right)|x|^4 & \\ +(270\alpha-10)|x|^3-\left(392\alpha-\frac{35}{2}\right)|x|^2 & 1<|x|\le 2\\ +(265\alpha-15)|x|-(66\alpha-5), & \\ \alpha|x|^5-14\alpha|x|^4+78\alpha|x|^3 & \\ -216\alpha|x|^2+297\alpha|x|-162\alpha, & 2<|x|\le 3\\ 0 & |x|>3\end{cases} \quad (1)$$

where $\alpha$ is the kernel parameter.

### 2.2 Seventh order 1P interpolation kernel

The convolutional, 1P interpolation kernel of the seventh order, length $L$ = 8, is defined in the paper [1]:

$$r_7(x)=\begin{cases}a_7|x|^7+a_6|x|^6+a_5|x|^5+a_4|x|^4 & \\ +a_3|x|^3+a_2|x|^2+a_1|x|+a_0, & |x|\le 1\\ b_7|x|^7+b_6|x|^6+b_5|x|^5+b_4|x|^4 & \\ +b_3|x|^3+b_2|x|^2+b_1|x|+b_0, & 1<|x|\le 2\\ c_7|x|^7+c_6|x|^6+c_5|x|^5+c_4|x|^4 & \\ +c_3|x|^3+c_2|x|^2+c_1|x|+c_0, & 2<|x|\le 3\\ d_7|x|^7+d_6|x|^6+d_5|x|^5+d_4|x|^4 & \\ +d_3|x|^3+d_2|x|^2+d_1|x|+d_0, & 3<|x|\le 4\\ 0, & |x|>4\end{cases} \quad (2)$$

The coefficients of the seventh order kernel are determined in accordance with the general conditions that apply to the interpolation kernel, which are defined in [1]:

$$\begin{cases}a_0=1, & a_1=0,\\ a_2=-384\alpha-\frac{1393}{578}, & a_3=0,\\ a_4=760\alpha+\frac{1960}{867}, & a_5=0,\\ a_6=-621\alpha-\frac{1148}{867}, & a_7=245\alpha+\frac{821}{1734}.\end{cases}$$

$$\begin{cases}b_0=-2352\alpha-\frac{2233}{1156}, & b_1=14168\alpha-\frac{120407}{6936},\\ b_2=-36000\alpha-\frac{13006}{289}, & b_3=47880\alpha+\frac{127575}{2312},\\ b_4=-35640\alpha-\frac{128695}{3468}, & b_5=14952\alpha+\frac{32683}{2312},\\ b_6=-3309\alpha-\frac{2492}{867}, & b_7=301\alpha+\frac{1687}{6936}.\end{cases}$$

$$\begin{cases}c_0=-47280\alpha-\frac{8505}{1156}, & c_1=133336\alpha+\frac{42525}{2312},\\ c_2=-157632\alpha-\frac{5670}{289}, & c_3=101640\alpha+\frac{1575}{136},\\ c_4=-38720\alpha-\frac{4725}{1156}, & c_5=8736\alpha+\frac{1995}{2312},\\ c_6=-1083\alpha-\frac{175}{1734}, & c_7=57\alpha+\frac{35}{6936}.\end{cases}$$

$$\begin{cases} d_0 = -12288\alpha, & d_1 = 22528\alpha, \\ d_2 = -17664\alpha, & d_3 = 7680\alpha, \\ d_4 = -2000\alpha, & d_5 = 312\alpha, \\ d_6 = -27\alpha & d_7 = \alpha. \end{cases}$$

where $\alpha$ is the kernel parameter.

## 3. EXPERIMENTAL RESULTS AND ANALYSIS

### 3.1 Experiment

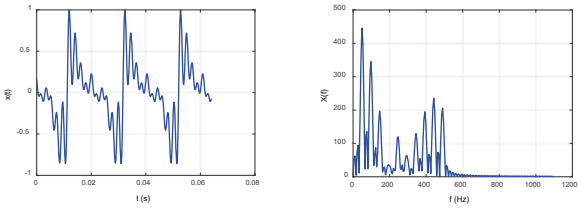
For the purpose of comparative analysis of the interpolation precision, when applying interpolation kernels of the fifth and seventh order, the Experiment was realized. Interpolation is applied over the mathematical Sine signals. The fundamental frequency of the Sine signals corresponds to the tones G1 - G7. The *MSE* was used as a measure of the interpolation precision. The kernels parameter α were optimized by minimizing the *MSE* ($\alpha_{opt} = \arg\min_{\alpha}(MSE)$). By comparing min(*MSE*), the kernel with higher interpolation precision was determined.

### 3.2 Base

The Base is formed from mathematical Sine test signals. The sine test signal is defined by:

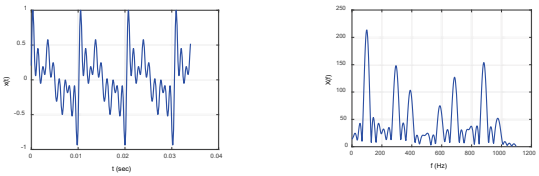
$$s(t) = \sum_{i=1}^{K} a_i \sin(2\pi i f_0 t) \qquad (3)$$

where $f_0$ is the fundamental frequency, $a_i$ is the amplitude of the $i$-th harmonic, and $K$ is the number of harmonics. The Sine Test signals are created with fundamental frequencies corresponding to music tones G1 (SinG1, $f_0$ = 49Hz), G2 (SinG2, $f_0$ = 98Hz), G3 (SinG3, $f_0$ = 196Hz), G4 (SinG4, $f_0$ = 392Hz), G5 (SinG5, $f_0$ = 783.99Hz), G6 (SinG6, $f_0$ = 1567.98Hz), G7 (SinG7, $f_0$ = 3135.96Hz) with $K$ = 10. The Sine Test signals are archived on the hard disk in the form of the **wav** files. Sine test signals, corresponding to tones G1 - G7, are shown in: a) time (figs. 1.a - 7.a) and b) spectral (figs. 1.b - 7.b) domain.



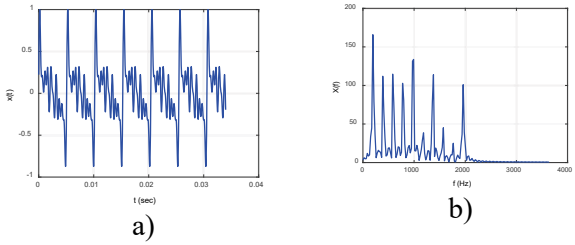
a) b)

***Fig. 1.*** *Sine test signal SinG1, ($f_0$ = 49 Hz): a) time and b) spectral domain.*



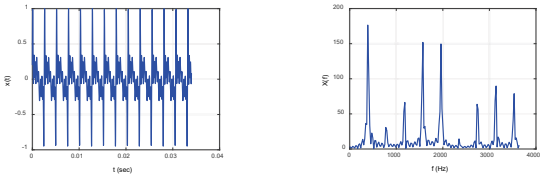
a) b)

***Fig. 2.*** *Sine test signal SinG2, ($f_0$ = 98 Hz): a) time and b) spectral domain.*



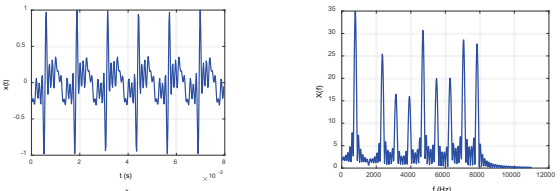
a) b)

***Fig. 3.*** *Sine test signal SinG3, ($f_0$ = 196 Hz): a) time and b) spectral domain.*



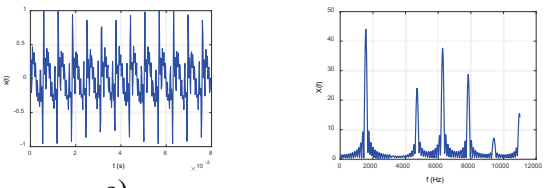
a) b)

***Fig. 4.*** *Sine test signal SinG4, ($f_0$ = 392 Hz): a) time and b) spectral domain.*



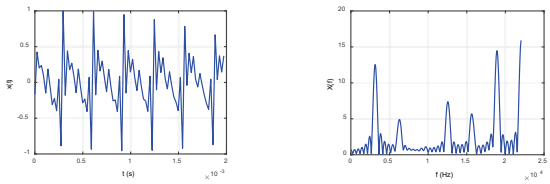
a) b)

***Fig. 5.*** *Sine test signal SinG5, ($f_0$ = 783.99 Hz): a) time and b) spectral domain.*



a) b)

***Fig. 6.*** *Sine test signal SinG6, ($f_0$ = 1567.98 Hz): a) time and b) spectral domain.*



a) b)

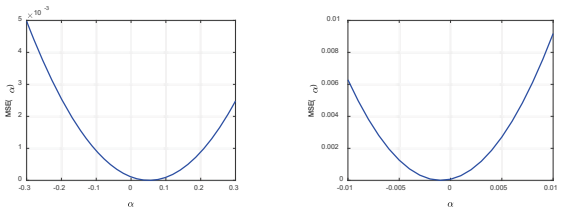
***Fig. 7.*** *Sine test signal SinG7, ($f_0$ = 3135.96 Hz): a) time and b) spectral domain.*

### 3.3 Results

The $MSE_{min}$ and the optimal kernel parameters, $\alpha_{opt}$, for the interpolation kernel of the fifth and seventh order, are shown in Table 1. In addition, Table 1 shows the mean of the optimal parameters $\alpha_{opt}$ and the mean of the $MSE_{min}$, for both types of interpolation kernels. Graphs of $MSE(\alpha)$ are shown in: a) fig. 8 (SinG1), b) fig. 9 (SinG2), c) fig. 10 (SinG3), d) fig. 11 (SinG4), e) fig. 12 (SinG5), f) fig. 13 (SinG6), and g) fig. 14 (SynG7).

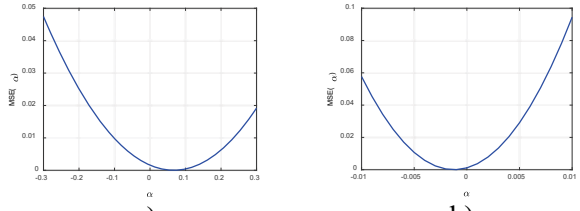
**Table 1**. *Optimal parameters $\alpha_{opt}$ and $MSE_{min}$ for fifth- and seventh-order interpolation kernels.*

| | *Fifth-order* | | *Seventh-order* | |
|---|---|---|---|---|
| Ton | $\alpha_{opt}$ | $MSE_{min}$ | $\alpha_{opt}$ | $MSE_{min}$ |
| SinG1 | 0.050 | 1.5991*10^-7 | -0.001 | 2.8312*10^-7 |
| SinG2 | 0.070 | 1.8420*10^-5 | -0.001 | 4.9448*10^-5 |
| SinG3 | 0.100 | 0.0097 | -0.002 | 0.0096 |
| SinG4 | -0.080 | 0.1519 | 0.002 | 0.1532 |
| SinG5 | -0.230 | 0.0976 | 0.005 | 0.0976 |
| SinG6 | 0.080 | 0.1060 | -0.002 | 0.1047 |
| SinG7 | -0.470 | 0.0803 | 0.010 | 0.0863 |
| | $\overline{\alpha_{opt_5}}$ | $\overline{MSE_{\min_5}}$ | $\overline{\alpha_{opt_7}}$ | $\overline{MSE_{\min_7}}$ |
| | -0.0686 | 0.0636 | 0.0016 | 0.0645 |



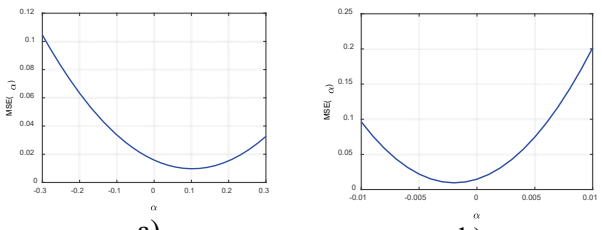
a) b)

***Fig. 8.*** *MSE(α) for interpolation kernels: a) fifth-order and b) seventh-order, for SinG1 Test signal.*



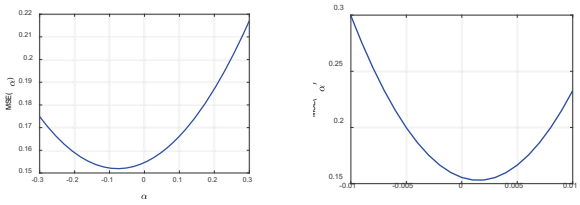
a) b)

***Fig. 9.*** *MSE(α) for interpolation kernels: a) fifth-order and b) seventh-order, for SinG2 Test signal.*



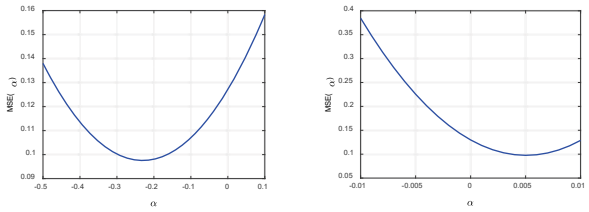
a) b)

***Fig. 10.*** *MSE(α) for interpolation kernels: a) fifth-order and b) seventh-order, for SinG3 Test signal.*



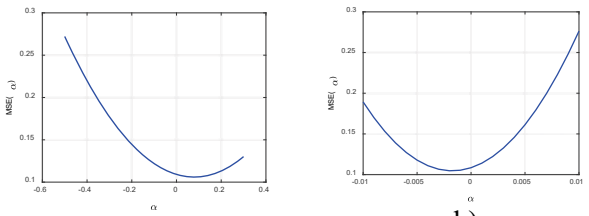
a) b)

***Fig. 11.*** *MSE(α) for interpolation kernels: a) fifth-order and b) seventh-order, for SinG4 Test signal.*



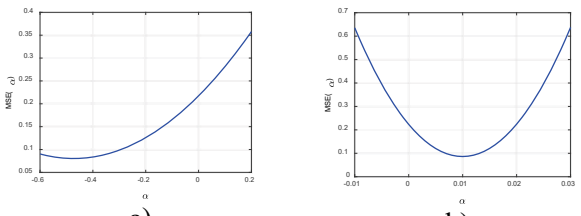
a) b)

***Fig. 12.*** *MSE(α) for interpolation kernels: a) fifth-order and b) seventh-order, for SinG5 Test signal.*



a) b)

***Fig. 13.*** *MSE(α) for interpolation kernels: a) fifth-order and b) seventh-order, for SinG6 Test signal.*



a) b)

***Fig. 14.*** *MSE(α) for interpolation kernels: a) fifth-order and b) seventh-order, for SinG7 Test signal.*

### 3.4 Analysis of results

Based on the results shown in Table 1 and figs. 8 - 14 it is concluded that:

a) the range of optimal values of the parameter $\alpha$ for the fifth-order kernel is $\alpha_{opt} \in$ [-0.470, 0.100]. The mean value of the kernel parameter of the fifth order is $\overline{\alpha_{opt_5}}$ = -0.0686.

b) the range of optimal values of the parameter $\alpha$ for the seventh-order kernel is $\alpha_{opt} \in$ [-0.002, 0.001]. The mean value of the kernel parameter of the fifth order is $\overline{\alpha_{opt_7}}$ = 0.0016.

c) the mean square error of the 1P interpolation seventh-order kernel compared to the mean square error of the 1P fifth-order kernel is MSE_7 / MSE_5 = 0.0645/0.0636 = 1.014 times higher.

Based on the comparative analysis of the mean square error for: a) the 1P interpolation fifth-order kernel and b) the 1P interpolation seventh-order kernel, it is concluded that the1P interpolation fifth-order kernel is more accurate in relation to the 1P interpolation seventh-order kernel when interpolating Sine Test signals.

## 4. CONCLUSION

In this paper, a comparative analysis of interpolation precision, in the interpolation of the Sine Test signal, using the 1P interpolation fifth-order and seventh-order kernels, was performed. Higher precision of interpolation was achieved by using the fifth-order interpolation kernel. In contrast to interpolation with Audio signals (Test signals were recorded at a concert piano), where the seventh-order kernel showed higher precision in relation to the fifth-order kernel, in the case of Sine signal interpolation, the seventh-order kernel showed lower precision. The explanation for the greater precision of the fifth-order kernel should be sought in the mathematical definition of the Sine test signal, which has a stronger autocorrelation.

## REFERENCE


[1] E. Mejering, K. Zuiderveld, M. Viegever, ''Image Reconstruction by Convolution with Simetrical Piecewise n-th-Order Polynomial Kernels'', IEEE Transactions on Image Processing, vol. 8, no. 2, pp. 192-201, Feb. 1999.

[2] H. S. Pang, S.J. Baek, K.M. Sung, ''Improved Fundamental Frequency Estimation Using Parametric Cubic Convolution'', IEICE Trans. Fundamentals, vol. E83-A, No. 12, pp. 2747-2750, Dec. 2000

[3] R. G. Keys, ''Cubic convolution interpolation for digital image processing'', IEEE Trans. Acout. Speech, & Signal Processing, vol. ASSP-29, pp. 1153-1160, Dec. 1981.

[4] N. Savić, Z. Milivojević, B. Prlinčević, ''Development of the 2P fifth-degree interpolation convolutional kernel'', International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), 8(11), 306-311, 2021.

[5] N. Savić, Z. Milivojević, ''Optimization of the 3P Keys Kernel Parameters for Interpolacion of Audio Signals'', International Scientific Conference UNITECH' 20, (pp. 200 – 205), Gabrovo, Bulgaria, Nov. 2020.

[6] N. Savić, Z. Milivojević, B. Prlinčević, & D. Kostić, ''Septic-convolution Kernel - Comparative Analysis of the Interpolation Error'', 16th International Conference on DEVELOPMENT AND APPLICATION SYSTEMS, Suceava, Romania, 2022.

# СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА РАДИОЧЕСТОТЕН УСИЛВАТЕЛ ЗА РАБОТНИ ЧЕСТОТИ НАД 1 GHz

**Мирослав Томов[1], Панайотис Когиас[2], Михаил Маламатудис[3]**
*[1]Технически университет - Габрово*
*[2] Department of Physics International Hellenic University, Kavala, Greece*
*[3] Department of Physics International Hellenic University, Kavala, Greece*

# SIMULATION MODEL OF A RADIO FREQUENCY AMPLIFIER FOR OPERATING FREQUENCIES OVER 1 GHz

**Miroslav Tomov[1], Panagiotis Kogias[2], Michail Malamatoudis[3]**
*[1] Technical University, Gabrovo, Bulgaria*
*[2] Department of Physics International Hellenic University, Kavala, Greece*
*[3] Department of Physics International Hellenic University, Kavala, Greece*

**Abstract**
*The amplifier was designed to operate effectively in frequency range 1930 - 1990 MHz. Design goals included at least 10dB of gain, unconditional stability, and an input referenced third order intercept of +10dBm. The simulation model is realized by a replacable non-linear model of appropriate active element with a transition frequency up to 60 GHz, the device is ideal for high performance applications such as portable wireless communications products.*

**Keywords:** RF Amplifier; Nonlinear simulation model, 1 GHz amplifying stage.

## ВЪВЕДЕНИЕ

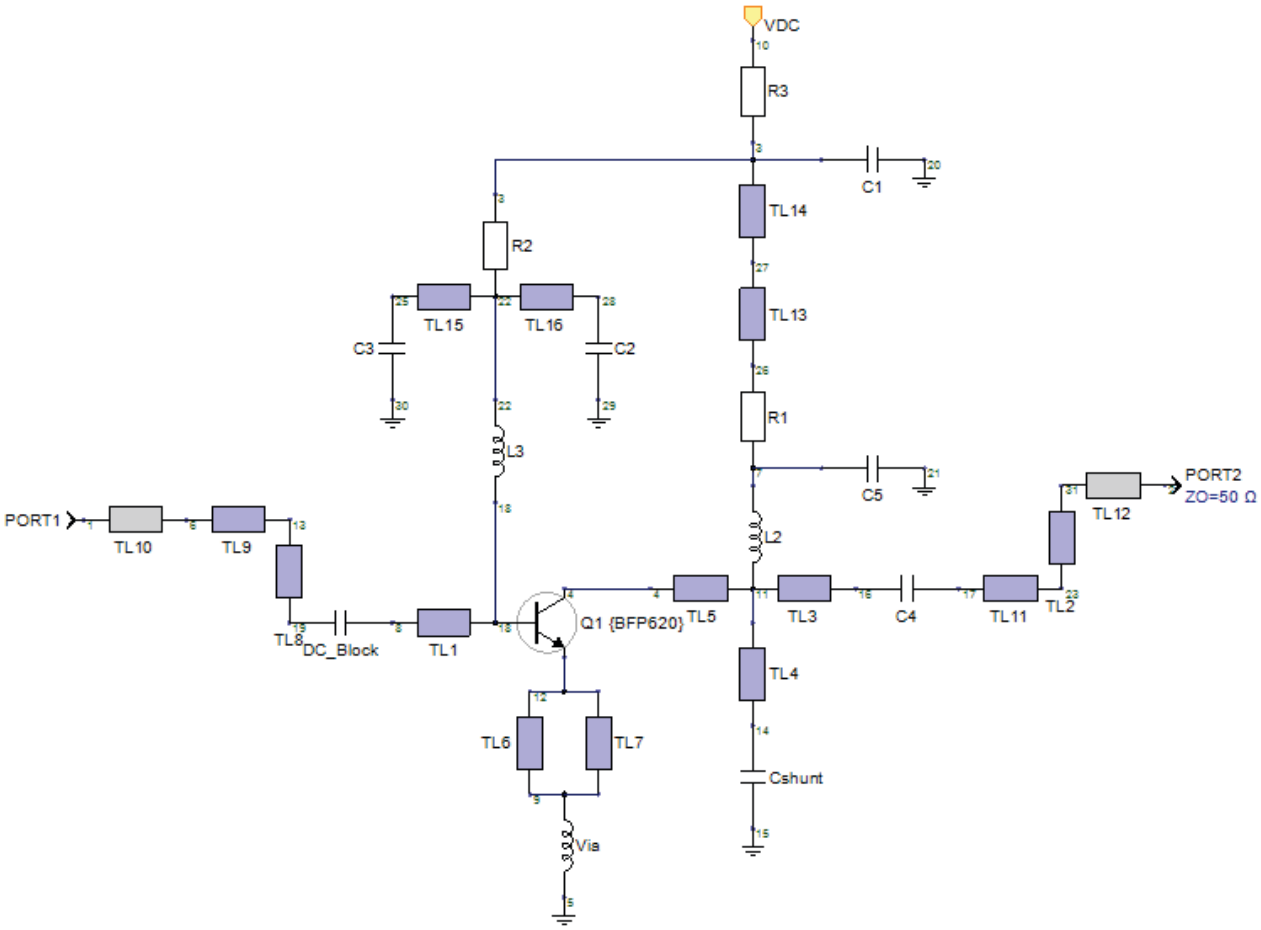
Настоящият доклад представя накратко анализа на усилвател, проектиран, реализиран и измерен при използването на силиций-германиев биполярен транзистор BFP620 на компанията-производител Infineon. Той се отличава с висока производителност и ниска цена, поставено в ултра миниатюрен пакет за повърхностен монтаж SOT-343 с 4 извода. С транзитна честота от над 70 GHz, този транзистор е отличен избор за приложения с висока производителност като преносими безжични комуникационни устройства или отделни модули.

Усилвателят е проектиран за режими с висока ефективност при работни честоти в диапазона 1930 - 1990 MHz. Постигнатите проектни цели включват 15 dB усилване при безусловна стабилност на работата на усилвателя. Схемата е реализирана с относително малък брой градивни елементи и компактен размер на печатната платка.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

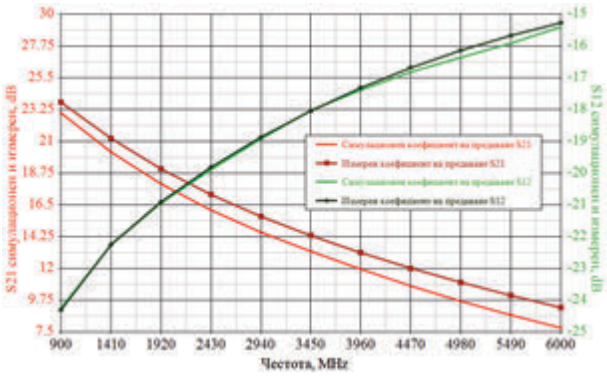
Принципната схема на изследвания усилвател е показана на фиг.1, реализирана симулационно с помощта на нелинеен модел на транзистора BFP620.

Използвани са предварително подготвени подходящи тестови схеми за детайлно симулационно изпитване на нелинейния модел. Зададено е преднапрежение от 2V и базов ток 8mA на входа на активния елемент, при което е извършена симулация и извеждане на неговите S-параметри.

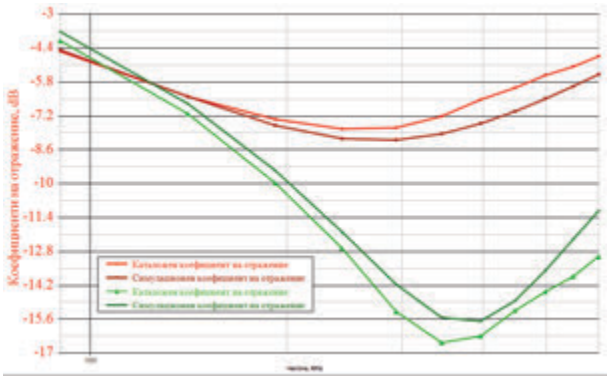



***Фиг. 1**. Принципна схема на радиочестотен усилвател за работни честоти над 1 GHz*

На фиг. 2 и фиг. 3 съответно са показани сравнителни диаграми между каталожните S-параметри на транзистора и получените симулационно.




***Фиг. 2**. Сравнение на каталожните коефициенти на предаване с тези на симулационния модел на активния елемент*




***Фиг. 3**. Сравнение на каталожните коефициенти на отражение с тези на симулационния модел на активния елемент*

Вижда се отлична корелация, което показва, че симулационният модел на активния елемент е добре синтезиран. Това е така, тъй като в модела са заложени каталожните параметри на транзистора, предоставени от производителя Infineon.

След като параметрите на модела са проверени, той се запазва в подходящи универсални формати (spice и др.) като потребителски модел под името "BFP620", което позволява лесно повторно използване в бъдещи проекти, както и в различни симулационни среди.

При следващата стъпка потребителският модел на транзистора е монтиран в работната схема, в която са вложени допълнителни звена под формата на комбинирани блок-компоненти съгласно симулационния модел, за да могат да бъдат включени реалистични паразитни влияния, присъщи за физически усилвател. Той също така включва сегменти от предавателна линия, за да моделира паразитните въздействия от PC платката.

За симулация с един управляващ сигнал, параметрите на усилвателя се изчисляват в блока със следните изходни уравнения:

1. Усилване.

Gain=hb_getspcompdbm(P2,FreqIndexIM,[1])-Pin = 15.47 dB (1)

За симулация с два управляващи сигнала, параметрите на усилвателя се изчисляват в блока със следните изходни уравнения:

Gain = 0.5*(Gain1+Gain2) = 15. 42 dB (2)

Където променливите Gain1 and Gain2 са съответно усилването по мощност изчислено за всеки от двата управляващи сигнала:

Gain1=hb_getspcompdbm(P2,FreqIndexIM,[1])-Pin (3)

Gain2=hb_getspcompdbm(P2,FreqIndexIM,[1])-Pin (4)

2. Изходна пресечна точка от трети ред:

Изпълнен е прост осредняващ алгоритъм за четири (4) възможни комбинации на спектралните, които могат да бъдат използвани за коректно измерване:

(F1) (2*F1-F2) (5)

(F1) (-F1+2F2) (6)

(F2) (2*F1-F2) (7)

(F2) (-F1+F2) (8)

OIP3=0.25*(OIP3_11+OIP3_12+OIP3_21+OIP3_22) = 24.12 dB (9)

където

OIP3_11=hb_oipn(P2,FreqIndexIM,[1;0],[2;-1]) (10)

OIP3_12 = hb_oipn(P2,FreqIndexIM,[1;0],[-1;2]) (11)

OIP3_21 = hb_oipn(P2,FreqIndexIM,[0;1],[2;-1]) (12)

OIP3_22 = hb_oipn(P2,FreqIndexIM,[0;1],[-1;2]) (13)

Изчисляват се чрез използване на вградена функция „хармоничен баланс“ на симулационната програма

IIP3 = hb_iipn(P2,FreqIndexIM,[1;0],[2;-1],Pin) (14)

или:

IIP3 = OIP3_11-Gain1 (15)

За комбинации от честоти, съответно:

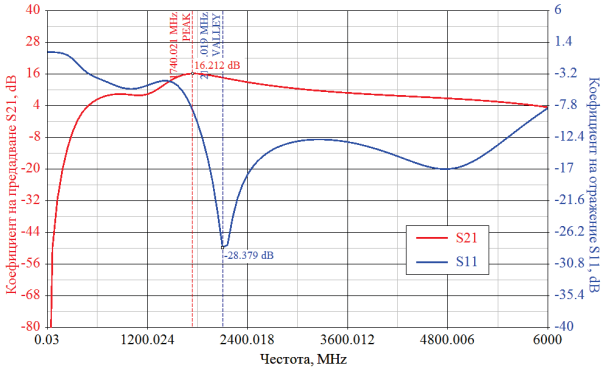
(F1) (2*F1-F2) IIP3 = 8.8 dB. (16)

Контролите за конвергенция са коригирани за тази конкретна схема. Пълното матрично изчисление е настроено така, че да ускорява конвергенцията, както е типично при анализиране на вериги, реализирани с биполярни транзистори. В допълнение, броят на хармониците в хармоничния баланс с един управляващ сигнал е увеличен до 16, така че сигналите да бъдат адекватно семплирани по време на измерване на мощността.

Това може да се види в изходните данни (графики и таблици), както и в данните от линеен анализ (S-параметри).

S-параметрите на цялостния усилвател са симулирани, като на фиг. 4 е показана обща диаграма на коефициента на предава-

не и коефициента на отражение (системата S-параметри) на усилвателя.



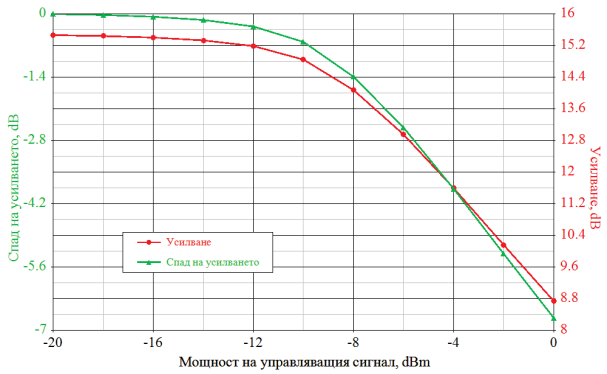

***Фиг. 4**. Коефициенти на предаване и отражение на симулационния модел на активния елемент*

При честота 1960 MHz усилването е 15,4 dB, малко по-добро от проектната цел. Общата форма на отраженията е много близка до измерените резултати (предоставени от каталога на Infineon).

Проведен е симулационен анализ на схемата при големи управляващи сигнали.

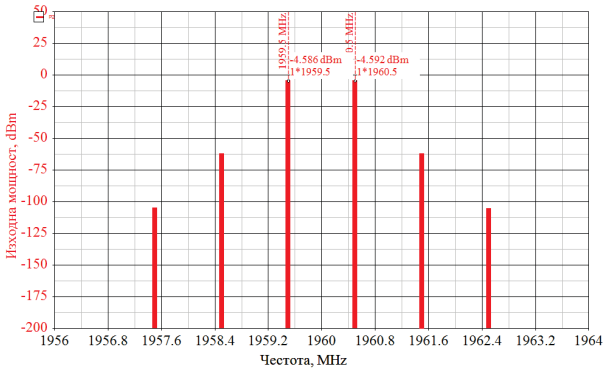
Симулацията с един управляващ сигнал показва спектъра на изходния сигнал на усилвателя, когато се прилага -20 dBm входна мощност.

На фиг. 5 в зелен цвят е изобразен спадът на усилването, докато се подава мощност на управляващия сигнал от -20 dBm до 0 dBm. Червената крива показва усилването като функция на входната мощност. От изведената графика се вижда, че усилване от 12dB съответства на входна мощност около -5 dBm.




***Фиг. 5**. Коефициент на усилване като функция на мощността на управляващия сигнал*

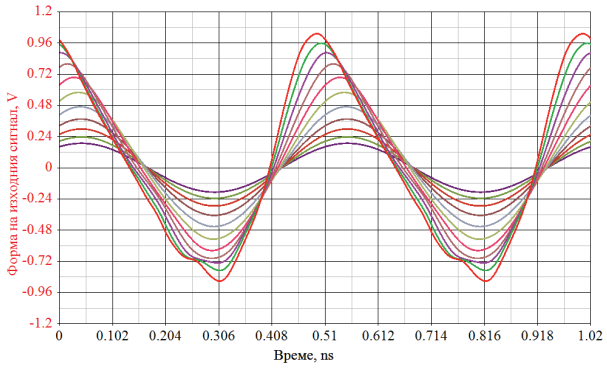
Трябва да се обърне внимание на факта, че мощността, измерена на входния порт (P1), е по-малка от -20 dBm поради непълно импедансно съгласуване на входа (фиг.6).




***Фиг. 6**. Спектър на мощността на изходния сигнал*

Вижда се, че спектърът на изходния сигнал е симетричен около централната работна честота, когато усилвателят се управлява с два -20 dBm сигнала. Този спектър е използван за изчисляване на референтното ниво на входния сигнал, показано като +8,8 dBm, много близо до 10,3 dBm, измерено на изградената схема.

На Фиг. 7 в една диаграма е показана съвместно формата на вълните на изходното напрежение при различна управляваща мощност.




***Фиг. 7**. Форма на вълната на изходния сигнал по напрежение*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съществуващите модели на активните елементи сравнително лесно, с неголеми, целенасочени усложнявания на елементния състав на еквивалентната схема, могат да

бъдат оптимизирани според конкретните изисквания към спецификите в режимите и условията на работа на радиочестотните усилвателни устройства.

Прилагането на тази концепция допринася значително да бъдат подобрени и резултатите от компютърните симулации на процесите в радиокомуникационните устройства без това да усложнява инженерната работа по проектирането им. Тези приложения водят до подобряване качествата на апроксимациите, реализирани от последващото физическо моделиране на активния елемент. Нещо повече, вече е лесно приложимо е да бъдат създавани хибридни модели, чиято обща схема е наподобява класическа еквивалентна електронна схема, в която, обаче, част от елементите ѝ освен физически, могат да бъдат зададени като математическа функция или като програмен ред.

Благодарение на по-прецизното моделиране на процесите в реалния транзистор чрез оптимизиране на подбора на елементите и топологията на еквивалентната схема на подобрените модели трябва да се базира не само на усилването при специфична стойност на честотата, но също така и при желаната отразена честота.

Характеристиките и цялостното поведение на физическите реализираните комуникационни устройства стават все по-близки до предварителните симулации, т.е. непредвидените негативни ефекти стават все по-малко.

Създаден е графо-изчислителен модул в среда на Keysight Genesys, който може да бъде прилаган за оптимизация на моделни схеми, работещи в широк честотен диапазон (включително до свръхвисоки честоти).

## REFERENCE


[1] Kazimierczuk, M.K., “RF power amplifiers”, TK7871.58.P6K39, 2008

[2] Hamam R.E., Karalis A., Joannopoulos J.D., Soljacic M. “Coupled-mode theory for general free-space resonant scattering of waves”, Physical review A, vol. 75, issue 5, ID 053801, 2007.

[3] Grebennikov A. V., RF and Microwave Power Amplifier Design, New York: McGraw-Hill, 2004.

[4] Kraus H.L., Bostian C. W., Raabs F.H., “Solid State Radio Engineering”, © John Wiley & sons Inc., 1980.

[5] Nedelchev I., Sadinov S., “Radio communication equipment”, © V. Aprilov University Publishing House, ISBN: 978-954-683-574-1, Gabrovo, 2017.

[6] Tomov M., Approaches for optimization of known active element models as per the purposes of the exploration - UNITECH' 2017 - Gabrovo, 17-18.11.2017, Volume II, ISSN 1313-230X, p.83-88.

[7] Nedelchev I., Tomov M., Optimization Of High Efficient RF Power Amplifying Schematics By Automated S-matrix Analysys - Scientific conference of Angel Kanchev University of Rousse 2016, Scientific papers of Rousse University - 2016, ISSN 1311-3321 , volume 55, series 3.2. p.8-12

[8] Nedelchev I., Sadinov S., Tomov M., Radio Frequency Parallel Circuit Class E Power Amplifier, International Scientific Conference - UNITECH'2016 - Gabrovo, 18-19.11.2016, Volume II, ISSN 1313-230X , pp. 102-107

[9] Karapenev B. Modeling and simulation study of a simplified model of high-power radio frequency MOS transistors. Scientific works of the University of Ruse, volume 51, series 3.2, p.46-51, ISSN 1311-3321, 2012 г.

# USING GEOSERVER AND POSGRESQL FOR CHANGE DETECTION OF SATELITE IMAGES

**Denis Byalev[1], Egnar Özdikililer[1,2]**

[1] *University of Telecommunications and Post, Sofia, Bulgaria denisbyalev@gmail.com*
[2] *Istanbul Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Istanbul, Turkey ozdikililer@itu.edu.tr*

**Abstract**

*The object of investigation is the use of relational DB for storing data for change detection analysis. The purpose of this paper is to: 1) to demonstrate the use of relational DB as storage for raster data for better performance while doing change detection; 2) propose relational DB schema for storing vectorized information of raster images.*

*In the scope of this paper is shown massive potential in storing vectorized raster data in relational DB.*

**Keywords:** Change Detection, Remote Sensing, Satellite Images, Sentinel-2, NDWI

## INTRODUCTION

Introduction Satellite change detection provides analysis based on the changes that have been detected during the time between two or more satellite acquisitions for an area of interest (AOI). The base for the project is using Setninel-2 satellite imaging as a base for creating change detection. The satellite system Sentinel-2 is equipped with MultiSpectral Instrument (MSI) instrument, which permits global coverage within a period of 6-8 days. For the region of Europe, this period is 4-5 days with 13 spectral bands in the visible up to the shortwave infrared spectrum (0.443–2.190 μm) with the width of the scene is 290 km. The spatial resolution is 10m for the visible (red, green, blue and near infrared bands), 20m for red-edge and shortwave infrared bands and 60m for the 3 bands dedicated for atmospheric corrections.

The images are processed to create NDWI index of water bodies in Kozloduy area. These raster images are stored in the DB for further use in change detection algorithm.

## MATERIALS AND METHODS

The area of interest described in the paper is *Kozloduy* area. Satellite images used for analysis are Setninel-2 images. The images are processed using Normalized Difference Water Index (NDWI), expressed with the following formula:

$$NDWI = \frac{(GREEN - SWIR11)}{(GREEN + SWIR11)} \quad (1)$$

*Equation 1 NDWI formula*

where GREEN and SWIR11 stands for the spectral reflectance measurements acquired in the visible (GREEN) and short-wave infrared regions (SWIR11) respectively. The two tasks are the following:

1) Storing the raster data as vectorized points in relational DB.

2) Visualizing vectorized data and performing change detection algorithm.

The base approach of storing the data in DB is the following Figure 1 (DB schema for storing vectorized raster data)

As seen in Figure 1 the base idea is storing raster metadata in 'geo_raster_index_ndwi_water' table. The metadata include Sentinel - 2 tile id and date of the taken image. The table 'geo_raster_values_ndwi_water' stores all possible values of the raster image, 'map_pixel_coords' is the table for storing grid information and 'map_pixel_coords_value_ndwi_water' table

for storing value of the raster for specified point on the grid.

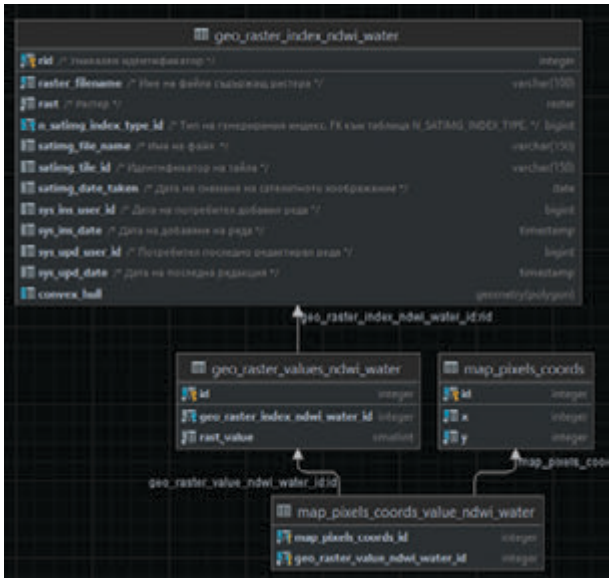



*Figure 1 DB schema for storing vectorized raster data*

NDWI raster image is typically in the range from -1 to 1 we multiply this value by 100 to create index in the range of -100 to 100 so that we could store it in smallint variable to save space. The image is with precision of 20m/20m per pixel. This means we store around 25 000 000 points in the database. The original SAFE file from sentinel is with the size of ~1GB, when we create NDWI raster the image size is typically around ~80MB. This is significantly lower. When we store this image in the DB we multiply this size multiple times, the result is that one image is stored in ~1 GB with the private key and indexes taking respectively ~1GB. The tradeoff storing the data in the DB is having the possibility of querying 161024 in less than a second as shown in Figure 2. The change detection (CD) is created using this formula:

$$CD = OLD - NEW \qquad (2)$$

*Equation 2 Change detection formula*

In (Equation 2) Change detection formula where the values are the older satellite image (OLD) and newer satellite image (NEW) respectively, this is represented as query shown in Figure 2.

The insertion of the data in the database is colossal as it takes around 8 hours to insert one raster image in the DB as vectorized data. As other point is the size of the data. For one tile from Sentinel-2 we could estimate the count of raster images for one year using the formula: N=(YD\D)*Q=(365\7)*1 ≈52, where we divide days in the year (YD) by average time new satellite image is published (Y) and multiply this my average percentage of non-cloudy images, these images have cloud coverage lower than 15%, we calculate worst case scenario where we accept all images as usable by the system. Using the average count of images for a tile we calculate average count for Bulgaria using the formula:TN = N * TL = 52 * 24 = 1248, where we multiply tile average count (N) by total tile count to cover Bulgaria (TL). Having this information, we could estimate the total size of storing the satellite images for Bulgaria for the period of one year by using the formula:

$$TS = (DATA_{SIZE} + INDEX_{SIZE}) * TN =$$
$$= (1158MB + 1042MB) * 1248$$
$$= 2200 * 1248$$
$$= 2745600MB$$
$$= \mathbf{2745.6GB \approx 2.75TB}$$

where we have the size of the data (DATASIZE) and indexes and primary keys (INDEXSIZE) multiplied by total satellite image count.

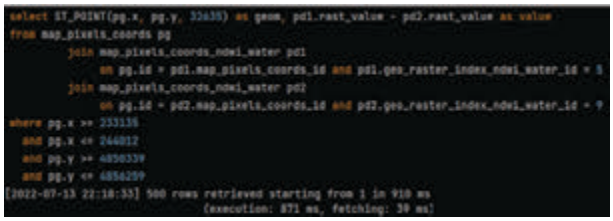



*Figure 2 query used in creating change detection*

The data is then visualized using Geoserver as a tool for visualizing spatial data using web map service (WMS). In Geoserver the select from Figure 2 is published as a layer with 6 parameters for the 2 satellite images we want visualize change detection and the upper left and bottom right corners represented with upper left x and upper left y and bottom left x



*Figure 3 SLD for NDWI_WATER visualization*

and bottom left y respectively. The visualization of layers in Geoserver is done using style layer descriptor (SLD). The value of the coordinate is being interpolated and based on the color table shown in Figure 3 and Figure 4 the specified color is shown.

The visualization relies on render on request to calculate the color, different approach would have been to store the color table inside the DB but this would have added more overhead in the data retrieval step. The request time rendering does not add significant performance bottleneck and this the bottleneck is still in the querying of the data.



*Figure 4 SLD for CHANGE_DETECTION visualization*

The published layers are all in the spatial reference system (SRS) of EPSG:32635. This system was chosen because it uses metric units and the data shown in this paper falls inside the area of use of the SRS. The background in the demo uses Open Street Map service as it provides free background road maps.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

The published layers in Geoserver provide visualization for the NDWI data shown in Figure 5 and Figure 6 respectively. We use change detection to visualize the change visualized in Figure 9 and Figure 10.

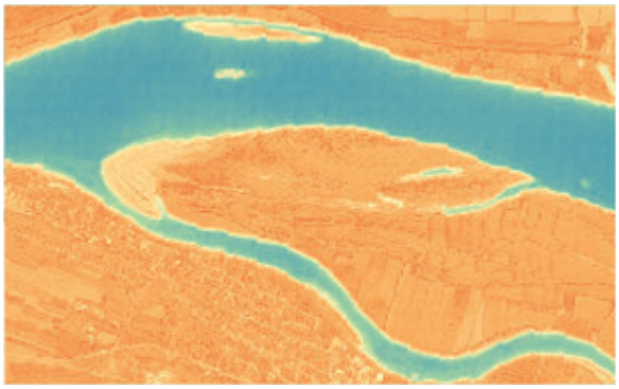


*Figure 5 NDWI of Kozloduy on 2021/09/15*

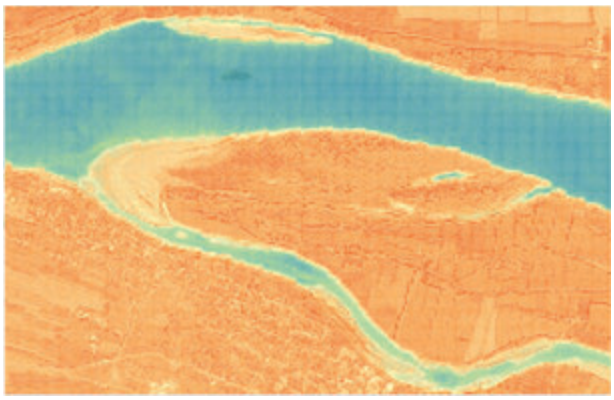


*Figure 6 NDWI of Kozloduy on 2021/09/25*

In the images we can determine that Figure 6 shows more land mass or we could say less water level than Figure 5. To visualize the change in the water level we perform change detection algorithm described at Equation 2, where Figure 6 and Figure 5 is used as OLD and NEW respectively in the formula.

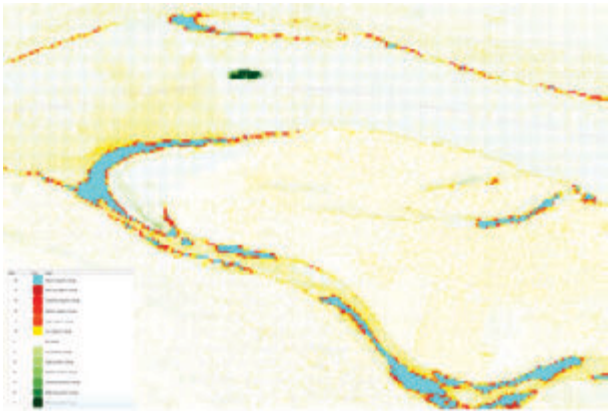


*Figure 7 Change detection between Figure 5 and Figure 6 include color range(mid Figure 8)*

The result of the algorithm is shown in Figure 7. The image shows that sky blue colored areas have massive negative change to the water level as well as some red areas. The full range of colors and their meaning could be seen at Figure 8.



*Figure 8 Change detection between 2021/09/25 and 2021/10/20*



*Figure 9 Change detection between 2021/10/20 and 2021/12/19*

From Figure 9 and Figure 10 we can see the increase in water level of Danube River. The visualization of the data is ~2 seconds including network traffic. This is visualization represents the tradeoff of storing more data to increase the speed of calculation to near real time. The area presented in Figure 9 and Figure 10 is about ~168km2. This provides an example if we have enough storage to store the data, we could potentially provide real time change detection algorithm for use in remote sensing systems.

There is potential in using non-relational DB in storing the data to increase read and write speed of the satellite data. One potential is using Apache Cassandra for storing the data and GeoMessa for creating spatial indexes as they claim to be able to query up to 80 000 points under one second. As the solution described in the paper is able to query near this amount this switch of storage could potentially improve the read speed to increase area of interest, we could analyze with the change detection algorithm.

## CONCLUSION

The result of having the raster image data stored in relational DB as vectorized data provides significant increase in speed when calculating change detection. This paper provide example of one such implementation. The biggest disadvantage of this implementation is the increase in data being stored. This being said it's safe to assume that with enough storage space this implementation could provide real time change detection to mass audience of people. This being said it is highly recommended to experiment with other realization on this idea to increase performance or save storage space without sacrificing performance or the nature of the real time system.

## REFERENCE


[1] Roumenina E., V. Vassilev, V. Naydenova, K. Ruskov. 2009. Land use dynamics of areas threatened with floods using object-oriented classification of very high resolution imagery. In: Proceedings of 5-th Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Nanotechnology, Safety" - SENS2009, 2–4 November 2009, Sofia, Bulgaria. pp. 116-124

[2] Vassilev V. 2013. Crop identification using SPOT-VGT NDVIs S10 time-series data for the arable land on the territory of republic of Bulgaria. Aerospace Research in Bulgaria. Published by SRTI-BAS, Issue 15, ISSN: 1313-0927 pp.172-182.

[3] Launay, M., and M. Guerif. 2005. Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications. Agriculture, Ecosystems and Environment, 111, 321−339.
[4]Lang, S., 2008. Object-based image analysis for remote sensing applications: Modeling reality, dealing with complexity. In: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G.J. (Eds.), Object Based Image Analysis. Springer, Heidelberg, Berlin, New York, pp. 1-25.
[5]Lillesand, T.M., R.W. Kiefer, J.W. Chipman. 2004. Remote Sensing and Image Interpretation, fifth ed. Wiley, New York, NY, 763pp.

# DEVELOPMENT A TAG TEMPLATE ENGINE EXTENTION WITH PHP

**Egnar Ozdikililer**

*Istanbul Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Istanbul, Turkey*
*ozdikililer@itu.edu.tr*

**Abstract**

*Within the scope of this study, a PHP-based application has been developed that makes it easy to dynamically create comprehensive static pages with PHP and reduces the coding time and error rate. At the last level of the application the app creates an html page as a result by adding the information taken from the database. It is aimed to develop further in the short term and to add a new one to the open source server rendered software.*

**Keywords:** php, template engine, php to html, engine development

## INTRODUCTION

The concept of Template Engine arises when we want to use static pages dynamically and do it without much effort.

An effort to show a changing content in a fixed number has emerged, which can perform this process and also shorten the coding time.

## RELATED WORKS

The most popular Template Engine concept JSX (JavaScript eXtension) structure today is an extension of Javascript. JSX is not a Framework.

It is a View, UI Library that configures the front face/page of the application. It enables the use of html syntax structure in Javascript. By writing small html codes piece by piece in Javascript, using them as components, and then putting them together with a certain hierarchy that we have created.

JSX provides a structure to modify and develop its own DOMs in html codes, it is actually a React extension and JSX is updated to work fully with any browser. Updating the DOM using JSX brings website performance improvement and development efficiency [1].

DOM (Document Object Model) is the structure that provides the visibility of web pages and the coexistence of HTML elements. The DOM is updated when the user enters any command on the web page. While this update runs smoothly on static pages, it often negatively affects the application on dynamic pages, weakening/weakening performance in terms of performance.

The VirtualDOM structure selected as a precaution comes into play.

VirtualDOM is a feature that comes with React. Here, if/when there is a change in the application, "only" the modified field is updated and passed to the DOM. VirtualDOM is actually the DOM in memory in the value/key pattern and is a copy of the DOM.

The general operation and rules can be summarized as follows;

• Each component can use a single parent element in Return.

• Custom keywords are found, eg className is used to define a class attribute in a component.

• The representation of a constant value or Javascript expressions in JSX format is done using { curly braces }. To give an example; When displayed without curly braces, the JSX format treats the value as text.

React app has folders similar to each other. These are the src(source) and public(source) folders.

When we open a page in a React web application through the browser, we see what is inside the index.html page. When we examine Index.html, we only see the title of

the application and the information in the body, but we cannot see the element that fills the application's content.

It should be noted that the HTML code that the bill finally outputs to us. Actually, the purpose of React is to generate HTML code. React's declarative code outline eliminates many frontend problems.

The motto of the React Js team is known to be "learn once, write anywhere".

## TAG ENGINE EXTENTION WITH PHP

Within the scope of this study, it is aimed to create its own server tag library by applying the above mentioned JSX browse rendering mentality to PHP. It is aimed that the user can create the templates they want with the tags they want.

The extension written in this study, which was started with this purpose, has the quality of an application, and it was aimed and written to create the same structure with PHP [2,4].

It automatically generates the relevant structure code described below with php and prints a dynamic result as html.

The code that allows us to create an interface for users is written. It is intended to be developed as an open source library in the future.

The working code done is a php extension. It provides the use and formatation of html syntax structure in PHP. It offers a structure formation that it can replace and develop with its own embedded code - convertible structure even in simple html structure and complex codes. The real working flow chart of the application is given in Figure 1. As can be seen here, it reads the Index.html file it encounters in the server-site-based application and parses it into the relevant sections (htmlToPhp).

Portion of parse Tag code is given below.

```
class TagLib{
  private string $tagParser;
  private string $attrParser;
  private $htmlToArrayCount;
  private $arrayToPhpCount;
  public function __construct() {
  public function getAttributes(string $html):array{
  public function htmlToArray(string $html):array|string{
  public function arrayToPhp(array|string $data,string $tab=''):string {
  public function htmlToPhp(string $html,string $tab=''):string {
    return $this->arrayToPhp($this->htmlToArray($html),$tab);
  }
}

$tag=new TagLib();
$time = -microtime(true);
print_r($tag->htmlToPhp(file_get_contents(__DIR__.'/done.html')));
$time += microtime(true);
echo " time: ",sprintf('%f', $time),PHP_EOL;
```

The parsed html document requirements are determined and converted into the structure in which the new read will be created. It separates the attributes of the tags and puts them in the array. Convert it, and after this it parses all the tags in the HTML content and puts it into a hierarchical array.

In the prepared code, structures in the form of class TagX {…} are created.

By creating element-based and arranging the complex structure, values from the relevant tagX are created and added to the relevant sections as needed. In this way, code readability also becomes easier.

In tag block formation, a new php file is created (Table.php) with the data in the database. As a result, it creates the result.htm file and itself is ready for use on the page.

It allows us to create static websites that can be updated in real time.

While the system is static, it turns into a dynamic structure that is stripped of its stability.

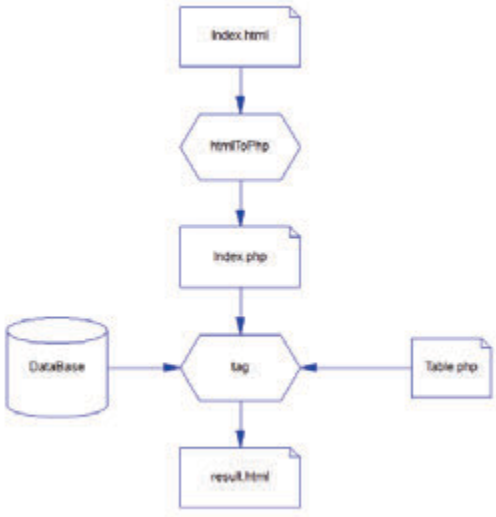



***Fig. 1.*** *Tag engine extention create process*

It offers a new perspective in the PHP world that further reduces coding, allowing us to easily add and update pages with a few tabs [3,5,6].

The PHP format, in which we write the html codes in PHP,

```
Index.html
<Table employees={$employees}/>
```

**Fig. 2.** Code block Index.html.

creates the tagX structure and the smallest unit elements, which we will examine in detail, in detail.

,

```
index.php
tag('Table',[employees='{$employees}']);
```

**Fig. 3.** Code block index.php.

The PHP structure starts when the Table structure is encountered in the Index.html parse operation.

Here, the field created by index.php, which corresponds to the Table field and will be managed from TagX, is parsed and Table.php is formed.

```
Table.php
<table>
  <tbody>
  <tr>
    <th>Name</th>
    <th>Address</th>
  </tr>
  <?php foreach($employees as $employee){ %}
    <tr>
      <td><?=$employee.name?></td>
      <td><?=$employee.address?></td>
    </tr>
  <?php } ?>
  </tbody>
</table>
```

**Fig. 3.** Code block Table.php.

Here, the final result.html is formed by adding the employee.json

```
database
employees.json
[
  {
    'name':'Egnar Ozdikililer',
    'address':'Istanbul Levent'
  },
  {
    'name':'Elis Ozdikililer',
    'address':'Istanbul Levent'
  }
]
```

**Fig. 4.** Code block employees.json.

data received from the database with the service (Fig. 5).

```
result.html
<table>
  <tbody>
  <tr>
    <th>Name</th>
    <th>Address</th>
  </tr>
  <tr>
    <td>Egnar Ozdikililer</td>
    <td>Istanbul Levent</td>
  </tr>
  <tr>
    <td>Elis Ozdikililer</td>
    <td>Istanbul Levent</td>
  </tr>
  </tbody>
</table>
```

**Fig. 5.** Code block result.php.

As a result, the pages written are automatically coded and used as html without any errors and time-wasting.

Since the application server – site is running, it does not expect the data reaching the database to be local. Here, it is designed to read the data received in the web service or microservice structure and use it in an integrated manner in the relevant structure. In the given example, it is reading a JSON (JavaScript Object Notation) file. JSON is an open standard file and data interchange format. Tests have shown suitability for other data structures.

## CONCLUSION

In the scope of this study, a new one has been added to PHP-based, server rendered, open source software. An application has been written, which instantly transforms static pages into dynamic pages, facilitating the operation, reducing the coding time and error rate, adding the data taken from the database and creating an html page as a result.

## REFERENCE

[1] https://reactjs.org/docs/introducing-jsx.html last access 01.11.2022

[2] https://php.org/ last access 21.10.2022
[3] Nixon R., Learning PHP, MySQL & JavaScript, 5th Edition, O'Reily 2004
[4] Ullman L., PHP for the Web: Visual Quick Start Guide, 5th Edition, Prime 2004
[5] Ullman L., PHP and MySQL for Dynamic Web Sites, 4th Edition, Peachpit Press 2014
[6] Schlossnagle G., Advanced PHP Programming 3th Edition, Sams Publishing, 2004.

НАПРАВЛЕНИЕ 4

# КОМПЮТЪРНИ СИСТЕМИ, КОМПЮТЪРНИ ТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННА СИГУРНОСТ

SESSION 4

# COMPUTER SYSTEMS, COMPUTER TECHNOLOGIES AND INFOMATION SECURITY

# ПОДОБРЯВАНЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА ГЕНЕТИЧНИ АЛГОРИТМИ ПРИ БАВНО ИЗЧИСЛИМИ ЖИЗНЕНИ ФУНКЦИИ

**Тодор Балабанов**

*Българска академия на науките*
*Институт по информационни и комуникационни технологии*
*ул. "акад. Георги Бончев", блок 2, гр. София 1113, България*
*todor.balabanov@iict.bas.bg*

# GENETIC ALGORITHMS PERFORMANCE IMPROVEMENT IN SLOWLY-CALCULATED FITNESS FUNCTIONS

**Todor Balabanov**

*Bulgarian Academy of Sciences*
*Institute of Information and Communication Technologies*
*acad. Georgi Bonchev Str., block 2, 1113 Sofia, Bulgaria*
*todor.balabanov@iict.bas.bg*

**Abstract**

*In the field of global optimization, genetic algorithms are one of the most effective meta-heuristics. The essence of genetic algorithms consists of a set of candidate suboptimal solutions, which set is called a population. Most often in practice, the initial population is randomly initialized. The optimization process is organized into epochs in which new generations appear in the population. The appearance of the new generation is most often the result of crossover and mutation. The mating of individuals in the population occurs after a selection process based on the fitness value that each individual. The fitness value of each individual is calculated by feeding the individual to the objective function. The efficient use of genetic algorithms is directly related to the speed of calculating the objective function. This is because the evaluation of multiple intermediate solutions is necessary before a final solution is proposed. For objective functions that take too much time to compute, the practical applicability of genetic algorithms drops sharply. In the present research, an interpolation of the objective function is proposed so as to reduce the number of calculations for the original objective function. The reduction of the number of slowly calculated functions leads to an overall speedup of the optimization process.*

**Keywords:** genetic algorithms, performance, curve fitting.

## ВЪВЕДЕНИЕ

В областта на глобалната оптимизация съществуват множество метаевристични методи, като един от най-широко разпространените е генетичният алгоритъм. В основата генетичните алгоритми стои множество от кандидат решения, наречено популация. Най-често в практиката, първоначалната популация е съставена от случайно генерирани решения (индивиди). Оптимизационният процес се организира на епохи, като във всяка епоха се създава ново поколение. Най-често използваните операции за появата на новото поколение са кръстосване и мутация. Подборът на родители за създаване на новото поколение се извършва, чрез операция за селекция. Тази селекция се основава на оценка за жизнеността на всеки от индивидите в популацията. Надеждата е, че по-добрите индивиди в популацията имат по-големи шансове да доведат до следващо решение, което да е по-близо до търсения оптимум. В най-честия случай, жизнената стойност се изчислява, чрез целевата функция, на която е подаден,

като входен параметър, самия индивид от популацията. Изчислителните процедури по операциите в самите генетични алгоритми са относително тривиални и не са изчислително времеемки. Бързината в търсенето на решение, чрез генетични алгоритми, е пряка зависимост от сложността на целевата функция. Това се дължи на факта, че при генетичните алгоритми се налагат многократни оценки на междинните решения (индивиди) в популацията. При задачи в които изчисляването на целевата функция е изключително бавно, използването на генетични алгоритми става практически невъзможно.

По отношение на интерполацията, б-сплайн кривите са един от най-мощните инструменти за постигане на практически приложими резултати. Б-сплайн кривите са под област на числения анализ. Б-сплайн или базисен сплайн е сплайн функция, която има минимална подкрепа по отношение на дадена степен, гладкост и дял от дефиниционната област. Всяка сплайн функция от дадена степен може да бъде изразена като линейна комбинация от б-сплайн криви от тази степен. Кардиналните б-сплайн криви имат възли, които са на еднакво разстояние един от друг. Б-сплайните могат да се използват за напасване на крива и числено диференциране на експериментални данни.

В настоящото научно изследване се предлага интерполация на целевата функция, така че да бъде намален броя на изчисленията на оригиналната целева функция. Избягването на множество бавни изчисления пряко води до общо ускоряване на оптимизационния процес.

Структурата на доклада е както следва: Част първа е въведение; Част втора представя предложеното нововъведение; Част трета е посветена на проведените експерименти и някои от получените резултати; Част четвърта съдържа заключение и препоръки за бъдещи изследвания.

## ИНТЕРПОЛАЦИЯ НА ЦЕЛЕВАТА ФУНКЦИЯ

Както вече бе споменато, бързодействието на генетичните алгоритми пряко зависи от времето необходимо за изчисляване на целевата функция. Това се дължи на факта, че всяко ново генерирано кандидат решение (индивид) трябва да бъде подадено на целевата функция, а резултата от нейното изчисление да послужи, като числена оценка за жизнеността на кандидат решението. Жизнеността на индивида определя неговите шансове за преживяване в популацията и неговите шансове за участие в създаването на потомство. Изключвайки времето, необходимо за пресмятане на целевата функция, останалите изчислителни процедури в генетичните алгоритми са относително бързи.

В практиката, повечето целеви функции се изчисляват бързо. В редки случаи обаче пресмятането на целевите функции изисква значително изчислително време. Пример за такъв вид функции са Монте Карло симулациите [1, 2, 3]. Втори пример за такава функция е сравнението за сходство на растерни изображения [4]. Трети пример за такива функции е изчислението на комбинаторни задачи [5, 6]. Още по-голямо забавяне се получава в случаите, в които целевата функция изисква участието на човек, което се случва в проектите за разпределени изчисления от тип човек-машина [7, 8].

За да бъде намалено изчислителното време, при бавно пресмятани целеви функции, един от подходите е тези бавно пресмятани функции да се смятат по-малък брой пъти. Въпреки, че не е възможно да се избегне изцяло пресмятането на бавните целеви функции, то броя на тези пресмятания може да се редуцира, чрез въвеждането на интерполиращи функции. Всяко кандидат решение представлява вектор от стойности в многомерното пространство на променливите. По всяко от измеренията в това пространство може да се изгради интерполираща функция. Един от най-подходящите инструменти за интерполиране са б-сплайн кривите. При $n$ мерно пространство се пресмятат б-сплайн коефициентите за $n$ интерполационни криви. За пресмятане на жизнената стойност, когато се използват интерполационните криви, се взема средната стойност от резултата даден от $n$-те интерполационни функции.

Процесът за употреба на интерполационни криви започва с няколко пресмятания на оригиналната целева функция, така че резултатите от тези пресмятания да дадат

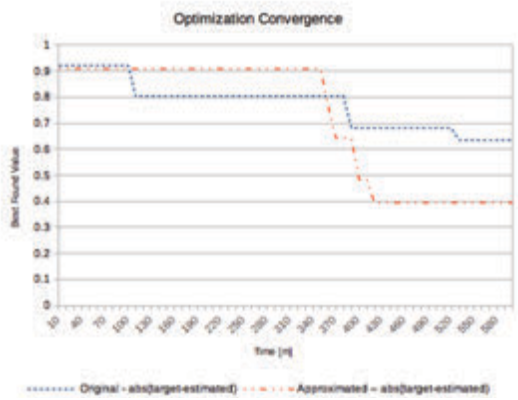
входните данни за определяне на първоначалните коефициенти за б-сплайн кривите. Тези коефициенти се определят от кандидат решенията в първоначалната популация. При намиране на по-добро кандидат решение, според жизнената функция, получена от интерполацията, задължително се пресмята и оригиналната функция, така че да се потвърди дали съответното кандидат-решение действително е по-добро от вече известните. Ако кандидат-решението е по-добро и според оригиналната целева функция, то то влиза в процедура по преизчисляване на всички коефициенти за б-сплайн кривите.

Така предложената добавка, за определяне жизнеността на индивидите, значително ускорява процеса по оценка на всеки един от тях. Това подобрение е изключително полезно за задачи, при които еднократно пресмятане на целевата функция отнема часове, дни или дори седмици. По този начин, генетичните алгоритми могат да се приложат за задачи, за които практически биха били неприложими.

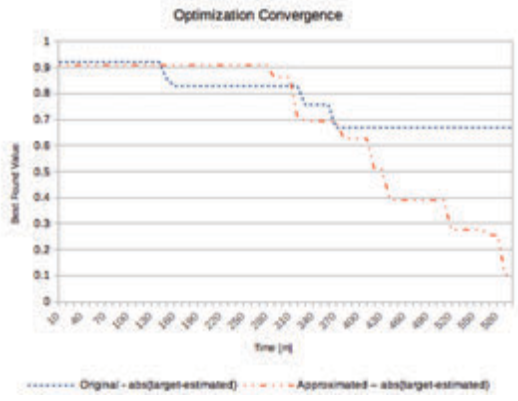
## ЕКСПЕРИМЕНТИ И РЕЗУЛТАТИ

Всички експерименти са извършени на настолна компютърна конфигурация Intel Core i5 2.3GHz, 1 CPU 2 ядра, 8GB RAM и операционна система macOS High Sierra 10.13.6. Решаваната оптимизационна задача е свързана с подредбата на барабани в хазартна игра от тип ротативка [2]. Целта е символите по виртуалните барабани да се подредят, така че играта да постига желаният RTP (Return to Player) процент. Пресмятанията са извършени на изследователска хазартна игра, която не е публикувана и използвана в хазартната индустрия. Играта е с пет барабана, от които са видими по три символа. Таблицата с печалбите и печелившите комбинации са предварително дефинирани. Подредбата по барабаните се извършва с девет, предварително известни символа.

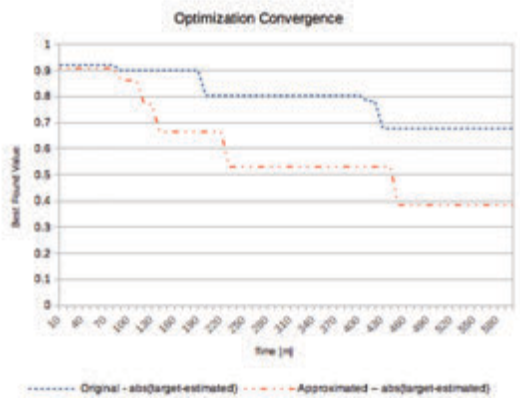
Генетичният алгоритъм се използва с приложено правило за елита. Експериментално, основно свързано с продължителността на оценяващата функция, размерът на популацията е деветнадесет. Компромисът е за относително малка популация, но достатъчна за да дава генетично разнообразие. Всяко стартиране на оптимизационния процес е ограничено до шестстотин минути. Оценката на кандидат решенията (индивидите) се извършва в следствие от Монте Карло симулация, с един милион завъртания. Препоръчителната в практиката стойност за брой завъртания е сто милиона, но при тази стойност забавянето на изчисленията би било толкова голямо, че цялата оптимизация би се обезсмислила. Вероятността за кръстосване (равномерно кръстосване) е експериментално заложена на 90%. Вероятността за мутация е заложена експериментално на 1% и представлява случайна подмяна на случайно избран символ в барабаните. С цел успешно извършване на експериментите, първоначалната популация не е случайно инициализирана. На база на ръчно формирани, начални барабани, се създават случайни девиации от първоначално заложения еталон. Целевата функция е абсолютната стойност от разликата между желания RTP и получения от Монте Карло симулацията RTP.




***Фиг. 1**. Първи експеримент*




***Фиг. 2**. Втори експеримент*




***Фиг. 3**. Трети експеримент*

Проведени са три независими експеримента, като сравнението е между генетичен алгоритъм с оригинална целева функция и генетичен алгоритъм с интерполация на целевата функция. Получените резултати са близки, но вариантът с интерполирана целева функция дава малко по-добри стойности. При първия експеримент (Фиг. 1), алгоритъма с интерполация взема превес малко преди достигането на критерия за прекратяване на оптимизационния процес. При втория експеримент (Фиг. 2), алгоритъмът с интерполация рязко води до подобрение, малко след средата на предварително заложеното време за работа на двата алгоритъма. При третия експеримент (Фиг. 3), двата алгоритъма вървят паралелно, но този с интерполация взема превес още в самото начално на отделното време за работа. Макар и първоначални, получените резултати са обещаващи и дават основание за допълнителни изследвания в предложената насока за подобрения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящото научно изследване е предложена интерполация на целевата функция, за ускорение на процеса по оптимизация в генетични алгоритми, когато основната целева функция е изчислително времеемка. Интерполацията по всяко от измеренията, в многомерното пространство на търсене, е извършена с помощта на б-сплайн криви. Резултатите от проведените експерименти ясно показват, че предложената интерполация ефективно може да помогне за ускоряване на процеса по оптимизация в оптимизационни задачи от реалната практика.

Като насока за бъдещи изследвания, предложената интерполация би било интересно да се експериментира в мета евристики, като еволюция на разликите, еволюционни стратегии и рояк от частици.

## БЛАГОДАРНОСТИ

This research is funded by Velbazhd Software LLC. It is partially supported by the Ministry of Education and Science of the Republic Bulgaria under the National Science Program “Intelligentanimal husbandry”, grant agreement No. D01-62/18.03.2021/, the National Research Programme “Young scientists and postdoctoral students” approved by DCM No. 577/17.08.2018, and the Bulgarian National Science Fund by the project “Mathematical models, methods and algorithms for solving hard optimization problems to achieve high security in communications and better economic sustainability”, KP-06-N52/7/19-11-2021.

## REFERENCE

[1] Balabanov, T., Zankinski, I., Shumanov, B. (2015). Slot Machine RTP Optimization and Symbols Wins Equalization with Discrete Differential Evolution. In: Lirkov, I., Margenov, S., Waśniewski, J. (eds) Large-Scale Scientific Computing. LSSC 2015. Lecture Notes in Computer Science(), vol 9374. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26520-9_22

[2] Balabanov, T., Zankinski, I., Shumanov, B. (2015). Slot Machines RTP Optimization with Genetic Algorithms. In: Dimov, I., Fidanova, S., Lirkov, I. (eds) Numerical Methods and Applications. NMA 2014. Lecture Notes in Computer Science(), vol 8962. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15585-2_6

[3] Balabanov, T., Estimation of Volatility based on the Estimation of Segmentation, Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 77, 2021, pp. 3-10. https://doi.org/10.7546/PECR.77.21.01

[4] P. Petrov, G. Kostadinov, P. Zhivkov, V. Velichkova, S. Ivanov and T. Balabanov, "Multi-Objective Optimization in Image Approximation," 2020 International Conference Automatics and Informatics (ICAI), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICAI50593.2020.9311351.

[5] Balabanov, T., Ivanov, S., Ketipov, R. (2020). Solving Combinatorial Puzzles with Parallel

Evolutionary Algorithms. In: Lirkov, I., Margenov, S. (eds) Large-Scale Scientific Computing. LSSC 2019. Lecture Notes in Computer Science(), vol 11958. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41032-2_56

[6] Balabanov, T., Sevova, J., Kolev, K. (2019). Optimization of String Rewriting Operations for 3D Fractal Generation with Genetic Algorithms. In: Nikolov, G., Kolkovska, N., Georgiev, K. (eds) Numerical Methods and Applications. NMA 2018. Lecture Notes in Computer Science(), vol 11189. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10692-8_5

[7] Ketipov, R., Kostadinov, G., Petrov, P., Zankinski, I., Balabanov, T. (2019). Human-Computer Mobile Distributed Computing for Time Series Forecasting. In: Vishnevskiy, V., Samouylov, K., Kozyrev, D. (eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2019. Communications in Computer and Information Science, vol 1141. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36625-4_40

[8] Balabanov, T. (2015). Distributed Evolutional Model for Music Composition by Human-Computer Interaction. Proceedings of International Scientific Conference UniTech 2015 Gabrovo, University publishing house V. Aprilov, vol. 2, pp. 389-392. ISSN:1313-230X.

# БЪРЗОДЕЙСТВИЕ НА LIBRE CALC ПРИ ОПТИМИЗАЦИЯ НА МНОГОМЕРНИ НЕЛИНЕЙНИ ФУНКЦИИ

**Тодор Балабанов**

*Българска академия на науките*
*Институт по информационни и комуникационни технологии*
*ул. "акад. Георги Бончев", блок 2, гр. София 1113, България*
*todor.balabanov@iict.bas.bg*

# LIBRE CALC PERFORMANCE IN OPTIMIZATION OF MULTIDIMENSIONAL NON-LINEAR FUNCTIONS

**Todor Balabanov**

*Bulgarian Academy of Sciences*
*Institute of Information and Communication Technologies*
*acad. Georgi Bonchev Str., block 2, 1113 Sofia, Bulgaria*
*todor.balabanov@iict.bas.bg*

**Abstract**

*There are various optimization problems in real-life practice. When it comes to linear optimization, high efficient exact numerical methods are developed. The actual optimization challenge comes with nonlinear optimization problems. There are infinite nonlinearities, but even the simplest is problematic enough. This study's well-known nonlinear benchmark functions (Rastrigin, Sphere, Rosenbrock, Styblinski–Tang) are optimized with LibreOffice Calc's nonlinear solver. Even though there are attempts at Libre's nonlinear solver to be rewritten purely in C++, the current implementation is Java based hybrid algorithm of Differential Evolution and Particle Swarm Optimization. This study aims to estimate the performance of the currently used nonlinear solver. The study results would be a valuable point of comparison when the newly developed solver comes into life.*

**Keywords:** differential evolution, particle swarm optimization, non-linear optimization, LibreOffice Calc.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Съществуват множество видове оптимизационни задачи, в реалната практика. За линейните оптимизационни задачи (линейна целева функция и линейни ограничения) са разработени множество ефективни, точни числени методи [1]. Сериозните трудности възникват, когато оптимизационните задачи съдържат някаква форма на нелинейност [2]. Съществуват безкрайно много възможности за участие на нелинейни функции в нелинейните оптимизационни задачи, но дори най-опростената нелинейност (примерно втора степен) създава достатъчно трудности.

За нуждите на настоящото научно изследване са избрани четири много популярни тестови функции - Rastrigin, Sphere, Rosenbrock, Styblinski–Tang [3]. Тези четири функции се характеризират с това, че дават възможност да се изчисляват при голяма стойност за измеренията (оси в многомерно пространство). Търсенето на оптимални и субоптимални стойности се извършва с LibreOffice Calc Nonliear Solver [4].

По настояще, съществува средно-срочен план на екипа, разработващ солвъра, той да бъде пренаписан изцяло на програмния език C++ [5]. Въпреки тези усилия, тази доработка все още не е завършена и в актуалните версии на офис пакета се използва солвър на Java, който изпълнява хибриден алгоритъм за глобална евристична оптимизация. В състава на хибридния алгоритъм влизат еволюция на разликите (Differential Evolution) и рояк от частици (Particle Swarm Optimization) [6].

Целта на настоящото научно изследване е да установи бързодействието на текущо използвания нелинеен солвър в LibreOffice Calc. Извършените експерименти и получените резултати биха били от изключителна полезност, когато бъде завършен C++ варианта на солвъра и бъде необходимо да се потвърди неговата ефективност.

Структурата на доклада е както следва: Част първа е въведение; Част втора представя хибридния алгоритъм, заложен в LibreOffice Calc Nonlinear Sovler; Част трета е посветена на проведените експерименти и някои от получените резултати; Част четвърта съдържа заключение и препоръки за бъдещи изследвания.

## ХИБРИДЕН АЛГОРИТЪМ ЗА ГЛОБАЛНА ОПТИМИЗАЦИЯ

В офис пакета LibreOffice Calc са дадени възможности за използването на няколко нелинейни оптимизационни алгоритъма. От тях DEPSO солвърът се е оказал през годините, като най-ефективен за решаването на нелинейни оптимизационни задачи. DEPSO хибридният алгоритъм използва в съчетание два мета евристични алгоритъма за глобална оптимизация – еволюция на разликите и рояк от частици [7]. И двата алгоритъма са популационни, като еволюцията на разликите спада към групата на генетичните алгоритми. Активирането на всеки от двата алгоритъма става на случаен принцип, с предварително зададена вероятност. По-подразбиране, двата алгоритъма се използват с шансове 50 на 50.

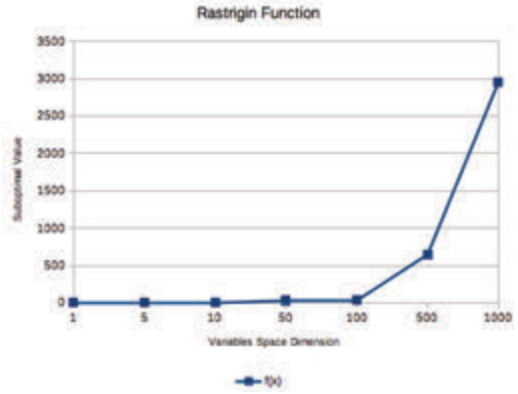
Еволюция на разликите е алгоритъм за глобална оптимизация [8], който разчита на опити за подобряване на вече налични кандидат решения. При подбора за подобряване на кандидат решенията се разчита на числена оценка, до колко тези решения са приемливи. Алгоритъмът не разчита на градиент и позволява използване в задачи с изключително висока размерност на пространството на променливите. Тъй като алгоритъмът е стохастичен, то той не гарантира достигането до глобалния оптимум. Характерно за еволюция на разликите е, че намира най-ефективно приложение в непрекъснати пространства. Оптимизационният процес се осъществява с множество на кандидат-решенията, наречено популация. От тези решения се избират родители и се създава потомство. В популацията остават тези индивиди, които имат по-добра оценка, получена чрез пресмятане на целевата функция. Рекомбинацията на родителите най-често се случва с помощта на операции за кръстосване и мутация. Фундаментална разлика при еволюция на разликите от генетичните алгоритми е, че мутацията се случва по всички елементи на съответния вектор, а не само на отделен елемент.

Роякът от частици е алгоритъм за глобална оптимизация [9], който също разчита на множество от кандидат-решения. Решенията се онагледяват като частици, движещи се из пространството на променливите. Движението се описва с текуща позиция и скорост. Движението на частиците силно се влияе от известното локално, най-добро добро решение и от известното глобално, най-добро решение. И двете (локално, глобално) решения се обновяват, ако в процеса на оптимизация бъдат открити по-добри от тях. За да се приложи оптимизация с рояка от частици, не е необходимо предварително знание за задачата и алгоритъмът може да се стартира на принципа на „черната кутия“. За рояка от частици, както и за еволюцията на разликите, е характерно, че може да се използва при задачи с много висока степен на измеренията. Също не се нуждае от градиент.

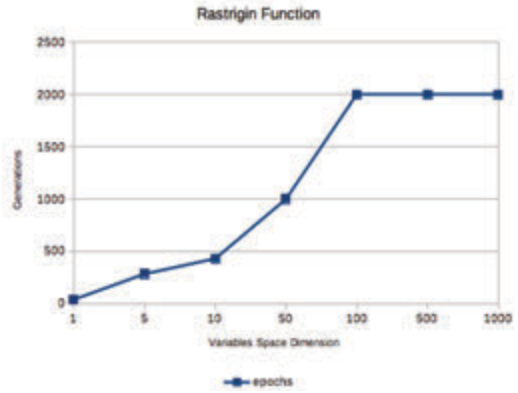
И двата алгоритъма, като имплементация в LibreOffice Calc, имат серия конфигурационни параметри, които в настоящото научно изследване се използват с подразбиращите им се стойности.

## ЕКСПЕРИМЕНТИ И РЕЗУЛТАТИ

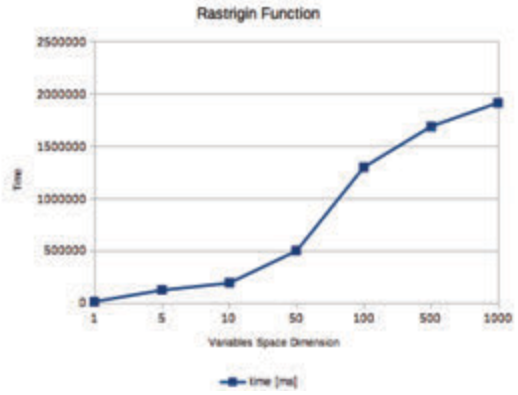
Всички експерименти са извършени на настолна компютърна конфигурация Intel Core i5 2.3GHz, 1 CPU 2 ядра, 8GB RAM, операционна система macOS High Sierra 10.13.6 и офис пакет LibreOffice 7.2.7.2.



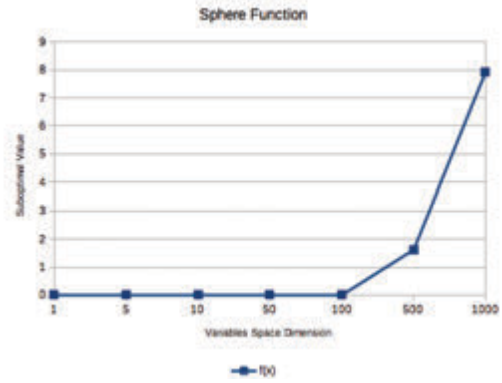

***Фиг. 1**. Постигнати субоптимални стойности при функцията Rastrigin*



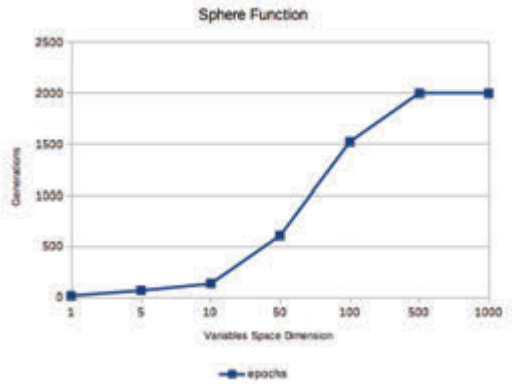

***Фиг. 2**. Брой поколения при функцията Rastrigin*



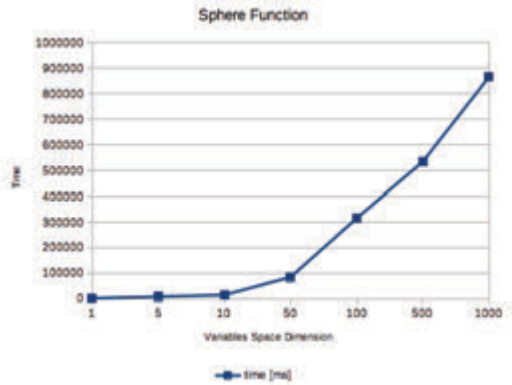

***Фиг. 3**. Изчислително време при функцията Rastrigin*



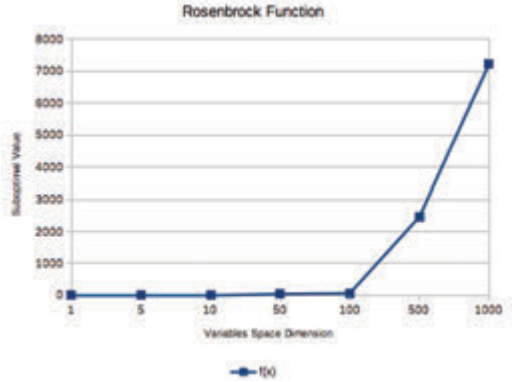

***Фиг. 4**. Постигнати субоптимални стойности при функцията Sphere*



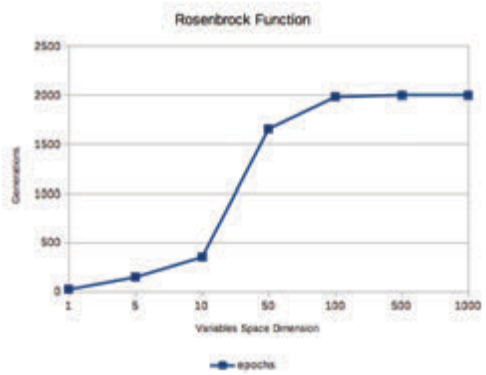

***Фиг. 5**. Брой поколения при функцията Sphere*



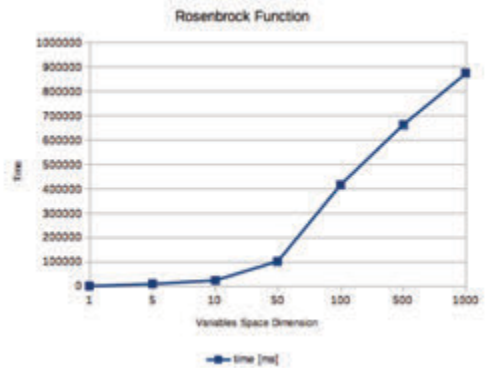

***Фиг. 6**. Изчислително време при функцията Sphere*



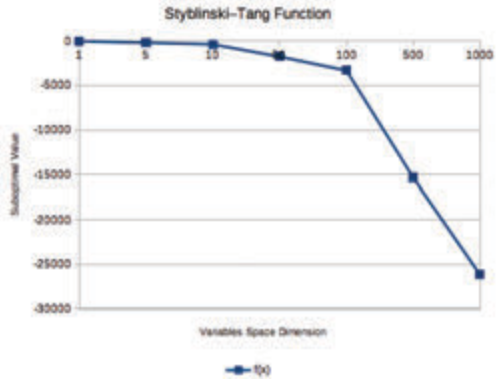

***Фиг. 7**. Постигнати субоптимални стойности при функцията Rosenbrock*



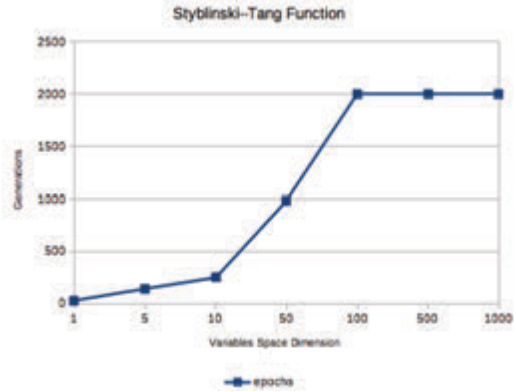

***Фиг. 8**. Брой поколения при функцията Rosenbrock*



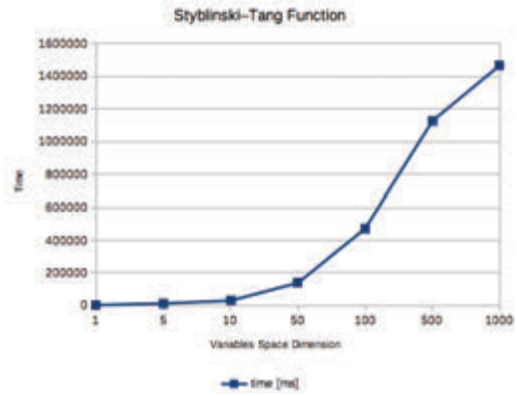

***Фиг. 9**. Изчислително време при функцията Rosenbrock*




***Фиг. 10**. Постигнати субоптимални стойности при функцията Styblinski–Tang*




***Фиг. 11**. Брой поколения при функцията Styblinski–Tang*




***Фиг. 12**. Изчислително време при функцията Styblinski–Tang*

За всяка от четирите функции са извършени независими експерименти. Всяка от четирите функции е използвана при следните измерения: 1, 5, 10, 50, 100, 500 и 1000. За над 1000 мерно пространство, работата на LibreOffice Calc става толкова забавена, че не позволява получаването на резултати в приемливо изчислително време на използваната настолна компютърна конфигурация.

И при четирите функции, до към 100 мерно пространство, солвърът намира близки до глобалния оптимум решения (Фиг. 1,4,7,10). Този резултат показва, че с рязкото нарастване на измеренията, достигането до глобалния оптимум се затруднява. За три от функциите, до към 100 мерно пространство, словърът изпада в стагнация и не използва предварително заложните 2000 оптимизационни цикъла (Фиг. 2,8,11). Изключение прави само сферичната функция, при която се приключва със стагнация до към 500 измерения (Фиг. 5). И при четирите функции, изчислителното време (ограничено за максимум 2000 оптимизационни цикъла) стремглаво нараства, в право-пропорционална зависимост от нарастването на измеренията в многомерното пространство (Фиг. 3, 6, 9, 12).

Получените замервания силно се влияят от начина по който са представени функциите в LibreOffice Calc. За всяко измерение, стойност се пресмята с помощта на формула, на отделен ред в работния лист. Пресмятането на голям брой (при най-тежкия случай 1000) формули и сумирането им за получаване на единична целева клетка, води до значително забавяне на работата.

Отнетото изчислително време при по-високите измерения най-вече се дължи на механизма по който електронната таблица изчислява формулите, а не толкова на затруднение при смятането на самите тестови функции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящото научно изследване се представят резултати за постигнатата ефективност в LibreOffice Calc Nonlinear Sovler. Експериментите за установяването на тази ефективност се базират на четири много известни тестови функции. Резултатите показват, че с нарастването на размерността на пространството на променливите, намаляват и възможностите на оптимизационния модул да определи глобалния оптимум. Второ много важно заключение от получените резултатите е, че ефективността на оптимизационния модул изключително много зависи от първоначалната точка, която служи за отправна точка, при стартирането на процеса по оптимизация.

Като насоки за бъдещи изследвания може да се посочат възможностите за изследване на другите нелинейни оптимизационни модули в LibreOffice Calc, както и на C++ модула, който е в текущ процес на разработване [10].

## БЛАГОДАРНОСТИ

This research is funded by Velbazhd Software LLC. It is partially supported by the Ministry of Education and Science of the Republic Bulgaria under the National Science Program “Intelligent animal husbandry”, grant agreement No. D01-62/18.03.2021/, the National Research Programme “Young scientists and postdoctoral students” approved by DCM No. 577/17.08.2018, and the Bulgarian National Science Fund by the project “Mathematical models, methods and algorithms for solving hard optimization problems to achieve high security in communications and better economic sustainability”, KP-06-N52/7/19-11-2021.

## REFERENCE

[1] Shu-Cherng Fang and Sarat Puthenpura. 1993. Linear optimization and extensions: theory and algorithms. Prentice-Hall, Inc., USA.

[2] L. E. Scales. 1985. Introduction to non-linear optimization. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

[3] Wang Peng, Mixed Particle Swarm Optimization Algorithm with Multistage Disturbances. Frontiers in Genetic and Evolutionary Computation (2019) 1: 1-4. http://dx.doi.org/10.23977/fgec.2019.11001

[4] Dasović, B., Klanšek, U., Comparison of spreadsheet-based optimization tools applied to construction site layout problem, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1209, no. 1, 2021. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1209/1/012010

[5] Vasco Alves, 70399 - Port Solver for Nonlinear Programming to native code, 2013. https://bugs.documentfoundation.org/show_bug.cgi?id=70399 , Last visited 07 Aug 2022

[6] LibreOffice Calc DEPSO NLP Solver, https://github.com/LibreOffice/core/blob/master/nlpsolver/ThirdParty/EvolutionarySolver/src/net/adaptivebox/deps/DEPSAgent.java, Last visited 07 Aug 2022

[7] M. Pant, R. Thangaraj, C. Grosan and A. Abraham, "Hybrid Differential Evolution - Particle Swarm Optimization Algorithm for Solving Global Optimization Problems," 2008 Third International Conference on Digital Information Management, 2008, pp. 18-24. https://doi.org/10.1109/ICDIM.2008.4746766

[8] Price, K.V. (2013). Differential Evolution. In: Zelinka, I., Snášel, V., Abraham, A. (eds) Handbook of Optimization. Intelligent Systems Reference Library, vol 38. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30504-7_8

[9] Poli, R., Kennedy, J. & Blackwell, T. Particle swarm optimization. Swarm Intell 1, 33–57 (2007). https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0

[10] LibreOffice Calc Native Solver, https://github.com/LibreOffice/core/tree/master/sccomp/source/solver, Last visited 07 Aug 2022

# EVALUATION OF ELECTRIC VEHICLES USING THE SIMPLIFIED WISP METHOD

**Branislav Ivanov [1], Dragisa Stanujkic[2]**

*[1] University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Serbia, E-mail: ivanov.branislav@gmail.com*

*[2] University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Serbia, E-mail: dstanujkic@tfbor.bg.ac.rs*

**Abstract**

*Global warming and the reduction of $CO_2$ emissions have become very actual problems. One way for reducing $CO_2$ emissions is to replacement of classic with electric vehicles. For this reason, the electric vehicle market is dynamically and constantly developing. Choosing electric vehicles with adequate characteristics without increasing costs is an important and challenging decision-making problem. This problem is especially evident when selecting electric vehicles, where a greater number of evaluation criteria should be considered. Therefore, in this article, a multiple criteria decision-making model for the evaluation of electric vehicles is proposed, based on the use of the Simplified WISP and Simplified PIPRECIA methods. The conducted analyses and comparisons allowed us to identify the most interesting electric vehicle. The proposed framework can be utilized as a basis for more detailed purchasing decisions.*

**Keywords:** Electric vehicles, MCDM, Simplified WISP, Simplified PIPRECIA, Multi-criteria decision aid.

## INTRODUCTION

The need for the larger using of electric vehicles, instead of classic vehicles, has resulted in the design of a larger number of electric vehicle models, which, apart from their appearance, differ in numerous other characteristics such as battery power, the radius of movement on a single battery charge, power consumption, and so on.

A large number of characteristics (criteria), which have different importance when choosing an adequate electric vehicle, represent an ideal problem that can be effectively solved by applying multiple criteria decision-making (MCDM) methods.

Pradhan et al. [1] can be mentioned as example where MCDM methods are used for evaluating electric vehicles. In this article, the COPRAS (COmplex PRoportional ASsessment) method was used in the Fuzzy environment. Similar research conducted Biswas and Das [2], where they used AHP (Analytic Hierarchy Process) and MABAC (Multi-Attributive Border Approximation area Comparison) methods, as well as Ecer [3], which used seven MCDM methods: SECA (Simultaneous Evaluation of Criteria and Alternatives), MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking According to Compromise Solution), MAIRCA (Multi Attributive Ideal-Real Comparative Analysis), CoCoSo (Combined Compromise Solution), ARAS (Additive Ratio ASsessment), and COPRAS (COmplex PRoportional ASsessment), also in Fuzzy environment. Ziemba [4] has proposed a framework for selection of electric vehicles in Poland based on Fuzzy extensions of TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), SAW (Simple Additive Weighting) and PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations) methods. In addition to the above research, numerous similar research can also be stated [5]-[7].

However, the selection of electric vehicles based on purely quantitative criteria does not require a Fuzzy environment, which is why this article considers the application of an approach based on the application of the Simplified

WISP (Integrated Simple Weighted Sum Product) method [8].

In the rest of this article, after Preliminaries, the Simplified WISP and Simplified PIPRECIA (PIvot Pairwise RElative Criteria Importance Assessment) methods are presented in detail in order to use them for evaluating electric vehicles. In the next section the usefulness of the proposed approach is demonstrate. Finally, the conclusions are given.

## THE SIMPLIFIED WISP METHOD

The simplified WISP method was formed on the basis of the WISP method [9], and its applicability was proven by comparing the ranking results obtained by applying the mentioned method and some prominent and some newly proposed MCDM methods, such as TOPSIS, VIKOR (VIsekriterijumska optimizacija i KOmpromisno Resenje, in Serbian), SAW, ARAS, WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product ASsessment) and CoCoSo [8].

The process of evaluating *m* alternatives based on *n* criteria, using this method, can be clearly presented using the following steps:

**Step 1.** Construct a decision-making matrix.

**Step 2.** Construct a normalized decision-making matrix as follows:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}, \quad (1)$$

where: $r_{ij}$ denotes a dimensionless number that represents a normalized rating of alternative *i* in regards to criterion *j*, $x_{ij}$ denotes rating of alternative *i* in regards to criterion *j*.

**Step 3.** Calculate the values of two utility measures, as follows:

$$u_i^{sd} = \sum_{j\in\Omega_{\max}} r_{ij}w_j - \sum_{j\in\Omega_{\min}} r_{ij}w_j, \quad (2)$$

$$u_i^{pr} = \frac{\prod_{j\in\Omega_{\max}} r_{ij}w_j}{\prod_{j\in\Omega_{\min}} r_{ij}w_j}, \quad (3)$$

where: $u_i^{sd}$ denote differences between the weighted sum of normalized ratings, and $u_i^{pr}$ denote ratios between a weighted product of normalized ratings of alternative *i*, respectively, and $w_j$ denotes weight of criterion *j*.

**Step 4.** Recalculate values of above mentioned utility measures, as follows:

$$\bar{u}_i^{sd} = \frac{1+u_i^{sd}}{1+max_i\, u_i^{sd}}, \quad (4)$$

$$\bar{u}_i^{pr} = \frac{1+u_i^{pr}}{1+max_i\, u_i^{pr}}, \quad (5)$$

where: $\bar{u}_i^{sd}$ and $\bar{u}_i^{pr}$ denote recalculated values of $u_i^{sd}$ and $u_i^{pr}$.

**Step 5.** Determine the overall utility $u_i$ of each alternative as follows:

$$u_i = \frac{1}{2}(\bar{u}_i^{sd} + \bar{u}_i^{pr}). \quad (6)$$

**Step 6.** Rank the alternatives and select the most suitable one. The alternatives are ranked in descending order, and the alternative with the highest value of $u_i$ is the most preferred one.

## THE SIMPLIFIED PIPRECIA METHOD

The simplified PIPRECIA method [10] is proposed based on PIPRECIA method [11]. In both of these methods, the criteria weights are calculated based on the pairwise comparison of criteria. However, in the PIPRECIA method, the importance of each criterion is compared with the importance of the previous criterion, while in the Simplified PIPRECIA method the importance of each criterion is compared with the importance of the first criterion.

The procedure for determining the relative importance of an alternative using the PIPRECIA method can be presented as follows:

**Step 1.** Determine the set of evaluation criteria.

**Step 2.** Set the relative significance $s_j$ of each criterion, except the first, as follows:

$$s_j = \begin{cases} > 1 & if\ C_j \succ C_1 \\ 1 & if\ C_j = C_1 \\ < 1 & if\ C_j \prec C_1 \end{cases}, \quad (7)$$

where $j \neq 1$. For $j = 1$, $s_j$ has the value 1.

Similar to the PIPRECIA method, the value of $s_j$ belong to the interval (1, 1.9] when $C_j \succ C_1$, that is to the interval [0.1, 1) when $C_j \prec C_1$.

**Step 3.** Calculate the value of coefficient $k_j$ as follows:

$$k_j = \begin{cases} 1 & if\ j = 1 \\ 2 - s_j & if\ j > 1 \end{cases}. \quad (8)$$

**Step 4.** Calculate the recalculated weight $q_j$ as follows:

$$q_j = \begin{cases} 1 & if\ j = 1 \\ \frac{1}{k_j} & if\ j > 1 \end{cases}. \quad (9)$$

**Step 5.** Determine the relative weights $w_j$ of the evaluation criteria as follows:

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^{n} q_k}. \quad (10)$$

## A NUMERICAL ILLUSTRATION

In order to present the procedure for evaluating electric vehicles based on quantitative data, using the Simplified WISP method, five electric cars were evaluated based on the following criteria:

- $C_1$ - Battery power (kWh)
- $C_2$ - Radius of movement on a single battery charge (km)
- $C_3$ - Power consumption (kWh/100km)
- $C_4$ - Engine power (kw)
- $C_5$ - Acceleration 0 -100 km/h (s)
- $C_6$ - Price (Eur)

The data used for the evaluation, downloaded from the website https://www.cars-data.com/en/, are shown in Table 1.

***Table 1.*** *Initial decision-making matrix*

| | | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ | $C_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *wi* | 0.15 | 0.19 | 0.15 | 0.15 | 0.19 | 0.19 |
| *Model* | *Opt* | max | max | min | max | min | min |
| Volkswagen ID.3 | $A_1$ | 58.00 | 424.00 | 15.50 | 150.00 | 7.30 | 40,380.00 |
| Hyundai IONIQ | $A_2$ | 38.30 | 311.00 | 13.80 | 100.00 | 9.90 | 40,767.00 |
| Nissan LEAF | $A_3$ | 40.00 | 350.00 | 14.10 | 110.00 | 7.90 | 34,140.00 |
| Mazda MX-30 | $A_4$ | 35.50 | 200.00 | 19.00 | 107.00 | 9.70 | 33,100.00 |
| Renault ZOE | $A_5$ | 52.00 | 390.00 | 19.30 | 100.00 | 9.50 | 37,550.00 |

Table 1 also shows the optimization directions of the criteria, as well as their weights, which in this case were determined using Simplified PIPRECIA. Calculation details obtained using the Simplified PIPRECIA method are summarized in Table 2.

***Table 2***. *Calculation details obtained using the Simplified PIPRECIA method*

| | $s_j$ | $k_j$ | $q_j$ | $w_j$ |
|---|---|---|---|---|
| $C_1$ | 1 | 1 | 1 | 0.15 |
| $C_2$ | 1.2 | 0.80 | 1.25 | 0.19 |
| $C_3$ | 1 | 1.00 | 1.00 | 0.15 |
| $C_4$ | 1 | 1.00 | 1.00 | 0.15 |
| $C_5$ | 1.2 | 0.80 | 1.25 | 0.19 |
| $C_6$ | 1.2 | 0.80 | 1.25 | 0.19 |
| | | | 6.75 | 1.00 |

The normalized, calculated using Eq. (1), is shown in Table 3.

***Table 3.*** *Normalized decision-making matrix*

| | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ | $C_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | 1.00 | 1.00 | 0.80 | 1.00 | 0.74 | 0.99 |
| $A_2$ | 0.66 | 0.73 | 0.72 | 0.67 | 1.00 | 1.00 |
| $A_3$ | 0.69 | 0.83 | 0.73 | 0.73 | 0.80 | 0.84 |
| $A_4$ | 0.61 | 0.47 | 0.98 | 0.71 | 0.98 | 0.81 |
| $A_5$ | 0.90 | 0.92 | 1.00 | 0.67 | 0.96 | 0.92 |

Two utility measures, their recalculated values, as well as, overall utility of each alternative and ranking order of alternatives, that is, evaluated electric vehicles, are presented in Table 4.

***Table 4.*** *Calculation details obtained using the Simplified WISP method*

| | $u_i^{sd}$ | $u_i^{pr}$ | $\bar{u}_i^{sd}$ | $\bar{u}_i^{pr}$ | $u_i$ | Rank |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | 0.04 | 1.364 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1 |
| $A_2$ | -0.14 | 0.361 | 0.821 | 0.576 | 0.699 | 4 |
| $A_3$ | -0.05 | 0.684 | 0.914 | 0.712 | 0.813 | 2 |
| $A_4$ | -0.19 | 0.210 | 0.773 | 0.512 | 0.643 | 5 |
| $A_5$ | -0.09 | 0.498 | 0.869 | 0.634 | 0.751 | 3 |

From Table 4, it can be seen that in this case of evaluation, the alternative marked as $A_1$, i.e. the Volkswagen ID.3 model was chosen as the most acceptable, based on the selected set of criteria and their weights.

***Table 5.*** *Ranking orders obtained using several MCDM methods*

| | Simplified WISP | TOPSIS | VIKOR | SAW | ARAS | WASPAS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| $A_2$ | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| $A_3$ | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| $A_4$ | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| $A_5$ | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

In order to verify the obtained results, an evaluation was carried out with several selected methods of multi-criteria decision-making, i.e. TOPSIS, VIKOR, SAW, ARAS, WASPAS methods. The ranking results achieved by applying the Simple WISP method and the mentioned MCDM methods are shown in Table 5 and graphically represented in Figure 1.

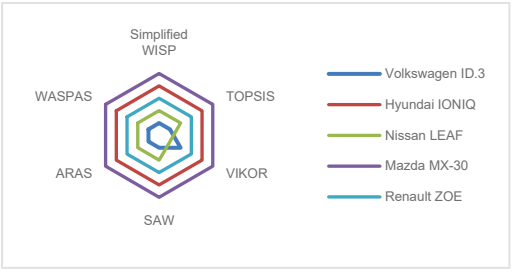



***Fig. 1.*** *Ranking orders obtained using several MCDM methods*

From Table 5, as well as Figure 1, it can be clearly observed that almost all used MCDM methods, except the VIKOR method, provide the same results, which confirms the usability of the proposed electricity evaluation on the basis of quantitative data.

In the aforementioned comparison, the results obtained using the simplified WISP method were compared with the results obtained using three prominent MCDM methods (TOPSIS, VIKOR and SAW) and two more recently proposed but frequently used MCDM methods (ARAS and WASPAS). Those methods were chosen for the following reasons:

The SAW method uses a very simple aggregation procedure, based on the weighted sum approach, as follows:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} r_{ij}\, w_j, \tag{11}$$

where: $S_i$ denotes overall utility of alternative $i$ and $r_{ij}$ denotes normalized rating of alternative $i$ in relation to criterion $j$.

The SAW method uses a very simple aggregation procedure and can be used with several normalization procedures, such as the normalization procedure used in the WISP method. However, it should be noted here that this method uses different equations for normalizing cost and beneficial criteria.

This method was often used earlier, but over time it was replaced by TOPSIS, VIKOR, and numerous other recently proposed MCDM methods.

The TOPSIS method is based on the idea that the best alternative should have the shortest distance from the ideal point and the farthest distance from the anti-ideal point in Euclidean space. The relative distance of each alternative from the ideal point $d_i^+$ and $d_i^-$ anti-ideal point are determined as follows:

$$d_i^+ = \left\{\sum_{j=1}^{n}\left[w_j\left(r_{ij} - r_j^+\right)^2\right]\right\}^{1/2}, \text{ and} \tag{12}$$

$$d_i^- = \left\{\sum_{j=1}^{n}\left[w_j\left(r_{ij} - r_j^-\right)^2\right]\right\}^{1/2}, \tag{13}$$

where: $r_j^+$ d and $r_j^-$ denotes $j$-th coordinate of the ideal point and $j$-th coordinate of the ant-ideal point, respectively.

After that, in the next step, the relative distance $C_i$ of the alternative $i$ to the ideal solution is determined as follows:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}. \tag{14}$$

According to the TOPSIS method, the alternative with the highest value of $C_i$ is at the same time the best alternative. Finally, it should be noted that TOPSIS method uses vector normalization procedure, without "transforming" the value of cost criteria into the value of beneficial criteria.

The VIKOR method is based on the idea of ideal and compromise solution. The best alternative in this method is determined on the basis of the overall ranking index $Q_i$, which is determined as follows:

$$Q_i = v\frac{(S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - v)\frac{(R_i - R^*)}{(R^- - R^*)}, \tag{15}$$

where: $S_j$ and $R_j$ denote the average and the worst group score of alternative $i$, respectively, $S^* = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, $R^* = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$, and $v$ represents a significance of the strategy, which value is usually set to be 0.5.

The average and group score for each alternative are determined as follows:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \frac{x_j^* - x_{ij}}{x_j^* - x_j^-}; \text{ for } p = 1 \text{ and} \tag{16}$$

$$R_i = max_j\left[w_j \frac{x_j^* - x_{ij}}{x_j^* - x_j^-}\right]; \text{ for } p \to \infty, \tag{17}$$

where $\Omega_{max}$ and $\Omega_{min}$ denote set of the benefit and cost criteria, respectively, and $x_j^*$ is determined as follows:

$$x_j^* = \begin{cases} max_j\, x_{ij} & j \in \Omega_{max} \\ min_j\, x_{ij} & j \in \Omega_{min} \end{cases} \tag{18}$$

The WASPAS method combines two approaches for determining the performance score of alternatives, as follows:

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^{n} r_{ij}\, w_j, \tag{19}$$

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^{n}\left(r_{ij}\right)^{w_j}, \tag{20}$$

where: $Q_i^{(1)}$ and $Q_i^{(2)}$ denote relative importance of alternative $i$ based on WS and exponentially EWP method, respectively.

The performance score of alternatives $Q_i$ are determined as follows:

$$Q_i = 0.5Q_i^{(1)} + 0.5Q_i^{(2)} \tag{21}$$

The WASPAS method uses max normalization procedure, where beneficial and non-beneficial criteria are treated differently.

The calculation procedure of the ARAS method is similar to the calculation procedure of the SAW method, with the difference that the ARAS method also introduces an optimal alternative. The overall performance ratings of the alternative are calculated as in the SAW method, with the difference that the ARAS method uses the SUM normalization procedure.

The final ranking of the alternative is based on the degree of utility $Q_i$ which is calculated as follows

$$Q_i = \frac{S_i}{S_0}, \tag{22}$$

where: $S_i$ denote overall utility of alternative $i$, and $S_0$ is the overall utility optimal alternative.

Finally, the discrepancy in the ranking orders of alternatives between the VIKOR method and the other MCDM methods arose as a result of the differences in the calculation procedures of the applied MCDM methods, the normalization procedures, and the weight of the criteria. By slightly changing the weights of the criteria, the VIKOR method would give the same results as the other MCDM methods.

## CONCLUSION

This article discusses the application of a simple approach for the evaluation of electric vehicles, which is based on the application of quantitative data and the easy-to-use Simplified WISP method. The Simplified WISP method was deliberately chosen because of its simplicity, in order to enable the use of this approach by decision-makers who are not familiar with MCDM methods.

In addition, the proposed model can be easily extended by adding new criteria, and the Simplified WISP method can be replaced by the WISP method or its extensions that support the application of fuzzy, intuitionistic, or neutrosophic sets.

Finally, the use of a larger number of evaluation criteria and the use of data obtained during real testing of electric vehicles can be mentioned as directions for further development of the presented model.

## REFERENCES


[1] Pradhan, P., Shabbiruddin, & Pradhan, S. Selection of electric vehicle using integrated Fuzzy-MCDM approach with analysis on challenges faced in hilly terrain. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2022, 44(2), 2651-2673.

[2] Biswas, T. K., & Das, M. C. Selection of commercially available electric vehicle using fuzzy AHP-MABAC. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2019, 100(3), 531-537.

[3] Ecer, F. A consolidated MCDM framework for performance assessment of battery electric vehicles based on ranking strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 143, 110916.

[4] Ziemba, P. Selection of Electric Vehicles for the Needs of Sustainable Transport under Conditions of Uncertainty - A Comparative Study on Fuzzy MCDA Methods. Energies, 2021, 14(22), 7786.

[5] Alosaimi, W., Ansari, M.T.J., Alharbi, A., Alyami, H., Ali, S., Agrawal, A., Khan, R.A. Toward a Unified Model Approach for Evaluating Different Electric Vehicles. Energies, 2021, 14(19), 6120.

[6] Karaşan, A., Kaya, İ., Erdoğan, M. Location selection of electric vehicles charging stations by using a fuzzy MCDM method: a case study in Turkey. Neural Computing and Applications, 2020, 32, 4553-4574.

[7] Ghosh, A., Ghorui, N., Mondal, S.P., Kumari, S., Mondal, B.K., Das, A., Gupta, M.S. Application of Hexagonal Fuzzy MCDM Methodology for Site Selection of Electric Vehicle Charging Station. Mathematics, 2021, 9(4), 393.

[8] Stanujkic, D., Karabasevic, D., Saracevic, M. An adaptation of the simple WISP method and its testing by using Python. In Proc. of the 1th International Conference „CONTEMPORARY ADVANCEMENT IN SCIENCE AND TECHNOLOGY“ COAST 2022, May 26-29, 2022, Herceg Novi, Montenegro.

[9] Stanujkic, D., Popovic, G., Karabasevic, D., Meidute-Kavaliauskiene, I., & Ulutaş, A. An integrated simple weighted sum product method -WISP. IEEE Transactions on Engineering Management 2021.

[10] Stanujkic, D., Karabasevic, D., Popovic, G., & Sava, C. Simplified pivot pairwise relative criteria importance assessment (PIPRECIA-S) method. Romanian Journal of Economic Forecasting, 2021, 24(4), 141.

[11] Stanujkic, D., Zavadskas, E. K., Karabasevic, D., Smarandache, F., Turskis, Z. (2017). The use of the pivot pairwise relative criteria importance assessment method for determining the weights of criteria. Romanian Journal of Economic Forecasting, 2022, 20, 116-133.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF THE QUALITY OF DATA OBTAINED FROM INTERNET SEARCH ENGINES

**Živković Miloš[1], Blagojević Marija[2], Stanišević Ilja[1]**

[1] *Western Serbia Academy of Applied Studies, department Valjevo, Serbia*
[2] *Faculty of Technical Science Čačak, Serbia*

**Abstract**

*Nowadays, the need for data is increasing, and in order to access data, we use a browser on a computer or mobile phone. Today's search engines give us a large number of pages for a search term. The question arises whether the search engine used for the search will really provide us with quality information about the requested data? In order to provide an answer, it is necessary to clarify how search engines get data from all the sites where the same is published, what do they do with it and how do they show it to users? The aim of this paper is to try to find out the quality of internet searches that we get from the most commonly used search engines.*

**Keywords:** Web mining, internet search engines, search quality of internet data.

## INTRODUCTION

The need for data is increasing, and in order to access data, we use a browser on a computer or mobile phone. Will the search engine used for the search really provide us with quality information about the requested data? Questions arise as to how search engines get data from all the sites where it is published, what do they do with it and how do they show it to users?

Today's internet data collection techniques include web mining. Data mining is a process that discovers significant relationships, patterns and behavioral trends in large amounts of data stored in warehouses that are accessed through recognition techniques, as well as statistical and mathematical techniques.

## EXPOSITION

There are two approaches that define web mining. First is the "process-oriented view" (Etzioni 1996), which describes web mining as a series of jobs that need to be done. Another approach is the "data-centric view" which defines web mining according to the types of data used in the mining process itself [1].

The second definition is more acceptable today, and we can say that Web mining represents a set of applications that access data by researching the web, pages, their content, documents associated with those pages, but also by monitoring logs of access to those pages, time of use and other relevant data. which can be obtained when using them [2].

Data mining is the process of discovering meaningful new correlations, patterns and trends by looking at large amounts of data stored in various forms of patterns, using pattern recognition technologies and statistical and mathematical techniques.

Since the amount of data is very large, it is practically impossible for the user who wants to do some analysis of the same to do it independently without auxiliary tools. Therefore, it is necessary to have tools that summarize the data and provide the necessary views or information that could help analyze the data to improve the business.

## TAXIOMETRY WEB MINING

According to the types of data being mined, web mining can be divided into three different categories as shown in Figure 1:

a) Content mining
b) Data structure mining
c) Mining using the Web [2]

This paper deals with the mining of the data structure and the content of the obtained data.

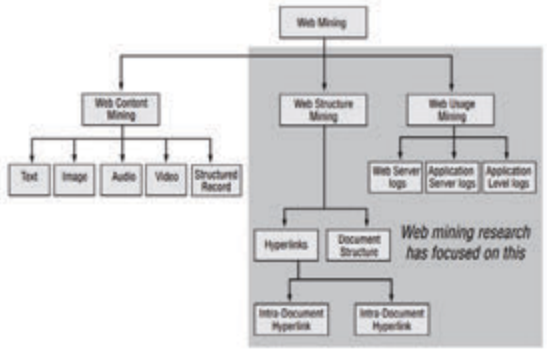



***Fig. 1**: Web mining Taxonomy [1]*

## WEBSITE CONTENT

The web page itself is an XML or HTML structure i.e., structured data that is displayed to the user. This structure contains tags i.e., marks that are important for displaying data, but also meta tags that, as a rule, should describe the information on the page in more detail.

Unfortunately, there is no standard for using meta tags, so we have various examples

<meta content="0;url=/search?q=fiscalization+satisfaction+blog&amp

<meta http-equiv="refresh" content="0;url=https://search.yahoo.com/search?p=fiskalizacija+zadvodstvo+blog

It's the same with other tags

<link href="/search?format=rss&q=fiscalization+satisfaction+blog&

href="https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrEoLyGr7xiaMsB_FpXNyoA;_ylu=Y29sb

<a href="/search?q=fiscalization+satisfaction+blog&amp

<a href="https://www.google.com/webhp?hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjY1f7

Each of our clicks on a link trigger some hidden activity on the page in order to display the requested page, but also to collect certain data about the user's behavior, so that the browser in the following period will try to fulfill our expectations as best as possible.

When the user opens a certain link, a page with the requested data can be displayed in front of him, but in addition to the requested data, that page also contains a lot of other data that we did not request, such as advertisements, but also data that the browser concluded that we need based on of our previous research.

## OPERATION OF THE BROWSER

Search engines have their own search algorithms and methods. When searching, they read meta-tags, as well as the content of pages on the Internet. They do not analyze that data, but simply collect it, so that they can give an answer to the requested query. Whether those tags are written correctly or not, whether they really describe the term that is on that page or it was thrown in order to show that page to the user, the search engine does not know that.

Google is one of the first search engines to introduce the importance of link structure in mining information from the web. PageRank, which measures the importance of a page [1], is a core technology in all Google search products and uses the structural information of the web graph to return high-quality results.

Google provides data through its API (Application Programming Interface) as shown in Figure 2.




***Fig. 2** Data search results using the google API*

Microsoft, through its API, returns search results, but also gives us the ranking of each page based on its algorithms /rankingResponse/.




***Fig. 3** Search result of Microsoft Bing search engine using API*

Every search engine that we turn to and through which we ask for the desired data shows us a page with a basic text that describes the requested data and a link that should open the requested page.

## CONTENT OF THE LINK

The content of the link may take the user to a page describing the search term, but it may also take the user to a search engine page where the page describing the search term is embedded.

Anything to be displayed to the user, the user will search it for the required text.

Along with the requested text, the user will receive many other unnecessary data.

This paper does not deal with that excess data, but shows the quality of the data obtained from the search engine.

As mentioned above, content research is one of the aspects of web mining.

In order to explore the content of the page, it is necessary to display the desired page in the browser, by clicking on the desired link, and then press Ctrl+U, which will display the text view of the obtained page, where you can see the text view of the page, structured according to the xml rule /html structures. This text needs to be saved to a file and then analyzed.

The data structure starts like this:

<!DOCTYPE html>
<html lang="en-latn" dir="ltr" xml:
lang="en-latn"
xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml"
class=" responsive " style="">

The standard to be followed is given in the xmlns attribute [3].

In order to analyze such a text, it is necessary to have a program that will load all saved files according to the given criteria and display the search results.

If we look at the visual display of the page received from the search engine, it happens that the information we were looking for is not visible because it is not in the text we are reading, but in the meta tags or in the links that lead us to the following pages. Such pages generally do not meet the user's criteria.

However, on the pages we have links that direct us to pages that should have the requested content.

Opening the following pages - sublevels, recording the content and repeating the procedure is a demanding and complex task for the user.

Procedure for measuring the quality of search engine work

The procedure for quality assessment of the results obtained by the search engine includes the development of a program that has the following modules:

- establishing a connection to the search engine and setting a query for the required terms.
- analysis of the obtained data and opening of links to which the browser directs us,
- collecting data from the received pages and searching for terms and links on the received pages.

Since addressing search engines is not the same, it is necessary to create a program for each search engine. Some search engines do not allow you to contact them without prior registration and obtaining permission to access data, and some allow direct access, but the results are cluttered with advertisements and other unnecessary information.

The measurement technique applied in the project is finding the number of pages to which hyperlinks direct us, as well as the number of pages that contain the user's searched terms, i.e., data structure mining and content mining.

If we look at the pages we get through the search, and then the links on those pages that further direct us to the searched terms, we can measure not only how many of those hyperlinks there are, how many pages with the searched terms to which the links direct us - the depth of the pages, how many fake ones there are pages because they do not contain the required terms and hyperlinks led us to those pages, and measure the quality of the pages obtained.

If it is the number of pages (Np- total number of pages) that we received

$$Np = \sum_{i=1}^{n} p \quad \text{..... (1)}$$

and the number of pages containing at least one of the requested terms Ng (number of pages with text)

$$Ng = \sum_{i=1}^{g} p \quad (2)$$

we can say that the quality of the obtained results is in percentages

$$Q[\%] = \frac{Ng}{Np} * 100 \quad (3)$$

## CONTENT SEARCH APPLICATION

Creating an application for page content search consists of two parts:

- Querying the search engine to obtain basic links to pages that have the required content;
- Search the resulting pages by depth as long as there is the required content.

The search of the obtained pages involves analyzing the content, finding the requested text, analyzing the data structure, searching for links to new pages within the obtained structure, and searching for the desired data.

When creating the application, it is necessary to take into account that some browsers do not allow you to contact them through the application if you have not previously registered with them, received certain codes and authorizations, that is, you must follow their rules, because for certain services you have to pay for using them.

In accordance with that, an application was created that allows search engines to be searched through the search engine API service and without the API service, by direct analysis of the data obtained from the search engine page itself.

API services give us data that is in the JSON standard [4], which we analyze and based on the criteria we get the addresses of the pages with the requested data.

When addressing the browser directly, we get a page that is in html format, where data about pages with our data is in meta tags with relative or absolute addressing.

The example search should exclude the search for commercial sites, and should only give us sites that describe the requested data. As there is a lot of talk about fiscalization in the period of writing this paper, we decided to search for sites that contain the following terms Fiscalization Pleasure Blog.

By querying the search engine through the application, we get a basic set of pages that have one or all of the terms. The page set is the same as if we manually set it up within the browser.

From the received response of the search engine, we extract the URL to the pages that, according to the search engine, should contain the requested data, and then we start analyzing the content and open all the links that further direct us to the requested data.

Because the number of URLs that appear on the pages, we investigate further is large, we had to limit the depth of the investigation to 30 levels and up to 30 sublevels.

Display of results obtained by content search and page structure search is displayed in Table 1.

***Table 1*** *Display of results obtained by content search and page structure search*

| Search engine | Number of pages | Number of sublevels | Number of pages with the search term | Number of links | Number of links with the search term | Number of links without repetition |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Google | 2433 | 2060 | 204 | 2035 | 1454 | 372 |
| Yahoo | 56833 | 51876 | 1294 | 50592 | 19513 | 4956 |
| Google – API | 3384 | 3212 | 171 | 3210 | 3023 | 173 |
| Bing - API | 20208 | 19146 | 1001 | 19137 | 15528 | 1070 |

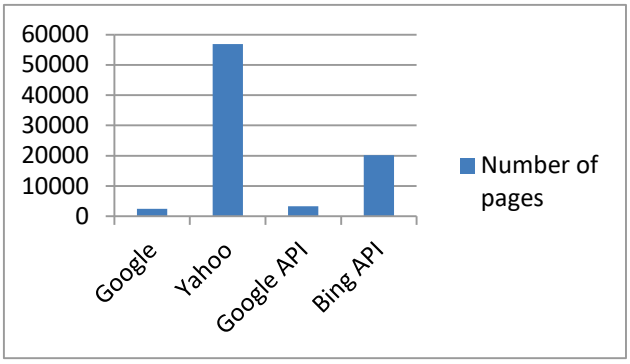



***Fig. 5*** *Display of the obtained search pages*

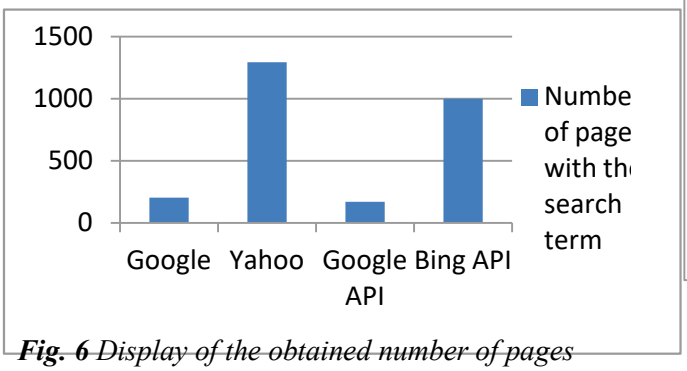



***Fig. 6*** *Display of the obtained number of pages with the search term*

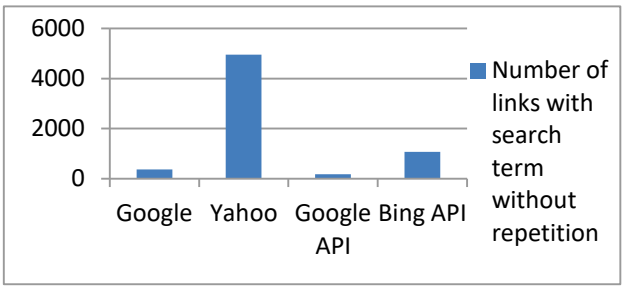



***Fig. 7*** *Display of links pointing to content pages*

If the URL contains, for example, the text product/efiskalizacija-sa-cs-30-pro-na-1-klik/, that link is opened, because it contains one of the search words, and one of our terms is searched for within the text of that page.

The obtained results are divided into several files: the list level, sublevel, URL, requested text shows the linear structure of all the obtained content; list of URLs; A filtered list of URLs representing only non-repeating URLs.

Since the result can be both in Cyrillic and Latin, it was necessary to analyze the requested data in both letters, in order to properly evaluate the obtained results.

The results obtained differ from the initial results. Each search engine has its own criterion, as I mentioned at the beginning, and in addition to the criteria of page ranking, there is also the criterion of paid advertising, which will place the page in the first place.

If we look at these three graphs, we can see that the number of pages obtained from Yahoo and Bing search engines is much higher than the number of pages obtained from Google search, regardless of whether the search was done via API or not.

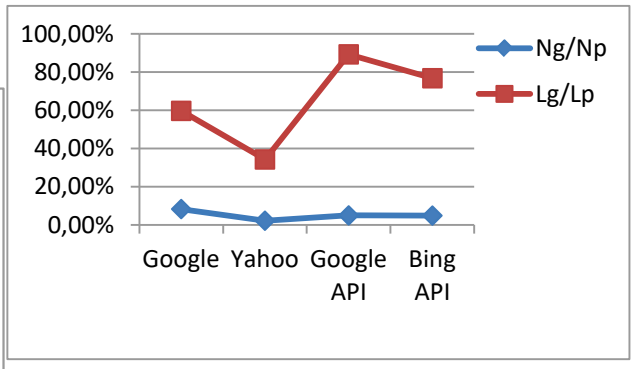



***Fig. 8*** *Ratio of received pages with the term and links with the term according to the total number of pages and links*

Figure 8 shows the ratio of received pages with one or more search terms to the total number of pages to which the links direct us.

On the part of the user who reads those pages, he may get the wrong picture of those pages because he will not find the terms, he is looking for on many of the pages he is directed to via links.

We also see that API search results are much better than search results, because search engines insert their links into user pages, to either place ads, or otherwise direct the user to an assumed search term.

## CONCLUSION

Today's search engines give us a large number of pages for the searched term or terms.

If the page - presentation is well done, where the metatags and links correctly describe the content of the page itself, we will easily get to the requested data.

Through this work, we have tried to show how high-quality search engines are, through which we reach the required search results, dealing with the analysis of both the structure of the obtained data and the content of the obtained data.

We have seen that through the API methods of the search engines themselves, we can get not only better search results, but also other measurement data that the search engine itself has reached, and the same cannot be obtained inside the search engine itself.

It is also noticeable that many pages have metatags that are not adequate to the content of the page itself, which is probably the result of copying the content of previous pages without correcting the metatags themselves.

Further research could be done in checking the quality of the pages themselves by comparing the content of the meta tags and the content of the text that is displayed to the user.

## REFERENCE


[1] Srivastava, Jaideep, Prasanna Kumar Desikan and Vipin Kumar. "Chapter 21 Web Mining — Concepts, Applications, and Research Directions." (2004).

[2] Pranit B., Chawan P.M., "Web Usage Mining," Journal of Engineering, Computers & Applied Sciences (JEC&AS), vol. 2, pp. 34- 38, June 2013.

[3] Brahmia, Z.; Grandi, F.; Bouaziz, R., International Journal of Web Information Systems, Vol. 16, Issue 1, pp. 23-64.; Emerald Publishing Limited. September 02, 2019.

[4] Brahmia, Z., Grandi, F.; Brahmia, S., Bouaziz, R., Procedia Computer Science, 2021, pp. 184:823-828 Language: English. DOI: 10.1016/j.procs.2021.03.102.

# MEASUREMENT OF THE INTERNET IMPACT ON DBMS RESPONSE SPEED

**Živković Miloš[1], Stanišević Ilja[1], Obradović Slobodan[2], Petrović Đorđe[1]**
[1] *Western Serbia Academy of Applied Studies, department Valjevo, Serbia*
[2] *Information Technology School Belgrade, Serbia*

**Abstract** *Important feature of database managmeent tool (i.e., DBMS) is the response speed. This feature can vary depending on the environment. Therefore we examined most commonly used DBMS (MS SQL Server and MySQL) in three different environments: on a stand alone workstation, within a local area network and on internet. We built up a simple software to test features relevant to the school's information system we were developing, instead of using available benchmark software. The aim was not to provide general evaluation of the tested DBMS but to evaluate specific features and to determine option more relevant for the specific situation and environment. Special attention was paid to internet impact on speed response, since the other situations were described and published earlier. This paper describes applied methodology. In the first part of the paper applied strategy and methodology are presented. Then, the technical conductions under which the tests were conducted are specified. All results of the measurement conducted on internet using TCP/IP protocols are presented in detail. Finally, comparation of all three examined cases is displayed and discussed..*

**Keywords:** Database Management Systems (DBMS), Microsoft SQL Server, MySQL, query response speed, performance evaluation, benchmark, local area network, internet.

## INTRODUCTION

Starting design of the integral information system for Valjevo Business School the question which DBMS (i.e., database management system) to choose had arose. The choice depended on staff experience and leaning, so it showed a tendency to be subjective. Therefore, it was necessary to develop neutral method and tool for objective evaluation. It was also necessary to determine and separate influence of the network protocols from performance of the tested DBMSs. This influence, as well as influence of the applied software framework, can lead to misleading and incorrect results.

It is important to emphasize that the main goal of this research was not to provide general, all-purpose evaluation of the tested DBMSs in various environment, but to provide estimation and arguments for a unique and specific case which was presented during development of the school's information system.

In this paper we present achieved measured research results concerning the internet impact on DBMS's performance.

## APPLIED METODOLOGY

In order to be able to objectively determine the performance of a database management system, appropriate measurements must be made with a suitable benchmark software tool. These measurements should provide objective evaluation of the tested database management systems. According to Gray [1], high-quality database testing benchmark system should provide the following characteristics:

- **relevance** – it has to be adequate for the largest number of potential users;
- **portability** – it can be applied on many different (desirably all) existing database management systems;
- **simplicity** – it has to be simple, easy to use and not to consume too many resources;

- **scalability** – it has to be adequate for many different (desirably all) computer systems and architectures, large as well as small.

These characteristics can be seen as contradictory. For instance, portability feature is frequently contradictory regarding the simplicity feature. Accordingly, it is necessary to determine reasonable compromise among these characteristics [2].

There are many factors that can influence results of the measurements. Some of these factors include hardware components. Thus, core numbers, working frequency, CPU speed, the amount of RAM memory, hard disk drive speed, bus speed, memory access speed, quality of the mainboard, etc. can have a significant influence on the measured results. System software can also have an impact on the results (for instance the way operating system manages the memory, threading of locking). Other significant factors could be data schema, database configuration (dedicated cash memory for query processing, number of established connections to the database, network protocols dedicated for database access, index implementation, etc.), the amount of previously recorded data, type of database access application, etc. [3]

One way to resolve the problem is application of the existing benchmarking tools. There are many measuring software tools which can test and evaluate different database features. Some of the benchmarks are made for general purpose. On the other hand, some of the benchmarks are specialized for testing certain aspects of the tested database management system. Some are dedicated for transaction processing tests, the others are for relational databases or for object-oriented databases, there are benchmarks for testing XML based databases, for decision support systems (i.e., DDS) evaluation, for cloud-based databases, for evaluation of non-SQL databases etc. [2] [4] Therefore, a separate independent organization to deal with database benchmark standards, founded by Transaction Processing Performance Council – TPS, was established [4].

There are many database benchmarks available on the market today. It is possible to use Quest [5], STS Soft [6], HammerDB [7] or any other. However, there is a significant issue related to usage of these benchmark tools as most of them are designed and developed for general purposes. Consequently, these tools test, measure and evaluate as many features as possible. Many of these features are irrelevant for the objectives of our project.

For instance, the school's system will have only few input spots so that evaluation marks dedicated for dealing with many connections to the database is in this case of no importance. Furthermore, the school's system will be available only within local area network and will not be available through internet, so that internet performance is completely irrelevant.

There are benchmark tools designed to be applied for certain specific purposes [8] as well as benchmarks which evaluate only small number of database management system features [9]. These tools are also not appropriate for the purpose of our project due to the limited scope of their application.

The development team has decided to adopt a different strategy. Instead of using the existing benchmarking tool(s), the team decided to develop a simple program to test and evaluate only features relevant to the development of the school's system [10]. The program was to be developed in the same environment and using the same technology as the school's system itself. The tool should be perfectly adjusted to meet and test evaluation criteria requested in this case. This tool would not satisfy Gray's criteria of portability and scalability [1] but these features are not relevant for our purpose. Anyway, the tool would to a large degree meet criteria of relevance and simplicity.

Since the school's database is a relational one hence the testing tool should be designed to test relational databases. The main adopted evaluation criterium is query response speed [11]. The testing tool is intended for measuring response speed to various SQL queries. This includes data retrieve queries (i.e., various SELECT queries) and action queries (i.e., INSERT, UPDATE and DELETE queries). There were separately taken into consideration queries without any logical condition and

queries containing simple or composite logical conditions (i.e., containing WHERE clause). Furthermore, there were separate measures for queries under single data table (i.e., relation) and under several tables (i.e., containing JOIN clause). The measurements were conducted under different amount of data already written in the database and with various amount of data to be written or changed. Queries were generated in a way that logical conditions were met by approximately 20% of records.

The school had no valid license for some commercial DBMS like ORACLE, DB, IBM DB2, Informix etc. The team members had no experience working on some other open-source systems like PostgreSQL, Ingres, Informix etc. It was estimated that introduction of these DMBSs would require increase of resource consumption (either in additional funds or in the extension of working hours), therefore these systems were not taken into consideration. For final testing two most common systems were selected: MS SQL Server (version 2016 Standard, 64-bit) and MySQL (version 8.0.16 – MySQL Community Server – GPL). Preliminary MS Access (version Professional Plus 2016) was also taken into consideration, but it achieved poor results during preliminary measurements, so it was abandoned for the final testing [12].

It was necessary to determine the amount of data in the relations. Empirically based, it was decided that all measurements would be performed up to maximum 10,000 records in the relations. Measurements were conducted under various number of records in the tables from 10 records gradually up to 10,000 records. For each combination total of seven measurements were performed. The highest and the lowest results were discarded. The arithmetic mean of the remaining results was accepted as the final result for each particular case.

## TECHNICAL ASSUMPTIONS

During the research, three particular cases were examined. The first one was testing DBMS and testing software running on the same single workstation. The second case was performing tests within local area network (LAN). Results for the first case are explained and given in detail in previous papers [10][12].

The final examined case involved data transfer through internet using TCP/IP protocols. The server hosts an SQL database, a web framework application that gives the client the ability to make an inquiry to the SQL database and return a response in the appropriate form. The server is connected to the Internet with a 20/20Mbs optical cable. There is a bridge device between the server and the Internet so there are no significant time delays in the internal infrastructure on the server side.

The computer configuration of the server is Windows server with OS Windows Server 2019 Standard, Microsoft SQL server 2019 64bit, MY SQL (MariaDB) 10.4.20, Tomcat Apache server 9.2, located on the internet. The internet speed is 20 / 20Mbs on optical cable with port speed 1G. The computer has CPU with 4 core, Intel Xeon E5-2620 2GHz, 64MB RAM ECC, LAN 1G, 2x SSD SAMSUNG 500GB M.2 NVMe MZ-V8V500BW 980 Series SSD 3500/3000 MB/s read/write speed and configured with RAID -1. The web portal/testing application was developed using eclipse, spring boot, java, java script, thymeleaf, hibernate, with basic security protocols.

The user's web browser connects to a web portal/server with the HTTP protocol, and uses standard GET/POST methods to exchange data. It sends the data to the client using the POST method in HTML format, the result is displayed in the form and in the grid. Although it is possible to compress data using the Gzip method, it was not used, so that we could compare the results with previous tests. We also did not use HTTPS security protocols and other communication elements provided by the TCP / IP protocol. The form displays the times when the user sends the request via the client application, the time when the request arrives on the server, the time required for the server to process the request, the time when the response from the server to the client and the time when the data is displayed on the client side. The user who tests should select the table he is processing, the activity he wants to perform on that table and the number of records he is processing. After that the test should be run. As the application could not be

made to work with both databases at the same time, and to have the same conditions for both types of SQL database, a separate application was created for each SQL database.

On the client side, there is an Internet connection of 75/10Mbs, the computer is connected via a router to the Internet. The computer configuration is Intel I5-9400F CPU 2.9GHz, 32GB RAM, SSD M.2 Patriot viper VPN100, motherboard Gigabyte Z390. A web browser is used to access the web portal on the server. Microsoft Edge, Google Chrome and Firefox Mozilla were used here.

The times displayed refer to the speed from the moment the request is sent by the user to the server to the moment the activity completion information is displayed by the web browser.

Since the web browser works asynchronously, i.e., it displays the data as it arrives, we have ensured that the time we measure is always taken when the last data is displayed on the screen. This means that we also measured the time it takes for the application client to display data to the user.

## PRESENTATION OF THE RESULTS

### Test results of INSERT records into the table

This testing involves sequentially record data into a database table. The process takes place through a single transaction, which ends with the last record of data. The results are given in Table 1. Graphical interpretation is provided in Figure 1.

**Table 1:** Display of the time of INSERT records in a table in seconds

| Number of records | 10 | 250 | 1000 | 5000 | 10000 |
|---|---|---|---|---|---|
| MS SQL | 0.342 | 2.377 | 7.313 | 37.213 | 68.333 |
| MY SQL | 0.343 | 2.689 | 8.867 | 45.065 | 88.064 |

Figure 1 shows that the advantage in the speed of INSERT records is on the MS SQL side over MY SQL, when increasing the number of records to be written to the table.

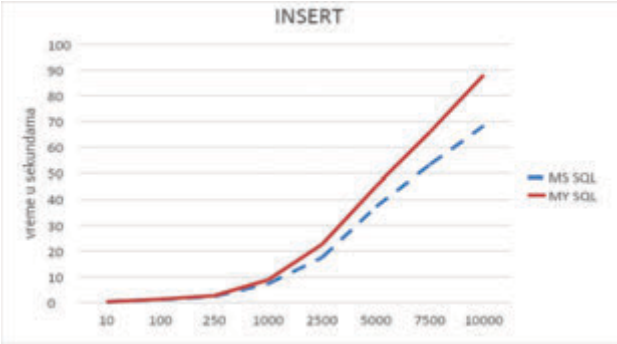



***Figure 1:*** *Results of measuring INSERT records in a table (in seconds)*

### Test results of UPDATE records in the table

This measurement involves updating a subset of the data from the number of records entered in the table. The results are given in Table 2. Graphical interpretation is provided in Figure 2.

**Table 2:** Display of the time of UPDATE records in the table in seconds

| Number of records | 10 | 250 | 1000 | 5000 | 10000 |
|---|---|---|---|---|---|
| MS SQL | 0.288 | 0.184 | 0.191 | 0.25 | 0.34 |
| MY SQL | 0.229 | 0.192 | 0.228 | 0.298 | 0.408 |

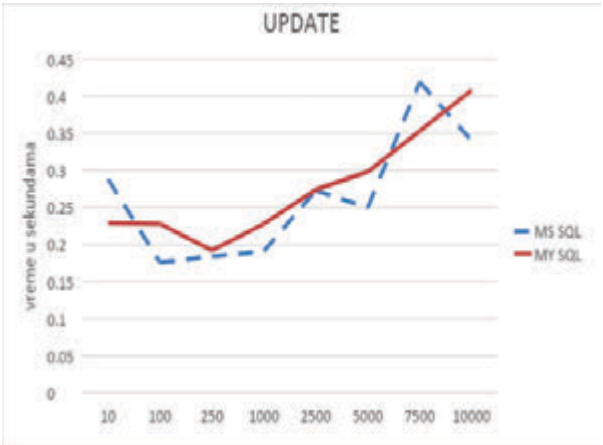



***Figure 2:*** *Results of measuring UPDATE records in the table (in seconds)*

Although the speed of UPDATE is almost linear in My SQL, we see that there are deviations in MS SQL. The amount of data that is sent by the server to the client is small, i.e., it contains information about the elapsed times in the measuring points. These deviations are consequences not only to the time required to process the data on the foreign SQL server, but also to the processed results to

reach the client and be displayed to him. As we did not show individual times in these measurements from the sending of the client's request to the display of the response, the influence of the Internet on the display of information to the client can be seen here.

**Test results of DELETE records from the table**

Deletion includes the time required to delete part of the data from the number of records in the table. The results are given in Table 3.

**Table 3:** Display the time of DELETE records from the table in seconds

| Number of records | 10 | 250 | 1000 | 5000 | 10000 |
|---|---|---|---|---|---|
| MS SQL | 0.245 | 0.167 | 0.159 | 0.268 | 0.229 |
| MY SQL | 0.237 | 0.232 | 0.227 | 0.198 | 0.277 |

Graphical interpretation is provided in Figure 3.




***Figure 3:*** *Results of measuring DELETE records from the table (in seconds)*

The picture shows large deviations in processing - deletion. These deviations are not only in MS SQL but also in MY SQL. Here, as with UPDATE, we can see the impact of the Internet and the speed of data transfer to the client. The explanation is that if we know that with the increase in the number of records that are to be processed on the server side the processing time should be longer, and that we have deviations on the client side, we come to the conclusion that the flow on the Internet influenced the obtained results.

**The results of testing a simple SELECT records from the table**

The WEB portal uses appropriate tools, classes to access data from the database. Some of the tools are Entity Manager, Persistence context. Each SELECT data from the table converts the obtained result into objects (class) that are further worked on in programming. If one wants to get a complex structure through SELECT, Entity Manager will return an object that keeps that structure in the working memory and enables faster and easier work with those objects. The portal converts the objects obtained in this way into the appropriate format and sends them to the client for display in a table. The results are given in Table 4.

**Table 4:** Display of the time of SELECT records from the table in seconds

| Number of records | 10 | 250 | 1000 | 5000 | 10000 |
|---|---|---|---|---|---|
| MS SQL | 0.356 | 1.402 | 4.141 | 19.539 | 38.843 |
| MY SQL | 0.23 | 1.284 | 3.975 | 19.235 | 43.13 |

Graphical interpretation is provided in Figure 4.

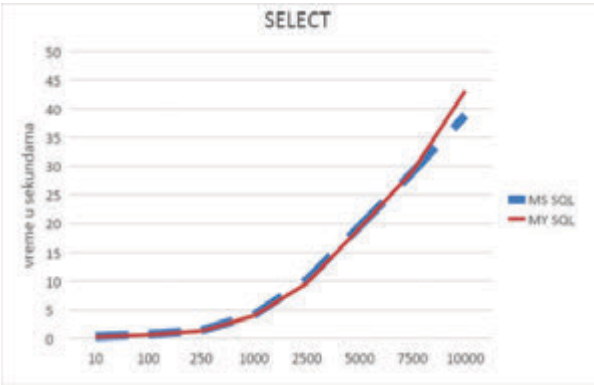



***Figure 4:*** *Results of measuring SELECT records from the table (in seconds)*

In simple SELECT, we take the maximum number of records created by the insert into the table, and display them to the user. Although in the real system the display of all data is not done at the same time, but instead only a part of the data is displayed, we tested the time required for the delivery of all data by the server. The final time represents the time that has elapsed from the moment the client sends the request, through the web portal to the SQL server, returning the results to the client side to the moment the final data is displayed to the user on the screen.

With SELECT we see that the speed of processing and obtaining data on the client side is almost the same - up to 7500 records, and that with a larger number of records the time for processing or sending data to the client is slightly reduced for MS SQL, and with MY SQL slightly increases.

**The SELECT test results with JOIN records from multiple tables**

The results for this case are given in Table 5.

**Table 5:** Display time SELECT including JOIN records from tables and WHERE logical condition in seconds

| Number of records | 10 | 250 | 1000 | 5000 | 10000 |
|---|---|---|---|---|---|
| MS SQL | 0.356 | 1.402 | 4.141 | 19.539 | 38.843 |
| MY SQL | 0.23 | 1.284 | 3.975 | 19.235 | 43.13 |

A complex SELECT with data from multiple tables is designed to always return the specified number of records. The data sent to the user are objects that contain all the relationships from the database itself.

Graphical interpretation is provided in Figure 5.

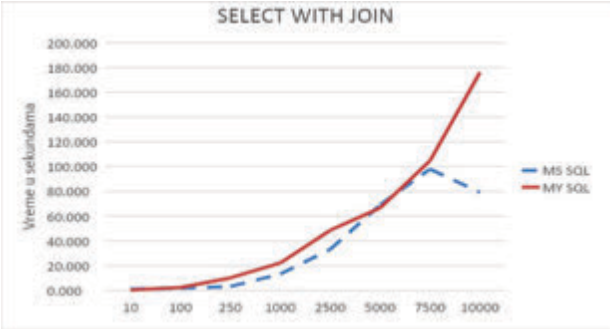



***Figure 5:*** *SELECT measurement results with JOIN records from tables (in seconds)*

We can see that the speed of obtaining data by MS SQL is higher with a larger amount of data, where it is necessary to return to the user all objects and their relations in order to create objects for the client.

## CONCLUSION

It can be concluded that, in general, MS SQL Server provides slightly better performance than MySQL in the internet environment. This difference increases in case of larger databases, with larger number of records. Anyway, the difference between the two is not significant for practical use.

Execution of INSERT and SELECT clauses is significantly faster on local area network than on internet. These two commands are most frequently used in everyday work (for instance, for work with customers on the public counters). Therefore, this delay should be taken into consideration when designing internet applications. Still, internet is somewhat faster in case of updating and deletion of records, but these operations are seldom performed.

It was shown that it is, in the decision-making process, possible to rely on small but efficient self-made testing tools adapted for real-life situation and adjusted for concrete requirements instead of depending on often inadequate and possible misleading benchmarking tools designed for general purpose [10]. The main contribution of this research, however, is to show and promote that it is possible to resolve a problem not only by using complex general-purpose tools, but by developing a small and simple goal-oriented tools designed for a single specific purpose. Such development is much cheaper, faster and requires less resources. This strategy is important in the cases of software development under low-budget conditions [13].

## REFERENCE


[1] Gray, J. (ed.) "The Benchmark Handbook for Database and Transaction Processing Systems – 2nd edition", Morgan Kaufman, 1993.

[2] Darmont, J. "Object Database Benchmark, Encyclopedia of Information Science and Technology", I-III, Idea Group Publishing, pp. 2146-2149, 2005.

[3] MySQL: MySQL Performance Benchmarks – Measuring MySQL Scalability and Throughput, A MySQL Technical White Paper, March 2005, available at http://www.jonahharris.com/osdb/mysql/mysql-performance-whitepaper.pdf.

[4] Darmont, J. "Data Processing Benchmarks, Encyclopedia of Information Science and Technology, Third Edition", Idea Group Publishing, pp. 146-152, 2014.

[5] Quest: Benchmark Factory for Databases, available at:

https://www.quest.com/products/benchmark-factory/.
[6] STS Softy: Database Benchmark, available at: https://www.quest.com/products/benchmark-factory/.
[7] HammerDB, available at: https://www.hammerdb.com/.
[8] Cudre-Mauroux, P., Kimura H., Kian-Tat L., Rogers J., Madden S., Stonebraker M., Zdonik S.B., Brown P.G. "SS-DB: A Standard Science DBMS Benchmark XLDB 2010", Stanford University, CA, Oct. 6-7, 2010.
[9] McKnight W., Dolezal J., Barker R "Cloud Database Performance Benchmark, Product Profile and Evaluation: Actian Vector and Microsoft SQL Server", MCG Global Services, February 2018.
[10] Stanišević I., Vićentić M., Obradović S. "MS SQL Server and MySQL Response Speed Comparation", IJEEC - International Journal of Electrical Engineering and Computing, e-ISSN: 2566-3682, Vol. 4, No.2, pp.111-120, December, 2020
[11] Stanišević I., Obradović S., Vićentić M. "DBMS Response Speed Testing System", International Scientific Conference UNITECH 2019, pp. II-39:II-43, Gabrovo, Bulgaria, EU, 15-16 November 2019.
[12] Stanišević I., Obradović S., Vićentić M. „Database Managment System Selection", International Scientific Conference UNITECH 2019, pp. II-33:II-38, Gabrovo, Bulgaria, EU, 15-16 November 2019.
[13] Stanišević I., Obradović S., "Characteristics of the Optimal Method for Software Design in a Low-budget Environment", Megatrend Review, Vol 8,No 2, UDC 005.8:004.41, ISSN 1820-4570, pp. 597-524, 2011.

# УЕБ-БАЗИРАНА СИСТЕМА ЗА ОТДАЛЕЧЕН ДОСТЪП ДО FPGA РАЗВОЕН ХАРДУЕР

**Иван Панайотов[1], Петър Минев[1]**

*[1]Технически университет - Габрово*

# A WEB-BASED SYSTEM FOR REMOTE ACCESS TO FPGA DEVELOPMENT HARDWARE

**Ivan Panayotov[1], Petar Minev[1]**

*[1] Technical University of Gabrovo*

**Abstract**

*This report presents a possible implementation of the system for remote access to FPGA development hardware. The goal is its implementation and use in the CST department of TU-Gabrovo. The system is relatively easy to implement and its implementation does not require large costs. The development is based on a Linux server with the free version of Xilinx Vivado development software installed. The system provides a web-based interface for remote configuration of the FPGA boards and their monitoring, through streaming video visualization of the obtained results. The Linux server allows authorization and fine-tuning of the access rights of the local user accounts in order to manage remote access to the USB devices connected to it, such as FPGA development boards and web cameras. The system provides a programming interface to automate this process. The LAMP web application building platform was used for the implementation.*

**Keywords:** FPGA; development boards; remote access; web-based; Vivado; LAMP.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Дигитализацията и преходът към дигитално общество налагат изграждане на подходяща база за онлайн обучение във всички области на образованието. В инженерните специалности и дисциплини е по-трудно да се внедрят и обособят средства за провеждане на практическите занятия от разстояние в електронна среда. При дисциплините свързани с проектиране на цифров хардуер, благодарение на технологиите свързани с програмируемите логически интегрални схеми, такъв подход е по-лесно осъществим. Тези технологии от години предоставят възможност за отдалечено използване на учебни макети [1, 2, 3, 4], но подходът не се прилага масово, тъй като работата с реалната развойна среда създава незаменим опит и дава увереност на начинаещия студент в собствените му възможности за реализиране на проектните си идеи. От друга страна, двугодишното затваряне на образователните институции, поради ограничителните мерки свързани с пандемията от SARS-CoV-2 и съпътстващото онлайн обучение, дадоха тласък в използването и развитието на системите, методите и средствата за дистанционно провеждане на лекции и упражнения. Разработките свързани с изследване и реализация на виртуални лаборатории по проектиране на цифрови схеми намериха своето естествено приложение. Много университети разполагаха [5, 6, 7, 8, 9], а други своевременно внедриха виртуални лаборатории, оборудвани с развойни средства, базирани на програмируеми логически интегрални схеми (ПЛИС) [10]. Така с помощта на браузер или друг специализиран софтуер, посредством подходяща комуникационна инфраструктура, студентите получават достъп

от разстояние и могат да зареждат и тестват своите проекти.

В настоящия доклад ще бъде представена подходяща за внедряване в катедра КСТ на ТУ-Габрово системата за отдалечен достъп до FPGA развоен хардуер. Целта е системата да е сравнително лесна за реализация и внедряването ѝ да не да изисква големи разходи.

Катедрата разполага с 6 броя развойни платки Zybo от Digilent Inc., които са с FPGA с хибридната Zynq архитектура на Xilinx. Те лесно могат да бъдат управлявани отдалечено с помощта на безплатната версия на развойния софтуер Vivado на Xilinx. Посоченият софтуер е инсталиран на всяка от 12-те работни станции в лабораторията по автоматизация в катедра КСТ. Освен това в катедрата е реализиран VPN достъп до работните станции в лабораториите, включително и до тези в лабораторията по автоматизация. Така студентите могат да работят на тях без да са свързани в локалната мрежа на университета. Тези предпоставки позволяват да се реализира отдалечен достъп до посочените развойни платки. Достатъчно е, платките да са свързани към работните станции в лабораторията и захранващото им напрежение да е включено. Задачата, която трябва да се реши в представената разработка е свързана с отдалеченото конфигуриране на FPGA платките през уеб базиран интерфейс и наблюдението на получените резултати след това. За решаване на този проблем е инсталиран и конфигуриран Линукс сървър, който позволява оторизация и прецизно задаване на правата за достъп на локалните потребителски акаунти с цел управление на отдалечения достъп до свързаните към него USB устройства, като FPGA развойни платки и уеб камери. Най-съществената част от разработката е реализацията на система, позволяваща управление и автоматизиране на този процес. Системата осигурява уеб интерфейс за настройка и конфигуриране на програмируемите устройства и визуализация на видео изображенията от камерите, следящи всяка от развойните платки. Системата е изградена с помощта на платформата за реализация на уеб приложения, LAMP. В уеб приложението по оригинален начин са осъществени основните изисквания заложени в началния етап на проектиране на системата.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### 1. Проектиране и средства за реализация

Преди да се пристъпи към първоначалното проектиране на уеб-базираната система за отдалечен достъп до FPGA развоен хардуер бе направено проучване, показващо развитието и възможностите на подобни системи. В шест от проучените системи – [1], [2], [4], [5], [7] и [8] се използват развойни платки с FPGA устройства от Xilinx (AMD), а в останалите четири – [3], [6], [9] и [10] – FPGA устройства от Altera (Intel). В три от системите не се използват уеб камери за наблюдение на периферните светодиоди и дисплеи върху платките. Разчита се на виртуални панели за вход-изход. Само в една от разработките не е предвиден виртуален панел за подаване на входни въздействия, чрез потребителския интерфейс към заредения в отдалечената платка проект. В шест от системите, за да се реализира този отдалечен вход се използва допълнителна входно-изходна платка (микроконтролер или микрокомпютър). Тя е свързана с FPGA устройството и преобразува командите от потребителя във сигнали към FPGA. В останалите четири системи, за тази цел се използват софтуерни решения.

За отдалеченото конфигуриране на развойните FPGA платки, в девет от проучените системи се използват средствата за отдалечено конфигуриране, предоставяни от производителите на FPGA чипове. Това улеснява създаването на уеб базирани системи за отдалечен достъп до FPGA развоен хардуер. Необходим е Linux сървър с инсталирана развойна среда за разработка с FPGA от избрания производител. След това системата за наблюдение, управление и контрол може да се реализира с помощта на език за уеб програмиране като PHP, Python и други. Реализирана на базата на описания подход е и отдалечената виртуална лаборатория предложена в [8]. Тя се състои от един сървър с процесор Intel(R) Xeon(R) E5-2620 v2 @2.10GHz (24 CPU) и 32 GB RAM памет, една развойна платка с хибридна FPGA архитектура Xilinx Zynq и втора платка със стандартна FPGA архитектура Xilinx Virtex-7. Към всяка платка има уеб камера за отдалеченото ѝ наблюдение. Сървърът предоставя уеб страница, в която потребителят резервира вре-

меви интервал, за да използва лабораторията и да взаимодейства с една от FPGA развойните платки. Двете развойни платки са свързани към сървъра с вградения USB JTAG интерфейс. Тази връзка позволява програмирането на FPGA, а също така и хардуерно откриване на грешки през JTAG. Чрез Xilinx Vivado всеки потребител има достъп до всяко свързано FPGA устройство. За да се ограничи достъпа на даден потребител, само до запазена FPGA платка, се променят правата за достъп и по точно собственика на запазеното USB устройство, в определения времеви период. За фиксиране на всяка FPGA платка с определено USB устройство е използван UDEV (Linux dynamic device management). За подаване на входни въздействия и наблюдение на изходните реакции за конфигурираните в FPGA проекти се препоръчва да се използва хардуерното откриване на грешки с готовите компоненти VIO и ILA, които са на разположение в IP каталога на Vivado.

Съобразно с направеното проучване, и посочените по-горе предпоставки в катедра КСТ, може да се посочи, че за реализацията на собствена система за отдалечен достъп до FPGA развоен хардуер, която да подпомага студентите от катедрата, в процеса на обучение по проектиране на цифрови схеми с програмируема логика, е удачно да се използват възможностите за конфигуриране от разстояние на FPGA развойни платки на Xilinx Vivado, така както това е предложено в [8]. За целта е необходимо да се разработи уеб-базирана система, която да направи прозрачно за потребителите, отдалеченото използване на Linux базирана инсталация на Vivado.

Спрямо заложената цел са формулирани следните функционални изисквания към системата: лесен и интуитивен интерфейс, който да не внася допълнително объркване за начинаещите потребители в работата им с FPGA развоен хардуер; едновременен достъп на няколко потребителя от различни работни места; поддържка на няколко развойни платки едновременно, като в даден момент един потребител може да заеме и използва само една платка; поддържка на различи модели развойни платки; хронологично запазване на действията на потребителите при работа с развойния хардуер; визуализиране в реално време на физическото състояние на развойните платки; лесно внедряване на подходящ сървър; минимални разходи за реализация, внедряване и използване.

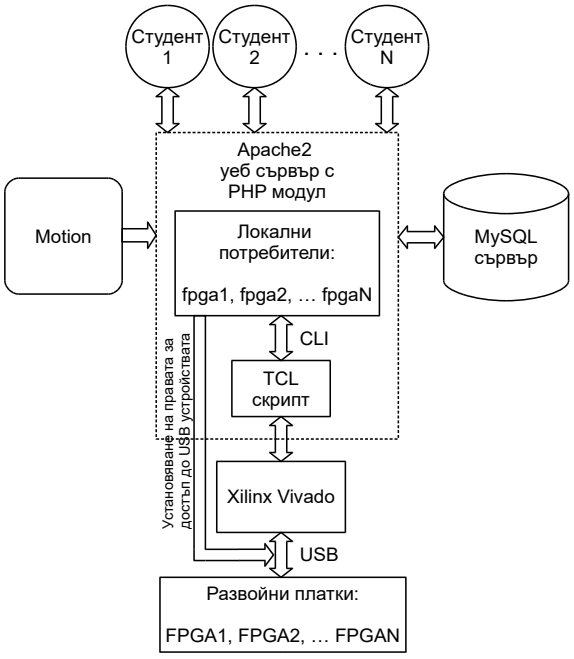
Системата е уеб базирана и основният начин за взаимодействие с потребителя е посредством уеб браузер. За управление и връзка с FPGA развойния хардуер се използва системата за автоматизирано проектиране Xilinx Vivado. Тя осигурява програмен инструмент, наречен Hardware Server, който позволява отдалечен достъп и конфигуриране на FPGA развойните платки. След стартиране на Hardware Server и установяване на връзка с него, могат да се изпращат команди, с които да се избере и конфигурира, включена към сървъра, FPGA развойна платка.

За програмната реализацията на описаната функционалност е избран езикът PHP.

Многопотребителският достъп в системата се реализира, като се използва MySQL сървър. Той дава възможност да се организира съхранението на потребителските данни.

За реализацията на визуална обратна връзка, чрез която потребителят да наблюдава резултата от действията си върху FPGA развойния хардуер е използван софтуерният инструмент с отворен код Motion.

На фигура 1 е показана общата структура на проектираната система. Потребителите, посредством уеб браузер, взаимодействат със сървъра Apache2, в който е настроен PHP модул. От своя стана, чрез PHP реализацията на системата, Apache2 взаимодейства с MySQL, Motion и Vivado.




***Фиг. 1**. Обобщена структура на системата за отдалечен достъп до FPGA развойни платки*

Комуникацията между потребител (студент) и Apache2 сървъра е двупосочна. Потребителят изпраща към Apache2 своите данни за верификация. Сървърът, с помощта на езика PHP и MySQL, проверява тези данни. След успешна верификация Apache2 зарежда в уеб браузера информация за наличните развойни платки и тяхното състояние. Ако верификацията е неуспешна потребителят се информира, като се извежда съобщение за грешка.

Взаимодействието между Apache2 и MySQL също е двупосочно и се извършва посредством езика PHP. Когато се верифицира потребителският вход в системата, MySQL сървърът е достъпен само за четене. Когато администратор въвежда нови потребители, MySQL е достъпен за четене и запис.

Системата е проектирана така, че да взаимодейства със софтуера за автоматизирано проектиране за FPGA, Xilinx Vivado, който осигурява управлението и конфигурирането на развойния хардуер. Избран от потребителя (студента) конфигурационен файл с помощта на набор от команди, оформени като TCL скрипт, се изпраща към Vivado, който от своя страна го предава към развойния хардуер. След това се прихваща върнатата от Vivado информация за извършените операции с развойният хардуер и тя се визуализира в уеб браузера на потребителя (студента). За осъществяване на комуникацията с Xilinx Vivado, в операционната система Linux, предварително са създадени локални потребителски акаунти. Всеки локален потребител има права за достъп само до USB устройството в Linux, съответстващо на една от развойните платки. В уеб-базираната система се използват подходящи програмни функции за изпълнение на команди в Linux от името на локален потребител. Това позволява, системата да стартира Hardware Server и да изпрати за изпълнение TCL скрипта за конфигуриране на развойната платка, до която потребителят има установени права за достъп.

Софтуерното приложение с отворен код Motion предава поточно видео. Предложената система прихваща видеопотока и го визуализира в уеб браузера на потребителя. Така, потребителят (студентът) следи в реално време състоянието на развойния хардуер, като наблюдава индикациите върху развойния хардуер и как те се променят в следствие на неговите действия.

## 2. Потребителски достъп до системата

В системата потребителите имат две нива на достъп: “потребител” – наблюдава и си взаимодейства с развойния хардуер; “администратор” – управлява и настройва развойния хардуер, създава нови потребители.

Потребителите от ниво “потребител” могат да се използват за студентите. Те се оторизират в системата като въвеждат своя факултетен номер и решават captcha – тест за сигурност. Този тест е широко използван в информатиката, като се смята, че може да бъде издържан само от човек. След успешна оторизация в уеб браузера се зарежда изглед с всички налични към момента развойни платки заедно с техния статус. Те може да са свободни – тогава светят в зелено или заети – тогава светят в червено. Когато една платка е свободна, потребителя може да я избере като щракне с курсора на мишката върху нея (фиг. 2).




***Фиг. 2**. Начален екран след вход от ниво „потребител“*

След избор на свободна платка се зарежда екран, в който потребителят може да прикачи конфигурационен файл за FPGA и да наблюдава в реално време състоянието на избраната развойна платка (фиг. 3). Прикаченият конфигурационен файла се изпраща и зарежда в развойната платка, посредством системата Vivado. На екрана на потребителя се извежда информацията, която Vivado връща в резултат от взаимодействието с развойната платка.

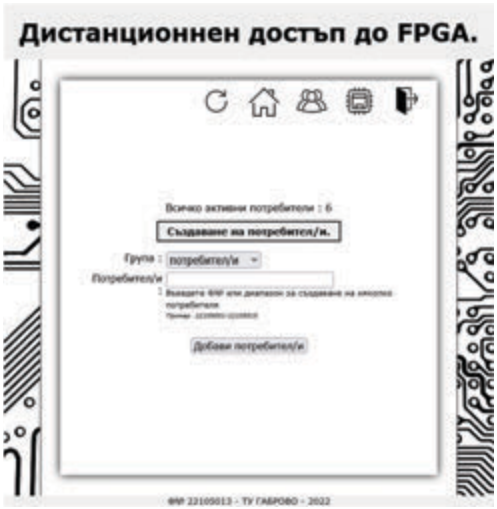
Потребителите от ниво “администратор” могат да се използват за преподавателите. Те също вписват потребителското си име и решават captcha, но след това при вярно решена captcha се зарежда поле, в което трябва да въведат парола за верификация. Различният на-

чин за вход в системата е едно от разграниченията за двата вида потребители.




***Фиг. 3**. Екран на заредена свободна развойна платка*

Потребителите с права на "администратор" имат възможност да добавят, изтриват и настройват нови потребители и развойни платки (фиг. 4 и фиг. 5). Те могат да изтриват генерираната временна информация при работа с развойните платки. Всяка платка може да бъде настроена от администратор на системата по уникален за нея начин. Това позволява в системата да се предостави достъп до различни модели развойни платки, с които да се работи през един и същ потребителски интерфейс.




***Фиг. 4**. Панел за управление на потребителите*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представената разработка на уеб базирана система за отдалечен достъп до FPGA развоен хардуер, отговаря на всички проектни изисквания. За нейното внедряване е необходима компютърна система с операционна система Linux и инсталирана безплатната версия на системата Xilinx Vivado, така че разходите за нейното внедряване ще зависят предимно от разходите за закупуване на компютърната система. За реализиране на желаната функционалност са избрани софтуерни решения с отворен код, което спестява допълнителни финансови средства. Системата е достъпна от различни физически работни места за няколко потребителя едновременно. Тя поддържа различни модели развойни платки. Броят на използваните платки е ограничен от броя USB портове на компютърната система. Същите ограничения важат и за броя на уеб камерите, който се използват за наблюдение на развойните платки. Ако е необходимо увеличаване на броя платки и камери, може да се използват USB разширителни платки или хъбове с допълнително захранване към тях.




***Фиг. 5**. Панел за управление на развойните платки*

Една от насоките за бъдещо развитие на уеб базираната система за отдалечен достъп до FPGA развоен хардуер е усъвършенстването на диалога с потребителя. Необходимо е да се извеждат подходящи съобщения. Например, съобщения които показват, че потребителят трябва да изчака или съобщения с по-подробно описание на събитията в системата. За да придобие цялостен завършен вид, системата трябва да бъде разположена на сървър в лабораторията на територията на катедра КСТ в Технически университет – Габрово. Необходимо е също така да се изгради подходяща конструкция, например от алуминиеви профили, за разполагане на развойните платки и уеб камери, както и да се осигури подходящо осветление с цел поучаване на ясни изображе-

ния от тях. Така оформена, системата може да се интегрира в учебния процес и да подпомага работата на преподаватели и студенти, при дистанционно или присъствено обучение, свързано с проектиране на цифров хардуер.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Този доклад е подготвен и осъществен като част от проект № 2209Е „Виртуална лаборатория за обучение по проектиране на цифров хардуер“, финансиран от средствата по бюджета за научни изследвания на Технически университет – Габрово.

## REFERENCE

[1] Iskra P., A. Muñoz, “Remote, web-based laboratory for Programmable Logic Devices”, in Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Discrete Event Systems Design – DESDes 2009, Oct 2009, Vol. 42, Issue 21, pp 143–148.

[2] Herrero A., I. Elguezábal, M. Vallejo, “A web-based environment providing remote access to FPGA platforms for teaching digital hardware design” in Proceedings of the IADIS International Conference on e-Learning – MCCSIS'08, July 2008, pp. 161–165.

[3] Soares J., J. Lobo, “A Remote FPGA Laboratory for Digital Design Students” in Proceedings of the 7th Portuguese Meeting on Reconfigurable Systems – REC2011, Feb 2011, pp 95–98.

[4] Reichenbach M. et al., “A New Virtual Hardware Laboratory for Remote FPGA Experiments on Real Hardware”, in Proceedings of the 2011 International Conference on e-Learning, e-Business, Enterprise Information Systems, and e-Government – EEE11, July 2011, Vol. 1, pp 17–23.

[5] Ravanasa K., R. Hashemian, “vLab, A High Speed Multi-Accesses Parallel Processing Remote Laboratory Access for FPGA Design Technology”, in Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Electro/Information Technology – EIT2014, June 2014, pp. 377-381.

[6] Fotopoulos V. et al., “Remote FPGA Laboratory Course Development based on an Open Multimodal Laboratory Facility”, in Proceedings of the 19th Panhellenic Conference on Informatics – PCI'15, Oct 2015, pp 447–452.

[7] Torresen J. et al., “Flexible Teaching of Reconfigurable Logic Design Including a Remote Cloud Lab”, in Proceedings of the Sixth International Conference on E-Learning and E-Technologies in Education (ICEEE2017), Sep 2017, pp 18–20.

[8] Mohsen A. et al., “Remote FPGA Lab For ZYNQ and Virtex-7 Kits”, in Proceedings of 2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Aug 2019, pp 185–188.

[9] Mayoz C. et al., “FPGA remote laboratory: experience of a shared laboratory between UPNA and UNIFESP”, in Proceedings of 2020 XIV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE), 2020, pp. 1-8.

[10] Hussein, R., D. Wilson, Remote Versus In-hand Hardware Laboratory in Digital Circuits Courses, Paper presented at 2021 ASEE Virtual Annual Conference Content Access, Virtual Conference, July 2021, https://peer.asee.org/37662.

# MICROSERVICE FOR CREATING GEOFENCES

**Victoria Velkova[1], Rosen Ivanov[2]**

*[1,2]Technical University - Gabrovo, 4 "H. Dimitar", Gabrovo, Bulgaria*
*v.velkova@tugab.bg, rs.soft.bg@gmail.com*

**Abstract**

*This paper presents the architecture and implementation of a microservice for creating geofences and exporting their coordinates in GeoJSON format. The service allows describing geofences in three ways: (1) by a polygon; (2) by a circle with a given center and radius; and (3) by a circle that is approximated by a polygon. The service provides the ability to populate geofences with geo hashes in order to very quickly calculate which geofence the clients of a location-based service fall into. Different levels of accuracy and geohash generation strategies are supported. At this stage, the service exports the geofence information in a format adapted for MongoDB database. Experiments have been conducted for different types of geospatial queries with geofences generated by the proposed service (buildings and open spaces of the Technical University of Gabrovo). The experiments show that all types of queries are executed in real time with active 2dsphere database indexing.*

**Keywords:** Geofencing, Push notification.

## INTRODUCTION

A geofence is a virtual perimeter set as a geographic boundary from the real world [1]. The area of the geofence can be set to form a radius around a specific location or to follow specific geographic contours. Geofencing is mainly used by Location Based Services (LBS) [2]. Through geofencing, it is possible to track when a client or group of clients enter or exit a geofence. User feedback is mainly implemented by sending push notifications to clients' mobile devices.

The most common use of geofencing in 2022 is for location-based marketing and advertising [3]. Geofencing enables the sending of real-time hyperlocal notifications to mobile app users based on their location. A distinction must be made between geotargeting and geofencing. By using geotargeting, advertisers can specify the location around which they want their customers to receive advertising messages. This is mainly implemented by using Bluetooth Low Energy (BLE) beacons [4]. Geofencing allows greater functionality and unlike geotargeting does not require additional hardware for its implementation. Geofencing can be as large as a city or neighborhood, or as small as a building. Geofences can have different shapes - most commonly a circle or polygon.

There are many uses of geofencing, but one of the main benefits is that businesses can get feedback from their customers and use this information in real-time to improve the customer experience. Geofencing allows businesses to narrow down their pool of potential customers to people who visit a specific geographic area. Adapting geofencing into marketing can be an effective tool to not only increase sales, but also improve the customer experience.

Geofencing is a technology that is easily implemented in modern mobile technologies. Statistics for 2022 [5] show that (1) geofencing is compatible with 92% of smartphones in use; (2) mobile ads via geofencing have double the click-through rate; (3) 53% of shoppers have visited a retailer after receiving a push notification from it; and (4) 90% of mobile messages are read within 3 minutes.

Geofencing-based services can use their own mobile app or the geofencing capabilities

of social networks. The social network Facebook provides the ability to set up geofencing around a location with a radius of up to one mile. Instagram allows the generation of polygon-shaped geofences. An additional feature is creating a temporary geofence for a live event. Twitter allows more than one location to be selected for geofencing purposes. It is possible to select an audience that speaks a specific language within a geofence, allowing customization of the ad depending on the language customers speak. Snapchat also supports geofencing, additionally offering geofilters - filters specific to certain areas.

Services that use their own mobile app provide greater functionality. In this case, it relies mainly on cloud services that support geofencing. There are numerous cloud services that support geofencing and segmentation of users. OneSignal [6] is a multiplatform notification service. OneSignal supports segmentation of users based on their GPS position and specific segmentation using custom tags. The problems with OneSignal are basically two: 1) Geospatial segmentation is only a rectangular shaped area; and 2) The number of segments is limited - 6 on the free plan and 20 on the professional plan. The PlotProjects [7] service offers better possibilities related to segmentation of users. The free plan allows defining up to 1000 geofences. With this service, we can describe a geofence in two ways - by a polygon and a circle with a certain radius. Both services do not allow the generation of the geohash signature for geofences. PlotProject allows the use of GPS maps in the creation of geofences, but does not offer an easy way to correct their contour. Exporting the data describing geofences is only possible with a paid plan activated.

The aim of the development is to create a microservice that offers a user interface through which geofences of arbitrary shape can be created quickly and intuitively using GPS maps. The service allows exporting the data in GeoJSON format to a MongoDB database. It is also possible to create and update the database on-line. It is possible to obtain geohashes for each geofence with the accuracy desired by the user.

## DESCRIPTION OF THE SERVICE

The service is implemented as a Node.js microservice. The microservice architecture enables the rapid building of complex programming systems with a high level of reliability. Each microservice works with its own database. The NoSQL database MongoDB in the Azure cloud infrastructure is used. The interface between the microservices and the databases is implemented using the MongoDB App Service (former name Realm). The technology stack that the microservice uses is as follows:

- Node.js - open-source, cross-platform, back-end JavaScript runtime environment that runs on the V8 engine and executes JavaScript code outside a web browser.
- Express - a web framework for Node.js. This framework is used to communicate with the microservice through a browser.
- Realm Web - package for authentication and communication with MongoDB databases using HTTPS protocol.
- Mapbox GL-JS - an open source JavaScript library that uses Mapbox GL to render interactive GPS maps. It is used to describe the contours of geofences.
- Mapbox GL Geocoder – this JavaScript library adds a geocoding control to a GPS map, allowing users to search for objects on the map.
- Turf - JavaScript library for geospatial data analysis and processing.

The service supports a Web interface through which users can very quickly create the geofences they need. Fig. 1 shows the components of the user interface.

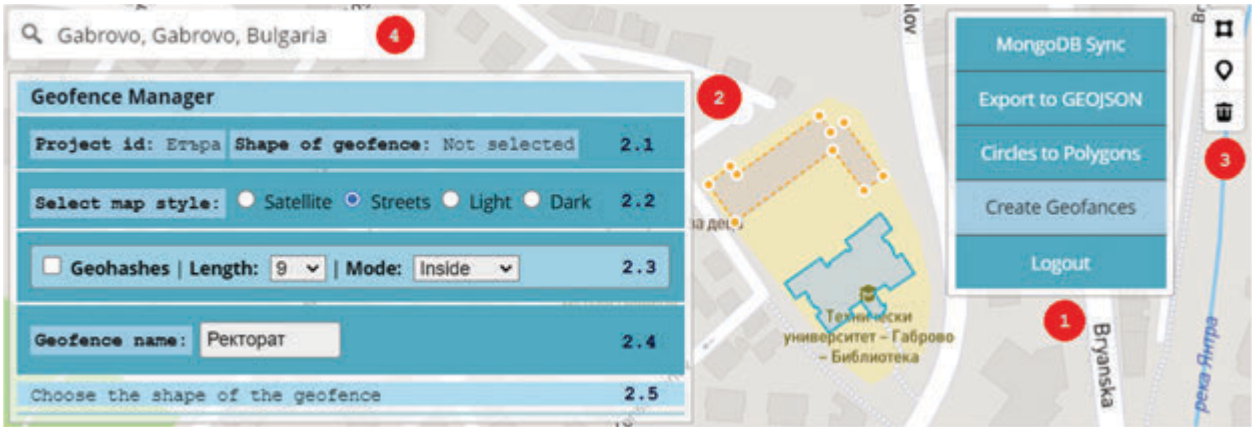
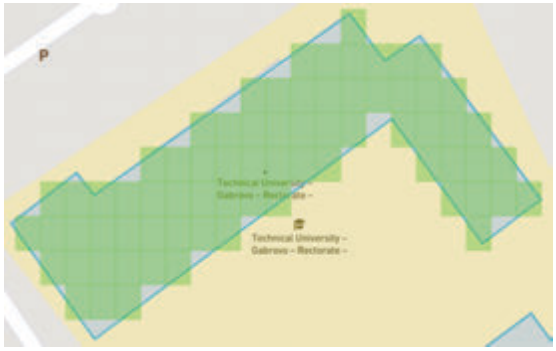



***Fig. 1.*** *User interface of the service*

Access to the service requires authorization. It is implemented through menu 1 (Login). If you want to synchronize in real time the entry, update and deletion of geofences with the database you must select menu item "MongoDB Sync". Some databases do not support working with geofences that are described by circles. In this case, menu item "Circles to Polygons" converts all entered circles to polygons with a specified number of points. The service allows to save the entered geofences to a file in GeoGSON format via menu item "Export to GEOJSON". When you want to start entering geofences select menu item "Create Geofences." In this case, you get access to menu 2 and 3, as well as the search bar for the desired geographical area or object - 4. The search for the desired location is implemented using the Mapbox GL Geocoder.

Using section 2.2 of menu 1 you can set the type of GPS map you want to use. GPS maps from OpenStreetMap and NASA are rendered using the Mapbox GL-JS library. Four GPS map types are supported: satellite, street, light and dark mode. Information about the selected project name and the currently selected geofence shape (polygon or circle) is obtained via section 2.1. Section 2.4 is used to specify the name of a selected geofence. Section 2.5 dynamically obtains information specific to the selected mode of operation, such as GPS coordinates of geofence points or geohash values for a given geofence. Section 2.3 enables the calculation of a geohashes for a selected geofence. A geohash is a string of a certain length that is a unique identifier of a specific geographic region with a rectangular shape. The longer the string, the more accurately the region is described. Points that are in close geographical proximity will have the same geohash. This allows a very quick calculation of whether a point is inside or outside a region. It is possible to choose the precision of the geohash description (length) and the algorithm to fill the geofence with geohashes. The possible fill modes are “inside” and “intersect”. In the “inside” fill mode, the center of each geohash is in the geofence. In “intersect” mode, all geohashes that fall within the geofence or intersect the geofence contour are searched for with a user-specified overlap factor. Fig. 2 shows the filling of a selected geofence with geohashes, as well as their symbolic values.



a)

**Geohashes (72):**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| sxd5bj6cc | sxd5bj69x | sxd5bj6c8 | sxd5bj6c9 | sxd5bj6cd |
| sxd5bj6ce | sxd5bj6cs | sxd5bj69m | sxd5bj69q | sxd5bj69r |
| sxd5bj6c2 | sxd5bj6c3 | sxd5bj6c6 | sxd5bj6c7 | sxd5bj6ck |
| sxd5bj6cm | sxd5bj695 | sxd5bj69h | sxd5bj69j | sxd5bj69n |
| sxd5bj69p | sxd5bj6c0 | sxd5bj6c1 | sxd5bj6c5 | sxd5bj6ch |
| sxd5bj6cj | sxd5bj6cn | sxd5bj68c | sxd5bj68f | sxd5bj68g |
| sxd5bj68u | sxd5bj68v | sxd5bj68y | sxd5bj68z | sxd5bj6bb |
| sxd5bj6bu | sxd5bj6bv | sxd5bj6by | sxd5bj6bz | sxd5bj62t |
| sxd5bj62w | sxd5bj62x | sxd5bj688 | sxd5bj689 | sxd5bj68d |
| sxd5bj68e | sxd5bj68s | sxd5bj68t | sxd5bj68w | sxd5bj6bt |
| sxd5bj6bw | sxd5bj6bx | sxd5bj708 | sxd5bj62k | sxd5bj62m |
| sxd5bj62q | sxd5bj62r | sxd5bj682 | sxd5bj683 | sxd5bj686 |
| sxd5bj687 | sxd5bj68k | sxd5bj6bq | sxd5bj62j | sxd5bj62n |
| sxd5bj62p | sxd5bj680 | sxd5bj681 | sxd5bj684 | sxd5bj4ry |
| sxd5bj4rz | sxd5bj4xb | | | |

b)

***Fig. 2.*** *Geohashing: (a) visual and (b) symbolic representation of geohashes*

The menu 3 can be used to select the shape of the geofence (polygon or circle) or the geofence delete mode. The service allows at any time editing the contour of an already entered geofence - adjusting the position of selected points, as well as entering additional points between any two points. It is allowed to have a geofence within another geofence.

## EXPERIMENTS

In order to test the feasibility of the proposed microservice, a MongoDB database with geofences was created. The geofences describe 11 buildings and one sports ground of the Technical University - Gabrovo. The database was created by importing the GeoJSON file that the proposed service generates. Fig. 3 shows the format in which the geofences are described.

```
{
   "name": "Ректорат",
   "region": {
     "type": "Polygon",
     "coordinates": [[[
        25.315752044161997,
        42.87559546661549],...
     ]]]
   }
}
```

***Fig. 3.*** *Geofence in GeoJSON format*

The MongoDB database provides multiple operators for working with geospatial queries, for example:

- $geoWithin - check if a GPS location (client position) is in geofence.
- $geoIntersect - check if a GPS location or area (polygon) is in a geofence or has intersections with a geofence.
- $near - check if a GPS location near each of the geofences without considering the Earth's radius.
- $nearSphere - check if a GPS location near each of the geofences considering the Earth's radius.
- $geoNear - content aggregation operator - checks if a GPS location near each of the geofences and returns the distance to nearby geofences.

The $near and $nearSpere geo operators require a 2dsphere index to be set for the database.

| Collection Name | Documents | Logical Data Size |
|---|---|---|
| students-100 | 100 | 18.85KB |
| students-1000 | 1000 | 188.48KB |
| students-10000 | 10000 | 1.84MB |
| students-200 | 200 | 37.7KB |
| students-2000 | 2000 | 376.95KB |
| students-50 | 50 | 9.42KB |
| students-500 | 500 | 94.24KB |
| students-5000 | 5000 | 942.38KB |

***Fig. 4.*** *Sample service client databases*

The $geoWithin and $geoIntersect operators can work with and without indexing. To test the runtime of these operators, eight databases were created that contain information about clients, including their GPS locations. The databases differ only in the number of clients (from 50 to 10000), as shown in Fig. 4.

```
{
 "location": {
  $geoIntersects: {
   $geometry: {
    "type": "Polygon",
    "coordinates": [[
      [longitude,latitude],
      ...
     ]]
   }
  }
 }
}
```

```
{
 "region": {
  $near: {
   $geometry: {
    "type": "Point",
    "coordinates":
       [longitude,latitude]
   },
   $minDistance: 0,$maxDistance: 20
  }
 }
}
```

***Fig. 5.*** *Database query syntax: $geoIntersect ($geoWithin) and $near*

The position of the clients (students) is randomly generated to fall within the region of Technical University - Gabrovo.

Fig. 5 shows the format of the tested geospatial queries. The operators $geoWithin and $geoIntersect are used to test the time it takes to compute which clients are in a geofence specified using the $geometry operator. The $near operator is used to check which geofences are close (20 m) to the specified client whose position is specified by GPS location (longitude, latitude).

The response time for all geospatial queries was below 1ms, regardless of the number of clients in the students-xxxxx databases. The analysis was implemented using the MongoDB Compass app and Explain Plan tool. The reason for these very good results is that MongoDB uses internal geohasing for geofences and client positions when 2dshrere indexing is enabled.

A Node.js application was developed (see Fig. 6) that displays the position of all clients that are in a given geofence. The aim is to estimate the response time while considering the time delay in the communication channels. Experiments show that with active 5G network connectivity this time is below 290ms (195ms on average). The reason for this delay is the use of MongoDB App Service (Realm) to access the MongoDB databases.

## CONCLUSION

A microservice has been developed to graphically describe geofences using polygons and circles. The geofence information can be exported as a GeoJSON file or directly saved to a MongoDB database. The service allows editing of already entered geofences by moving and deleting contour points or entering new points. The microservice is part of a service for delivering personalized content to visitors of open-air museums [8]. The architecture of the microservice allows it to be easily integrated to other projects that use geofencing in order to deliver personalized content and improve the customer experience. In the future, it is planned to enable the export of geofences in a format specific to other databases that support geospatial queries.




***Fig. 6.*** *Visualization of the geofences (green) and the position of the clients that are in geofences (red dots)*

## REFERENCES


[1] Statler, S. Geofencing: Everything you need to know. In Beacon Technologies (pp. 307-316). Apress, Berkeley, CA, 2016.

[2] Rahate, S. W., & Shaikh, M. Z., Geo-fencing infrastructure: Location based service. International Research Journal of Engineering and Technology, 3(11), 1095-1098, 2016.

[3] Ho, Y. J. I., Chen, X. O., Mao, S., Catch Me If You Can! The Economic Analysis of Geofencing, 2022.

[4] Alzoubi, H., Alshurideh, M., Kurdi, B., Akour, I., & Aziz, R., Does BLE technology contribute towards improving marketing strategies, customers' satisfaction and loyalty? The role of open innovation. International Journal of Data and Network Science, 6(2), 449-460, 2022.

[5] Plotprojects. What is Geofencing Marketing? How to Add it to Your Strategy, Oct. 1, 2022, from https://www.plotprojects.com/blog/what-is-geofencing-marketing-how-to-add-it-to-your-strategy/

[6] OneSignal, OneSignal - Customer Messaging Delivered, https://onesignal.com, Oct. 2022.

[7] PlotProjects, The best geofencing software plugin for mobile apps. https://www.plotprojects.com, Oct. 2022.

[8] Ivanov, R., Velkova, V., Delivering personalized content to open-air museum visitors using geofencing, Int. Conference Digital Presentation and Preservation of Cultural and Scientific Heritage, Vol. 12, pp. 141-150, 2022.


## Acknowledgements


This research has been partially funded by Bulgarian Ministry of Education and Science, project №2003E and project №2009E.

# МОДЕЛИРАНЕ НА ДИАЛОГА В СИСТЕМИТЕ ЗА АВТОМАТИЗИРАНО ПРОЕКТИРАНЕ

**В. Кукенска[1], П. Минев[1], И. Върбов[1], М. Динев[1]**

*[1] Технически Университет - Габрово*

# MODELING DIALOGUE IN AUTOMATED DESIGN SYSTEMS

**V. Kukenska[1], P. Minev[1], I. Varbov[1], M. Dinev[1]**

*[1] Technical University - Gabrovo*

**Abstract**

*The dialog in automated design systems for is carried out in real-time mode and provides a solution to a specific design task. Its main parameters are its structure and condition. Modeling the structure of dialogue allows to examine and compare different types of dialogue, defining areas of application and optimizing the dialogue process. The model of human-computer dialogue is considered as a set of models of its structure, state and scenario.*

*This paper aims to present the models created for the different forms of dialog interfaces in automated design systems.*

**Keywords:** model, modeling, dialog interfaces, graphs, state machines

## ВЪВЕДЕНИЕ

В системите за автоматизирано проектиране се използват различни форми на диалогови интерфейси. Тези форми най-често са алтернативна, сценарийна и директивна.

При алтернативната форма диалогът е организиран като функционални менюта за алтернативен избор от потребителя при всеки от етапите на автоматизираното проектиране.

При избор на операции по меню предложенията на системата представляват списък от фрази или думи и съкращения на естествен език, обозначаващи операциите. Управлението на диалога се извършва от системата.

Сценарийна форма на диалог е предназначена за потребители, които все още нямат изградени навици за практическа работа със системите за автоматизирано проектиране. При тази форма на диалог системата изисква от потребителя въвеждане на необходимите данни, указва техния формат, извежда върху екрана съобщения за грешки и предлага на потребителя да се възползва от помощна информация.

Директивната форма е предназначена за компетентни, опитни потребители, които добре познават възможностите на системата и езика за описание на данните, и имат опит при решение на приложни задачи. Основното предимство на тази форма е възможността за гъвкаво взаимодействие в процеса на диалога и значително намаляване броя на диалоговите контакти между човека и компютъра при търсене на оптимално проектно решение. Инициатор на диалога в този случай се явява човекът. Той задава команди по определен формат и в определена последователност. Потребителят сам определя темпа на взаимодействие и променя хода на процеса в желаното от него направление.

Обект на този доклад е диалогът в системите за автоматизирано проектиране. Диалогът се осъществява в режим на реално време и осигурява решение на конкретна задача за проектиране. Негови основни параметри са структурата и състоянието му.

Моделирането на структурата на диалога позволява да се изследват и съпоставят различните видове диалог, като се определят области на приложение и се оптимизира диалоговия процес. Моделът на диалога се разглежда като съвкупност от модели на структурата, състоянието и сценария му.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Основни параметри на диалога „човек – компютър“ се явяват структурата и състоянието му.

Структурата на диалога е свързана съвкупност от състояния на диалога, получени от общуването на потребителя с диалоговата система.

Състоянието на диалога се определя от три компонента:

- Използваната форма на диалог;
- Достигнатата в системата ситуация;
- Предисторията на диалога.

Предисторията на диалога се определя от последователността на диалоговия обмен до достигната в момента ситуация.

Структурата на диалога „човек – компютър“ обхваща всички възможни състояния на диалоговата система и схемата на възможните преходи между тях.

Структурата на диалога намира най-пълно отражение в сценария на диалога. Сценарий на диалога се нарича пълното описание на структурата и съдържанието на диалога.

Структурата на диалога може да се разглежда и като съвкупност от единични диалогови контакти и възможни преходи между тях. Диалогови контакти се наричат достъпните позиции за потребителя, от които той може да посочи изпълнението на определени процедури или директиви. На всеки диалогов контакт съответства екранен кадър от диалога.

Екранният кадър на диалога се разглежда като формат на съобщението, получено в даден момент на монитора. Кадрите имат фиксирана или променяща се структура. Самите съобщения са организирани като меню или като въпроси и отговори. В кадрите може да се включва помощна информация за потребителите.

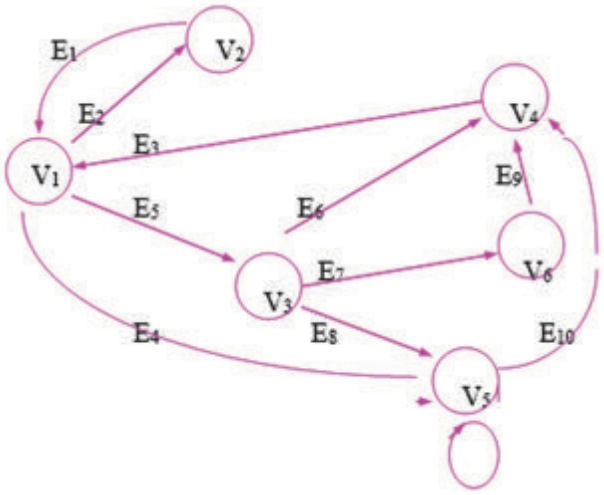
Решението на конкретна проектна задача или подзадача може да се разглежда като диалогова процедура. Диалоговата процедура представлява алгоритмична последователност от диалогови контакти и преходи между тях.

Моделът на диалога „човек-компютър“ се разглежда като съвкупност от модели на структурата, състоянието и сценария му.

Задачата за моделиране на структурата на диалога може да се формализира като се използват теорията на множествата и теорията на графите.

По определение всеки граф G(V(G),E(G)) представлява съвкупност от две множества V(G) и E(G), където V(G) е непразно множеството на върховете, а E(G) - множеството на ребрата.

Ако на множеството на върховете се съпостави множеството на диалоговите контакти, а на множеството на ребрата - множеството на връзките между диалоговите контакти, то графът G(V,E) е графично представяне на структурата на диалога (фиг. 1).




***Фиг. 1.*** *Представяне на структурата на диалога чрез граф*

Върховете на графа G (фиг. 1) са точките за диалогови контакти. На всеки връх (диалогов контакт) съответства екранен кадър от диалога.

Ребрата са разрешените връзки между диалоговите контакти.

На всяка диалогова процедура съответства един маршрут в графа G. Маршрут в графа G се нарича крайна последователност от ребра от вида $\{V_0,V_1\}$, $\{V_1,V_2\}$ ,..., $\{V_{m-1}, V_m\}$ и се означава така:

$$V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow \ldots \rightarrow V_m \quad (1)$$

На всеки маршрут съответства последователност от върхове $V_0, V_1, V_2, \ldots V_m$, където $V_0$ е начален, а $V_m$ е краен връх на маршрута. Върховете в маршрута могат да се повтарят.

Броят на ребрата на всеки маршрут определя дължина му.

За моделиране на сценария и състоянието на диалога е удачно да се използва теорията на крайните автомати поради аналогията между поведението на крайните автомати и промяната на състоянието на диалога.

При използване теорията на крайните автомати сценария на диалога може да се представи със следния модел,

$$D = <S , A , C , Y , G , I , \Omega > , \quad (2)$$

където:

G- структура на диалога (графа на диалога);

S - множество на състоянията;

A - множество на операциите;

C - множество на условията;

X - множество входни съобщения (въпроси);

F - множество програмни условия;

Y - множество на изходни съобщения (реакции).

$$C = X \cup F \quad (3)$$

$$G : S \times C \rightarrow S \quad (4)$$

Сценарият на диалога освен описание на структурата включва в себе си и информационния и операционен модел на диалога.

Информационният модел може да се представим със следния запис,

$$I: \begin{vmatrix} S \rightarrow Y \\ S \times C \rightarrow R , \end{vmatrix} \quad (5)$$

а операционният модел - със следния запис:

$$\Omega: \begin{vmatrix} S \rightarrow A \\ S \times C \rightarrow A \end{vmatrix} \quad (6)$$

Информационният модел на диалога включва множество входни въздействия (сигнали, съобщения) X, множество на изходните реакция Y и множеството на състоянията S.

Ако се представи прехода от едно състояние в друго, както и връзката между входните и изходни съобщения като система на въздействието на крайни автомати от вида:

$$A = A ( \{S\}, \{X\}, \{Y\}, Fy , Fs ), \quad (7)$$

То, задачата за определяне на състоянието на диалога A се свежда до задача за определяне на функциите Fs и Fy, където:

{X}={X1, X2, ... ,Xl } е множество от входни съобщения (реплики) на човека (компютъра);

{Y}={Y1,Y2, ... ,Ym} е множество на изходните съобщения (реплики) на компютъра (човека);

{S}={S0,S1,..., Sn} е множество на състоянията.

S0 е началното състояние на автомата, което съответства на началното състояние на диалога.

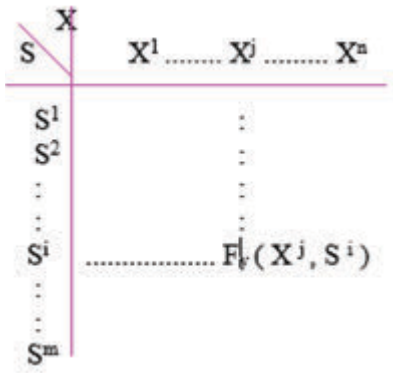
Fy е функция на изходните съобщения,

$$F_y : \{ S \} \times \{ X \} \rightarrow \{ Y \} \quad (8)$$

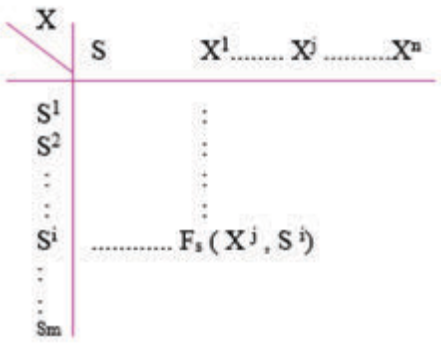
Fs е функция на преходите и се определя така:

$$F_s : \{ S \} \times \{ X \} \rightarrow \{ S \} \quad (9)$$

Функциите Fs и Fy могат да се задават таблично и това е отразено на фиг. 2 а,б.




а)



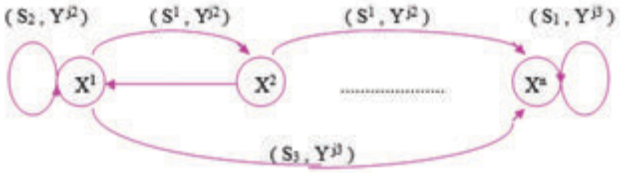

б)

***Фиг. 2.*** *Таблици на преходните функции на автоматите*

Тези таблици могат да се представят и като една. В този случай елемента, получен при пресичане на i-тия ред с j-тия стълб ще бъде:

(Fs(Sj,Xi), Fy(Sj,Xi)) (10)

Задаването на функциите Fy и Fs може да се извърши и чрез диаграмите на Мур (фиг. 3).



***Фиг. 3.*** *Диаграма на Мур на преходите на автоматите*

Диаграмите на Мур се построяват по следния начин: Върху работното поле се разполагат n кръга, които съответстват на възможните състояния на диалога. Във всеки кръг се записва означението на съответстващото му състояние. Преходите между състоянията се означават с насочени ребра. При това всеки преход, който излиза от кръга на състоянието Xi, i=1, m взаимно еднозначно съответства на елемент от множеството Xk, ако Yi=Fs(Xi,Sj).

Състоянието на диалога A се изменя във времето t. Тази промяната се представя със следния математически модел:

Yt = Fy ( Xt , St ) (11)

St-1 = Fs (Xt , St ) (12)

В общия случай при прехода на автомата A от състояние St в състояние St+1, което съответства на промяната на диалога в интервала време (t,t+1), се изменя и натрупва нова информация за обекта на проектиране. Ето защо е удобно в качеството на входно въздействие да се използва съобщението (репликата) на човека - оператор Xt. То (тя) от своя страна променя информацията за обекта и спомага за формирането на изходна реакция на системата в качеството на изходно съобщение Yt. Диалоговата система "човек - компютър" предава съобщението Yt на монитора и чака реакцията на оператора Xt+1.

Ако е определено началното състояние на автомата, т.е. определена е стартовата точка на диалога "човек-компютър", то информационния модел на диалога се представя със следния израз:

As = A ( { S }, { X }, { Y }, Fy, Fs, S0 ) (13)

И ако функционирането на автомата се зададе с отношението (14),

Fs ={( Xl,Fs(S,Xl),Fy(S,Xl)):Xl X,l=1,2,..}, (14)

то промяната на състоянието на диалога "човек-компютър" може да се представи със следната система уравнения:

S(1) = S0
S(t+1) = Fs(S(t),X(t)) (15)
Y(t) = Fy(S(t),X(t)), t = 1,..,m

При така предложения математически апарат задачата за построяването на математическия модел на диалоговия процес се разглежда като задача за определяне на графа на състоянието G(V,E), множествата {X}, {Y} и {S}, функциите Fy и Fs и съответствието S→K, където {K} е комплекса от знания за обекта или за предметната област.

Ако всички множества и обекти са определени, то може да се твърди, че и математическия модел на диалоговия процес е определен.

Предимството на използването на теорията на крайните автомати при моделиране на диалоговия процес се определя от възможността за проектиране на йерархични интерфейси в системите за автоматизирано проектиране. Например, някои състояния на автомата могат да се разглеждат като подавтомати, които имат своите крайни множества от състояния, входни въздействия и изходни реакции.

Този модел е удобен и отразява точно сценарийната форма на диалога, която предварително е известна.

Ако развитието на диалоговия процес не е известно предварително, както е при алтернативната и директивна форми на диалог, то е необходимо прогнозиране на поведението на автомата с цел регулиране и управление на диалоговия процес. При моделиране с крайни автомати задачата за прогнозиране на развитието на диалога се привежда към задача за предсказване на поведението на автомата. За целта е необходимо да са известни множествата на входните съобщения {X} = { X1,X2,..., Xl}, функциите Fy, Fs и началното състояние на автомата S0.

За моделиране на алтернативната форма на диалог е удобно да се използват абстрактни крайни автомати.

Нека абстрактният краен автомат A=(X,S,Y,Fy,Fs) е автомат с r входа и v изхода, което съответства на r възможни отговора (реплики) на човека (компютъра) в дадено състояние на диалога и v възможни отговора на компютъра (човека). И нека

$$X= X_1 \times X_2 \times ... \times X_r \quad (16)$$

$$S = S_1 \times S_2 \times ... \times S_q \quad (17)$$

$$Y= Y_1 \times Y_2 \times ... \times Y_v \quad (18)$$

са декартови произведения на съответните множества X={X1, X2, ...,Xl}, S={S1, S2,...,Sq}, Y={Y1,Y2,...,Yv}.

Ако S'=Fs(S,X), Y'=Fy(S,X), S'=(S'1,...,S'q), Y'=(Y'1,...,Y'v) са известни, то функциите Fs1,...,Fsq и Fy1,...,Fyv могат да се представят така:

$$S'1 = Fs1 (S1,....Sq, X1,....Xr) \quad (19)$$

……..

S'q = Fsq (S1,...,Sq, X1,...,Xr)

Y'1 = Fy1 (S1,...,Sq, X1,...,Xr)

.....

$$Y'v = Fyv (S1,...,Sq, X1,...,Xr) \quad (20)$$

Следователно задачата за определяне на функциите Fs и Fy се свежда до задача за определяне на функциите Fs1,...,Fsq и Fy1,...,Fyv.

Ако началното състояние на диалога "човек- компютър" е известно, то състоянието на диалога в даден момент от време може да се представи със следната система уравнения:

S1(1) = S q0 = S01, ... ,Sq(1)

S1(t+1) = Fs1(S1(t), ... ,Sq(t),X1(t),...,Xl(t))

……..

Sq(t+1) = Fsq(S1(t), ... ,Sq(t),X1(t),...,Xl(t))

Y1(t) = Fy1(S1(t), ... ,Sq(t),X1(t), ... ,Xl(t))

.....

Yv(t) = Fyv(S1(t), ... ,Sq(t),X1(t), ... ,Xl(t))

Представеният математически модел отразява алтернативната и алтернативно – сценарийната форми на диалог.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Използването на теорията на графите и теорията на множествата позволява привеждането на задачата за моделиране на структурата на диалога към решаване на оптимални задачи от теория на графите.

Приложението на теорията на крайните автомати позволява да се построи математически модел на сценария и състоянието на различните форми на диалоговото взаимодействие.

Представеният математички модел на диалога позволява да се управлява диалоговото взаимодействие, както и да се реализира гъвкав и адаптивен интерфейс в системите за автоматизирано проектиране.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящият документ е изготвен с финансовата помощ на договор № 2209Е за провеждане на научни изследвания по проект на тема: „Виртуална лаборатория за обучение по проектиране на цифров хардуер“ към Технически университет – Габрово.

## REFERENCE

[1] Swamy M., K. Thulasirman, Graphs, Networksand Algorithms, Moskow,1984.

[2] Bojcheva Svetla, S. Toleva, Discrete Mathematics, Siela, 2018.

[2] Rosen K., Discrete Mathematics and Its Application, NewYork, 2012.

[4] Manev K., Algorithms in graphs, Library i ++, KLMN, Sofia, 2013.

# CONTROLLER FOR ULTRASONIC MEASUREMENT OF WIND SPEED AND DIRECTION

# КОНТРОЛЕР ЗА УЛТРАЗВУКОВО ИЗМЕРВАНЕ НА СКОРОСТ И ПОСОКА НА ВЯТЪРА

**Hristo Kilifarev**[1]

[1] *Technical University of Gabrovo*
*hri.100@gmail.com*

**Abstract**

*The subject of the present work is the development of a controller for measuring wind speed and direction with a four-arm ultrasonic anemometer based on an Arduino platform and ultrasonic distance measurement modules. The aim of the development is the study of the possibility, through the use of relatively cheap components in the system, to implement the functionality of an ultrasonic anemometer with an LCD to display the measurement data. The results of the work could be used for educational purposes as well as a development base in the creation of future developments of similar devices.*

**Keywords:** controller, acoustic anemometer, ultrasonic sensors, measurement of wind speed and direction.

## ВЪВЕДЕНИЕ

За бита на човека както и за изследвания в по-широк аспект е нужно да бъдат измервани само някой от основните климатични елементи. С най-голямо значение са: температура на въздуха, атмосферно налягане, относителна влажност на въздуха, скоростта и посока на вятъра.

Уредите за измерване скоростта и посоката на вятъра се наричат анемометри. Най-общо се разделят на два вида в зависимост дали измерват скоростта или посоката на вятъра, но двата показателя са взаимно свързани.

Според исторически сведения, първият анемометър е създаден през петнадесети век от италианския архитект Леон Батиста Алберти. През изминалите векове, конструкцията им е претърпяла сериозно развитие, разработени са различни видове. Значително е подобрена и точността им.

Конструкцията на анемометъра се състои от три основни части – приемно устройство, вторичен преобразувател и отчитащо устройство.

Приемното устройство е познато още като чувствителен елемент на анемометъра или първичен преобразовател. Вторичният преобразовател представлява механичен, пневматичен или електронен блок, който, преобразува, усилва и предава деформацията на чувствителния елемент към отчитащото устройство. Последното обикновено е във вид на скала, индикатор или дисплей, върху които лесно могат да бъдат отчетени получените резултати.

Групата на анемометрите включва различни като конструкция уреди, които могат да се класифицират на основата на различи признаци. Най-често се систематизират в пет основни групи - механични, манометрични, акустични, оптични и термоанемометри.

Към групата на механичните анемометри се отнасят уреди, работата на които се базира на аеродинамичните сили, възникващи при обтичане на тела със специфична форма с въздушен поток. Сред най-често използваните уреди от тази група са чашковите и крилчатите анемометри.

Манометричните прибори измерват динамичното налягане, което въздушен поток оказва върху течност в специална тръбичка.

Към групата на акустичните анемометри се включват уреди, използващи зависимостта между скоростта на звука и скоростта на въздушния поток.

Работата на оптичните анемометри се основава на т.нар. ефект на Доплер.

При термоанемометрите измерването на скоростта се базира на промените в температурата на нагрято тяло, зависещи от скоростта на обтичащия го въздушен поток.

Ултразвуковите анемометри са разработени за първи път през 50-те години. Те измерват едновременно скоростта на въздушния поток и посоката му, на базата на разпространението на ултразвукови вълни в него.

За определяне на скоростта на вятъра с помощта на звукови вълни при ултразвуков анемометър се използват 3 типа методи, а именно метод на времевата разлика, методът на фазова разлика и методът на Доплер. Най-използваният метод е методът за разлика във времето, защото има сравнително по-лесно реализиране от другите методи. При измерванията с помощта на методът на времевата разлика изчисляването на скоростта на вятъра е базирано на измереното време на полет на звуковите вълни между двойки преобразуватели.



***Фиг. 1.*** *2D и 3D акустични анемометри*

За тази цел анемометърът е оборудван с двойки ултразвукови преобразуватели, разположени едни срещу други. Последователно, всеки преобразовател излъчва ултразвуков сигнал, през въздушния поток с посока към срещуположния преобразувател. Ако посоките на потока и ултразвуковия сигнал съвпадат, сигналът ще премине разстоянието от излъчващия до приемащия преобразовател по-бързо. Съответно, ако потокът има противоположна на сигнала посока, времето ще е по-голямо. Чрез пресмятане на времето, необходимо на звуковия сигнал да достигне до срещуположния преобразовател се определя скоростта на потока. Посоката на въздушния поток се определя в зависимост от ъгъла, под който той пресича ултразвуковите вълни.

Измерванията от двойки преобразуватели могат да се комбинират, за да се получи измерване на скоростта на потока в 1-, 2- или 3-измерното пространство. Разделителната способност в пространството се определя от дължината на пътя между преобразувателите, която обикновено е 10 до 20 см.

Ултразвуковите анемометри могат да правят измервания с много фина времева резолюция - 20 Hz или повече, което ги прави подходящи за измервания при турбуленция на въздушния поток, където те запазват оптималните си експлоатационни характеристики.

Липсата на движещи се части ги прави подходящи за дългосрочна употреба в открити автоматизирани метеорологични станции, метеорологични шамандури, корабна навигация, авиация и вятърни турбини, където точността и надеждността на традиционните анемометри с чаши и лопатки се влияят неблагоприятно от соления въздух или праха.

Недостатък е високата им цена, съчетана със сложни схемни решения, поради което се употребяват при отговорни измервания. Основен недостатък е също изкривяването на въздушния поток от конструкцията, поддържаща преобразувателите, което изисква корекции на резултатите, въз основа на измервания в аеродинамични тунели, за да се сведе до минимум ефекта.

Тъй като скоростта на звука варира в зависимост от температурата и е практически стабилна при промяна на налягането, ултразвуковите анемометри също се използват като термометри.

Двуизмерните (2D) акустични сензори за вятър са два вида:

- С две ултразвукови пътеки: Тези сензори имат четири рамена. Недостатъкът на този тип сензор е, че когато вятърът идва в посока на ултразвукова пътека, раменете нарушават въздушния поток, намалявайки точността на полученото измерване;
- С три ултразвукови пътеки: Тези сензори имат три рамена. Те дават излишък на измерване по един път, което подобрява точността на сензора и намалява аеродинамичната турбулентност.

**Обект на настоящата работа е разработване на контролер за измерване на скоростта и посоката на вятъра с четирираменен ултразвуков анемометър, базиран на Arduino платформа и ултразвукови модули за измерване на разстояние.**

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### *Теоретични основи*

Същността на метода за измерване на скоростта на вятъра е да се измерва транзитното забавяне на ултразвукови вълни (импулси) от предавателя до приемника, които са разположени на определено разстояние един от друг. При известно константно разстояние между сензорите е лесно да се изчисли скоростта на разпространение на сигнала. Тогава истинската скорост на вятъра ще бъде равна на разликата между референтната проектна скорост и измерената. Знакът ще покаже посоката на вятъра.

За сух въздух скоростта на разпространение на звука $c_{\text{dryair}}$ може да бъде пресметната чрез следната зависимост (1) [1]:

$$c_{\text{dry air}} \approx 331.4 + 0.6T_c \ [m/s] , \qquad (1)$$

където $T_c$ е температурата на въздуха в ºC. За опростяване на зависимост (1) в нея са игнорирани зависимостите на скоростта на звука от относителната влажност на въздуха, газовия състав на въздуха и атмосферното налягане. Най-значимо влияние върху скоростта на звука имат температурата на въздуха и газовият му състав, относителната влажност има около един порядък по-ниско влияние като при по-сух въздух скоростта е по-ниска, а влиянието на атмосферното налягане може да се пренебрегне (за обхвата на обитаемите надморски височини то е приблизително еднакво). Газовият състав на въздуха може също да се игнорира като фактор, ако съотношението на газовия микс се запази постоянно.

Изминатият път от ултразвуковите вълни може да се пресметне чрез (2), когато посоката му съвпада с тази на разпространение на ултразвуковите вълни във въздуха, тъй като скоростта им се сумира с тази на вятъра:

$$S = Tof\,(c + V) , \qquad (2)$$

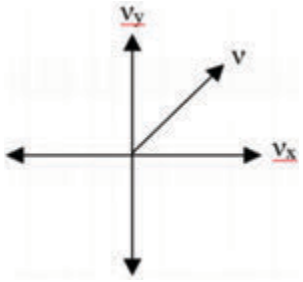
където $S$ е разстоянието между предавателя и приемника, $c$ е скоростта на звуковите вълни, $Tof$ е времето на движение на ултразвуковата вълна от излъчвателя до приемника и $V$ е скоростта на вятъра.

Тогава за пресмятане на скоростта на вятъра, може да се използва формула (3):

$$V = S / Tof - c \qquad (3)$$

При известна температура на въздуха, $c$ и $S$ са известни, така че $V$ зависи само от $Tof$.

Посоката на вятъра може да се представи като вектор $V$, ориентиран под определен ъгъл спрямо координатната система, в която са разположени рамената на анемометъра (фиг. 2).




***Фиг. 2.*** *Посока на вятъра в координатната система на 2D анемометъра*

Анемометрите се ориентират спрямо основните световни посоки на компаса – например Изток по ос +X и Север по ос +Y.

Дължината на вектора в посоката на вятъра представлява неговата скорост $V$, която може да се пресметне като векторна сума от съставните му компоненти по осите $X$ и $Y$ – съответно $Vx$ и $Vy$ (4):

$$\vec{v} = \overrightarrow{v_x} + \overrightarrow{v_y} , \qquad (4)$$

която се пресмята чрез (5):

$$v = \sqrt{{v_x}^2 + {v_y}^2} . \qquad (5)$$

Векторът може да попадне във всеки от квадрантите на координатната система, важно за изчисленията е да се отчита посоката на вятъра винаги с положителен знак, т.е. като число по-голямо от скоростта на звука $c$.

Например ако посоката на вятъра е към Юг (-Y), тогава ако се измерят скоростите на разпространение на ултразвуковите вълн-

ни в посока от Север към Юг и обратно, ще се окаже, че първата е равна на $c+Vy$, а втората ще бъде равна на $c-Vy$.

Ъгълът на завъртане $\theta$ на векторът за посоката на вятъра може да се изчисли като се използва функция аркустангенс от отношението между компонентите на вектора на скоростта по осите Y и X (6):

$$\theta = tan^{-1}(\frac{v_y}{v_x}) \quad (6)$$

Полученият ъгъл на завъртане θ е между -180º и 180º. При добавяне към основните четири посоки на компаса също и междинните им посоки (общо осем посоки през 45º) и се приеме, че около всяка отчитана посока има толеранс от ± 22,5º, тогава се получават резултатите, представени в таблица 1.

***Табл. 1.*** *Връзка на изчисления ъгъл $\theta$ с посоката на вятъра при толеранс от ±22,5º*

| **Ъгъл** | **Посока** |
|---|---|
| $-22,5 < \theta < 22,5$ | Север |
| $22,5 < \theta < 67,5$ | Североизток |
| $67,5 < \theta < 112,5$ | Изток |
| $112,5 < \theta < 170$ | Югоизток |
| $-180 < \theta < -157,5$ или $157,5 < \theta < 180$ | Юг |
| $-170 < \theta < -112,5$ | Югозапад |
| $-112,5 < \theta < -67,5$ | Запад |
| $-67,5 < \theta < -22,5$ | Северозапад |

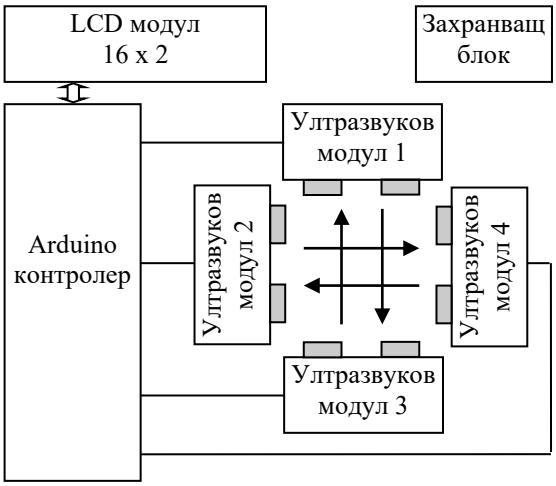
За да се пресметне скоростта на звука във въздуха $c$ в израз (1) е нужно да е известна температурата на въздуха $Tc$. Тя може да се измери с помощта на допълнителен сензор в системата, но може също да се изчисли с помощта на същия израз, ако е известно $Tof$ – времето за движение на ултразвуковата вълна от излъчвателя до приемника при известно разстояние между тях.

Без значение от текущите посока и скорост на вятъра, ако се сумират измерените стойности за време на движение по четирите основни посоки на анемометъра в един и същ момент от времето и се раздели на 4, ще се изчисли осреднената стойност за $Tof_m$, която е равна на скоростта на звука при нулева скорост на вятъра. Тази стойност се използва в израз (7), който се получава от заместването на израз (1) в (3) при $V$=0, за изчисляването на текущата температура на въздуха $Tc$:

$$Tc = (S / Tof_m - 331.4)/ 0.6 \quad (7)$$

***Проектиране и хардуерна реализация***

На фиг. 3 е представена функционална блокова схема на ултразвуковия анемометър.




***Фиг. 3.*** *Функционална блокова схема на 2D анемометъра*

Измерването на $Tof$ може да се извърши с готов модул за измерване на разстояние като HC-SR04 [2], който има достъпна цена и е лесен за използване.



***Фиг. 4.*** *Ултразвуков модул за измерване на разстояние HC-SR04*

Сензорният модул HC-SR04 е базиран на ултразвукови пиезоелектрични сензори (излъчвател и приемник), работещи на 40kHz. Разполага с локален генератор и драйвер за подаване на възбудителни сигнали към излъчвателя, а също така има аналогов усилвател, свързан към приемника и детектор-интегратор на изхода му. За работа с модула е нужно да се подаде стартов импулс към него с продължителност от 10 μs, при което той генерира пакет от 8 на брой възбудителни импулси към излъчвателя в

модула и се излъчват ултразвукови вълни, като в същия момент се стартира вътрешен таймер. При приемане на отразения пакет ултразвукови вълни от приемника в модула и преобразуването им в аналогов електрически сигнал, следва усилване, детектиране и натрупване като постоянно напрежение в интегратор. След достигане на зададен праг на напрежението в интегратора, вътрешния таймер спира и на изхода на модула се извежда правоъгълен импулс с определена продължителност (между 150 µs и 25 ms; 38 ms ако не е получен входен сигнал), която е точно толкова време, колкото е било времето за полет на ултразвуковата вълна – времето от подаване на стартиращия импулс до получаването на отразената вълна (ехото), отчетено от вътрешния таймер в модула.

По принцип модула HC-SR04 е предназначен за измерване на разстоянието до отразяваща повърхност пред него – измереното време за полет е от модула до отразяващата повърхност и обратно (в двете посоки).

В конкретната разработка на анемометър сензорните модули са разположени по двойки един срещу друг, като разстоянието между тях е 20 cm. За измерването на *Tof* във всяка от четирите основни посоки ще се комбинират сигналите за изпращане и приемане на срещулежащите модули по следния начин:

- когато Модул 1 (Север) излъчва, тогава Модул 3 (Юг) ще приема;
- когато Модул 3 (Юг) излъчва, тогава Модул 1 (Север) ще приема;
- когато Модул 2 (Запад) излъчва, тогава Модул 4 (Изток) ще приема;
- когато Модул 4 (Изток) излъчва, тогава Модул 2 (Запад) ще приема.

За извеждане на измерванията от анемометъра е избрано да се използва стандартен двуредов LCD модул с 16 символа на ред. За спестяване на необходимите изводи за управление от микроконтролера ще се използва специализиран модул за конвертиране към I2C комуникация (фиг. 5).




***Фиг. 5.*** *LCD 16x2 модул с I2C преобразувател*

За реализацията на анемометъра може да се избере всякакъв микроконтролер с достатъчно функционални възможности, но за улесняване на задачата е избрано да се работи с Arduino платформа, която има различни версии на хардуерно изпълнение, различни разширителни модули, развойна среда Arduino IDE с програмен език, подобен на C++ и богата поддръжка с готови библиотеки за работа с различни периферни устройства, сензори и интерфейси. Тази платформа има микроконтролер на Atmel от серията ATmega, поставен на платка с локално стабилизирано работно напрежение, изводите на микроконтролера са изведени на удобни конектори, има чип за програмиране и комуникация през USB интерфейс, както и други допълнителни възможности при някои версии.

За конкретната разработка на анемометър са нужни 8 цифрови извода (4 изхода и 4 входа) за подаване на стартови импулси към ултразвуковите модули HC-SR04 и съответно за приемане на импулсите за отчетено време на полет при приемане на вълни от модулите. Нужни са още 2 цифрови извода за реализиране на I2C комуникацията към LCD модула.

В блоковата схема на фиг. 3 е предвиден Захранващ блок, който трябва да осигурява необходимите напрежения за всички компоненти в анемометъра. Захранването на устройството може да става от външен източник или от батерия с необходимото напрежение. Ултразвуковите модули, LCD модула с I2C преобразувател, както и Arduino платката работят на 5V. Удобство е наличието на стабилизатор на напрежение на +5V в повечето от Arduino платките, което е изведено на изводи и може да се използва за захранването на маломощни периферни модули.

За реализацията на анемометъра е избрана платформата Arduino Uno, която разполага с 14 цифрови извода и 6 аналогови входа, като за I2C комуникацията ще се използват като втора функция аналоговите изводи A4 и A5 [2]. Неизползвани остават 6 цифрови извода и 4 аналогови входа, които могат да се използват за бъдещо развитие на проекта.

За захранването на останалите модули в системата ще се използва стабилизираното

изходно напрежение от +5V на Arduino Uno платката, а нейното захранване ще става от батерия с напрежение +9V с последователно свързан на нея прекъсвач. По този начин разработваният анемометър става автономно мобилно устройство с локален захранващ източник.

***Програмно осигуряване***

След включването на захранването на устройството се стартира програмното осигуряване на микроконтролера. В началото еднократно се извършва инициализация, при която се задават функциите на цифровите изводи и комуникационните изводи по I2C интерфейс, инициализира се LCD модула и се извеждат начални надписи към него, инициализира се също комуникацията по сериен интерфейс към USB за целите на диагностика, където също се изпраща начално съобщение. Всички променливи се установяват с начални стойности. Следва цикличното изпълнение на главната част от програмата до изключване на захранването.

В главната част на програмата се извършват последователно следните основни действия:

- Извършват се по 8 измервания за *Tof* чрез ултразвуковите модули за всяка от посоките, след което се изчисляват техните 4 осреднени стойности (за намаляване на грешките от измерване при турбуленции);
- Изчисляват се съставните части на векторите за всяка посока, температурата на въздуха *Tc*, скоростта на вятъра *V* и ъгълът на посоката му $\theta$;
- Получените текущи резултати се извеждат към LCD и към серийният интерфейс в подходящ форматиран вид.

На фиг. 6 е представен разработения анемометър при полеви тестове и показания на дисплея при липса на вятър.




***Фиг. 6.*** *Тестване на разработения анемометър*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При тестването на анемометъра с вятър от различни посоки се получават резултати, които са с толеранс около ±10º около основните оси, което може да се дължи на турбуленции от корпусите на ултразвуковите модули HC-SR04. При липса на вятър анемометърът понякога отчита грешни показания от около 0,02 м/с в случайна посока, което може да се приеме за допустимо в сравнение с измервателната грешка на други анемометри.

Разработката може да се използва за учебни цели и за база в други проекти.

Едно бъдещо развитие на проекта може да бъде насочено към добавяне на сензор за измерване на влажността на въздуха и извършването на изчисленията за скорост на разпространение на ултразвуковите вълни отчитайки нейното влияние. Може също да се промени конструкцията, с цел намаляване на влиянието на корпусите на ултразвуковите модулите върху въздушния поток.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящата работа е финансово подпомогната от Проект № 2203E за научни изследвания в Технически университет - Габрово.

## REFERENCE

[1] Nave, C. R., Sound Speed in Gases, (2014) http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/souspe3.html#c1, HyperPhysics, Georgia State University, 2014.

[2] Cytron Technologies Sdn., User's Manual V1, HC-SR04 Ultrasonic Sensor, 2013.

[3] Arduino.org, Arduino UNO R3, https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3, 2022.

# СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ВИДЕОЕФЕКТИТЕ В АУДИО-ВИЗУАЛНА ПРОДУКЦИЯ

**Иванка Вълова**

*Софийски университет „Св. Климент Охридски“*
*Факултета по журналистика и масова комуникация*
*Учебно телевизионно студио*

# COMPARATIVE ANALYSIS OF VIDEO EFFECTS IN AUDIO-VISUAL PRODUCTION

**Ivanka Valova**

*Sofia University “St. Kliment Ohridski”*
*Faculty of Journalism and Mass Communication*
*Educational Television Studio*

**Abstract**

*The paper "Comparative analysis of video effects in audio-visual production" presents some of the video effects that are often used in television productions and are available in professional audio-visual editing programs. The effects in the professional editing software programs can be divided into separate groups to make them easier to find and work with. The name of the effects and their classification into groups put the users on the right track about the type and the result of their application.*

*Video effects can create, enhance, beautify and bring to life images and events. They have the ability to render the story more dramatic and, thus, have a stronger impact on the audience.*

*The paper "Comparative analysis of video effects in audio-visual production" provides academic and practical knowledge related to the new technologies.*

**Keywords:** video effects, audio-visual production, professional editing software.

## ВЪВЕДЕНИЕ

В тази статия са представени част от видеоефектите, които са често използвани в телевизионните продукции и са достъпни в програмите за професионално аудио-визуално редактиране. Ефектите в професионалните софтуерни програми за монтаж могат да бъдат разделени в отделни групи, за по-лесното им намиране и работа с тях. Названието на ефектите и класифицирането им в групи ориентира потребителите за вида и резултата от приложението им.

Видеоефектите могат да създадат, усилят, разкрасят и дадат живот на изображения и събития. Те притежават способност да придадат на историята по-голяма драматичност и по този начин да въздействат по-силно върху публиката.

Професионалните софтуерни програми за аудио-визуално редактиране предлагат възможност за по-дълбоко ниво на обработката на цветността на изображението, а не само семпло цветно коригиране, като се създава цялостно цветно усещане във визуалното произведение. Разработени са измерватели на цветността, които сравнят некоригираното с вече коригирано видео. Софтуерните инструменти предоставят цветни коректори и маски с меки граници, които дават възможност за ограничаване на зоните, в които да действат цветните коректори и добра дълбочина на цветовете, която

осигурява възможност за максимално добро качество. Предлагат се различни функционалности за създаване и редактиране на видеоефекти [7, 8, 9, 11]. Допълнителни настройки, опции за промяна на параметрите на изображенията модернизират обработката на видеото. За прецизно редактиране на видео, професионалните софтуерни приложения предоставят работно пространство Effects, което осигурява достъп до средствата за редактиране на кадрите.

## КЛАСИФИКАЦИЯ

Видеоефектите изпълняват множество полезни функции. Те могат да бъдат използвани с различни цели.

– За поправяне на дефекти във видеоизображения, например коригиране на цветовия баланс, на яркостта, контраста, нюанса и наситеността на изображението, изсветляване на засенчените обекти, намаляване на акцентите в изображението и др.

– За създаване на качества, които не присъстват в суровия видеоматериал, например леко разфокусиране, придаване на цветови оттенък на залез към сцената, режисьорски корекции на цветовете, създаване на висококачествени изображения в сиви скали, създаване на сенки, нюанси и тонове чрез добавяне на черно, сиво и бяло към основен цвят, регулиране на силата на светлината, добавяне на светлосенки, изглаждане на нежелани неравности, пълна промяна на визията на изображението. Например жълтокафеникавият оттенък на кадрите, получен чрез ефекта Tint/Sepia, създава усещане за минало време и събития.

– За постигане на емоционално въздействие. Светлинните ефекти в различни цветове създават усещане за топлота и уют или за хлад и омраза. Цветът е един от наймощните инструменти, с които може да се въздейства на аудиторията. Той може да ни повлияе емоционално, психологически и дори физически, често без да го осъзнаваме. Премахването на цветове от видеоклипа и създаването на изображение в сивите нива често са препратка към минали действия и предизвикват носталгия.

– За създаване на преходи, с които се индикира преминаването от една сцена към друга, т.е. от една епоха в друга или към различна географска ширина. Например ефектът на постепенна трансформация на едно изображение в друго, забавеното движение, заместването на изображение в един кадър с изображение от друг кадър (wipe) често са индикация за промяна на мястото или времето.

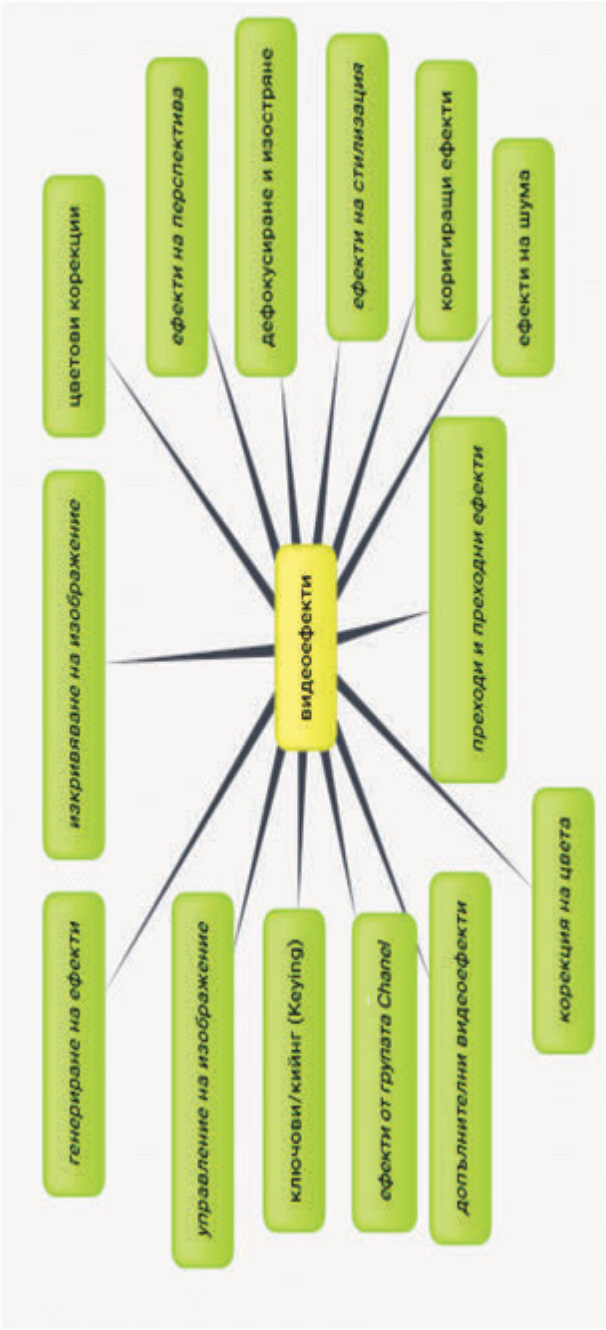
– Ефекти, които добавят шум в кадъра. Съществуват различни видове шумове и следователно те могат да бъдат приложени за различни цели. Често идеята е да се насочи зрителят към проблеми и несъответствия в истинността на представяната информация и др. Белият шум е символ за пълна загуба на комуникация.

Хоризонталните линии, които са индикатор за несинхронизация във вертикалната развивка, се свързват с проблеми в общуването на различни йерархични нива. Чертите, появяващи се в изображението вследствие от разминаване на хоризонталната развивка между предавателната и приемната страна, са показател за проблеми в група от една социална прослойка и т.н.

Съотношението шум–изображение, шум–говор или шум–изображение–говор е красноречив символен знак, който не е достатъчно експлоатиран във видеоиндустрията, но крие огромен художествен заряд.

Познаването на ефектите и прилагането им са част от символните знаци в аудио-визуалните продукции. Играта със знаците е присъща повече за художествените жанрове, но е добре телевизионното познание да звучи и художествено, а художественото внушение да предлага и познания [1]. Умелото прилагане на символните знаци увеличава комуникативната сила на аудио-визуалната творба.

Софтуерните програми за видеомонтаж притежават графична част и генератор за надписи, който има отделен интерфейсен панел. Той осигурява възможност за създаване на текстови полета, с които да се акцентира във видеото или да се даде допълнителна информация. Разработен е голям набор от шаблони, които лесно се модифицират. Библиотеката от темплейти дава свобода и идеи за създаване на професионални лога.




***Фиг.1.*** *Обобщена класификация на видеоефекти*

Елементите, участващи в аудио-визуалната програма, могат да се анимират – обекти, сцени и текст. Професионалните софтуерни програми за аудио-визуално редактиране предоставят инструменти и за интерполация между отделните фреймове, възможност за промяна на времетраенето на анимациите и превю на самия ефект, като промяната във видеото може да се види в реално време. Композитингът е възможността за обединяване на няколко слоя видео чрез използването на ефекти и методи за смесване. Съществуват способи за използване на маски, за стабилизиране на видео, изрязване по цвят и голям набор от други ефекти, които дават пространство за работа и творчество.

Ефектите в софтуерни програми за монтаж са разделени в отделни категории за по-лесното им намиране и работа с тях. Например съществуват следните групи от ефекти – ключови/кийнг, коригиращи ефекти, ефекти за дефокусиране или изостряне, цветови корекции и др. Названието на ефектите и класифицирането им в групи ориентира потребителите за техния вид и за резултата от използването им.

## НАЙ-ЧЕСТО ИЗПОЛЗВАНИ ВИДЕОЕФЕКТИ

Съвременните комуникации са силно визуални и съответстват на начините, по които хората използват *Интернет,* в частност мобилните си устройства.

### *Ефекти Instagram-like*

Онлайн софтуерните продукти предлагат видеоефекти, специално разработени за социалните мрежи и в частност – за Instagram. В онлайн софтуерните приложения са заложени възможности за обогатяване на предварително зададените библиотеки и достъп до по-кинематографични и стилни ефекти, заглавия и преходи.

В софтуерното приложение Filmora в групата Instagram-like са включени общо 24 ефекта. Сред тях са Sunrise, Sunset, Lord Kelvin, Lomo, Valencia, Toaster, Sutro, Sunflower, Retro, Sierra, Romantic, Nashville, Ink Well и др. Социалните мрежи, като Instagram, Meta и др. станаха възможни благодарение на технологията Web 3.0.

### *Ключови ефекти*

Съществуват и се прилагат множество ефекти под общото название кийнг (keying), или ***ключови ефекти***. Те осигуряват различни нива на видеокачество и сложност на прилагане. Общата черта на тези ефекти е възможността да се изреже електронен „отвор“ (кийхоул) в изображение. В „отвора“ се поставя друг видеосигнал, като по този начин изображението се наслагва върху или в друго изображение.

Разграничаването на една област в изображението от друга е въз основа на разликите в яркостта и цвета. Първата стъпка при разпознаването на даден обект е да се идентифицират неговите контури, които отделят обекта от фона. Средният слой на ретината подпомага тази задача, като очертава краищата на гледаното изображение. Обработката в ретината прави границата между светлите и тъмните области по-рязка, подсилвайки впечатлението, че двете области са различни. Създава се интересна оптична илюзия. Близо до края тъмната област изглежда необичайно тъмна, а светлата – необичайно светла [2]. Получените светли и тъмни ивици се наричат ленти на Max, по името на Ернст Max (1838–1916), австрийски физик, който пръв ги описва.

Множеството на ключовите ефекти включва Luminance Key, Blue Key, Chroma Key и др. Те са неразделна част от всички професионални софтуерни програми за аудио-видео редактиране. Най-разпространеният ефект, наречен Blue Key, е частен случай на ефекта Chroma Key.

Заслугите за разработване на „синия екран“ са на Лари Бътлър, който печели наградата на Академията за филмово изкуство за специални ефекти за филма „Крадецът от Багдад“ (*The Thief of Baghdad*). Той създава ефекта „син екран“ и техниката „блуждаеща маска“ и постига визуални ефекти, които за времето си са безпрецедентни. Филмът е преработен няколко пъти, от които най-забележителна е версията от 1940 г. [3]

***Коригиращите ефекти*** се прилагат за промяна на контраста и цвета, за линейна обработка на изображения като конволюция, за премахване на цветове от видеоклипа и създаване на изображение в сивите нива, прилагане на до пет светлини и създаване на творческо осветление, за коригиране на яркостта, контраста, нюанса и наситеността на изображението, изсветляване на засенчените обекти, намаляване на акцентите в изображението и др. По-голямата част от тези ефекти спомагат за подобряване на качеството на заснетото изображение.

В групата на коригиращите ефекти (Adjust effects) най-често се класифицират следните: Auto Color, Auto Contrast и Auto Levels ефекти; Convolution Kernel ефект; Extract ефект; Levels ефект; Lighting ефекти; ProcAmp ефект; Shadow/Highlight ефект.

***Ефекти LUT***

*LUT (Lookup Table)* са предварително зададени филтри, които се прилагат за цялостна промяна на цветовата палитра на видеоклипове. Те автоматично регулират нивата на наситеност, осветеност, контраст, гама и нюанс. LUT съдържат предварително запазени настройки, които се прилагат едновременно. Те са полезни и удобни инструменти за обработка на изображения. Използва се справочна математическа таблица за трансформиране на входните данни в зависимост от зададения алгоритъм.

LUT могат да се създават и прилагат към различни формати, като Rec. 709, Rec. 2020, HDR, LOG, RAW и др. Математическите алгоритми, заложени в LUT, са постоянни и различните резултати са в зависимост от входните данни, т.е. от оригиналните видеоматериали.

Приложението Filmora съдържа 26 броя LUT филтри обединени в три групи.

Софтуерният продукт KineMaster, който е проектиран за мобилни устройства с операционни системи Android и iOS предллага LUT филтри, с които се придава по-изтънчен облик на редактираните визуални елементи.

Монтирането на ефекти се отъждествява със създаването на свят от нищото Видеоефектите са неразделна част от ***военните филми***.

Умелото използване на техниките и технологиите пресъздава детайлна и ефектна симулация на реалност заради добрите параметри на техническото оборудване, заради перфектния звук и чудесната музика.

Военните филми са актуални, защото войната присъства в нашето ежедневие и през 2022 г. [10]. В миналото, когато не са били налични сегашните ефекти, се е налагало заснемането на баталните сцени с реални танкове, самолети, кораби, което е било скъпо и трудно за организиране и изпълнение.

Детайлна информация за филмите, свързани с военни събития и конфликти, може да бъде намерена в статията на Кирилов „Нови елементи, съвременни внушения и

реалистичност в руските и беларуските художествени филми за Втората световна война“ [5].

Групата от ефекти за ***изкривяване на изображение*** (Distort) променя геометричните показатели на заснетото изображение. Следните ефекти са част от тази група: Corner Pin, Lens Distoration, Spherize, Magnify, Mirror, Offset, Twirl, Whirl и др.

***Допълнителни видеоефекти***

Видеоефектите са различни в различните софтуерни програми за монтаж. Към тази група се класифицират следните ефекти: SDR conform, Clip Name ефект, Timecode ефект и др.

Ефектът *Timecode* наслагва дисплей с времевия код на видеото, за да улесни точните сцени и сътрудничеството между членове на екипа и с клиентите. Дисплеят на времевия код показва дали клипът е с последователна, или с презредова развивка. Ако клипът е с презредова развивка, се изписва допълнителен символ, който показва дали полукадърът е в четното или в нечетното поле. Настройките на ефекта Timecode позволяват да се контролират позицията, размерът и непрозрачността на дисплея, както и опциите за формата на времевия код и също от коя камера е записан източникът на видеосигнала.

***Ефектите на перспективата (гледната точка) включват:*** завъртане на изображението около хоризонтална и вертикалната ос и в същото време приближаването или отдалечаването му от зрителя; придаване на обработен и осветен триизмерен вид на контурите на обекта; добавяне на скосен край и осветяване на контурите, като често се придава триизмерен вид на 2D елементи; създаване на сянка от точков източник на светлина, която пада върху изображението, и др.

***Ефектите на стилизация*** са многобройни, по-долу ще разгледаме някои от тях.

Ефектът *Brush Strokes* придава на изображението груб рисуван вид. Прилага се за постигане на живописен стил чрез настройване на дължината на щрихите и увеличаване на плътността им. Съществува функционалност за указване на посоката на щрихите с четка, които се разсейват произволно с малка стойност, за да се получи по-естествен резултат.

*Ефектът Bokeh Parallax* позволява качествено и артистично да се замъглят частите на изображението, които не са във фокус, и в същото време се създава усещане за движение на отделни части от изображението. Елементите извън фокус могат да се намират зад основните елементи в композицията и/или пред тях.

Ефектите Bokeh и Parallax са част от инструментариума на почти всяко софтуерно приложение за онлайн редактиране.

*Ефект Plexus Particles/плексус частици.* Ефектът е въздействащ с частиците, които се движат и създават различни форми. Наличен е в софтуерния продукт Filmora.

Филмът „Блейд Рънър 2049“ е отличен за най-добри специални ефекти, а Роджър Дийкинс получава „Оскар“ през 2018 г. за най-добър оператор.

Прилагането на специални ефекти, за постигане на зрелищност, не трябва да бъде за сметка на реалистичността [6].

***Преходи и преходни ефекти***

Преходи (transitions) в софтуерните програми за монтаж е термин, с който се индикира преминаването от една сцена в следващата.

Например ако целта е да се види, че героят претърпява сътресение или изпада в състояние под упойка, разфокусирането е перфектният преход.

Най-простият вид преход и най-често използваният е „на остро“ (cut), при който след последния кадър на дадена сцена започва първият кадър на следващата. Преходите са групирани в групи според типа: 3D motion/3D движения; Dissolves/преливания; Wipes/замествания; Iris; Zooms/променя мащаба.

В Cross Dissolve една сцена постепенно се прелива (разтваря – dissolves) в друга в рамките на кратко време. Настройките по подразбиране за преходите са с продължителност 30 кадъра и центрирано подравняване спрямо границата между двете сцени. Намира широко приложение във филмите от 70-те и 80-те години.

Често използван преход в немите филми е от групата Iris/ирис. Например във филма на Чарли Чаплин „Хлапето“ (The Kid, 1921)

преходите между отделните сцени е бленда, която постепенно се отваря при започване на нова сцена или се затваря, за да се отбележи края на дадено събитие. „Хлапето“ е един от първите филми, който прави опит за комбиниране на комедия и драма.



*Фиг.2 Кадър от филма „Хлапето “ (The Kid,1921)*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Професионалната обработка на заснетия материал допринася до голяма степен за ефективността на аудио-визуалната продукция. Всички приложени видеоефекти трябва да са добре обмислени. Изборът и обработката на изображение в аудио-визуална продукция е част от комуникационния процес между зрители и авторите на дадено аудио-визуално произведение.

Благодарение на подобрените инструменти на софтуерните приложения днес, обработката на видео е по-лесна и резултатът е по-въздействащ. Повечето системи за нелинеен монтаж включват редица специални ефекти, които могат да се използват за подобряване на проекта. Желателно е да се използват внимателно и по подходящ начин, защото прекомерната употреба на специални ефекти е признак на аматьорска продукция.

Ефектите за звука и видео се прилагат към аудио-визуалната програма по един и същия начин. И както всеки друг елемент на продукцията, ефектите не трябва просто да бъдат добавени – те трябва да бъдат интегрирани в продукцията от самото начало.

## REFERENCE


[1] Raycheva, L. The Television Phenomenon: Transformations and challenges. Sofia: Tip-Top Press, 2013.

[2] Smith S. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. dspguide.com/ch24/1.htm

[3] Valova, I. Applications of Chroma Keys, Computer Science’11. – In: Workshop on Super Computer Architectures and Applications, Ohrid, Macedonia, 1–3 September 2011, 435–437.

[4] Valova, I. Specifications and Functions of Video-audio Mixers. In: Proceedings of the International Scientific Conference- UNITECH’12. Gabrovo. T.4, 255–260, 2012 (in Bulgarian).

[5] Kirilov, S. New Elements, Contemporary Suggestions and Realism in Russian and Belorussian Feature Films about World War II. – In:NewMedia21 www.newmedia21.eu/analizi/novi-elementi – savremennivnusheniya - i-realistichnost -v-ruskite-i- belaruskite-hudozhestveni-filmi-za-vtoratasvetovna- vojna

[6] Kirilov, S. Marshal Badge, Revolver and Iron Fists: the Rise and Fall of Western. – In: New Media21. www.newmedia21.eu/atelie/sherifskaznachka-revolver-i-zdravi-yumrutsi-vazhod-i-zalez-na-uestarna.

[7] Adobe Premiere Pro. www.adobe.com

[8] Final Cut Pro. www.apple.com/final-cut-pro

[9] Filmora. www.filmora.wondershare.net

[10] Kirilov, S. Russian Exceptionalism: Civilizational Hesitations and Soft Power. In: Newmedia21.eu. https://www.newmedia21.eu analizi/ruskata-izklyuchitelnost-tsivilizatsionni-tarseniya-i-meka-vlast/

[11] KineMaster. https://www.kinemaster.com

# LORA И ZIGBEE СЕНЗОРНА МРЕЖОВА СИСТЕМА ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА ДАННИ

**Диян Динев[1], Айдън Хъкъ[1]**
*[1] Технически университет – Варна, България*

# LORA AND ZIGBEE SENSOR NETWORK DATA STORING SYSTEM

**Diyan Dinev[1], Aydan Haka[1]**
*[1] Technical University of Varna, Bulgaria*
*diyandinev@tu-varna.bg, aydin.mehmed@tu-varna.bg*

**Abstract**

*Internet of Things (IoT) is a concept that is considered the full use in the environment of various objects that through wireless and wired connections and unique addressing schemes can interact with each other and work with other objects to create new applications and services to achieve of common goals. Some of the most popular IoT technologies are ZigBee, which has a wide variety of applications in sensor networks, and LoRa, which has a narrow range. All IoT systems allow the tracking of data from connected objects. This paper describes the development of a real-world system based on the collection, storage, and analysis of sensor data from ZigBee and LoRa networks. The implemented system consists of an MQTT server, MongoDB database, and a developed web graphic interface to visualize and process the data received from the devices. The main stages of system development and test performances are presented to confirm the system's efficiency.*

**Keywords:** IoT, LoRa, Wireless Sensor Network, ZigBee

## ВЪВЕДЕНИЕ

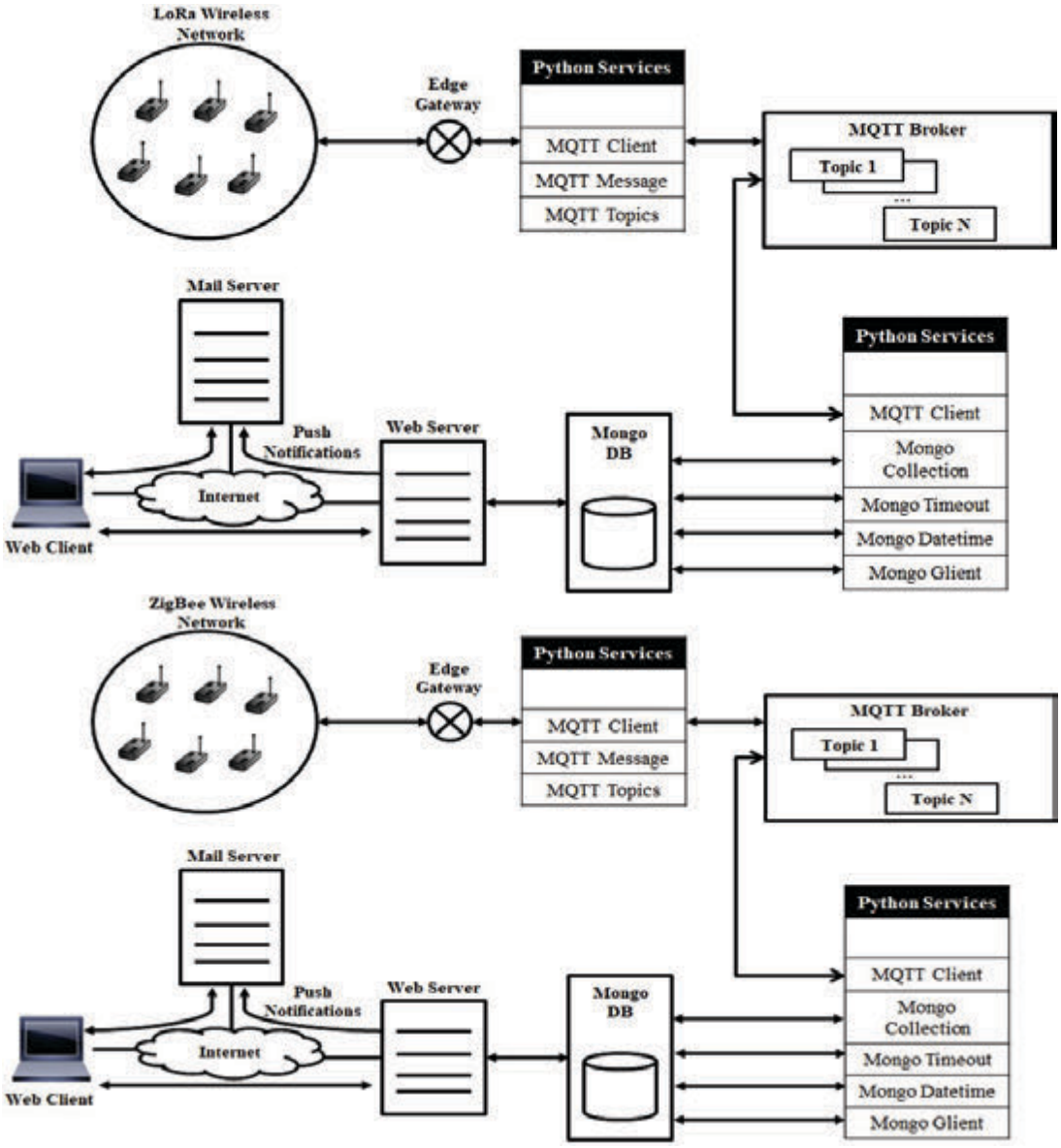
Разрастващото се използване и развитие на съвременните информационни и комуникационни технологии увеличава дела на използваните мрежи за домашна автоматизация, следене параметрите на околната среда, умен град и др. Тези съвременни приложения в ежедневието осигуряват разпространението на технологиите за Интернет на нещата (Internet of Things) [1].

Широк дял в областта на Интернет на нещата заема използването на различни технологии за безжични сензорни мрежи. Тези технологии позволяват бързо и лесно изграждане на мрежа без необходимост от жично свързване между крайните компоненти. Те позволяват следене на различни параметри на околната среда, които биха повлияли по определен начин на системи от широк спектър области. За осигуряване на ефективен контрол и управление на сензорната мрежа е необходима система за следене и съхранение на данни, която позволява изследване на прихванати данни в реално време и анализирането на такива от предходни събития, както и генериране на сигнали и съобщения за предупреждение при настъпило определено събитие.

В този доклад са представени предложения на системи за съхранение на данни и възможностите на разработените за тях уеб интерфейси за технологиите LoRa и ZigBee за безжични сензорни мрежи, които са реализирани в катедра „Компютърни науки и технологии“ на факултет по изчислителна техника и автоматизация при Технически университет - Варна.

## СИСТЕМА ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА СЕНЗОРНИ ДАННИ

Частта от системата реализираща съхранението на данни от LoRa и ZigBee безжичните сензорни мрежи се състои от две основни част – MQTT сървър (MQTT Broker) и MongoDB база от данни (Фиг. 1).




***Фиг. 1***. *Логическа топология на LoRa (а) и ZigBee (б) безжични сензорни мрежи*

Протоколът MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) работи по комуникационния модел публикуване/абониране и по подразбиране използва TCP транспортен протокол. Източникът публикува съобщенията си в опашка с конкретно име на тема, това позволява абонатите да слушат само темите, които са важни за тях. Протоколът предоставя и редица полезни функции като осигуряване на Quality of Service (QoS) на различни нива, йерархични имена на теми, споделено абониране [2].

Базата данни Mongo DB представлява нерелационна и ориентирана към поддържане на документи база. При таза база данни документите се съхраняват в таблици, чиито редове могат да бъдат вложени. Тази организация на данните е съчетана с оператори, които предоставят достъп до вложени данни [3].

Визуализирането на данните в реално време и такива съхранени в базата данни се реализира през разработеният уеб интерфейс, който е достъпен през включения уеб сървър.

Абонирането към теми, прихващането на данни (Фиг. 2) и съхраняването им в базата данни (Фиг. 3) се извършва чрез Python скриптове.

```
Import MQTT header
Import Mongo header
ADDR = MQTT broker address
PORT = MQTT port number
ALIVE = MQTT keep alive interval
QoS = MQTT QoS Level
TOPICS = MQTT topics name

Get ADDR
Get PORT
Get ALIVE
Get QoS
Get TOPICS

Class MQTT
    Initialise MQTT Client
    Initialise MQTT Message
    Connect MQTT TOPICS
    Connect Mongo

    run MQTT

        start client loop
        read MQTT Message
        start ALIVE
    stop MQTT

        stop client loop
    disconnect MQTT Client
```

***Фиг. 2**. Псевдокод за абониране към MQTT тема/теми и прихващане на данни*

```
Import MQTT client header
Import Mongo headers

URI = Mongo URI
DB = Mongo DB

Collection = Mongo Collection
Timeout = Mongo Timeout
Datetime = Mongo Datetime

Get URI
Get DB
Get Collection
Get Timeout
Get Datetime

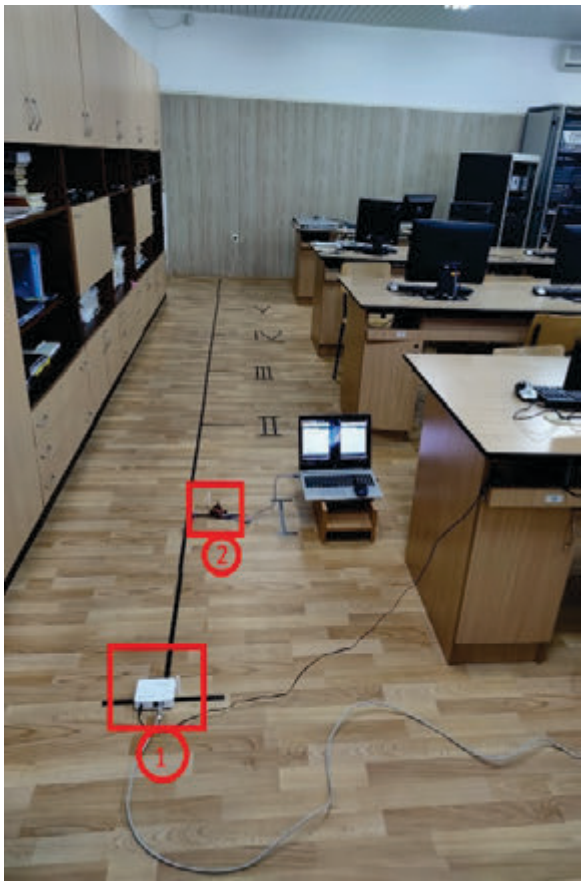
Class Mongo
Initialise Mongo Client
Connect Mongo

Store Data
Save Data
```

***Фиг. 3**. Псевдокод за съхранение на данните в MongoDB*

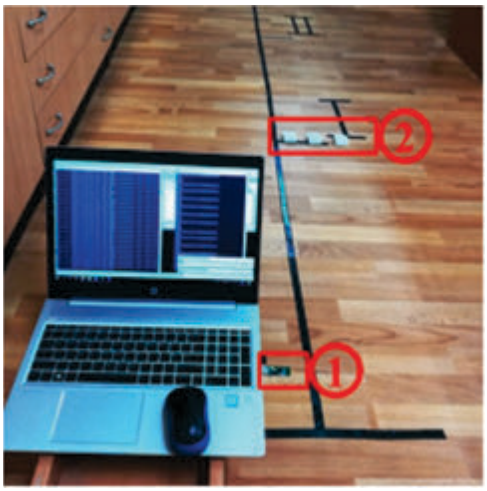
## КОМПОНЕНТИ НА LORA И ZIGBEE БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ

Сензорната мрежа LoRa се състои от Dragino LG01-S - Single Channel LoRa IoT Gateway (Фиг. 4 – 1) за управление на мрежата и получаване на данни от сензорни възли. Изграден е от LoRa безжичен модул с микроконтролер и Linux модул за интернет връзка и USB Host интерфейс. Модулът LoRa е вграден от RFM9xW 868MHz приемо-предавателен радио модул с чипсет SX1276, който се управлява от микроконтролер Atmega 328P, зареден с Arduino Uno bootloader [4]. На LoRa Gateway е необходимо конфигуриране за препращане на получените съобщения от сензорите към MQTT сървър. За предаване на данни се използва Dragino LoRa Shield с Arduino UNO. LoRa Shield (Фиг. 4 – 2) позволява на платките на микроконтролера Arduino да предават безжично данни на големи разстояния с ниска консумация на енергия. Изграден е от LoRa приемо-предавателен радио модул RFM9xW 868MHz, който работи със SPI интерфейс през ICSP конектор или цифрови D11-D13 портове на Arduino. Няколко сензора могат да бъдат свързани към LoRa Shield. За целите на експериментите са използвани сензор за пламък и DHT11 (сензор за температура и влажност) (Фиг. 4).




***Фиг. 4**. Физическа топология на LoRa безжична сензорна мрежа*

Сензорната мрежа ZigBee се състои от няколко компонента - ZigBee координатор, приемо-предавател и крайни възли. Координаторът е реализиран със софтуер ZigBee2MQTT, инсталиран и стартиран на Windows машина [5]. Приемо-предавателят е TI CC2531EMK, конфигуриран за работа със ZigBee стандарт, който е свързан към Windows машината и позволява реализиране на комуникация между крайните възли и координатора (Фиг.5 – 1) [6]. Експерименталната постановка се състои от крайни сензорни възли на фирмата Sonoff - Sonoff Door Sensor и Sonoff Temperature and Humidity Sensor [7] (Фиг. 5 – 2).




***Фиг. 5****. Физическа топология на ZigBee безжична сензорна мрежа*

## LORA УЕБ ИНТЕРФЕЙС

Уеб интерфейсът за визуализация на данните е разработен с помощта на PHP, JavaScript HTML. Сървърната система за управление на базата от данни за съхранение на информацията е реализирана на MongoDB. Това е безплатна нерелационна база от данни съхраняваща получените от сензорите данни в колекции от документи (Фиг. 6).

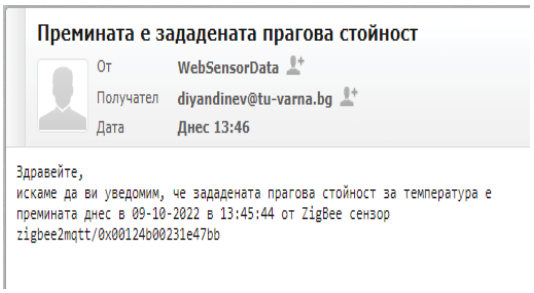



***Фиг. 6.*** *Структура на един документ*

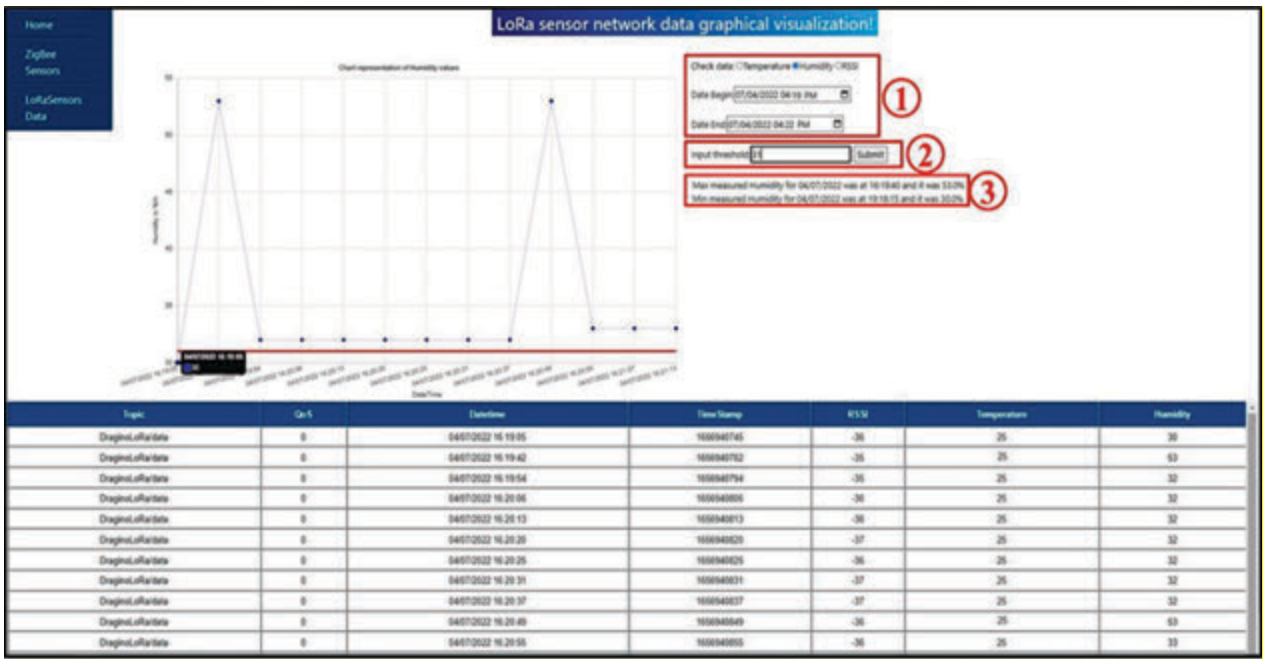
Структурата на един документ е следната:

- _id: уникален идентификатор за всеки един документ;
- topic: съдържа името на канала, от който получаваме данните и името на сензора, който ги изпраща;
- payload: масив сдържащ същинската информация за получените данни от сензора разделени във формата ключ – стойност;
- QoS –поле с информация за нивото на качеството на услугата;
- timestamp: съхранява информация за времето, в което е получена информацията от сензора под формата на integer число;
- datetime: съхранява информация за времето, в което е получена информацията от сензора в четим за компютъра формат.

Разработеният уеб интерфейс LoRa осигурява подходяща визуализация на съхранената информация и извеждане на статистически извадки на базата на индивидуалните характеристики и времеви сегменти на работа, както и създаване на модел за работа на устройствата в изследваната среда. Интерфейсът позволява визуализация на избраната стойност за параметър на околната среда според зададения от потребителя времеви интервал. Ако не е избран времеви диапазон за вземане на проби, системата показва данните, получени през последните 10 минути (фиг. 8 – 1 ). Той също така предоставя възможност за задаване на прагова стойност, която да показва кога измерените данни са под и над избрания праг (червена линия) (фиг. 8 – 2). При работа с параметрите температура и влажност, при превишаване на зададения праг се генерира уведомително съобщение за настъпилото събитие. Настроен е и пощенски сървър, изпращащ съобщения до e–mail на потребителя при преминаване на зададени прагови стойности. (фиг. 7) При избор на визуализация на даден параметър на данните се извеждат максималните и минималните отчетени стойности за конкретно избрания период (фиг. 8 – 3).



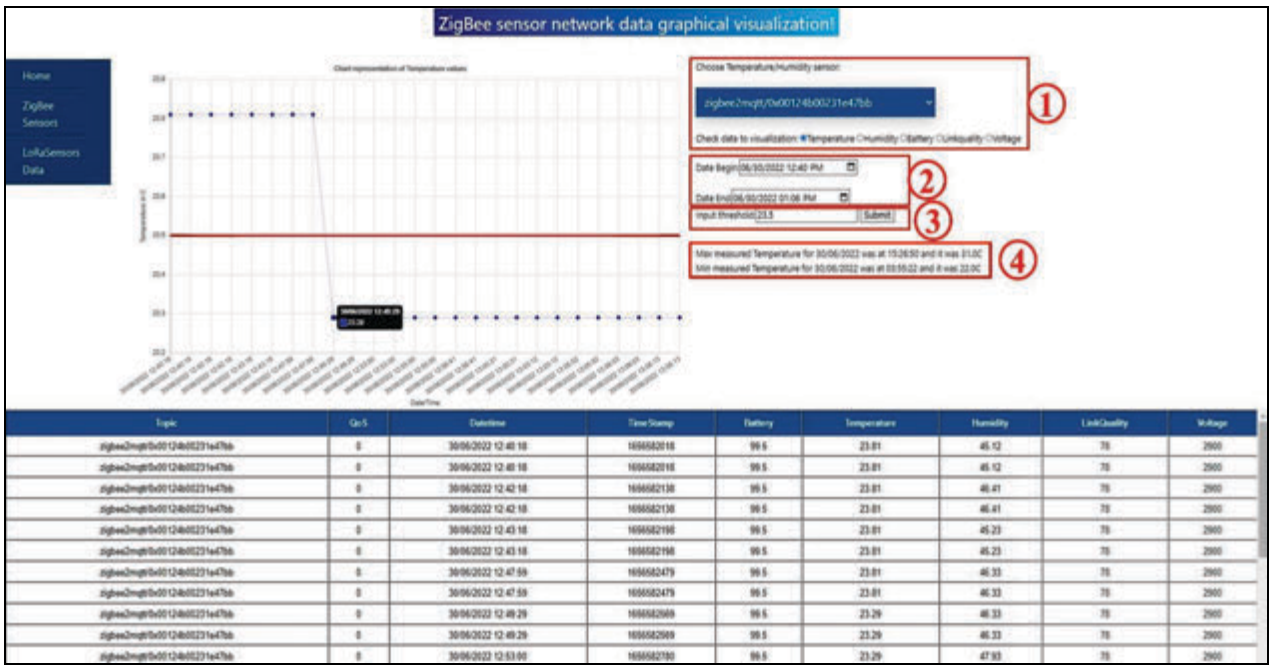

***Фиг. 7****. Получено съобщение на имейл при преминаване на прагова стойност на даден показател*




***Фиг. 8**.Визуализация на данните за влажността LoRa чрез уеб интерфейса*

## ZIGBEE УЕБ ИНТЕРФЕЙС

Информацията от базата данни се визуализира чрез разработения ZigBee уеб интерфейс. Позволява показване на статистики и графики за различните параметри на околната среда, следени от сензора, както и създаване на модел на работата на устройствата в изследваната среда. Интерфейсът позволява на потребителя да избере типа параметър на околната среда, за който се представя графиката за промяна на стойността. След като се избере параметър за генериране на графика, е възможно да се избере сензор от падащо меню, чиито измервания да бъдат представени (фиг. 9 – 1). При първоначалното генериране на стойностите, в диаграмата се представят тези от последните 10 минути. Потребителят има възможност да избере друг период за визуализация на данните и преглед на предишни измервания (фиг. 9 – 2). В допълнение, потребителят на системата има възможност да въведе прагова стойност за разглеждания параметър, което дава възможност ясно да се отчете в кой момент от време измерените стойности са близки до прага или го надвишават (Фиг. 9 – 3). При работа с параметрите температура, влажност и ниво на батерията превишаването на зададения праг води до генериране на уведомително съобщение за събитието. Системата визуализира извадка в рамките на избрания период за минимална и максимална отчетена стойност в определен момент за избрания параметър (фиг. 9 – 4).




***Фиг. 9.*** *Визуализация на данните за температурата на ZigBee чрез уеб интерфейса*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Този доклад представя система за съхранение на данни от LoRa и ZigBee, приложими към IoT,. Предложените системи предоставят добра възможност за проучване на работата и опциите за конфигуриране на безжичните сензорни мрежи LoRa и ZigBee. Те имат връзка с предмети, свързани с изучаване на бази данни, програмиране и използване на протокола MQTT. Това дава възможност на студентите да затвърдят знанията си по съответните предмети и да получат допълнителни.

## REFERENCE


[1] Ericsson Mobility Report, June 2022, https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report, Last visit on 22.07.2022.

[2] Salami D., Streibel O., Rhenius M. and Sigg S., "A FAIR Extension for the MQTT Protocol," 2020 16th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN), 2020, pp. 10-16, doi: 10.1109/MSN50589.2020.00019.

[3] Srai A., Guerouate F. and Lahsini H.. (2021). The Integration of the MDA Approach in Document-Oriented NoSQL Databases, the case of Mongo DB. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), Vol. 10 (Issue 3), 115–122. https://doi.org/10.35940/ijeat.C2235.0210321

[4] LG01-N Single Channel LoRa IoT Gateway https://www.dragino.com/products/lora/item/143-lg01n.html (available on 27 April 2022).

[5] Windows Zigbee2MQTT. https://www.zigbee2mqtt.io/guide/installation/05_windows.html, Last visit on 21.02.2022.

[6] Using Zigbee2MQTT- A Beginners Guide. https://stevessmarthomeguide.com/using-zigbee2mqtt-beginners-guide/, Last visit on 29.08.2022.

[7] ZigBee Sonoff Devices. https://sonoff.tech/products/, Last visit on 29.08.2022.

# ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРИНЦИПА НА ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПРИ ФУНКЦИОНАЛНО И КОНСТРУКТИВНО ПРОЕКТИРАНЕ

**В. Кукенска[1], М. Динев[1], П. Минев[1], И. Върбов[1]**

*[1]Технически Университет - Габрово*

# USING THE PRINCIPLE OF DECOMPOSITION IN FUNCTIONAL AND STRUCTURAL DESIGN

**V. Kukenska[1], M. Dinev[1], P. Minev[1], I. Varbov[1]**

*[1] Technical University - Gabrovo*

**Abstract**

*This paper presents the use of the decomposition principle in solving tasks for designing technical objects in electronics and computer systems. Considered tasks are mainly from the stages of the functional and constructive design.*

**Keywords:** decomposition, system approach, functional design, topological design.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Всяка система може да се разглежда като съвкупност от елементи, които притежават връзки и свойства. Връзките позволяват посредством преход от един към друг елемент да се съединяват два произволни елемента в съвкупност. Свойствата на системата са различни от свойствата на отделните елементи на съвкупността.

Най-общо системите се разделят на големи и сложни. Големи са тези системи, които се състоят от значителен брой еднотипни елементи и еднородни връзки. Сложните системи се състоят от разнотипни елементи и разнородни връзки.

Различието между система, голяма система и сложна система е условно. Много често сложните системи са и големи. Затова и в изложението по-долу не се търси разликата между видовете системи, а се разглеждат подходи, които са приложими за всички системи.

Обект на този доклад е системният подход и по точно приложението на един от неговите принципи – декомпозиция, в отделни етапи и задачи при автоматизирано проектиране на схеми, устройства и системи.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Един от най-използваните подходи в при автоматизирано проектиране е системният. При него всеки обект се разглежда като система, която може да се раздели на подсистеми. Всяка от тези подсистеми може да бъде разделена на подсистеми (модули) от по-нисък ред. Модулите от най-ниския ред са елементите, чиято вътрешна структура не представлява интерес за решаване на задачите на определено ниво, но нейните свойства влияят на другите подсистеми и на системата като цяло.

При решаване на определени задачи от функционалното и конструктивното проектиране на системи е необходимо да се определят необходимия брой йерархични нива, според спецификата на поставените изисквания в техническото задание.

Основни принципи на системния подход са декомпозиция, модулност и йерархия.

Принципът на декомпозиция (разделяне) е свързан с определяне на подсистемите (модулите) на проектираните обекти, както и с тяхната йерархична структура. Той се използва и като критерии при решаване на задачи от функционалното и конструктивното проектиране.

Обособени части от проектираното устройство или система, които в съответствие с първоначалния проектантски замисъл се характеризират с изпълнението на определени функции в рамките на общия алгоритъм на устройството, представляват функционални модули или функционални възли.

Декомпозицията на една сложна система на отделни подсистеми, които са свързани с други функционални модули и изпълняват конкретни функции, се извършва по йерархичен принцип. Така например функционалните модули от най-ниско ниво (неделими функционални модули) са логическите елементи, отделните чипове памет, микропроцесорните схеми и др. Съвкупността от такива функционални модули образуват функционални модули от второ ниво (например микропроцесорен блок) и т.н.

Функционалното проектиране обхваща избора на структурата, елементите, начина на тяхното свързване и изчисления на количествени показатели.

Етапите на функционалното проектиране са: съставяне на техническо задание за проектиране, синтез, анализ, оптимизация и документиране на полученото решение [2,3,5].

Етапът синтез се състои в избора на принцип, обща структура, съставни елементи, режим на работа и др.. Построява се обща система, която удовлетворява поставените изисквания в техническото задание за проектиране. Тук понятието "система" се използва в неговия най-общ смисъл (функционална, конструктивна и технологична система)[2].

При анализа се определят точните стойности на елементите и режимите на работа. Прави се оценка на получените резултати. Етапът анализ включва в себе си подетапите съставяне на модел и неговото изследване [3].

Една от основните задачи, чието решение се налага при моделиране и анализ е задачата за рационално разделяне (разбиване, декомпозиция) на системата (схемата) на части (подсистеми, подсхеми). Решаването на тази задача се налага от самата същност на диакоптичния подход [1,3,4].

Рационалното разделяне на системата на подсистеми е оптимизационна задача, чието решение позволява отделянето на функционални подситеми, линейни и нелинейни подсистеми (части), отчитане на повторяемост на отделни подсистеми, ориентация на използване на библиотеки с модели на често използвани подсистеми.

От друга страна всяка система се състои от определен брой елементи и връзки между тях. Това позволява тяхната структура да се представи чрез граф на базата на аналогии. Така за задачата за декомпозиция на дадена система може да се приведе към задача за оптимално разделяне на граф, представляващ топологичен модел на изследваната структура. Основната особеност при решаването на такава задача се явява избора на критерий за разбиване в зависимост от поставените цели. Най-често използваните критерии са: минимална свързаност на подсистемите; минимален брой подсистеми; определен брой елементи в подсистемите [1].

Методите за моделиране на системи се различават по начините на разделяне на системите, начините на представяне на подсистемите, по организацията на уравненията на пълната система, както и по методите за тяхното решаване. Приложението на принципа на декомпозиция е най-силно изразено в методите моделиране с използване на разредени матрици с блокова структура *($M_1$)* и във функционалните методи за декомпозиция *($M_2$)* [4].

При методите $M_1$ задачата за моделиране на системи се привежда към задачата за формиране и решение на матрично - векторни уравнения с матрици със специална структура. Те се характеризират със следното:

- еднократното решение на системата от по-висок ред се свежда към последователно решаване на системи уравнения от по-нисък ред;

- при формиране уравненията на системата (схемата) се използва единен координатен базис и в пълната система уравнения участват всички променливи на системата определени посредством гореспоменатия базис;
- избора на формата на матриците по зададена структура на системата в общия случай не е формален и се осъществява по интуитивни съображения;
- не винаги е лесно решима задачата за привеждане на матриците в желания вид.

Методите от направление $M_2$ се основават на разделянето на системите (схемите) на подсистеми (подсхеми). Всяка подсистема (подсхема) се разглежда като многополюсен елемент и се представя с функционален модел (макромодел), който описва поведението й в пространството чрез променливите на връзките им. От уравненията за многополюсниците и уравненията на връзките между тях се определя математическия модел на системата.

Ако на множеството на възлите на системата се съпостави множеството на върховете V на графа $G(V,E)$, а на множеството на елементите на системата - множеството на ребрата Е, то за дачата за декомпозиране на системата на части се привежда към задача за разделяне на графа $G$ на слабосвързани помежду си подграфи $G_1, G_2, G_3,....,G_N$ .

Математическата формулировка на задачата за декомпозиция на графа $G(V,E)$ е следната:

Даден е графа $G(V,E)$. Да се раздели на $N+1$ подграфа $G_1, G_2, G_3,....,G_N, G_C,$ където $G_m=(V_m, E_m)$, $m=1....N$ са отделените подграфи, а $G_C=(V_C,E_C)$ е подграф на връзките между отделените подграфи.

Търси се такова разделяне на графа $G$ на подграфи при което се удовлетворяват следните условия:

1. Броят външни връзки да е колкото може по-малък;
$$V_C = min(V_C),\ E_C = min(E_C) \qquad (1)$$
2. Всеки подграф да е различен от нулевия:
$$\forall G_m \neq 0,\ m=1,N,\ G_C \neq 0 \qquad (2)$$
3. Обединяването на всички подграфи да съответства на изходния граф;
$$(\cup G_m) \cup G_C = G,\ m=1,N. \qquad (3)$$
4. Всеки два подграфа да нямат общи върхове.
$$G_i \cap G_j = 0,\ i \neq j,\ i,j = 1,N. \qquad (4)$$

Като външни връзки се разглеждат връзките между отделните подграфи (подсхеми, подсистеми), а като вътрешни - връзките между върховете (елементите) в отделните подграфи. Реброто $E_i$ е вътрешно, ако $E_i \in E_m$, в противен случай се счита за външно.

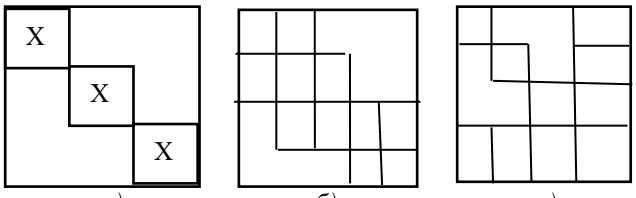
Една друга формулировка на задачата за разделяне на графа се представя със следния запис:

Даден е графа $G(V,E)$. Да се раздели на подграфи $G_m=(V_m,E_m)$, $m=1...N$ при удовлетворяване на следните условия:

1. $g_{min} \leq G_m \leq g_{max},\ m=1,N,$ където $g_{min}$ и $g_{max}$ са минималния и максималния размер на отделните подграфи.
2. $0.6\ m_{max} \leq g_{min} < m_{max}$
3. $m_{max} < g_{max} \leq 1.4\ m_{max}$

Диакоптичният подход, може да се приложи както към обекта (системата), така и върху математическия му модел записан в общ вид както следва.
$$Ax=B \qquad (5)$$
където А е матрица за системата, която се построява по определени правила и зависи от избрания метод за моделиране.

Разделянето на математическия модел на системата се свежда до привеждане на матрица А към една от следните форми.




*а)* *б)* *в)*

***фиг. 1.*** *Структури на особени матрични форми.*

Привеждането на матрицата $A$ към една от показаните структури се извършва с преобразуването и по определени правила. От гледна точка на оптимално използване на изчислителни ресурси е удачно да се работи с блоково-диагонални матрици *(фиг.1,а)* или с лентови *(фиг.1,б)*. При функционално проектиране най-използваната структура е блоково-диагонална с ограничения *(фиг.1,в)*.

Математическият модел на системата, чиято матрица $A$ е представена в тази форма има вида:

$$\begin{bmatrix} A_{11} \cdots & 0 & A_{1r} \\ \cdots A_{22} & 0 & A_{2r} \\ \cdots\cdots\cdots & & \\ 0 & A_{nn} & A_{nr} \\ A_{r1} \cdots & & A_{rr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdots \\ X_n \\ X_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ b_n \\ b_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

Задачата за привеждане на матрицата $A$ в блоков вид се свежда до задача за намиране на такава неособена матрица $T$, с която да се получи матрицата $B$:

$$B=T^{-1}AT \quad (7)$$

В общия случай тази задача изисква решаване на системата от матрични уравнения от вида:

$$AT-TB=0 \quad (8)$$

Ако разделим системата на подсистеми, преди съставянето на модела, можем да получим необходимата структура на матрицата А още на етапа на съставяне на уравнения на системата.

При конструктивното проектиране системите се разглеждат като съвкупност от отделни конструктивни модули, свързани помежду си по определен начин. Между конструктивните модули също може да се установи йерархия в зависимост от сложността им. Най-ниско ниво в тази йерархия заемат конструктивните модули, които не могат да се разделят. Следващото ниво са конструктивните модули, изграждани от модулите на по-ниското ниво, и т.н.

Конструктивните модули представляват елементи от конструкцията (куплунг, печатна платка, кутия, захранващ блок и т.н.), от които технически се реализират системите. Конструктивните модули също се характеризират със своята сложност и йерархично място в цялостната конструкция на устройството. При конструктивно проектиране се решават задачите, свързани със синтез на конструкцията, верификация и документиране на конструктивния проект. Основна задача при синтез на конструкцията е задачата за компановка на конструктивните модули по конструктивното поле. Тя включва решаването на три основни задачи: типизация, покритие и декомпозиция. По своята същност тези задачи са оптимизационни. За решаването им прилагат следните критерии: минимална сумарна дължина на връзките между модулите, минимален брой типове модули, минимален брой връзки между модулите и др.

Задачата на компоновката може да се разглежда в два аспекта: компоновка с образуване на произволни функционално-конструктивни модули и компоновка с образуване на предварително зададени функционално-конструктивни модули.

Задачата за компоновка се свежда до декомпозиране на системата на отделни функционални възли, които могат да се поместят в конструктивни модули от различни йерархични нива. Най-използваните критерии за решаване на тази задача са размерът на функционалния модул и броят на външните връзки между отделните функционални възли, разположени в различни конструктивни модули. Съобразно тези критерии задачата за компоновка се свежда до декомпозиране на множеството на елементите $\{A\} = \{a_1, a_2, ..., a_n\}$ на отделни не пресичащи се подмножества $\{A_i\}$, $i = 1, 2, ..., m$ по такъв начин, че

$$\{A_i\} \bigcap \{A_j\} = \{0\} \text{ за } i \neq j, \quad (9)$$

$$\bigcup_{i=1}^{m} \{A_j\} = \{A\}, \quad (10)$$

Оптималното решение на задачата за декомпозиция е свързано с определянето на минимален брой модули. Ако с $j$ се отбележи възможният клас разбивания на множеството $\{A\}$, то

$$\{A\} = \bigcup_{i=1}^{m_j} \{A_i^j\}, j = 1, 2, ..., p. \quad (11)$$

Структурата на системата може да се представи чрез графов модел $G = \{A, V\}$, при който който множеството на върховете $\{A\} = \{a_1, a_2, ..., a_n\}$ съответства на множеството на елементите на системата (подсистемата, модула), а множеството на ребрата $\{V\} = \{v_1, v_2, ..., v_n\}$ – на връзките между елементите. Така задачата за декомпозиция на системата може да се приведе към задача за разделяне на графовия модел на подграфи по определен критерии.

На върха $a_i$ може да се поставят за оценки за сложност и свързаност. Сложността на елемента $S(a_i)$ се определя от общия брой на входовете и изходите му, а свързаността $E(a_i)$ – от връзките елемента с оста-

налите елементи в системата. За всяко подмножество $\{A_i\}$ от елементи също могат да се поставят аналогични оценки $S(A_i)$ и $E(A_i)$, като

$$S(A)_i = \sum_{a_i \in A_i} S(a_i), \qquad (12)$$

$$E(A_i) = S(A_i) - \sum_{s \in I(A_i)} d_1(s) - \sum_{s \in B(A_i)} d_2(s) \qquad (13)$$

където:

$\{I(A_i)\}$ - е подмножеството от всички върхове, инцидентни само с върховете на елементите от подмножеството $\{A_i\}$;

$\{B(A_i)\}$ – подмножеството на външните върхове на подмножеството $\{A_i\}$, инцидентни поне на един от върховете от $\{A_i\}$ и едновременно с това представляващи входове или изходи на елементите, неучастващи в подмножеството $\{A_i\}$;

$d_1(s)$ и $d_2(s)$ - са съответно броят на ребрата, свързващи $\{A_i\}$ с $\{I(Ai)\}$, и на ребрата, свързващи $\{A_i\}$ с $\{B(A_i)\}$.

При решаване на задачата за компоновка е необходимо да бъдат изпълнени и следните условия:

$$S(A_i) \le S_0 \text{ за всяко } i = 1, 2, ..., m \qquad (14)$$

$$E(A_i) \le E_0, \qquad (15)$$

където $S_0$ и $E_0$ представляват горните допустими оценки на сложността на конструктивния модул и на външните му връзки с останалите модули.

При формулиране на задачата за декомпозиция на графовия модел се използва критерия за минимален брой външни връзки между отделните конструктивни модули тогава. Броят на връзките между два конструктивни модула $i$ и $j$ се означава с $b_{ij}$ $(i \ne j)$ и отново се търси такова разбиване на системата на модули, при което е налице еднозначно съответствие между модула $i$ и подмножеството $\{A_i\}$ от елементи на системата. Общият брой връзки между всички модули тогава се дава с

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} b_{ij}, \qquad (16)$$

където $k$ е общият брой на модулите, на които е разделена системата.

Ако се въведат и разстоянията между отделните конструктивни модули $c_{ij}$ $(i \ne j)$, общата дължина на връзките между модулите може да се определи по формулата

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} c_{ij} b_{ij} \qquad (17)$$

Под оптимална компоновка тогава ще се разбира това декомпозиране на системата на модули, при което $W_{обр} = minW$

$$W_{обр} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} c_{ij}^{l} b_{ij}^{l} \qquad (18)$$

При компоновката с образуване на функционално конструктивни модули с предварително зададени характеристики, реализирани с конструктивни модули от най-ниско йерархично ниво, основен критерии за успешна компоновка е реализацията на цялата система при минимална цена, изразена във функция от цените на отделните модули. В този случай задачата се свежда до декомпозиране на системата на модули $T_i$ $(i = 1, 2, ..., k)$, всеки от които има определена цена $p_i$. Ако с $x_i$ означим честотата на използване на модула $T_i$, то може да се определи минималната цена на системата.

$$C = min \sum_{i=1}^{k} p_i x_i \qquad (19)$$

За модулите, които представляват неделима конструктивна единица критериите за сложност и брой на външните връзки на отделните модули отпадат, доколкото тези характеристики не подлежат на промяна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледани са основните задачи от етапите на функционално и конструктивно проектиране на системи, в които се прилага принципа на декомпозиция.

Декомпозирането на системите на подсистеми води до намаляване на изчислителните ресурси, необходими за изследване на проектните решения.

Декомпозирането на системите може да се реализира на различни нива на абстрактно представяне.

Приложението на принципа на декомпозиция може да се комбинира с прилагането на различни критерии.

**БЛАГОДАРНОСТИ:**

Настоящият документ е изготвен с финансовата помощ на договор № 2209Е за провеждане на научни изследвания по проект на тема: „Виртуална лаборатория за обучение по проектиране на цифров хардуер“ към Технически университет – Габрово.

## ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

[1]Kukenska V., Development of modular educational research dialog system for automated design in electronics., dissertation, Gabrovo, 1998.

[2]Kukenska V. P. Minev, Automation of engineering work, University Press “Vasil Aprilov”, Gabrovo 2016,

[3] Dimitrov, Y. B., L. H. Raykovska, V. I. Furnadjiev, Design and build automation in electronics, Technology, Sofia, 1991.

[4] Garvanov I., Modeling of processes and systems, Sofia,2014

[5] Hristov M., R. Radanov, B. Donchev, K. Mihaylov, D. Pukneva, O. Antonowa, D. Arabadjieva, Microelectronics Design Systems Laboratory Manual, Sofia, 2004.

# ПРОГРАМИРАНЕ ЗА ТАКТИЛНИ ДИСПЛЕИ С RASPBERRY PI И БИБЛИОТЕКА KIVY

**Делян Генков**
*Технически университет - Габрово*

# PROGRAMMING FOR TOUCH-SCREEN DISPLAYS USING RASPBERRY PI AND KIVY LIBRARY

**Delyan Genkov**
*Technical University - Gabrovo*

**Abstract**

*Touch screen displays are an essential part of our life. We all use smartphones, tablets, public devices, presentation screens and many other devices, equipped with touch screen displays on daily basis. There are many libraries and frameworks that can be used for programming for these displays. The paper presents one way to build such programs, using a library - Kivy, installed on a Raspberry Pi computer. The main goal of the paper is to share the undocumented behavior of the library and the experience of the author to overcome these unexpected features.*

**Keywords:** Touch Screen Display, Raspberry Pi, Kivy, Python.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Много съвременни устройства използват тактилни дисплеи – мобилни телефони, таблети, екрани за автомобилни табла, публични дисплеи. Съществуват много програмни среди и библиотеки, които могат да се използват за прихващане и обработка на докосването на потребителя до дисплея.

В настоящия доклад се описва опитът на автора с една такава библиотека – Kivy – безплатна библиотека с отворен код, позволяваща използване с програмен език Python. Библиотеката е многоплатформена, поддържа Android, iOS, Linux, macOS и Windows.[1]

Въпреки че проектът се развива вече 12 години от общност, наброяваща над 150 души и наличието на документация на сайта на проекта, не всички функционалности работят както е описано, понякога документацията е доста повърхностна и не може да се разбере лесно как и какво точно трябва да се направи. Поради широкото и използване има много въпроси за конкретни функции или употреба в Интернет пространството, които получават различни отговори и трикове, които понякога работят, друг път – не.

При разработката на конкретен проект беше избрана тази библиотека за управление на устройство чрез тактилен дисплей и бяха открити доста различия на поведението от документацията, както и бяха преодоляни доста трудности.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Основна цел на проекта беше замяна на блок с механични бутони с тактилен дисплей, като се симулират софтуерни бутони, при натискането на които да се изпраща команда към машината, но да бъдат добавени допълнителни функционалности. Част от тях са добавяне на екрани с допълнителна информация за компанията опериращa машините, извеждане на анкета за качеството на услугите, възпроизвеждане на рекламен клип, въвеждане на многоезичен интерфейс, както и екрани, съобщаващи за нефункционалност на машината и за режим на отдалечена диагностика.

За управлението на машината беше избран Raspberry Pi 4B компютър с 4 GB RAM памет и с операционна система Raspbian версия 11 (bullseye). Изборът беше продиктуван от наличието на HDMI порт за дисплея и USB портове за получаване на информация за докосване на екрана, както и от наличието на достатъчен брой входно/изходни портове за симулиране на 22 броя хардуерни бутони за машината.

Използваният дисплей е ZHIXIANDA 21.5 Inch Wide Screen FHD 1920x1080 With HDMI VGA USB Input Industrial Open Frame Touch Monitor, поради подходящия му размер за вграждане в машината. Той използва HDMI интерфейс за извеждане на информация и USB интерфейс за предаване на информацията за докосването към компютъра. При свързването и двете функции бяха автоматично разпознати от операционната система и не се наложи да се инсталират драйвери или да се калибрира системата, управлението на операционната система се изпълняваше успешно чрез докосвания на екрана.

За управление на машината бяха инсталирани библиотеката Kivy и необходимите допълнителни компоненти, според инсталационната процедура от документацията, както и необходимите компоненти за програмиране с Python. [4]

В Kivy графичните примитиви (бутони, текстови полета, изображения) се наричат с общото наименование Widget. Те могат да се добавят към подложки (Layouts), които имат различен начин на разполагане на обектите в тях.

Свойствата на всеки обект – цвят, размер и други се управляват, променяйки свойството на обекта в програмата на Python или чрез специален език – Kivy Language, чрез който във външен файл с разширение .kv се описват свойствата. Пример за такова описание е представен на фигура 1.

```
MyWidget:
    canvas:
        Color:
            rgba: 1, .3, .8, .5
```

***Фиг. 1**. Пример за Kivy Language*

Примерът създава фон (Canvas) с цвят 100% червено, 30% зелено, 80% синьо и 50% прозрачност. Еквивалентният код на Python е показан на фигура 2.

```
with self.canvas:
    Color(1,.3,.8,.5, mode='rgba')
```

***Фиг. 2**. Еквивалентен код на Python*

Поради относителната спешност на проекта и непознаването на Kivy Language, неговото използване беше изоставено и целия код на обектите в приложението беше описан на Python. В последствие беше установено, че избраният подход може би не е най-добрият, защото кодът на финалната програма надвиши 1300 реда и стана труден за ориентация, както и промяната на свойствата на някои обекти се затрудни.

Цялата структура на обектите е дървовидна – коренът на дървото е главният обект на приложението, като в него могат да се добавят различни обекти – деца (Children), които в себе си могат да съдържат други обекти.

Идеята на изграждането приложение беше то да има различни екрани за различните функционалности. Затова за главен обект беше избран ScreenManager – обект, който може да съдържа в себе си много екрани и да сменя активния при команда.

Отделните екрани съдържат различни обекти. В зависимост от начина на подреждане на обектите е удобно като контейнери да се използват подложки (Layouts). Поддържат се следните видове подложки:

- BoxLayout – хоризонтален или вертикален. Разпределя обектите по хоризонтала или по вертикала, разделяйки пространството между всички обекти;
- GridLayout – нарежда обектите в решетка с фиксиран брой редове и/или колони;
- AnchorLayout, където позицията на елемент може да се избира между горе, център и долу във вертикална позиция и ляво, център и дясно в хоризонтална;
- FloatLayout, където позицията на всеки елемент може да се посочва в

относителни или абсолютни координати.

Тези елементи могат да се наслагват един върху друг, за да се постигне желаната подредба. При докосване на екрана, всеки обект, който е в обсега на докосването получава събитие on_press и on_release, независимо на каква дълбочина се намира.

В нашия случай главният екран на приложението ще бъде с фиксиран размер и изисква подреждането на 18 еднакви по размер бутона, наредени в три колони. Освен тях са необходими още 5 допълнителни бутона, разположени на фиксирани места. Разположението на екрана е показано на фигура 3.




***Фиг. 3**. Основен екран на приложението*

Бутоните за избор на напитка са разположени под съответната картинка и са наредени автоматично в GridLayout. Добавянето на един бутон е показано на фигура 4, за другите е аналогично.

```
grid = GridLayout(cols=3, rows=6,
spacing = (50,50), padding = (80,
300, 80, 150))

btn1=Button(text='Button 1',
background_color = (0,0,0,0))

btn1.bind(on_press=coffee_btn)
btn1.bind(on_release=clear_out)
grid.add_widget(btn1)
```

***Фиг. 4**. Добавяне на бутони в GridLayout*

На горните три реда се създава GridLayout с три колони и 6 реда, задава се разстоянието между отделните бутони и отстоянието на елементите от границите на екрана. След това се създава бутон с име Button 1. Името е важно, защото после във функциите, присъединени към събитията на бутоните ще се разпознава кой бутон е натиснат или отпуснат по името на бутона. Чрез действието bind се назначават функциите, които се изпълняват при натискане и отпускане на бутон и накрая бутонът се добавя в подложката.

При добавяне на елементи в Layout трябва да се има предвид, че в масива, описващ поделементите на подложката – children[] елементът с индекс 0 е последния добавен бутон, а не първия.

Другите бутони са в полетата горе вляво под емблемата на клиента за портфолио, горе в средата за регулиране на захар, долу вляво за информация и долу вдясно за смяна на език. Освен тях има две текстови полета за сумата, която е пусната в машината и горе вдясно за изписване на текущия час. Всички тези елементи са наредени в един FloatLayout и позициите им са фиксирани твърдо. Добавянето на първия елемент е показано на фигура 5, за останалите е аналогично.

```
floatlay = FloatLayout()
button = Button(text='About',
size_hint = (.5, .05), pos = (0, 0))

button.bind(on_press=callback)
floatlay.add_widget(button)
```

***Фиг. 5**. Добавяне на бутон във FloatLayout*

Първият ред създава FloatLayout, а втория – бутон. Размерът на бутона в полето

size_hint е в проценти от размера на екрана. В случая размерът на бутона е половината от ширината (x – координатата) на екрана, а по височина – 5% от размера на дисплея. В последствие създаденият FloatLayout с добавените към него бутони се добавя като подчинен елемент на екрана.

След аранжирането на бутоните най-отгоре се добавя изображение, което скрива графичното представяне на бутоните. Върху него се добавят двете текстови полета за кредит и час. Кодът е показан на фигура 6.

```
screen1.add_widget(Image(source='imag
es/menu.jpg'))
lblCredit = Label(text='0.00')
lblCredit.color=(0, 0, 0, 1)
lblCredit.background_color=(0,0,0,0)
lblCredit.font_size=70
lblCredit.bold=True
lblCredit.pos=(90, 890)
```

***Фиг. 6**. Добавяне на изображение и текстово поле*

Първият ред добавя картинката, която е най-отгоре на екрана. След това се създава текстово поле с бял цвят на текста и прозрачен фон с голям размер шрифт, удебелен и се позиционира на абсолютна позиция на екрана. По същия начин се създава и текстовото поле за часа.

Повечето останали екрани са статични изображения с добавени един или няколко бутона, тяхното създаване е аналогично. По-голям интерес представляват екраните с анкетата, която се предлага на потребителя след избора на напитка и екранът с рекламното видео, който се визуализира след отказ от анкета.

На екрана с анкетата могат да се изобразяват до 4 въпроса, което е определено от размера на екрана и времето, което потребителят има, за да попълни анкетата. Въпросите могат да бъдат с по един възможен отговор или с по няколко възможни отговора. Тъй като трябва да се осигури възможност за задаване на въпросите и възможните отговори е дефиниран формат на текстов файл, в който собственика на машината да записва опциите за анкетата. При стартиране на програмата се изчита файла и се конструира анкетата с необходимите контроли и текст, както е показано на фигура 7.

```
Questions=4
Question1=Доволни ли сте от
качеството на напитките?
Type=radio
Answers=2
Answer1=Да
Answer2=Не
```

***Фиг. 7**. Формат на файла за анкета*

Най-отгоре се указва броя на въпросите, след това за всеки въпрос се указва текста на въпроса, типа на отговорите – дали е с радио-бутони (един възможен отговор) или с чек-бокс – няколко възможни отговора. След това се показват броя отговори и техните текстове. За всеки въпрос са предвидени до 4 възможни отговора и ако предложените отговори са по-малко, останалото пространство се допълва с празни текстови полета.

Интересното при избора на отговорите в Kivy е, че и в двата случая контролата се нарича checkbox. Ако трябва да има само един възможен отговор, трябва да се обединят няколкото възможни отговора в група с един и същ номер. Друг интересен момент е, че въпреки че иначе противоречи на правилата е възможно да няма нито един маркиран радиобутон. Проблемът, който беше забелязан беше, че библиотеката използва графични примитиви за радио бутоните и чек боксовете, които се изрязват от предварително записано графично изображение. Поисканата от клиента функционалност да увеличим размера на изображението не можеше да се осъществи по стандартен начин. За да стане възможно увеличаването на размера на чек-боксовете и радио-бутоните се наложи да се промени файла по подразбиране на библиотеката Kivy, който указва от коя точка и колко точки да бъдат изрязани от оригиналното изображение. Файлът се нарича defaulttheme.atlas, по подразбиране се намира в папка /usr/local/lib/python3.9/dist-packages/kivy/data/images/ и показва от кои координати на комбинираното изображение колко точки да се изрежат. За да се уголеми изображението на радиобутоните, се наложи да бъдат сменени всички координати на текстовете, съдържащи checkbox. Примерен текст на бутон е: "checkbox_radio_off": [196, 137, 26, 26]. Левите две стойност се увеличават спрямо подразбиращите се с 4

пиксела, а десните две се намаляват с 4.

Когато даден бутон бъде натиснат, програмата влиза в съответната функция, която е закачена при дефиницията на бутона. Възможно е функциите да са различни – при натискане и при отпускане на бутона, както е разработено в настоящата система. Един интересен ефект, който беше забелязан при настоящата разработка и не беше открит отговор при нито един Интернет форум беше, че при всяко натискане на бутон или чекбокс програмата влизаше два последователни пъти в прикачената функция и също така при отпускане влиза два пъти в съответната функция. Това наложи филтриране на натискането и отпускането – проверка дали това е първото натискане, при което да се предприема съответното действие и при второ задействане да пропуска извикването на функцията.

Друг интересен момент при работата на приложението беше с инициализацията на серийния порт. Разработваният софтуер си комуникира чрез USB интерфейс с външен контролер, свързан към LCD дисплей на машината за осигуряване на информация за текущия статус на машината и други входни параметри.

```
try:
   ser=serial.Serial("/dev/ttyUSB0",115200)
except:
   logging.info("ttyUSB0 not found!")
   try:

ser=serial.Serial("/dev/ttyUSB1",115200)
   except:
      logging.info("ttyUSB1 not found")
```

***Фиг. 8**. Инициализация на сериен порт*

Без промяна на физическия USB порт, в който е включен контролера, веднъж интерфейса се разпознава като устройство ttyUSB0, друг път като ttyUSB1. За преодоляване на този проблем, трябва да се направи проверка в началото на програмата какъв е текущият номер, както е показано на фигура 8.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение Kivy е една удобна библиотека за обработка на събития при работа с тактилен дисплей. Въпреки широкото си разпространение, документацията на проекта е доста оскъдна и някои функционалности имат различно от документираното поведение. В бъдеще са планирани подобни разработки за Android, както и разширяване на функционалността на съществуващата разработка.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящият документ е изготвен с финансовата помощ на договор № 2203Е за провеждане на научни изследвания по проект на тема: „Разработка и валидиране на решения за ефективно дистанционно обучение чрез използване на иновативни ИКТ технологии“ към Технически университет – Габрово.

## REFERENCE

[1] Kivy, Kivy: The Open Source Python App development Framework., https://kivy.org/, date of usage: 20.10.2022.

[2] Raspberry Pi foundation, Raspberry Pi 4 - Your tiny, dual-display, desktop computer…and robot brains, smart home hub, media centre, networked AI core, factory controller, and much more, https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/, date of usage 20.10.2022.

[3] Focus Tehnology, Metal Case 10 10.4 11.6 12.1 15 17 19 21.5 Inch Pcap Touch Screen Monitor Industrial Open Frame LCD Monitor, https://zhixianda.en.made-in-china.com/product/NQCpSRJVvnhE/China-Metal-Case-10-10-4-11-6-12-1-15-17-19-21-5-Inch-Pcap-Touch-Screen-Monitor-Industrial-Open-Frame-LCD-Monitor.html, Date of usage: 20.10.2022.

[4] Kivy. Getting Started » Installing Kivy, https://kivy.org/doc/stable/gettingstarted/installation.html, Date of usage: 18.02.2022.

# СЪЗДАВАНЕ НА ВИРТУАЛНА ЧАСТНА МРЕЖА ЧРЕЗ WIREGUARD

**Делян Генков**
*Технически университет - Габрово*

# CREATING A VIRTUAL PRIVATE NETWORK USING WIREGUARD

**Delyan Genkov**
*Technical University - Gabrovo*

**Abstract**

*The virtual private networks (VPN) are an essential part of our modern world. During the COVID crisis we all had to work from home and in the same time to access our corporate resources from anywhere. VPN's are a convenient way to establish a secure remote access to any corporate network. There are many protocols and software suites that can be used for setup a VPN access. Wireguard is a relatively new way for establishing a VPN network. The present paper aims to share the author's experience with this VPN suite.*

**Keywords:** virtual private network, VPN, Wireguard.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Виртуалните частни мрежи (Virtual Private Network, VPN) са широко използван начин за достъп до отдалечени мрежови ресурси по сигурен начин чрез криптиране на предаваните данни. Има много протоколни набори, чрез които може да се реализира такава мрежа, един от широко използваните стандарти се нарича IPSec, създаден е от Internet Engineering Task Force (IETF) през 1995 година и неговата текуща версия е описана в документа RFC-2401. [1]. Той може да се намери вграден в софтуера на доста маршрутизатори, с цел реализация на сигурна отдалечена връзка.

Други често използвани пакети са Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP) [2] и Layer Two Tunneling Protocol (L2TP) [3], които са създадени през 1999 година и са вградени в операционната система Microsoft Windows.

Проектът OpenVPN [4], създаден през 2001 година също е популярен и се намира вграден в софтуера на някои маршрутизатори, главно от домашен и среден клас, като се отличава с лесните настройки и начин на използване.

През 2020 г. в ядрото на операционната система Linux беше включен един нов проект за създаване и използване на виртуални частни мрежи – Wireguard [5]. Той бързо спечели привърженици със своите възможности и в момента е компилиран и работи в много платформи, включително Windows, macOS, BSD, iOS, Android. WireGuard е изключително проста, но бърза и модерна VPN, която използва най-съвременна криптография. Той има за цел да бъде по-бърз, по-опростен, по-икономичен и по-полезен от IPsec, като същевременно избягва огромното главоболие по сложните настройки. Той има за цел да бъде значително по-производителен от OpenVPN. WireGuard е проектиран като VPN с общо предназначение за работа от вградени системи до супер компютри и е подходящ за много различни ситуации.[5]

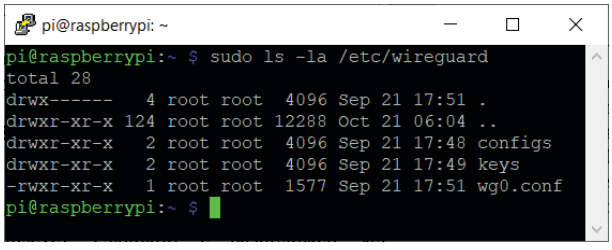
Сред предимствата на тази платформа са нейната висока производителност, минималната възможност за атаки, възможността за поддържане на връзка при преминаване от мрежа в мрежа (роуминг) и високото ниво на сигурност, осигурено от подбраните криптографски протоколи.

В разработката, която използва описаната мрежова инфраструктура беше необходимо да се избере протоколен набор за изграждане на виртуална частна мрежа между машини, разположени на различни места в страната и свързани чрез различни технологии за достъп до Интернет и през мрежи на различни Интернет доставчици. В част от тези свързаности не е възможно да се предостави публичен IP адрес на свързаността към Интернет. Тези машини трябва да установяват автоматично връзка към централен сървър, като получават фиксирани IP адреси във виртуалната частна мрежа, за да може да се идентифицира коректно машината. Компютърът на администратора също трябва да може да установява връзка към виртуалната частна мрежа, откъдето да достъпва машините, за да може да наблюдава тяхното състояние и да ги управлява. След направена поредица от тестове на различни платформи беше избран Wireguard за изграждане на виртуалната частна мрежа. Въпреки срещнатите трудности по време на изграждането, изборът се оказа успешен и мрежата изпълнява своите изисквания. В настоящия доклад са представени начините на конфигуриране и резултатите от използването на изградената мрежа, както и срещнатите предизвикателства и начините за тяхното решаване.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

За разработката са използвани Raspberry Pi компютри за сървър и клиенти с операционна система Raspbian версия 11 (bullseye). Сървърът е разположен зад маршрутизатор с публичен IP адрес и конфигурирано препращане на порт (port forwarding) за порта на сървъра – UDP 51820.

Инсталацията на сървърната част е в папка /etc/wireguard. Съдържанието и е показано на фигура 1.




***Фиг. 1**. Съдържание на сървърната папка*

Главният конфигурационен файл е wg0.conf. В папката configs се пазят генерираните конфигурационни файлове за всеки клиент, а в папката keys се пазят генерираните частен и публичен ключ на сървъра.

В конфигурационния файл основната секция е [Interface], показана на фигура 2.

```
[Interface]
PrivateKey = …
Address = 10.8.0.1/24
PostUp = iptables -A FORWARD -i wg0 -j ACCEPT; iptables -A FOR ACCEPT; iptables -t nat -A POSTROUTING -o eth0 -j MASQUERADE
PostDown = iptables -D FORWARD -i wg0 -j ACCEPT; iptables - D -j ACCEPT; iptables -t nat -D POSTROUTING -o eth0 -j MASQUERADE
MTU = 1420
ListenPort = 51820
```

***Фиг. 2**. Обща конфигурация на сървъра*

В секцията PrivateKey се изписва генерирания частен ключ на сървъра, който е премахнат от показаната конфигурация от съображения за сигурност. В секцията Address се указва мрежата, от която ще се раздават адреси на клиентските устройства. Командите в секциите PostUp и PostDown се използват за добавяне и премахване на изключение за необходимите пакети в защитната стена на операционната система при установяване и прекъсване на връзката. Секцията MTU е необходима за намаляване на подразбиращия се максимален размер на пакета от 1500 байта на 1420 байта, за да могат увеличените със заглавната част на VPN протокола пакети да преминават през установения тунел без фрагментация. Накрая в секцията ListenPort се указва UDP порта, който се използва за връзката.

За генериране на конфигурация за нов клиент се използва командата sudo pivpn add, както е показано на фигура 3.




***Фиг. 3**. Генериране на нов клиент*

След изпълнението на тази команда трябва да въведем име на потребителя в случая Admin_for_all

Командата създава потребителски конфигурационен файл с име Admin_for_all.conf името му е такова заради, ролята му която ще изпълнява. Този потребител ще може да вижда всички останали потребители свързани към сървъра, като за целта са му нужни определени настройки за да изпълни тези изисквания. За да видим и редактираме този файл трябва да навигираме до директория /home/pi/configs. Това подсещане се изписва след като създадем определения потребител. Тази реализация на VPN сървър поддържа и опция за генериране на QR код като с негова помощ и мобилно приложение, което сканира QR кода ще има достъп до VPN сървъра.

За всеки конфигуриран клиент в конфигурационния файл на сървъра трябва да има по една секция [Peer], която да съдържа показаната на фигура 4 конфигурация.

```
[Peer]
PublicKey = …
PresharedKey = …
AllowedIPs = 10.8.0.7/32
```

***Фиг. 4**. Секция за клиентска конфигурация*

В секцията PublicKey се записва генерирания публичен ключ на отдалеченото устройство, а в секцията PresharedKey – споделения ключ, който е еднакъв за двете устройства. Двата ключа са премахнати от показаната конфигурация от съображения за сигурност. В секцията AllowedIPs се записва IP адресът, който ще получи клиента с префикс /24.

За да се конфигурира клиентското устройство, трябва да се копира съдържанието на генерирания файл за съответния клиент и да се запише в папката /etc/wireguard като файл с име wg0.conf. необходимото съдържание е показано на фигура 5. Към автоматично генерираното съдържание трябва да се добавят и някои нови неща, за да може само необходимите пакети да преминават през VPN тунела и да се осъществява автоматично връзката.

```
[Interface]
PrivateKey = …
Address = 10.8.0.2/24
DNS = 8.8.8.8, 8.8.4.4

[Peer]
PublicKey = …
PresharedKey = …
Endpoint = 1.2.3.4:51820
AllowedIPs = 10.8.0.0/16
PersistentKeepalive=10
```

***Фиг. 5**. Конфигурация на Raspberry PI клиент*

В секцията PrivateKey се записва генерираният частен ключ за тази станция, както е записан в автоматично генерирания файл. В секцията Address се записва IP адресът, с който ще работи тази станция. За нашата задача е важно станциите да имат статични IP адреси, за да се знае коя точно машина се достъпва в даден момент от време. В секцията DNS се записват адреси на един или повече DNS сървъри, които ще използва клиента. В секцията PublicKey се записва генерираният публичен ключ на сървъра, а в секцията PresharedKey – споделеният ключ за тази станция. В конфигурационния фрагмент ключовете са премахнати от съображения за сигурност. В секцията Endpoint се записва публичния IP адрес на сървъра, заедно с номера на порта, на който е конфигуриран Wireguard сървъра (показан на фигура 2 в секцията ListenPort).

Секцията AllowedIPs по подразбиране се генерира със стойност 0.0.0.0/0, ::0 при автоматичния процес на генериране, но тази стойност указва целия трафик на отдалечената машина за протоколите IPv4 и IPv6 да се препраща към тунела, което няма да позволи локалната машина да достъпва ресурси в Интернет. Затова е добре тя да се смени, както е показано на фигура 6 – да позволява само трафикът за мрежата на адресите на VPN мрежата (в случая 10.8.0.0) да бъде препращана през тунела, а останалия трафик да бъде маршрутизиран през локалната Интернет свързаност. В нашата мрежа не се използва протокол IPv6, затова неговата конфигурация се премахва от автоматично генерирания файл. Също така е необходимо ръчно да се добави в конфигурационния файл секцията PersistentKeepalive=10, което ще позволи връзката на отдалечения

клиент да се установи автоматично при наличие на Интернет свързаност към сървъра.

От конзолата на сървъра може да се види информация за свързаните клиенти с командата: sudo wg show, както е показано на фигура 6.

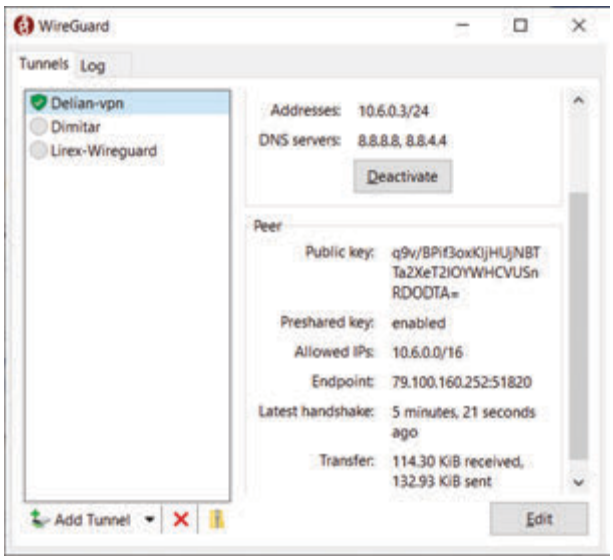
```
  root@raspberrypi:/home/pi# wg show
  interface: wg0
    public key: …
    private key: (hidden)
    listening port: 51820

  peer:
cO8uzrHuvkUFqANlTE4DYcc3Jc5rx7ZkfYUXG
+qS2hE=
    preshared key: (hidden)
    endpoint: 5.6.7.8:41230
    allowed ips: 10.6.0.2/32
    latest handshake: 1 second ago
    transfer:  20.94  MiB  received,
11.28 MiB sent
```

***Фиг. 6**. Проверка на свързаните клиенти*

Показаната информация съдържа данни за публичния ключ на сървъра, който не е таен, но е премахнат от конфигурационния файл за по-добра прегледност, частния ключ, който е таен не се визуализира от командата. Показва се още и номерът на порта, на който е конфигуриран сървъра. За всеки свързан клиент отдолу се визуализира следната информация – публичния ключ на клиента, неговия публичен IP адрес и номерът на порта, частният му IP адрес във VPN мрежата и информация за предадените и приети данни към и от този клиент. От съображения за сигурност командата не показва споделения ключ. В примера е показана информация само за един клиент.

На компютъра на администраторите на системата се инсталира Wireguard VPN Client – в случая се използва операционна система Microsoft Windows и е показана работата и конфигурацията на този клиент, но е аналогично за останалите поддържани операционни системи. За този клиент също се генерира конфигурационен файл на сървъра, както е показано на фигура 3 и конфигурационния файл се импортира в клиента, като се прави отново редакция на IP адресите, които ще се препращат през тунела, в противен случай клиентът няма да има Интернет свързаност. Екранът на клиентския софтуер е показан на фигура 7.




***Фиг. 7**. Клиент за Windows*

В този клиент са добавени три различни VPN тунела, които се използват за различни цели. В момента е активен тунелът, който се използва в конкретната разработка. Вижда се, че той е активен, както и може да се разбере информация за VPN адреса на компютъра, DNS сървърите, които се използват, публичния ключ на компютъра, позволените IP адреси, които преминават през тунела, както и информация за предадените и приети данни. С бутона Edit може да се редактира конфигурацията на тунела, а с Activate/ Deactivate да се активира и деактивира VPN свързаността. След активиране на тунела всички свързани машини вече са достъпни и могат да се наблюдават и управляват отдалечено през всеки разрешен протокол – в нашия случай ssh и http.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конфигурирана и тествана е виртуална частна мрежа, която свързва отдалечени машини с различен Интернет достъп към централен сървър, откъдето могат да бъдат наблюдавани и управлявани устройствата, свързани към мрежата. Избран е подходящ протоколен набор за изграждането и са показани необходимите настройки за конфигурирането на сървъра и клиентските машини. В момента в мрежата са свързани три машини и три администраторски компютъра. В бъдеще се очаква да бъдат включени около 300 машини в мрежата. Получените резултати показват, че мрежата изпълнява своите функции и е адекватна на

поставените предварителни изисквания. Wireguard се оказва лесна за употреба технология с малко натоварване върху компютърните системи, но в същото време бърза, надеждна и сигурна.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящият документ е изготвен с финансовата помощ на договор № 2203Е за провеждане на научни изследвания по проект на тема: „Разработка и валидиране на решения за ефективно дистанционно обучение чрез използване на иновативни ИКТ технологии“ към Технически университет – Габрово.

## REFERENCE

[1] S. Kent, R. Atkinson, Security Architecture for the Internet Protocol, RFC 2401, https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2401, date of usage 20.10.2022.

[2] K. Hamzeh, G. Pall, etc., Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP), RFC 2637, https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2637, date of usage 20.10.2022.

[3] W. Townsley, A. Valencia, etc., Layer Two Tunneling Protocol "L2TP", RFC 2661, https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2661, date of usage 20.10.2022.

[4] OpenVPN, Secure access and network connectivity reimagined, https://openvpn.net/, Date of usage 20.20.2022

[5] Jason A. Donenfeld, Wireguard, fast, modern, secure VPN Tunnel, https://www.wireguard.com/, date of usage 20.10.2022.

# DETERMINING AN EFFECTIVE SET OF TIME SERIES DATA PARAMETERS SUITABLE FOR IDENTIFYING SECURITY INCIDENTS

**Vasyl Komarov, Dmitrii Chernov, Vladimir Krizhanovski**

*Vasyl' Stus Donetsk National University*

**Abstract**

*The purpose of the research is developing a method of data analysis, systematization, and preparation of time series of sensors values for further analysis by the method of structural functions (Allan variance), which can be used to reveal characteristics of processes and their changes with high validity. The data collection was performed in a real cyber-physical system on large range time intervals using examples of 11 different temperature sensors. The analysis of the processed digital data was performed and influences factors on the way from the measurement point to the point of receiving information were determined. It is shown that the appropriate preparation of data arrays makes it possible to obtain distinctive generalized samples of time sequences parameters, the comparison to which allows to detect security incidents and abnormal processes in IoT sensor networks. The considering of these factors makes it possible to create a tool for sensors values pre-sorting and sample data sets obtaining. The developed hardware and software tools for such preliminary processing are described.*

**Keywords:** time series data, data preparation, Identification of differences in date, Allan variance.

## INTRODUCTION

There is an issue with the analysis of data sequences that are accumulated (generated) over time. That issue has acquired special value in connection with the development of the Internet of Things (IoT) and the autonomous operation of large networks of sensors. In such a network the need for the detection of abnormal operations or external (unauthorized) interference has of important. In other words, tasks of control of the proper operation of sensor networks (safety) and control of attacks on these networks (security) are actual.

There are many methods of solving similar problems, which include the analysis of time series [1], the search for "disorder" in the process [2], the use of event tracking systems [3], statistical methods [4], etc. Many of these methods require large amounts of data to be processed, which is justified in terms of obtaining detailed information, but IoT systems create excessive communication traffic and lead to an increase in power consumption. The challenge arises to reduce the cost of computing power and energy for data transmission and processing while maintaining the accuracy and detail of time series analysis. One of the possible options is the use of the method of structural functions, namely the Allan variance and related functions, which make it possible to obtain generalized characteristics of the stochastic process, based on which it is possible to determine the key parameters, by the change of which it is possible to determine the change in the nature of the process [5]. The result of such processing is a set of data, the number of which is proportional to $\log_2 n$, where $n$ is the number of numerical values in the sequence. Thus, it is possible to achieve a significant reduction in the amount of data that must be transmitted for processing. Of course, it is important to understand what exactly is needed and possible to get using this method.

The most practically significant results of the use of system functions and Allan dispersion were obtained in the analysis of highly stable electromagnetic oscillators, gyroscopes, and other stable systems, where the deviations are many orders of magnitude smaller compared to the averaged values in the time series (when it can be determined) [5]. At the same time, there are examples of using this

method for processes in which a different relationship between the deviation of parameters and their average value is observed [6]. For example, the analysis of the results obtained from application of Allan dispersion to the results of experiments with sensors of the Internet of Things shows that the calculated indicators of the processes are affected by the functioning properties of specific types of sensors: their dynamic characteristics, single outliers in the general data flow, etc.

The purpose of the work is to develop a method of analysis and preparation of data of time series of sensor for further processing by the method of structural functions, so that further processing allows to detect the characteristics of processes and their change with high reliability.

## EXPOSITION

In research for purposes of automation of data collection an improvised IoT sensor node [7] consisting of an Arduino Uno board, an additional module with a flash drive and DS3231 real-time clock module was considered.

For an experimental study of the properties was used 4 types of sensors: DS18B20 temperature sensors (2 devices), two types of combined temperature and humidity sensors DHT11 (4 devices) and DHT22 (also 4 devices), the DS3231 includes a temperature sensor, which also was considered with other sensors. In total 11 temperature sensors located in relatively close physical conditions were used simultaneously in the study. All used sensor types are very common, so certain properties of their metrological characteristics are available in the corresponding datasheets.

The collection of dataflows from temperature sensors was provided entirely on the side of the Arduino controller by a specially developed algorithm using the PlatformIO toolkit within the VSCode IDE. The controller, performing tasks in autonomous mode, stored a measurements series of different intervals and periods for all connected sensors on the flash card. Some software tricks were made in the controller algorithm of the improvised sensor node to minimize the possibility of periodic jitter effect appearing in the data due to the moments of recording the measurement data on the flash card, creation of folders and files, which are needed quite often and could not be taken out of the total measurement time due to the limit of the controller's RAM and the lack of multitasking.

Further statistical analysis of data samples with automated conditional evaluation and systematization of the nature of changes during the measurement was performed on the PC using a specially written Python script, which generates of an aggregate brief report of data distribution by sensor type, measurement interval, value range.

The following naming conventions are used in the algorithms and below in the article: sample – data of a single measured temperature value; probe – an unitary continuous limited fragment of dataflow with given fixed sample rate and number of samples. Several probe samples are presented in the Fig. 1-3 on the left. Probes can be overlapped and nonoverlapped.

In total, 4075 nonoverlapped probes suitable for further analysis were obtained from 11 sensors. These probes include only measurements during which there was changes in the measured value, to which the Allan dispersion method can be applied. For several reasons the distribution turned out to be not homogeneous in relation to the types of sensors. The main reasons are the unequal number of various sensors involved in the experiment (which was due to the existing nomenclature at the time of the start of the experiment) and the capabilities of the used improvised model of the sensor node. In addition, the DS18B20 sensors were set to two different resolution options for separate series of measurements, which should be distinguished as two sub-types of sensors (see Fig. 2), and the integrated sensor DS3231 by default has the coarsest discretization of the sensors used, which in advance resulted in the production of a larger number samples with a fixed temperature value, which were rejected as uninformative and not suitable for variance estimation. Table 1 shows overall statistical data of the obtained probes.

Some of the obtained probes from individual sensors turned out to contain unintentionally arising unnatural values (see Fig. 3). Probably it was caused by several reasons or a combination of them, including poor contacts of the Arduino's connectors during part of the

***Table 1.***

| Sensor types | | DHT11 | DHT22 | DS18B20 (9 bit) | DS18B20 (12 bit) | DS3121 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Devices | | 4 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| Sample rate (s) | min | | | 10.0 | | |
| | max | | | 2.5 | | |
| Samples | min | | | 128 | | |
| | max | | | 1024 | | |
| Temperature (°C) | min | 55.4 | 50.8 | 44.5 | 42.25 | 43.5 |
| | max | 9.7 | 10.5 | 10.0 | 14.43 | 12.0 |
| $\Delta T_{min}$ (°C) | | 0.09 | 0.1 | 0.5 | 0.06 | 0.25 |
| Probes | Total | 1517 | 1510 | 145 | 452 | 285 |
| | Natural | 912 | 1410 | 145 | 412 | 265 |
| | Anomaly | 605 | 100 | – | 40 | 20 |

measurements, as well as fluctuations in current consumption and electromagnetic activity of the flash drive board located physically close to the data buses on the improvised sensor node (finally spikes in data received instead of the expected jitter). The DHT11 sensors turned out to be the most "sensitive" to the conditions over data collection phase of the experiment (possibly just for the reason that the connector from this group of sensors was not lucky when assembling the measuring system).

The resolution of all DHT22 and DHT11 type sensors participating in the study was 0.1 of the main temperature measurement scale unit, and DS18B20 sensors – 0.06 and 0.5 for individual instances 1 and 2, respectively. This property limits the high-frequency fluctuations of the output signal of the sensors and causes differences in the statistical properties of the accumulated data, which is confirmed by their processing.

Observation of the responses of considered sensors to temperature changes confirm that the

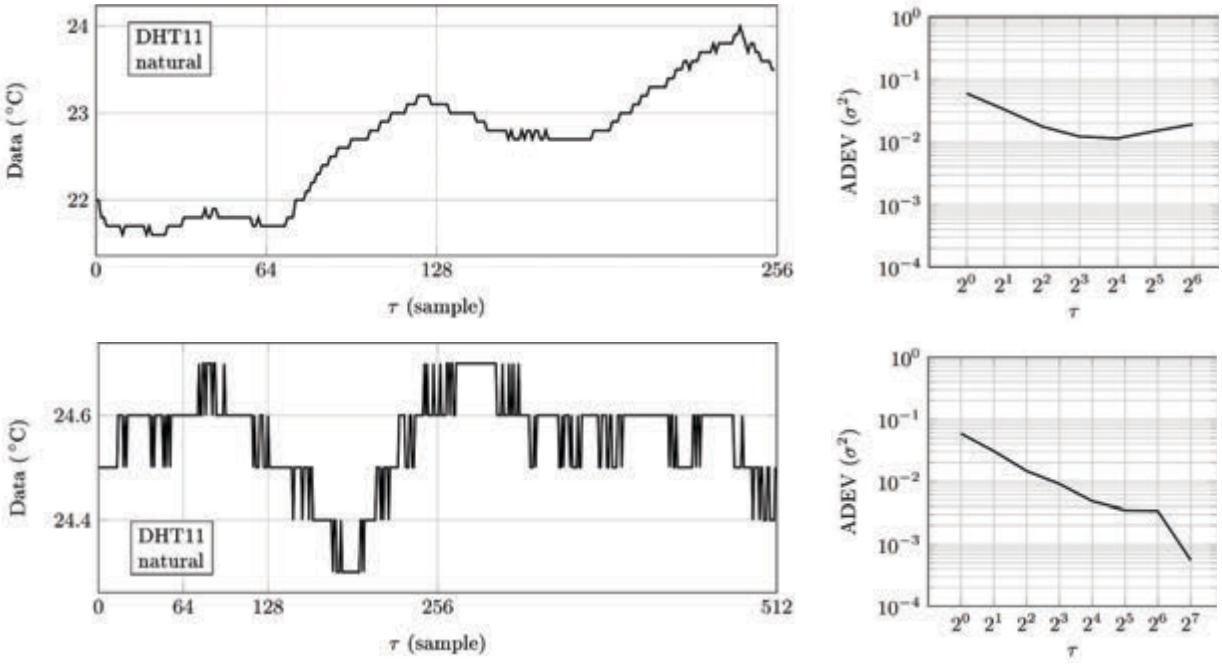



***Fig. 1.*** *Various samples of the DHT11 sensor data stream and the corresponding Allan variance*

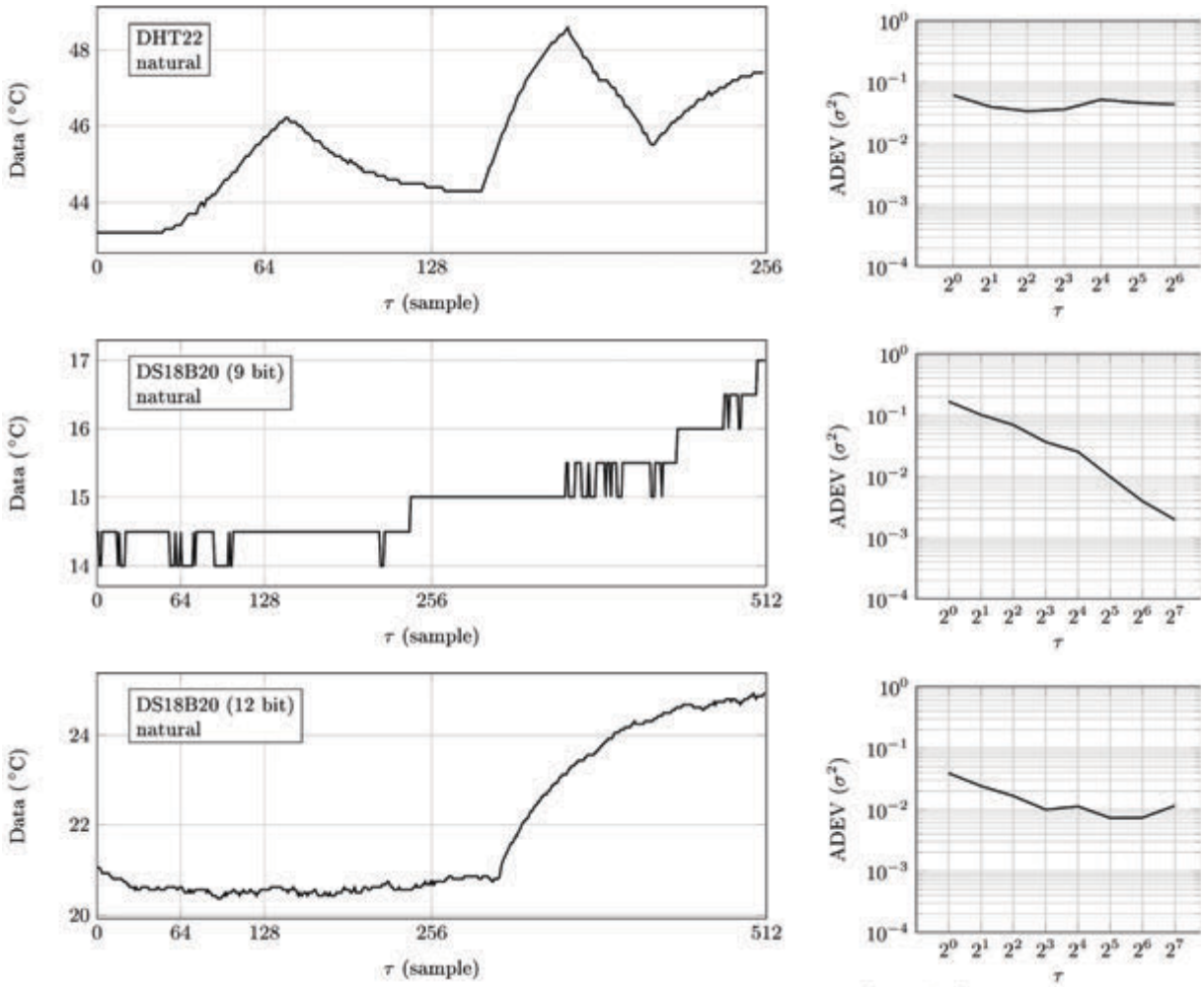



***Fig. 2.*** *Samples of the DHT22 and DS18B20 (with different resolution) data stream and the corresponding Allan variance*

received data have various dynamics, based on the type of sensor, the design differences, the transfer function of internal digital converters and transmission to the receiving device interface, as well as the individual specific of manufactured devices.

As it became clear after data analysis, a special limited representation of numerical values, which was used in the controller algorithm for intermediate storage, can also give an additional contribution to the transfer function for sensors with certain parameters of the digitalization of measured values due to the rising effect of multi-rate digital signal processing.

It is obvious that the time to establish the steady state of the sensor depends on its physical properties and, in the case of the studied sensors, has a systematic effect on high-frequency data changes, which can manifest itself against the background of a real change in the measured values. Differences in statistical data, caused by high-frequency fluctuations of the output signal depending on the resolution of the sensors under study, can be seen in the left section of the given graphs - in the case of DS18B20, the curves are expectedly higher for small values of τ. The graphs also clearly show the difference in the slope of the section with τ ~ 5–100 for the two types of sensors.

## CONCLUSION

The dynamic characteristics of the sensors, primarily the parameters of establishing a stationary state or the relaxation time in combination with value of time interval between individual polls of the sensor state allow to rationally limit the necessary number of consecutive samples and separate the redundant data, which mainly characterizes the source of the measured data and insignificantly characterizes the measurement system.

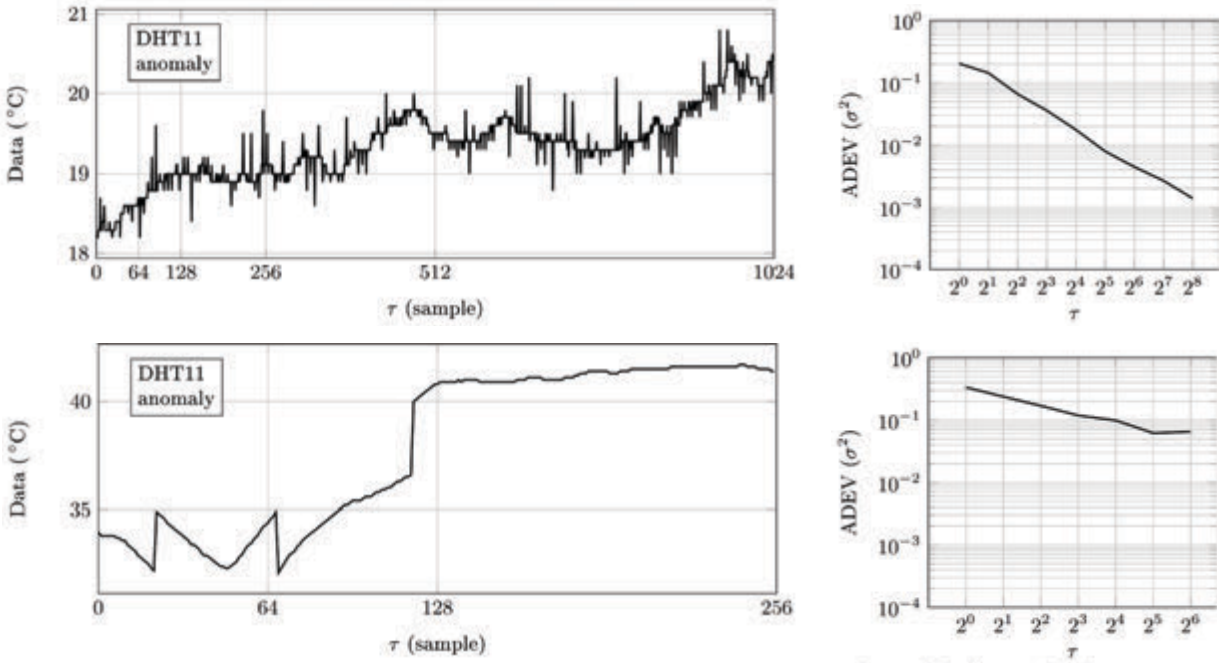



***Fig. 3.*** *Samples of the DHT11 sensor data stream with anomalies of different kind and the corresponding Allan variances.*

Each specific manufactured temperature sensor has to a certain extent a personal signature of metrological characteristics, which can be used indirectly to identify the type of sensor or atypical data from a known instance of the sensor, which may be a sign of interference in the operation of the measuring system or, for example, an emergency change in the properties of the sensor physical environments, when controlled object cannot perform its regular function.

Processing of the data flow this way in the dynamic Allan variance mode allows to continuous monitor the state of the sensor network using relatively small computing resources and network traffic.

## REFERENCE

[1] W. W. Wei. "Time series analysis." in *The Oxford Handbook of Quantitative Methods in Psychology: Vol. 2*, 2013, doi: 10.1093/oxfordhb/9780199934898.013.0022

[2] B. Yavorskyy, Yu. Leschyshyn, "Reliability of method for change-point detection of rhythm–cardiosignal," *Visnyk TNTU*, vol 73, no 1, pp. 252-258, 2014, (In Ukrainian.)

[3] G. González-Granadillo, S. González-Zarzosa, R. Diaz, "Security Information and Event Management (SIEM): Analysis, Trends, and Usage in Critical Infrastructures," *Sensors*, vol. 21, no. 14, p. 4759, 2021, doi: 10.3390/s21144759.

[4] Oakland, J., Oakland, R. J. *Statistical Process Control*, 7th ed. Routledge, 2018, doi: https://doi.org/10.4324/9781315160511

[5] Walls F.L., Allan, D.W. "Measurements of Frequency Stability", *Proceedings of the IEEE*, vol. 74, no. 1, pp. 162-168, 1986.

[6] L. Galleani L., P. Tavella, "The Dynamic Allan Variance V: Recent Advances in Dynamic Stability Analysis," in *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 63, no. 4, pp. 624-635, April 2016, doi: 10.1109/TUFFC.2015.2504124.

[7] V. G. Kryzhanovskyi, V. F. Komarov, S. P. Serhiienko and L. V. Zahoruiko, "Identification of Sensor Nodes Normal Operation Using Allan Variance," *Visnyk VPI*, no. 3, pp. 78–83, Jun. 2021. (In Ukrainian.), doi: 10.31649/1997-9266-2021-156-3-78-83.

НАПРАВЛЕНИЕ 5

# АВТОМАТИКА

SESSION 5

# AUTOMATION

# A SYSTEM FOR GATHERING AND VISUALIZATION OF AIR QUALITY DATA FROM A GEO-REFERENCED MULTI-SENSOR GAS-SENSING HEAD

**Kamen Boyadzhiev[1], Stefan Ivanov[2]**

*[1,2] Department of Automation, Information and Control Systems, Technical university of Gabrovo*

**Abstract**

*Nowadays collecting data is one of the most important tasks for understanding processes and phenomena, the weather and everything we are interested in. But what makes collected data valuable is finding an easy (if possible) and convenient or human-readable way of presenting it.*

*A prototype of a multi-sensor gas-sensing head is connected to a Raspberry Pi to record geo-referenced air quality data to a local database. It is tested with two GPS modules.*

*Gathered data is presented in a mapping software - Google MyMaps and MS Excel 3D Maps, which uses bing services. Both mapping services provide a fast and human readable way to read, analyze and understand air quality data.*

**Keywords:** air-quality monitoring; multi-gas-sensing; data visualization.

## INTRODUCTION

To make a good air quality evaluation several things are needed.

First, a way to measure the concentrations of 5 gases, namely the conventional (criteria) pollutant gases:

- carbon monoxide;
- nitrogen dioxide;
- nitrogen oxides;
- sulphur dioxide;
- ozone.

defined by the World Health Organization (WHO) [1, 2] and consequently by the national authorities. As a member of the European Union (EU), Bulgaria follows the EU legislation [3]. In [3] it is also defined a way how measurements take place, validity of the data, evaluation of the concentrations of the targeted gases and what local authorities to do to inform and protect the human health and vegetation.

Second, gathering the concentration of pollutant gases is directly connected to weather conditions and the specific location where measurements take place. That's why a measuring system should be equipped with a weather station to assess the weather conditions - ambient temperature and relative humidity, the speed and the direction of the wind, and the rain and snow precipitation. And of course, if it the measuring station is not on a fixed location, a GPS sensor to have the exact coordinates of measurement.

And last but not least, a way to represent gathered data in a human-readable and easy to understand way. In this way decision makers can use gathered data in a more convenient way.

## HARDWARE DESING

### *A. Measuring Head*

A prototype of a multi-sensor gas-sensing head (Figure 1) was developed for air quality monitoring. It consists of 5 electrochemical gas sensors. Each of them is for one of the specific targeted gases, but they also react to other gases. This parameter is called gross-sensitivity.

Electrochemical gas sensors generate current, proportional to the volume of the toxic gas, i.e. they work in amperometric mode. This current is filtered, amplified and processed by a microcontroller to obtain a calibrated reading in engineering units [4].

The measuring head is equipped with a sensor to evaluate ambient temperature and relative humidity.

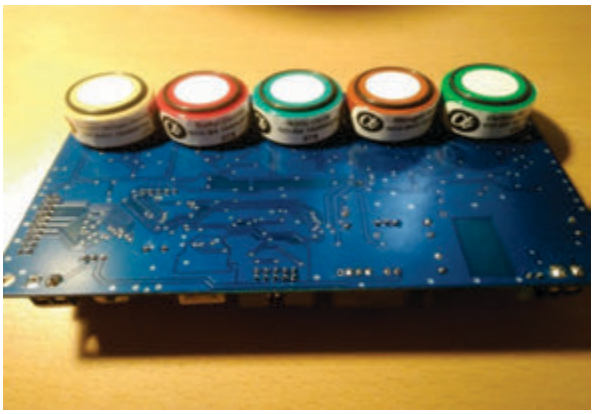


***Figure 1**. A prototype of a multi-sensor gas-sensing head*

### *B. Raspberry Pi 3 Model B+*

In order to store gathered air quality data, a single-board computer is used. It is a powerful enough and compact form of a computer. It has an operating system on which a database is installed - MySQL. In this way, all the data is stored locally. The Raspberry also has a built-in RJ-45 port and Wi-Fi, so it could easily distribute the stored data if it is in range of Internet.

### *C. GPS modules*

To get the exact location where the measuring head is situated, the system has been tested with two GPS modules. They differ each other by the price and the way they provide the GPS coordinates.

### *C.1. U-blox7 VK-172 USB GPS*

The VK-172 USB GPS by U-blox7 (Figure 2) is a relatively cheap GPS module that could be found on Amazon. It is with the size of a Flash disk and is connected directly to one of the USB ports of the Raspberry Pi. It has a led to easy identify if it is connected to a satellite. When connected to the USB, it stays red, and when it successfully connects to a satellite in range, the led starts blinking rapidly. After configuration, the Raspberry Pi is ready to receive the GPS coordinates.




***Figure 2**. U-blox7 VK-172 USB GPS module*

It is recommended to use it outdoors, because it has a poor signal indoors and very small chance to receive satellite data.

The Raspberry Pi can be configured to take the time from the satellites, so there is no clock difference between real-time and the time of the operating system on the Pi. Staying in sync with the real-time clock is of great importance when saving the date-time for each measurement.

### *C.2. 4G and GNSS board*

On figure 3 is depicted the SIM7600E-H-4G HAT for Raspberry Pi by WaveShare.



***Figure 3**. The SIM7600E-H-4G HAT mounted on the Raspberry Pi 3B+*

It is more expensive because it is designed as a HAT for the Raspberry Pi that mounts on top of it. Except providing GPS coordinates, it also expands the connectivity of the Pi. It has a 4G module that provides the ability to use a

GSM card and use the mobile provider signal coverage if there is no near-by internet coverage. It can also be used to send SMS messages in case of different events that may happen to the station or detecting a high value of a target pollutant gas which requires a quick response from competitive personal.

Both GPS modules provide GPS coordinates - latitude and longitude within 1 meter which is of enough accuracy for the application.

## DATA VISUALIZATION

When working with geo-referenced data, the most convenient way of data presentation is on a map. Nowadays there are many opportunities to do that - using a mapping services such as Google Maps, bing, Apple Maps and others or using a GIS software such as QGIS, ArcGIS and others.

In this paper we are focused on using the mapping services.

Gathered air quality data is stored on a local database and then exported to a pc in the form of a *.csv file. After that the file is opened in MS Excel. It is then further processed to get the index level that describes the current air quality state at the monitoring head according to the way of data representation by the EEA Europe air quality online web pages [7, 8].

In [7] the monitoring station air quality index is given and the colour of the station represents the state of the index according to the table with the states (Figure 4).

| Pollutant | Index level (based on pollutant concentrations in µg/m3) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Good | Fair | Moderate | Poor | Very poor | Extremely poor |
| Particles less than 2.5 µm ($PM_{2.5}$) | 0-10 | 10-20 | 20-25 | 25-50 | 50-75 | 75-800 |
| Particles less than 10 µm ($PM_{10}$) | 0-20 | 20-40 | 40-50 | 50-100 | 100-150 | 150-1200 |
| Nitrogen dioxide ($NO_2$) | 0-40 | 40-90 | 90-120 | 120-230 | 230-340 | 340-1000 |
| Ozone ($O_3$) | 0-50 | 50-100 | 100-130 | 130-240 | 240-380 | 380-800 |
| Sulphur dioxide ($SO_2$) | 0-100 | 100-200 | 200-350 | 350-500 | 500-750 | 750-1250 |

***Figure 4***. *Air Quality Index states by EEA*

Also there is information on how the data is evaluated which can also be found in great detail in [3].

There is also a table showing how the index bands are complemented by health related messages that provide recommendations for both the general population and sensitive populations. The latter includes both adults and children with respiratory problems and adults with heart conditions.

In [8] data is represented in a form of a certain pollutant gas across all monitored stations.

For the purpose of data presentation, we are showing two stations. One with collected data from the measuring head - Station 1. And the data for Station 2 is based on a percent from the values of Station 1. Also the coordinates for Station 2 are taken to a close location to the position of Station 1.

The values for the concentrations of pollutant gases may differ from officially reported stations due to sensor aging.

### *A. Google MyMaps*

Google MyMaps [9] is a great tool provided by Google. Compared to Google Maps, it is free and doesn't require programming knowledge to use it. Of course it doesn't provide the capabilities of Google Maps.

For the purpose of the current presentation, only a Google Account is needed. When Google MyMaps is loaded, it allows to upload the *.csv file with air quality data. The user defines which columns to be used for setting the locations on the map - in our case latitude and longitude. Then the data is sorted according to the State column which is based on the states given in figure 4. The colours are configured to match the ones in the table but there is no visible legend.

The type of the map is selected to terrain but could be used street map or one of the other types.

On figure 5 are shown the results.

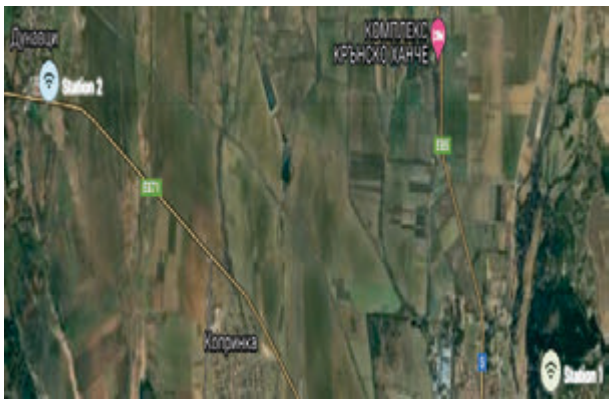



***Figure 5**. Stations on Google MyMaps*

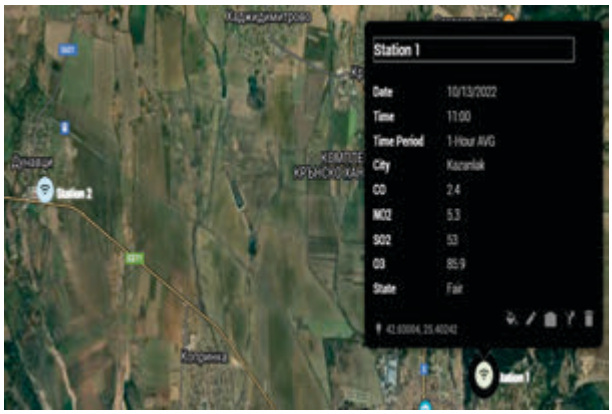



***Figure 6**. Detailed view of a Station on Google MyMaps*

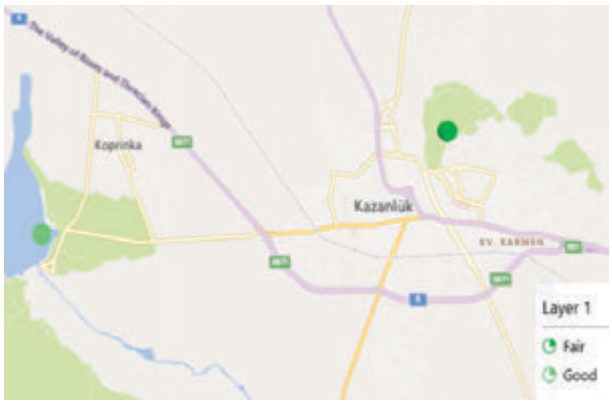



***Figure 7**. Stations on MS Excel - 3D Maps*

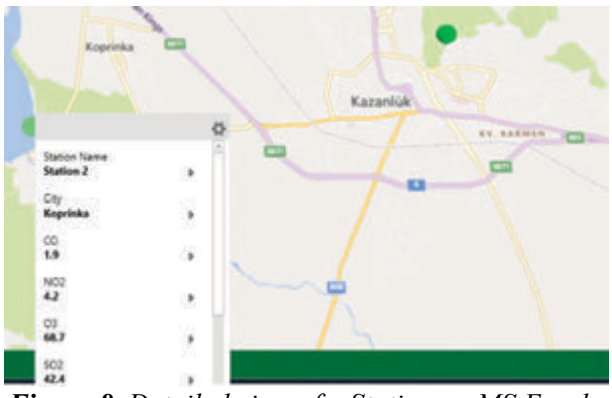



***Figure 8**. Detailed view of a Station on MS Excel - 3D Maps*

The Station name is shown next to the icon of the station. Google MyMaps allows to use among a variety of predefined icons or to upload a custom icon. Also to upload a picture of the location and many other settings.

On figure 6 is shown the status of Station 1 when clicked on it. All the data is extracted from the *.csv file and may be customized - some of the data may not be shown or edited in place.

The measuring units should be given in the *.csv file or won't be displayed.

As can be seen this is static data from a *.csv file. If the user likes to have a live updated data with more opportunities to customize the way of presentation and many more settings it is possible to convert to the paid version - Google Maps.

### *B. MS Excel - 3D Maps*

MS Excel - 3D Maps uses its own service - bing maps. It is available from MS Excel 2016.

Once the *.csv file is opened in Excel the user just selects the rows and columns of the table and clicks on the 3D Maps icon in the insert section of the tool bar.

Here the steps are almost identical. For the location of the points (Stations) the columns latitude and longitude are selected. The region names are removed. And the Stations are again sorted according to the State column based on states given in Figure 4.

The results are shown on figure 7.

The legend is only filled with the existing states. Not all the possible states according to the table on figure 4.

Figure 8 shows the detailed view of the Station when an user clicks on a particular one.

The measuring units are not displayed again.

## CONCLUSION

As seen the two mapping services provide a free, fast and human-friendly way for presentation of geo-referenced air quality data. The look of both of them can be customized to some extent. They both can be used to analyze already collected data without the need of special programming skills.

But if one needs to have a real-time information system with updating of many stations at the same time, and to be accessible from many people online, a preferred choice would be the use of a specialized GIS software or the Google Maps platform to build the system on it.

## REFERENCE


[1] WHO Air Quality Guidelines for Europe, 2nd edition, 2000, ISBN 1358 3 ISSN 0378-2255

[2] WHO Air Quality Guidelines, Global Update 2005 - Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide

[3] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:32008L0050

[4] AAN 4 - How electrochemical sensors work

[5] https://www.amazon.com/Vk-172-Gmouse - Glonass-Raspberry-Geekstory/dp/ B078Y597M6

[6] https://www.amazon.com/4G-HAT-SIM7600A-H-Communication-Positioning/dp/ B07PLTP3M6/ref=sr_1_1_sspa?crid=1IB19IGRUZ2ML&keywords=sim7600e-4g&qid=1666446870&qu=eyJxc2MiOiIxLjc2IiwicXNhIjoiMC4wMCIsInFzcCI6IjAuMDAifQ%3D%3D&s=electronics&sprefix=sim7600ce-4g%2Celectronics%2C176& sr=1-1-spons&psc=1&smid=A2SA28G0M 1VPHD

[7] https://airindex.eea.europa.eu/Map/AQI/Viewer/#

[8] https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index

[9] https://www.google.com/mymaps

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ТЕМПЕРАТУРАТА ВЪРХУ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА СЕНЗОРНИ ЕЛЕМЕНТИ ЗА ВЛАЖНОСТ НА ОСНОВАТА НА Ti-Si-O-Ce-Zn-Cu ТЪНКИ СЛОЕВЕ

**Недю Недев[1], Звездица Ненова[1], Стефан Кожухаров[2], Тошко Ненов[1]**

*[1]Технически университет - Габрово*
*[2]Химикотехнологичен и металургичен университетя*

# INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE INFLUENCE ON THE CHARACTERISTICS OF HUMIDITY SENSOR ELEMENTS BASED ON Ti-Si-O-Ce-Zn-Cu THIN FILMS

**Nedyu Nedev[1], Zvezditza Nenova[1], Stephan Kozhukharov[2], Toshko Nenov[1]**

*[1] Technical University of Gabrovo*
*[2] University of Chemical Technology and Metallurgy*

**Abstract**

*The ambient temperature is a major factor affecting a number of processes. In the present paper, the temperature influence on the electrical characteristics of thin-film humidity sensor elements based on the Ti-Si-O-Ce-Zn-Cu system, prepared via a sol-gel method and sintered at temperatures of 400°C and 800°C, was investigated. The study was carried out in a temperature range of 10°C to 50°C, with a change in relative humidity in the range of 20% to 92%. Temperature coefficients of resistance, impedance, capacitance and phase angle were determined.*

**Keywords:** humidity sensor elements; sol-gel method; temperature influence; temperature coefficients.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Температурата на околната среда е важен фактор, оказващ влияние върху голям брой процеси, протичащи в природата, а също и такива, свързани с човешката дейност. Нейното изменение оказва влияние върху индустриални процеси, при производството на земеделска продукция и други [1, 2].

От своя страна влажността е друг фактор, подлежащ на постоянен мониторинг и контрол. За целта се разработват нови сензори с подобрени характеристики. За разработването им се използват различни базови материали като $TiO_2$, $SiO_2$ и други [3-10]. За получаване на тънкослойни образци широко се използва зол-гел метод [11-14].

Въпреки подобряването на характеристиките на разработваните сензорни елементи, промяната на температурата на средата, в която функционират, води до промяна на техните параметри.

На тази основа в настоящата работа се изследва влиянието на изменението на температурата на околната среда върху характеристиките на сензорни елементи за влажност, изготвени по зол-гел метод на основата на $TiO_2$-$SiO_2$, легирани с Ce, Zn и Cu.

## ОПИСАНИЕ НА СЕНЗОРНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ

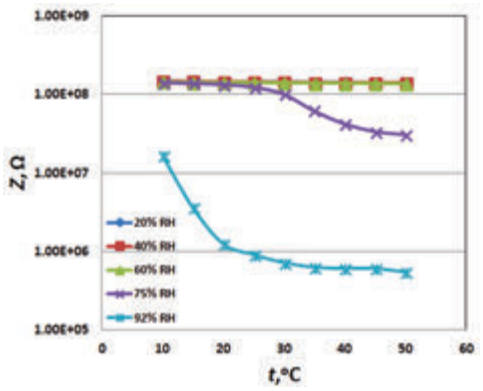
Като източници на Ti и Si в основната $TiO_2$-$SiO_2$ зол-гел система са използвани Titanium (IV) n-butoxide и Polydimethylsiloxane. За внасяне на легиращите елемети Ce, Zn и Cu са използвани Diammonium hexanitratocerate, Zinc nitrate hexahydrate и Copper (II) Nitrate Trihydrate. След отлагане на слоевете върху подложки от $Al_2O_3$ с предварително нанесени сребърно-паладиеви електроди и по-

следващо синтероване при температури 400ºC и 800ºC [14], са получени образци, означени съответно с TSD_400 и TSD_800.

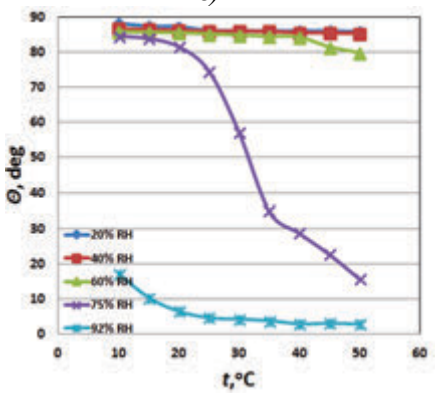
## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Изменението на електрическите параметри - активно съпротивление $R$, капацитет $C$, импеданс $Z$ и фазов ъгъл $\theta$ е извършено с Impedance Analyzer Precision LCR Meter MIFA на Zurich Instruments AG, даващ възможност за измерване с точност до 0.05%. Измерванията са направени при амплитуда на тестовия сигнал от 500 mV и честота 20 Hz. Образците са поставяни в камерата на калибратор за влажност и температура HygroGen2-XL на Rotronic Instruments Ltd., осигуряващ контролирана влажност в диапазона от 5% до 95% относителна влажност ($RH$) с точност 0.1% $RH$ и температура в диапазона от 0ºC до 60ºC с максимално отклонение 0.01ºC.

Характеристиките $R = f(t°)$, $C = f(t°)$, $Z = f(t°)$ и $\theta = f(t°)$ на образците TSD_400 и TSD_800 при изменение на температурата $t°$ в диапазона от 10ºC до 50ºC и фиксирани стойности на относителната влажност в диапазона от 20% $RH$ до 92% $RH$ са представени на фиг. 1 и фиг. 2.

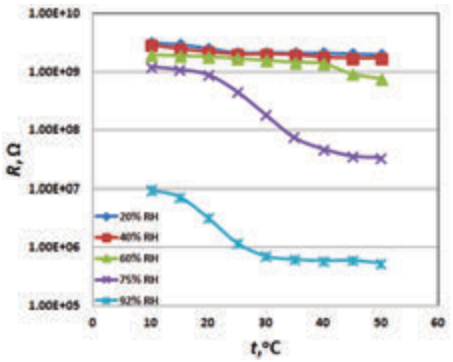



*в)*

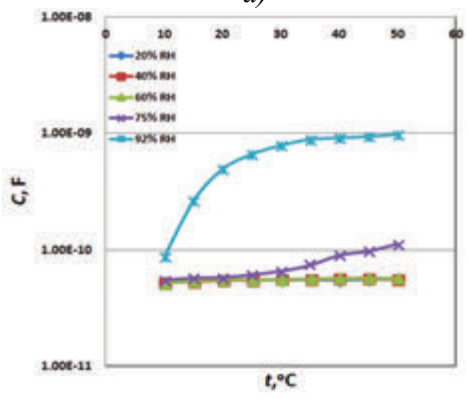



*г)*

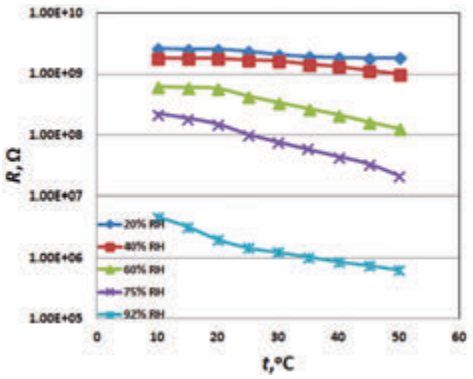
***Фиг.1.*** *Влияние на температурата върху характеристиките: а) $R = f(t°)$, б) $C = f(t°)$, в) $Z = f(t°)$ и г) $\theta = f(t°)$ на образец TSD_400 при различни нива на относителната влажност RH*



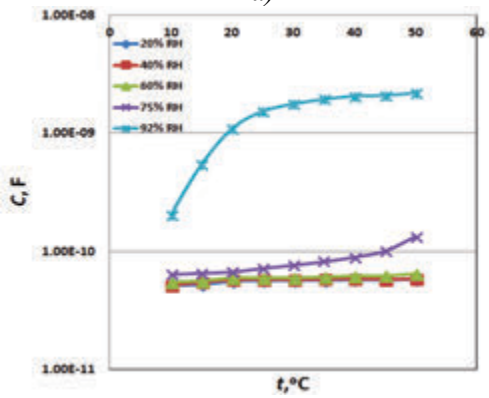

*а)*



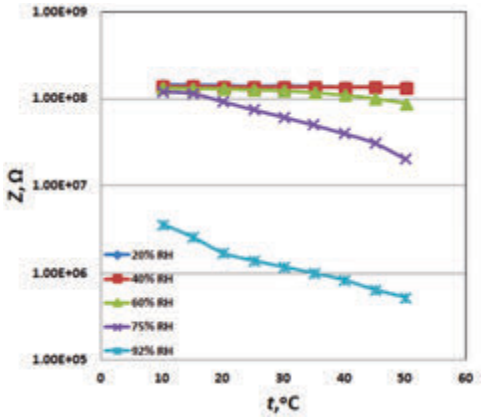

*б)*



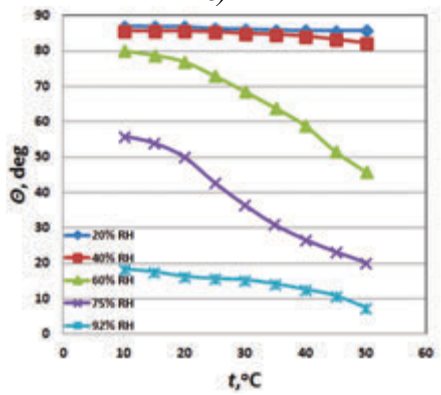

*а)*




*б)*




*в)*




*г)*

***Фиг.2.*** *Влияние на температурата върху характеристиките: а) $R = f(t°)$, б) $C = f(t°)$, в) $Z = f(t°)$ и г) $\theta = f(t°)$ на образец TSD_800 при различни нива на относителната влажност RH*

При двата типа образци се наблюдава намаляване на активното съпротивление $R$, импеданса $Z$ и фазата $\theta$ и нарастване на капацитета $C$ с нарастване на температурата.

За изследване на влиянието на температурата върху отделните величини $X$, съответно $R$, $C$, $Z$ и $\theta$, са определени температурните им коефициенти при зададена стойност на относителната влажност $RH$

$$\alpha_X = \frac{1}{X} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta t°} \quad , \qquad (1)$$

където $\Delta X$ е изменението на $X$ при изменение $\Delta t^o$ на температурата; $X$ – стойността на величината при началната температура на разглежданото температурно изменение $\Delta t°$.

Стойностите на температурните коефициенти $\alpha_X$ за отделните величини при температура 30°C, явяваща се средна точка за диапазона на изследване 10°C ... 50°C, за образци TSD_400 и TSD_800 при $\Delta t° = 5°C$ и различни стойности на относителната влажност $RH$ са представени съответно в табл. 1 и табл. 2.

***Таблица 1.*** *Температурни коефициенти $\alpha_X$ при температура 30°C и $\Delta t°=5°C$ при изменение на относителната влажност от 20% RH до 92% RH за образец TSD_400*

| $\alpha_X$ | Относителна влажност | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 20% *RH* | 40% *RH* | 60% *RH* | 75% *RH* | 92% RH |
| $\alpha_R$, 1/°C | -0.0009 | -0.0029 | -0.0127 | -0.1192 | -0.0251 |
| $\alpha_C$, 1/°C | 0.0018 | 0.0029 | 0.0032 | 0.0243 | 0.0252 |
| $\alpha_Z$, 1/°C | -0.0024 | -0.0028 | -0.0033 | -0.0781 | -0.0248 |
| $\alpha_\theta$ , 1/°C | -0.0046 | -0.0002 | -0.0009 | -0.0780 | -0.0188 |

***Таблица 2.*** *Температурни коефициенти $\alpha_X$ при температура 30°C и $\Delta t°=5°C$ при изменение на относителната влажност от 20% RH до 92% RH за образец TSD_800*

| $\alpha_X$ | Относителна влажност | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 20% *RH* | 40% *RH* | 60% *RH* | 75% *RH* | 92% *RH* |
| $\alpha_R$ , 1/°C | -0.0151 | -0.0224 | -0.0416 | -0.0486 | -0.0322 |
| $\alpha_C$, 1/°C | 0.0007 | 0.0023 | 0.0027 | 0.0138 | 0.0192 |
| $\alpha_Z$, 1/°C | -0.0028 | -0.0029 | -0.0096 | -0.0380 | -0.0302 |
| $\alpha_\theta$, 1/°C | -0.0005 | -0.0006 | -0.0135 | -0.0306 | -0.0142 |

От получените резултати при температура 30°C се наблюдава, че и при двата образеца температурните коефициенти $\alpha_R$, $\alpha_Z$ и $\alpha_\theta$ са отрицателни. Те нарастват по големина с увеличаване на относителната влажност $RH$ до около 75%, след което има определен спад при по-нататъшно нарастване на $RH$. Температурният коефициент $\alpha_C$ е положителен, като нараства с нарастване на $RH$ при същата температура.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследвано е влиянието на изменението на околната температура върху електрическите параметри на сензорни елементи за влажност на основата на Ti-Si-O повърхностни слоеве, легирани с Ce, Zn и Cu, изготвени по зол-гел метод и синтеровани при температури 400°C и 800°C.

Получените характеристики $R = f(t°)$, $C = f(t°)$, $Z = f(t°)$ и $\theta = f(t°)$ и температурните коефициенти $\alpha_R$, $\alpha_Z$, $\alpha_C$ и $\alpha_\theta$ показват

зависимостта им както от температурата на околната среда, така и от нивата на относителната влажност при нелинейност на тези зависимости. Това поставя необходимостта от провеждането на температурна компенсация с използването на подходящи методи при включване на сензорните елементи в измервателни схеми, за да се осигури необходимата точност на провежданите измервания.

## REFERENCE


[1] R.E. Davis, G.R. McGregor, K.B. Enfield. Humidity: a review and primer on atmospheric moisture and human health, Environ. Res. 144 (2016), pp.106–116.

[2] Z. Duan, Y. Jiang, H. Tai. Recent advances in humidity sensors for human body related humidity detection, J. Mater. Chem. C, 9 (42) (2021), pp.14963–14980.

[3] C. Yang, H. Zhan, W. Gu, C. Chen. Preparation and mechanism investigation of highly sensitive humidity sensor based on Ag/$TiO_2$. Current Applied Physics, 43 (2022), pp.57–65.

[4] M. M. Ikram, F. Ahmed, S.J.A. Rizvi. Design and fabrication of humidity sensor. Materials Today: Proceedings, 48 (2022), pp.650–654.

[5] S. Kozhukharov, Z. Nenova, T.Nenov, N. Nedev, M. Machkova. Humidity sensing elements based on cerium doped titania-silica thin films prepared via a sol–gel method. Sensors and Actuators B: Chemical, Sensors and Actuators B, 210 (2015), pp.676–684.

[6] Z. Li, A.A. Haidry, B. Dong, L. Sun, Q. Fatima, L. Xie, Z. Yao. Facile synthesis ofnitrogen doped ordered mesoporous $TiO_2$ with improved humidity sensingproperties, J. Alloys Compd., 742 (2018), pp.814–821.

[7] T.Y. Li, R.J. Si, J. Sun, S.T. Wang, J. Wang, R. Ahmed, G.B. Zhu, C.C. Wang. Giant and controllable humidity sensitivity achieved in (Na+Nb) co-doped rutile $TiO_2$. Sensors & Actuators: B. Chemical, 293 (2019), pp.151–158.

[8] D. Nunes, A. Pimentel, A. Gonçalves, S. Pereira, R. Branquinho, P. Barquinha, E. Fortunato, R. Martins. Metal oxide nanostructures for sensor applications, Semicond. Sci. Technol., 34 (2019), 043001.

[9] M. U. Khan, G. Hassan, M. Awais, J. Bae. All printed full range humidity sensor based on $Fe_2O_3$. Sensors and Actuators A, 311 (2020), 112072.

[10] X. Zhao, X. Chen, X. Yu, X. Ding, X. L. Yu, X. P. Chen. Fast response humidity sensor based on graphene oxide films supported by $TiO_2$ nanorods. Diamond & Related Materials, 109 (2020), 1080316.

[11] H. Farahani, R. Wagiran, M.N. Hamidon. Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: a comprehensive review, Sensors, 14 (2014), pp.7881–7939.

[12] Z. Nenova, S. Kozhukharov, T. Nenov, N. Nedev, M. Machkova. Combined influence of titania and silica precursors on the properties of thin film humidity sensing elements prepared via a sol-gel method. Sensors and Actuators B, 224 (2016), pp.143-150.

[13] Z. Nenova, T. Nenov, S. Kozhukharov, N. Nedev. Humidity sensing elements based on Si-Bi-O surface layers prepared via a sol-gel method. IEEE Sensors Journal, 2018, Vol. 18, No 17, pp.6946-6953.

[14] Z. Nenova, N. Nedev, S. Kozhukharov, T. Nenov. Humidity Sensors Based on Doped Titania-Silica Surface Layers. 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), June 3-6, 2018, Bourgas, 2018, pp.1-4, IEEE Xplore.

# ACQUIRING DATA FOR CHEESE AGING USING GAS SENSORS

**Stefan Ivanov[1], Todor Todorov[1], Elena Monova[1]**

[1] *Technical University of Gabrovo*

**Abstract**

*The paper presents the monitoring of cheese aging using gas sensors. The data are acquired via specially developed device and can be used after that for classification purposes. Comparing different cheeses, it is possible to evaluate how various kinds of milk reflect on the process of aging.*

**Keywords:** gas sensors, data acquisition.

## INTRODUCTION

The use of gas sensors for monitoring air and environmental quality is becoming more common. This is due to the continuous progress in the production of new types and generations of gas sensors, as well as in the development of new techniques for data processing and classification. Apart from monitoring of air parameters, another major application of gas sensors is food quality monitoring.

Various gas monitoring methods are used for air pollution control [1]. In addition to expensive analytical instruments, measuring modules based on gas sensors are also used. They have a low cost and enable rapid measurements [2]. Since often harmful chemical constituents in the air cannot be identified using a single gas sensor, it is necessary to use multiple sensors combined in the corresponding sensor module.

Regarding the quality of food products, consumers need an objective and accurate assessment of what they are buying. They must receive information and a guarantee that the food they buy is produced from the specified products and stored correctly by the traders (according to the prescriptions and requirements of the manufacturer and control authorities). Last but not least, the ability to accurately detect contamination both in different foods and in the raw materials used for their preparation is important. This increasingly necessitates the development of fast and accurate methods and devices, through which it will be possible to determine the quality of various food products, as well as to determine the condition during their storage. One of the possibilities in this direction is the use of a set of gas sensors united in the so-called "Electronic nose". The "electronic nose" makes it possible to quickly and accurately determine the quality of products [3]. The use of gas sensors is suitable for testing various food products in solid or liquid state. They are suitable for detecting, for example, the added amount of water in milk [4], and can also be used to detect dairy products infected with Escherichia coli [5], as well as for monitoring the quality of yogurt [6]. With the help of gas sensors, research was also done on contaminated sheep's milk with toxins [7], which are carcinogenic and extremely dangerous for human health.

The results obtained in these studies are particularly indicative of the possibilities of gas sensors in their use to classify different food products. The aim of this paper is to present a module with gas sensors that is used in application for data acquisition about aging of cow cheese. The acquired data are further processed and classified.

## SENSOR MODULE FOR DATA ACQUISITION

It is developed a sensor module for monitoring of three main types of gases. It can be used for measurements of gas footprints of various foods (Fig.1).

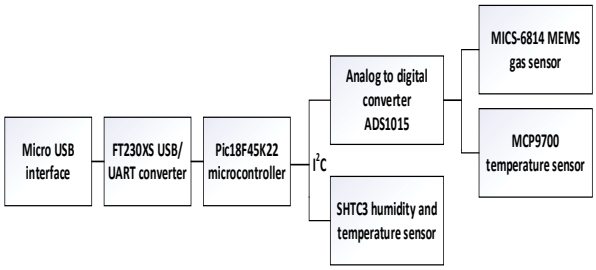



***Fig. 1.*** *Block diagram of sensor module*

The developed module uses MICS-6814 gas sensor [8]. The sensor is able to detect the following gases- Carbon Monoxide (CO), Nitrogen Dioxide ($NO_2$), Ammonia ($NH_3$).

The sensor type is metal oxide sensor which means that the sensing elements are resistive and their resistances change with the changes of measured gases. The oxidizing gases (such as ozone or nitrogen dioxide) make the resistance of sensing elements to increase while the reducing gases such as carbon monoxide or VOC's cause the resistance to decrease. The module is placed in specially developed housing (Fig.2).

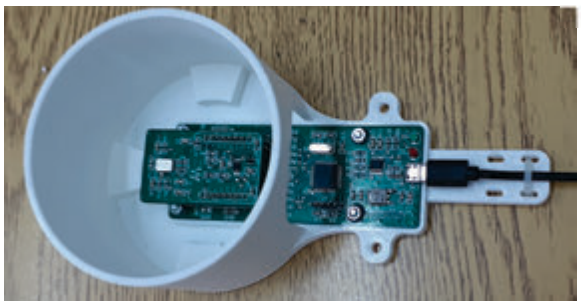


***Fig. 2.*** *Sensor module*

## SOFTWARE FOR DATA ACQUISITION

A program for data acquisition is developed and it is used for reading and storing the acquired by the sensor data on personal computer. The program is developed with LabVIEW and after successful initial tests it is compiled as stand-alone application (Fig.3).

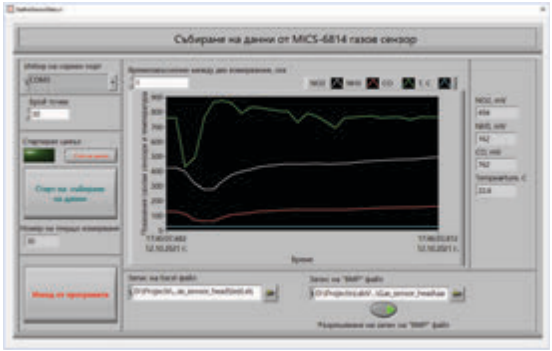


***Fig. 3.*** *Data acquisition program*

The main properties of the program are intuitive user interface, graphical representation of acquired data and possibilities for storing the data in Excel file. The program also enables the data to be plotted into BMP image and stored locally.

## EXPERIMENTAL SETUP

The data from gas sensor module is acquired using glass vessel where cheese samples with approximate weight of 20g are placed. The sensor module is placed over the glass vessel (Fig.4) and the measurements are started.

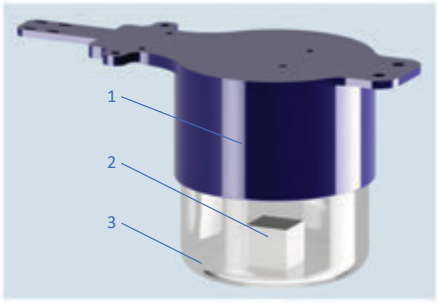



***Fig. 4.*** *Experimental setup 1) sensor module, 2) cheese sample, 3) glass vessel*

During measurements it is possible the glass vessel to be placed on heating plate, that is controlled to have temperature between 40ºC and 50ºC.

## ACQUIRED DATA SETS

During data acquisition samples of local brand of cheese "Bojenci" were tested. It was acquired data from samples with maturing time 17, 31 and 46 days. Fig.5 presents how the data acquired with sensor module looks like a graphic for certain period of time. Initially the sensors are not warmed and therefore they need time to stabilize and go in work mode.

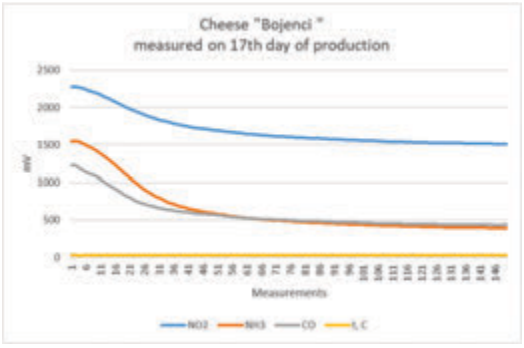



***Fig. 5****. Measured data for test sample with 17 days of maturing*

The entire process of measure takes 5 minutes. From these 5 minutes, only data for the last 20 seconds is used for receiving the average values of sensors outputs in mV. Table 1 presents averaged values for sensors outputs.

***Table 1.*** *Average values for sensors outputs*

| Day | $NO_2$ | $NH_3$ | CO |
|---|---|---|---|
| 17 | 1514.075 | 396.925 | 438.15 |
| 31 | 1518.85 | 292.55 | 425.025 |
| 46 | 1317.9 | 222.25 | 329.35 |

Visual inspection of the chart of above data shows that there is change in sensors outputs during mention period of cheese aging (Fig.6).

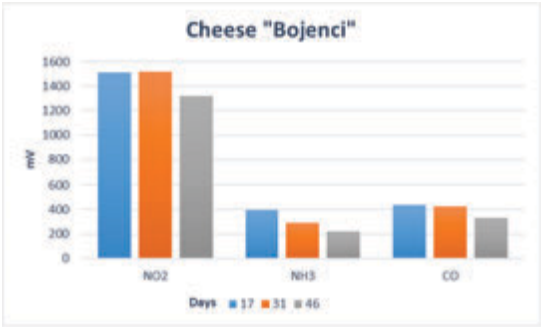



***Fig. 6****. Chart of averaged data*

## CLASSIFICATION OF PERIOD OF CHEESE AGING

The acquired data can be used for purposes for classification of period of cheese aging. In fact, the measured samples are insufficient for good classification, but it is possible to be added interpolated data. For data interpolation are used cubic splines (Fig.7). After interpolation there are enough number of data sets which can be used for classification purposes.

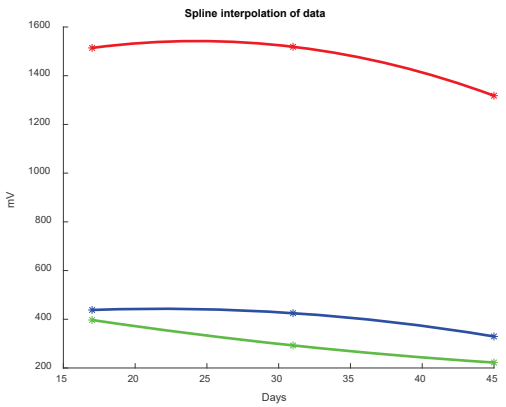



***Fig. 7.*** *Interpolation of data for the three gas sensors*

For fitting of data and classification of period of cheese aging is used artificial neural network (ANN). The ANN has two layers – one hidden and one output layer (Fig.8).

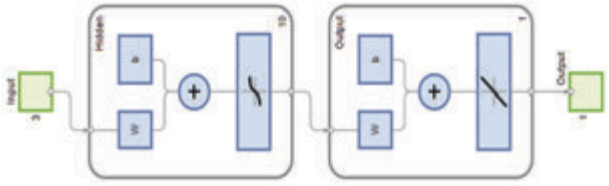


***Fig. 8.*** *ANN structure*

The neural network has 10 neurons in the hidden layer with "tansig" activation function of neurons and 1 neuron in the output layer with linear activation function.

The data set for training after the interpolation consist of more than 280 points. 70% of them are used for training, 15% for validation during training and 15% for testing.

The neural network is successfully trained. After the test of the neural network, the error of classification of period of aging is neglegible small (Fig.9).

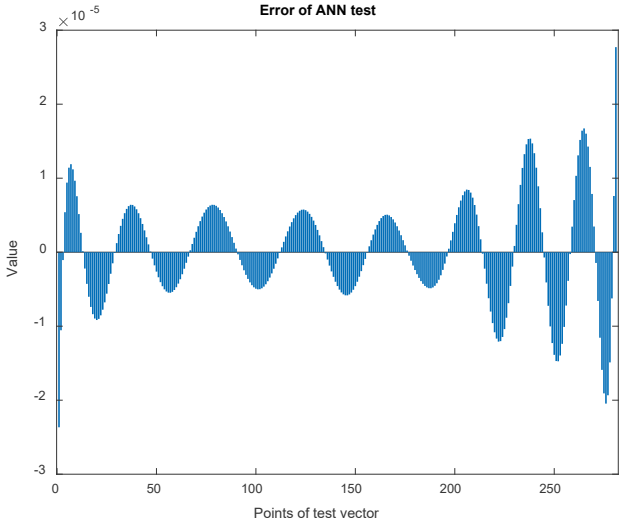



***Fig. 9****. The error values after the test of ANN*

The maximum absolute value of the error is 2.7711e-05.

It can be concluded that the trained neural network can very successfully classify the aging period of mentioned brand of cheese.

## CONCLUSIONS

The paper demonstrates how the process of cheese aging can be measured with low-cost

gas sensor module. The acquired data are used for training of artificial neural network which is able to determine the period of cheese aging. The neural network can be used as ANN model, which can be implemented in the software of a real gas detector for determining the cheese quality based on its period of aging.


## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the European Regional Development Fund within the OP "Science and Education for Smart Growth 2014 - 2020", Project CoC "Smart Mechatronic, Eco- And Energy Saving Systems And Technologies", № BG05M2OP001-1.002-0023.


## REFERENCES


[1] R. D. Down, J. H. Lehr. Environmental instrumentation and analysis handbook. WILEY-INTERSCIENCE, Hoboken, New Jersey, 2005.

[2] Nart J.K., K. Martinez. Environmental sensor networks: a revolution in the earth system science? Earth-Science Reviews, Vol. 78, 2006, 177-191.

[3] H. Swatland. Effect of connective tissue on the shape of reflectance spectra obtained with a fibre-optic fat-depth probe in beef. Meat Sci. 2001, 57, pp.209–213.

[4] H. Yu, J.Wang, Y.Xu. Identification of Adulterated Milk Using Electronic Nose. Sens. Mater., 2007, 19, pp. 275-285.

[5] Z. Ali, W. T. O'Hare, B. Theaker. Detection Of Bacterial Contaminated Milk By Means Of A Quartz Crystal Microbalance Based Electronic Nose. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2003, Vol. 71, pp.155–161.

[6] G. Green, A.Chan, R.Goubran. Tracking Food Spoilage in the Smart Home Using Odour Monitoring. In Proceedings of the 2011 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Bari, Italy, 30–31 May 2011, pp. 284–287.

[7] S. Benedetti, F.Bonomi, S.Iametti, S. Mannino, M.Cosio. Detection of aflatoxin M1 in ewe milk by using an EN. In Proceedings of the 2nd Central European Meeting 5th Croatian Congress of FTBN, Opatija, Croatia, October 17–20, 2004, pp. 101-105.

[8] Data Sheet. MiCS-6814. (https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2015/02/1143_Datasheet-MiCS-6814-rev-8.pdf).

# РАЗРАБОТВАНЕ НА ИЗКУСТВЕНА НЕВРОННА МРЕЖА ЗА КЛАСИФИКАЦИЯ НА СИРЕНЕ

**Стефан Иванов[1], Тодор Тодоров[1], Елена Монова[1]**
*[1]Технически университет - Габрово*

# DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR CLASSIFICATION OF CHEESE

**Stefan Ivanov[1], Todor Todorov[1], Elena Monova[1]**
*[1] Technical University of Gabrovo*

**Abstract**
*The paper represent how artificial neural network can be used for classification of cheese based on the type of milk used for its production. The experimental data are gathered via specially designed low-cost electronic nose incorporating gas sensor module.*

**Keywords:** artificial neural network, data classification

## ВЪВЕДЕНИЕ

Използването на газови сензори за контрол на въздуха и качеството на околната среда става все по-разпространено. Това се дължи на непрекъснатия напредък в производството на нови видове и поколения газови сензори, както и в разработването на нови техники за обработка и класификация на данни. Освен за контрол на параметрите на въздуха, друго основно приложение на газовите сензори е мониторинг на качеството на храните.

За контрол на замърсяването на въздуха се използват различни методи за мониторинг на газовете [1]. В допълнение към скъпи аналитични уреди се използват и измервателни модули, базирани на газови сензори. Те имат ниска цена и позволяват постигане на бързи измервания [2]. Тъй като често вредните химически съставки във въздуха не могат да бъдат идентифицирани с помощта на един газов сензор, е необходимо да се използват множество сензори, комбинирани в съответния сензорен модул.

По отношение на качеството на хранителните продукти, потребителите имат нужда от обективна и точна оценка за това, какво купуват. Те трябва да получат информация и гаранция, че храните, които купуват, са произведени от посочените продукти и се съхраняват правилно от търговците (съгласно предписанията и изискванията на производителя и контролните органи). Не на последно място е важна възможността за точно откриване на замърсяване както в различните храни, така и в суровините, използвани за тяхното приготвяне. Това все повече налага разработването на бързи и акуратни методи и устройства, чрез които ще може да се определя качеството на различни хранителни продукти, както и да се определя изменението на състоянието им по време на тяхното съхранение. Едно от направленията в тази насока е използването на набор от газови сензори, обединени в т. нар. "Електронен нос". „Електронният нос“ дава възможност за бързо и точно определяне на качеството на продуктите [3]. Използването на газови сензори е подходящо за тестване на различни хранителни продукти в твърдо или течно състояние. Те са подходящи за откриване например на доба-

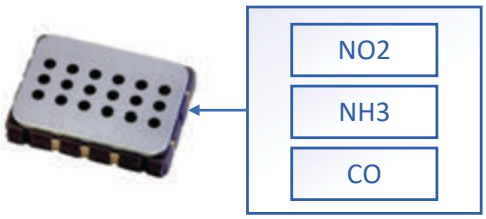
вено количество вода в млякото [4], както могат и да се използват и за откриване на млечни продукти, заразени с Escherichia coli [5], както и при следене на качеството на киселото мляко [6]. С помощта на газови сензори са правени и изследвания на замърсено овче мляко с токсини [7], които са канцерогенни и изключително опасни за човешкото здраве.

Резултатите, получени в тези изследвания, са особено показателни за възможностите на газовите сензори при използването им за класифициране на различни хранителни продукти.

Цел на настоящата работа е да представи класифицирането на различни типове сирена, посредством данни събрани с помощта на газови сензори и обработени с помощта на невронни мрежи.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Събирането на данни се осъществява посредством специално разработен за целта сензорен модул. Разработеният модул използва газов сензор MICS-6814 [8]. Сензорът може да открива следните газове - въглероден оксид (CO), азотен диоксид (NO2), амоняк (NH3) (фиг. 1).

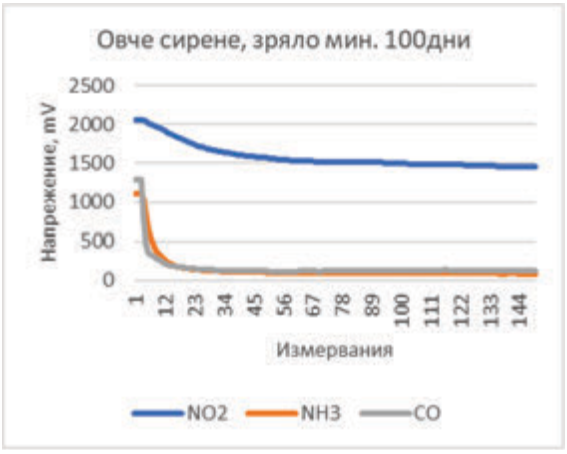



***Фиг. 1.*** *Сензор MICS-6814*

Данните от сензорния модул се събират с помощта на приложение, разработено на LabVIEW. Събираните данни се записват в Excel файлове и могат след това лесно да бъдат обработвани.

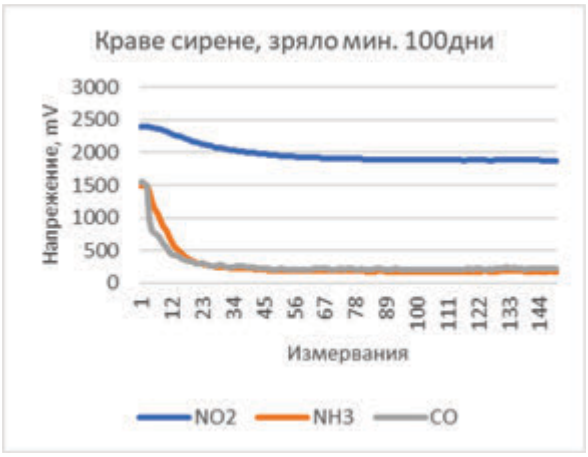
Изследвани са три типа сирене, като продължителността на всяко изследване е пет минути. Събрани са по 150 измервания за всеки тип сирене, като времето между две последователни измервания е 2 секунди. При стартиране на измерванията сензорите в MICS-6814 се нуждаят от известно време - около 90 секунди, за да се установят и да преминат в работен режим.

На фиг. 2 са представени резултатите от измерването на овче сирене.




***Фиг. 2.*** *Измервания на овче сирене*

На фиг. 3 са представени резултатите от измерването на краве сирене.



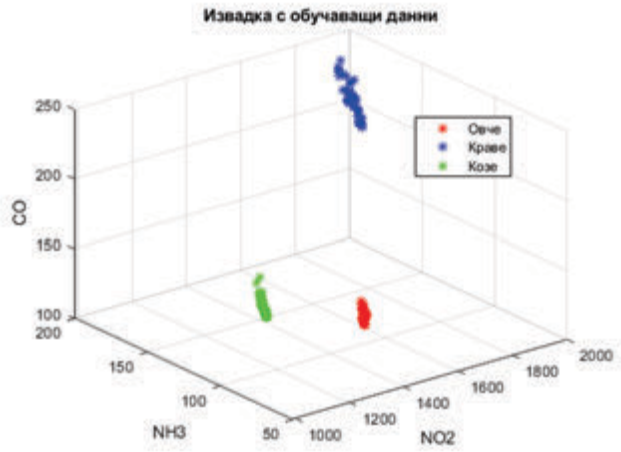

***Фиг. 3.*** *Измервания на краве сирене*

На фиг. 4 са представени резултатите от измерването на козе сирене.



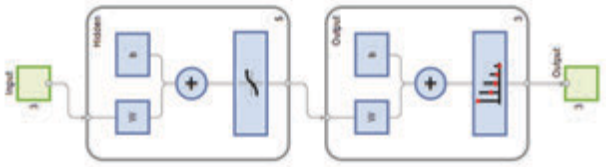

***Фиг. 4.*** *Измервания на козе сирене*

От направените измервания са взети последните 50 точки от всяко и на тази база е създадена експерименталната извадка с реални данни (фиг.5), които се използват за обучение на изкуствена невронна мрежа (ИНМ).




***Фиг. 5.*** *Извадка с експериментално измерени данни*

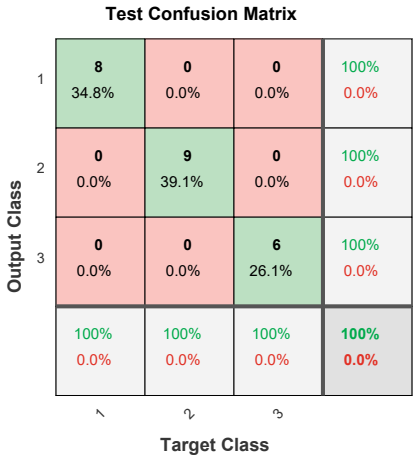
От разпределението на данните се вижда, че трите типа сирене са добре различими като класове. За класификация се използва невронна мрежа с два слоя- един скрит и един изходен (фиг. 6).



***Фиг. 6.*** *Структура на невронната мрежа*

В скрития слой има 5 неврона с „tansig“ функция на трансфер, докато изходня слой се състои от три неврона със “softmax” функция на трансфер. Обучението на мрежата е извършено посредством „Scaled conjugate gradient - SCG“ алгоритъм с обратно разпространение на грешката.

От входната обучваща извадка – 70% от данните се използват за обучение, 15% за валидиране на обучението и 15% за тестване на невронната мрежа след обучението. При тестването на работата на мрежата, тестовата извадка се разпознава успешно на 100% (фиг. 7).




***Фиг. 7.*** *Матрица на разпознаванията*

Тъй като експерименталните данни, събрани за всеки тип сирене, са близки като стойности, то за проверка на работоспособността на обучената невронна мрежа се предлага използването на симулирани стойности, в които е добавен шум по случаен принцип. Като основа за генериране на симулираните данни се вземат средните стойности на показанията на отделните сензори на MICS-6814 за всеки един тип сирене.

Средната стойност на показанията на сензорите се изчислява за всеки тип сирене по формулата:

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \qquad (1)$$

където N -броят на осредняваните стойности на x.

В табл.1 са представени средните стойности в mV на показанията на сензорите за различните типове сирена.

***Табл.1.*** *Средни стойности*

| Средни стойности в mV | NO2 | NH3 | CO |
|---|---|---|---|
| Овче сирене | 1470.812 | 91.128 | 127.788 |
| Краве сирене | 1883.56 | 176.116 | 217.332 |
| Козе сирене | 998.82 | 72.104 | 170.42 |

Добавеният шум се генерира на базата на стандартните отклонения в показанията на сензорите за всеки тип сирене. Стандартното отклонение се изчислява по формула (2) .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2} \qquad (2)$$

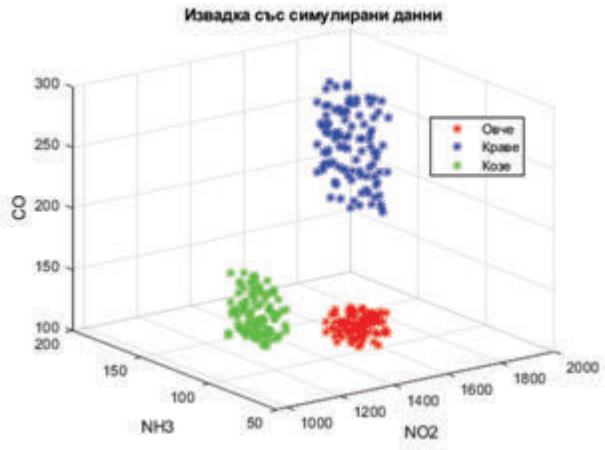
Резултатите за стандартните отклонения са представени в табл.2.

***Табл. 2.*** *Стандартни отклонения*

| Стандартно Отклонение в mV | NO2 | NH3 | CO |
|---|---|---|---|
| Овче сирене | 12.93982 | 2.339984 | 2.568064 |
| Краве сирене | 3.770346 | 5.082839 | 10.24632 |
| Козе сирене | 8.385142 | 3.37995 | 5.098899 |

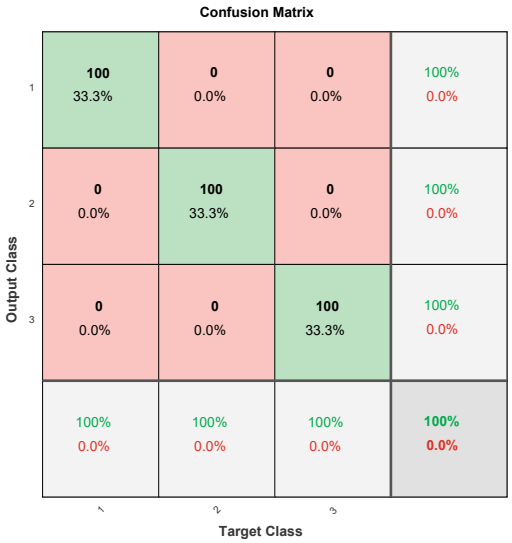
На база на получените стандартни отклонения и средните стойности за показанията, се генерират по 100 случайни показания за всеки тип сирене, симулиращи измервателни данни и чиито стандартни отклонения са пет пъти по-големи от тези на реалните измерени данни, представени по-горе в табл. 2.

Разпределението на симулираните данни в пространството, дефинирано от сензорите NO2, NH3 и CO е представено на фиг. 8.




***Фиг. 8.*** *Извадка със симулирани данни*

На база на симулираните данни, изкуствената невронна мрежа генерира на изхода си класифициране на отделните входни данни към един от трите типа сирене. Независимо, че стандартното отклонение на симулираните данни е пет пъти по-голямо от това на реалните данни, с които е обучена невронната мрежа, то симулираните данни се разпознават и класифицират със 100%-ва точност (фиг.9).




***Фиг.9.*** *Матрица на разпознаванията*

Въз основа на това може да се заключи, че обучената невронна мрежа може да се използва успешно за класифициране на описаните сирена.

Бъдещите изследвания ще бъдат съсредоточени в областта на събиране на данни от сирена от различни производители, така че освен разпознаване на типа на сиренето да може да бъде определен и неговият производител.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа е представено използването на изкуствена невронна мрежа за класификация на три типа сирена въз основа на данни събрани с помощта на газов модул с използването на три газови сензора вградени в него. Изкуствената невронна мрежа е обучена и е тествана успешно както с реални, така и със симулирани данни, в които е добавен изкуствено генериран шум.

## ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ


[1] R. D. Down, J. H. Lehr. Environmental instrumentation and analysis handbook. WILEY-INTERSCIENCE, Hoboken, New Jersey, 2005.

[2] Nart J.K., K. Martinez. Environmental sensor networks: a revolution in the earth system science? Earth-Science Reviews, Vol. 78, 2006, 177-191.

[3] H. Swatland. Effect of connective tissue on the shape of reflectance spectra obtained with a

fibre-optic fat-depth probe in beef. Meat Sci. 2001, 57, pp.209–213.
[4] H. Yu, J.Wang, Y.Xu. Identification of Adulterated Milk Using Electronic Nose. Sens. Mater., 2007, 19, pp. 275-285.
[5] Z. Ali, W. T. O'Hare, B. Theaker. Detection Of Bacterial Contaminated Milk By Means Of A Quartz Crystal Microbalance Based Electronic Nose. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2003, Vol. 71, pp.155–161.
[6] G. Green, A.Chan, R.Goubran. Tracking Food Spoilage in the Smart Home Using Odour Monitoring. In Proceedings of the 2011 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Bari, Italy, 30–31 May 2011, pp. 284–287.
[7] S. Benedetti, F.Bonomi, S.Iametti, S. Mannino, M.Cosio. Detection of aflatoxin M1 in ewe milk by using an EN. In Proceedings of the 2nd Central European Meeting 5th Croatian Congress of FTBN, Opatija, Croatia, October 17–20, 2004, pp. 101-105.
[8] Data Sheet. MiCS-6814. (https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2015/02/1143_Datasheet-MiCS-6814-rev-8.pdf).

# ANALYSIS of PID CONTROL SYSTEM USING EXPERIMENT SET for UNDERGRADUATE ENGINEERING STUDENTS

***Ozgur Mercanlı[1], Hilmi Kuscu[1]**

*[1] Trakya University, Department of Mechanical Engineering*

*Trakya University Engineering Faculty, Edirne/TURKEY*
*(E mail:ozgurmercanli@trakya.edu.tr)*

**Abstract**

*PID controllers are the most used controllers. Theoretical understanding of the system to be controlled and its working principles are very important for closed-loop control. This basic knowledge is learned in principle by all undergraduate engineering students. However, understanding the practical aspects of a PID controller implementation must be cleverly combined with their links to theoretical concepts. This article examines the theoretical and practical training development process with the PID experiment set, showing a setup that can serve as a bridge between the theoretical and practical worlds of control system knowledge. By changing the coefficients of $K_p$, $T_i$, and $T_d$, students will observe the change between the input and output signals of the control system, so they will be able to make visual and theoretical analyses on the oscilloscope screen.*

**Keywords:** PID controller, Experiment set, closed-loop systems, educational aspect, PID experiment

## 1. INTRODUCTION

PID controllers are the most commonly used controllers. [1] Theoretical understanding of the system to be controlled and its working principles are very important for closed-loop control. [2] This basic knowledge is learned in principle by all undergraduate engineering students.

However, understanding the practical aspects of a PID controller implementation must be cleverly combined with their links to theoretical concepts. The most important component of an ideal PID control, e(t), is the control error, which is a value of the basic undergraduate course in Automatic Control Systems. The effects of proportional, integral, and derivative actions are included in the course content in a simple and understandable way, based on numerical simulation results. [3] Then, automatic control lessons are taught by focusing on the block diagrams of the feedback control system, the Laplace domain and time domain basic equations, the transient and steady-state error, the steady state, and the effect of integral and derivative motion on the closed loop system. The whole system is also included in the application of the Ultimate Value Theorem and the concept of system type. The dynamic properties of feedback control systems with ideal PID controllers can be easily evaluated theoretically and mathematically with Bode diagrams. Finally, the lessons are completed by evaluating the methods of several PI and PID setting rules that are widely used in practice. [6]

Although the content of the course is enriched with theoretical and mathematical applications, in order to better understand the basis of automatic control systems, it should be reinforced and become more understandable by observing the results experimentally in the laboratory environment with the students.

The content of this paper is organized as follows. In section 2, the components required to develop the physical demonstration setup are introduced as proposed PID, and experimental materials and devices are illustrated. In section 3, several recommended

experiments are included. In addition, detailed information is given on some of our observations and feedback from our students. Finally, the paper is concluded in section 4.

## 2. MATERIALS&METHOD

### *2.1 Proportional Control*

The reason why on-off control often gives rise to oscillations is that the system overreacts because a small change in the error will make the manipulated variable change over the full range. This effect is avoided in proportional control where the characteristic of the controller is proportional to the control error for small errors.

### *2.2 Integral Action*

The main function of the integral action is to make sure that the process output agrees with the setpoint in a steady state. With proportional control, there is normally a control error in the steady state. With integral action, a small positive error will always lead to an increased control signal, and a negative error will give a decreasing control signal no matter how small the error is. The following simple argument shows that the steady-state error will always be zero with integral action.

### *2.3 Derivative Action*

The purpose of the derivative action is to improve closed-loop stability. The instability mechanism can be described intuitively as follows. Because of the process dynamics, it will take some time before a change in the control variable is noticeable in the process output. Thus, the control system will be late in correcting for an error. The action of a controller with proportional and derivative action may be interpreted as if the control is made proportional to the predicted process output, where the prediction is made by extrapolating the error by the tangent to the error curve.

The PID controller has three terms. The proportional term P corresponds to proportional control. The integral term I give a control action that is proportional to the time integral of the error. This ensures that the steady-state error becomes zero. The derivative term D is proportional to the time derivative of the control error. This term allows for the prediction of future errors. There are many variations of the basic PID algorithm that will substantially improve its performance and operability. [1][4]

PID control system diagrams,block diagrams and tranfer funstıons shown ın Fig.1, Fig.2 and Fig3 respectively.

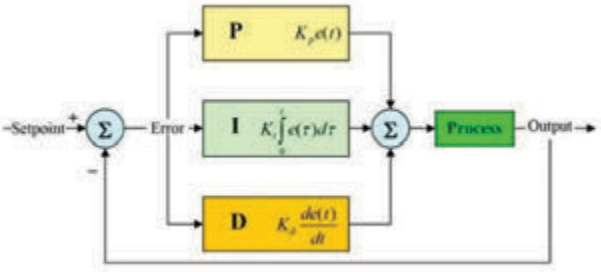



***Fig.1.1*** *PID Control System [5]*

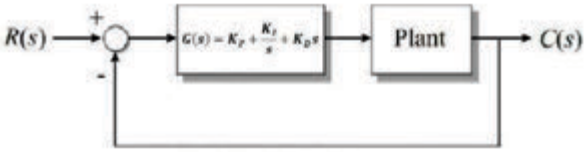



***Fig.2.*** *PID Control Block Diagram[5]*

$$G(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

***Fig.3.*** *PID Control Transfer Functon[5]*

### *2.4 Using Oscilloscope in PID experiment*

An oscilloscope is a measuring device that allows us to see time-dependent changes in electrical voltage. We know that a voltmeter is used to measure electrical voltage under normal conditions. Voltmeters show us only the magnitude and direction of the voltage in the circuit displayed numerically on ıts screen. The oscilloscope, on the other hand, presents the variation of the voltage with time as a two-axis graph in an easier-to-understand.
We can measure the voltage and frequency values digitally, as well as using the voltage and frequency reference values adjusted on the scaled oscilloscope screen. We measure the frequency value in the x-axis (horizontal) direction and the voltage amplitude and value in the y-axis (vertical) direction.

In addition, frequency and voltage behavior patterns can be monitored graphically on the oscilloscope screen as output value according to the input value.

In this experiment, we use a Digital storage oscilloscope GW-Instek GDS 1102A-U[8] as shown in Figure 4.



***Fig.4.*** *GW-Instek GDS 1102A-U oscilloscope [8]*

*2.5 Experimental Set*

There are different possibilities for the structure of the PID controller, as for all other combinations. This type which shown fig.4 is particularly graphic; namely the parallel circuit three decoupled signal controller, whose output voltages are then added. Due to the parallel circuit, each controller can operate independently to others. Practical controllers are usually assembled with one or more operational amplifiers, whereby the PID behaviors is released by suitable feedback.

The influence of three components can usually be set externally;

The **P** part proportional sensitivity $K_p$
The **I** part by the integral action time $T_n$
The **D** part by the derivative action time $T_d$

The D part, therefore, ensures that the controller reacts quickly even in the case of slow changes at its input. The P part takes care of medium amplifications and the I part causes the controller to operate accurately without leaving a control difference. Deriving the individual controller parameters from the jump reply or rise reply is difficult since the three components overlap. In this experiment, we, therefore, concentrate on comparative observation. HPS SystemTechnik [7] PID board illustrated in Figure 5.

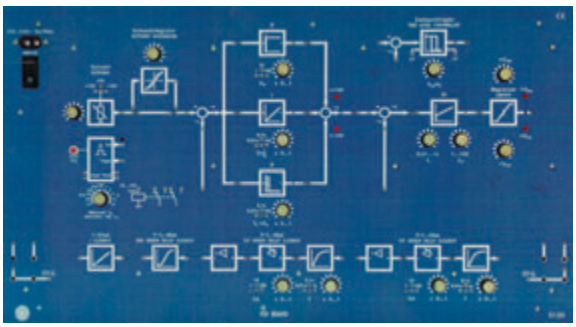


***Fig.5.*** *HPS System Technik PID Board V 5120[7]*

The set point generator allows set point jumps to be set in the range of -10V…+10V and fed directly or through the set point integrator to the measuring object.

## 3. RESULTS AND DISDUSSION

By changing the coefficients of $K_p$, $T_i$, and $T_d$, students will observe the change between the input and output signals of the control system, so they will be able to make visual and theoretical analyses on the oscilloscope screen.

Students set the experiment circuit shown in fig 6 and select the following setting which is illustrated in Table 1 for the measurement.
Each column refers to different measurements which written on Table1 respectively

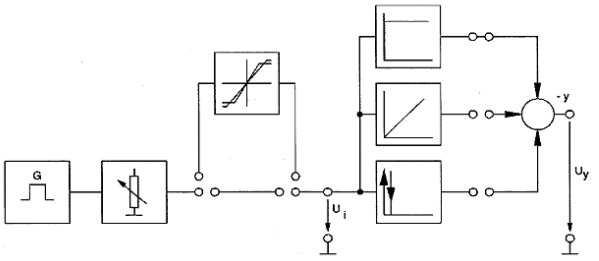



***Fig.6****. Experimental circuit.*

Each column refers to different measurements which written on Table1 respectively.

To measure the jump reply we apply the pulse voltage directly to the set point potentiometer.

*Table.1. Experiment settings and parameters*

| | Jump Reply | | |
|---|---|---|---|
| Measurement No | 1 | 2 | 3 |
| Controller | P | PI | PID |
| Measuring Cycle $T_m$ | 10ms | | |
| Set Point Integrator | | | |
| Jump $U_i$ | 1 V | | |
| Proportional Action Factor $K_p$ | 2 | 3 | 5 |
| Integration Time $T_i$ | | 0,1sn | |
| Differantial Action Time $T_d$ | | | 0,1sn |

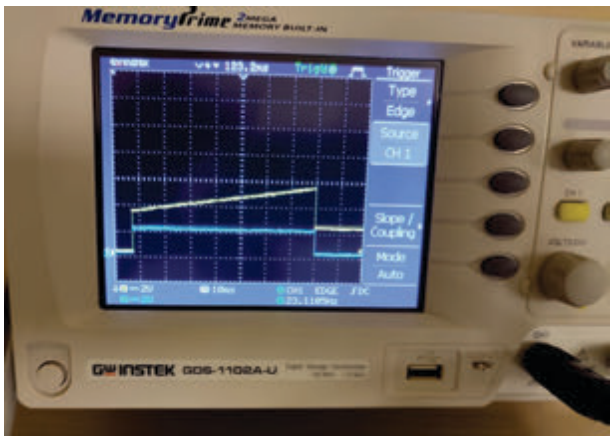



***Fig.7.*** *PI output on the oscilloscope display*

The jump response of the PID experiment according to table 1 column 2 on the Oscilloscope screen is shown in Figure 7. From Chanel 2 we applied input signal blue colored square waveform. And from channel1 we got the output signal yellow colored which referred to the behavior of the PI behavior.

The monitoring of the jump response of the PID experiment according to table 1 column 3 on the oscilloscope screen and the connection of the experiment set with the oscilloscope is shown in figure 8. Yellow colored is the output signal and referred the behavior of the PID controller.

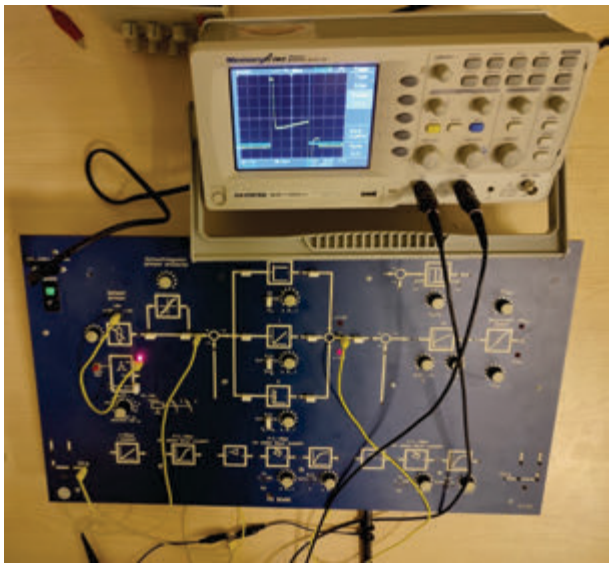


***Fig.8.*** *PID output on oscilloscope display*

Figure 9 shows the results of all three experiments observed and measured on the oscilloscope screen and transferred to the scaled paper according to the reference values given. The results of P, PI and PID denier are included in this paper.

Each of the three controllers (P, I, and D) is limited by a peak limiter that keeps the output signal 10,5 V (+/- 1V). After summation of the three parts, however, voltages may appear, which are greater than 10.5 V. This mainly depends on the adjustment of the proportional action factor $K_p$.

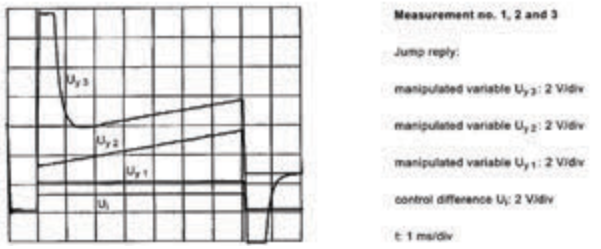



***Fig.9****. Experimental results*

Students can able draw the output diagrams on scaled paper. So they see the difference between both three different experiments, and visually they can compare and analyze the behaviors of the components. They can describe the jump reply PID controller and compare it with that of the PI controller. They can shade the derivative actıon area in the jump of the PID controller and measure the $T_d$.

## 4. CONCLUSIONS

The presented results can be used as part of a complex control system, helping to gain and analyze basic design information to make the transition to advanced control issues devoted to PI/PID controller design.

During the calibration and both manual tuning, the students encounter different practical challenges where they can associate those problems with the theoretical lectures where various aspects are assumed ideal.

## REFERENCES

[1] Aström K.J., Hauggland T., PID Controllers 2nd Edition Instrument Society of America 1995.

[2] Csurcsia P., Z., Bhandari P., Troyer T.D., Development of a low-cost PID setup for engineering technology students IFAC Papers OnLine 55-4 (2022) 213–218

[3] Yurkovich V.D., Naidu S.D., Educational Issues of PI-PID Controllers 9th IFAC

Symposium Advances in Control Engineering The International Federation of Automatic Control Nizhy Novgorod, Russia, June 19-21,2012 DOI:10.3182/2010619-3-ru-202400090
[4] Ozdas N.M., Dinibütün T.A., Kuzucu A., Otomatik Kontrol Temelleri 2nd Edition Birsen İstanbul 1998
[5] Kuscu H., Automatic Control Lecture Notes
[6] Ziegler NJ., Nichols NB., Optimum Settings for Automatic Controllers *J. Dyn. Sys., Meas., Control*. Jun 1993, 115(2B): 220-222 (3 pages) https://doi.org/10.1115/1.2899060
[7] Systemtechnik https://www.systemtechnik-online.de/home/
[8] GW-Instek https://www.gwinstek.com/en-global.

# DEVELOPMENT OF A PLC BASED EXPERIMENTAL SETUP FOR UNDERSTANDING CONTROL AND AUTOMATION APPLICATIONS

**Figan DALMIŞ**
*Namik Kemal University, Vocational School of Technical Sciences (fdalmis@nku.edu.tr)*

**Abstract**
*In accordance with industrialization of agriculture, PLCs (Programmable Logic Controllers) have been frequently employed in modern agricultural applications such as greenhouse automation, smart farms, autonomous tractors and harvesters, irrigation systems, animal automation systems, automatic transplanting machine. In this experimental and practical study, a test laboratory is designed with the aim of developing of teaching control and automation applications used not only in industry but also in agriculture, to students in the university. The developed control and automation system consists of PLC based control unit and HMI (Human Machine Interface) based monitoring unit. The physical signals are monitored in real time, through a local touch screen HMI. HMI screen also displays the downtime of the machine and the different process alarms occurred during the runtime. The communication mode between the PLC and HMI is supported by the Modbus RS485 protocol. Developed educational system allows students to learn programming, connecting, designing and understanding of the PLC/HMI based automation systems in industrial and agricultural application.*

**Keywords:** PLC, HMI, agriculture, automation.

## INTRODUCTION

Nowadays, many different processes like all manufacturing processes in industry, water treatment and distribution processes, electricity generation and distribution processes, agricultural process are automated. By Industry 4.0 revolution, technologies that facilitate the work of the producer by increasing productivity, profit and quality in agriculture have become smarter. With the developments in technology, it has become mandatory for our students to have knowledge about automation and control systems used not only in industry but also in agriculture. For this reason, in this study a test laboratory is developed to teach the students how to work with automatic control systems and how to implement them using the PLCs/HMIs. PLCs are the digital computers that makes machinery and systems work automatically. HMI is a device that connects a human to the controller in an automated system. HMIs provide a visual representation of the process parameters. They allow human operators to monitor and control machinery and the processes in real time.

PLCs are designed for multiple analogue and digital inputs and output arrangements, extended temperature ranges, immunity to electrical noise, and resistance to vibration and impact. The data handling, storage, processing power and communication capabilities of some modern PLCs are approximately equivalent to desktop computers. The main difference from other computers is that PLCs are armored for severe conditions (such as dust, moisture, heat, cold, vibration) and have the facility for extensive input/output (I/O) arrangements [1].

PLCs play vital role not only in process control plants but also in manufacturing industries where it is necessary to have proper control of the automated machine to yield accurate result and easy fault identification and fault location. This is achieved by using PLC and HMI the control and monitoring of the machine [2].

An application study is introduced for education of Electrical and Electronics students about programming, connecting, designing and understanding PLC/HMI based automation systems. Developed educational system allows

students to learn processing of digital and analog signals about PLC unit and monitoring and controlling these signals via HMI. Developed education system is shown in Figure 1[3].

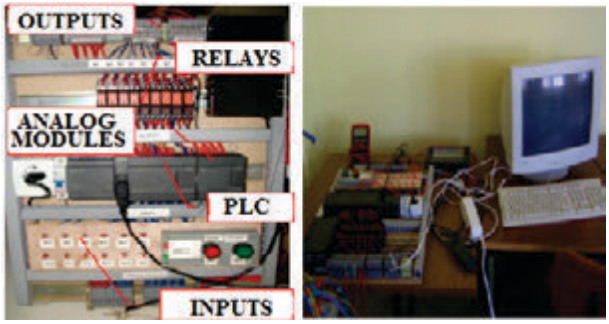



***Fig. 1.*** *Developed experimental automation education system*

S7–200 PLC based automation laboratory is developed in Marmara University. It consists of PLCs and extension modules, operator panels, motors, lamps, control elements (switches, buttons, etc) and application sets. The control program for the PLC is written with MicroWin Software, and SCADA program is written with WinCC monitor configuration software [4].

A didactic kit, an intelligent house model is developed to teach control and automation to students. Several characteristics in the house (alarm intrusion, stair and internal illumination, main door and attic temperature) are controlled by using a PLC. The local and remote monitoring interface of the model is developed in LabVIEW. It also allowed the model visualization through a Webcam positioned in front of the house. Developed didactic kit is shown in Figure 3 [5].

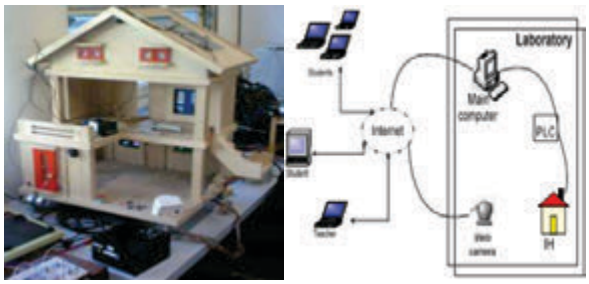



***Fig. 3.*** *Didactic kit: intelligent house*

A hardware and software architecture that allows the students both to work with real PLCs through the simulation of real industrial plants and to develop appropriate SCADA systems is proposed. This system is based on LabVIEW, MODBUS, PLCs and SolidWorks. To illustrate the use of the proposed architecture, two semi-virtual laboratories based on a bottling plant and the automatic irrigation process of a greenhouse using PLCs have been developed. Figure 4 shows the hardware architecture of semi-virtual plants for the learning of automation [6].

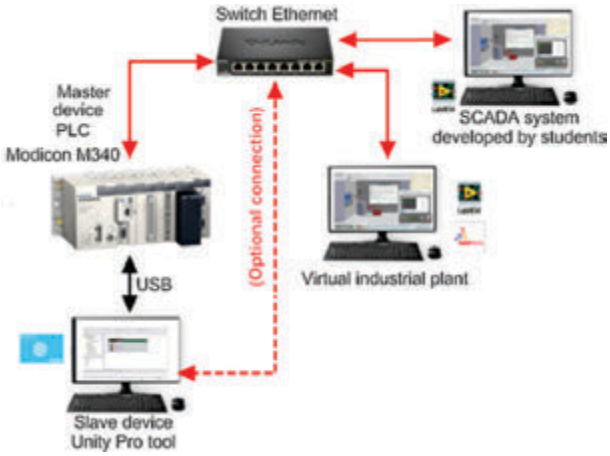



***Fig. 4.*** *Hardware architecture of semi-virtual plants for the learning of automation*

A PLC and SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) based smart village was developed for monitoring and controlling water distribution, energy maintenance and cold storage for cultivated product. The block diagram of the system is shown in Figure 5 [7].

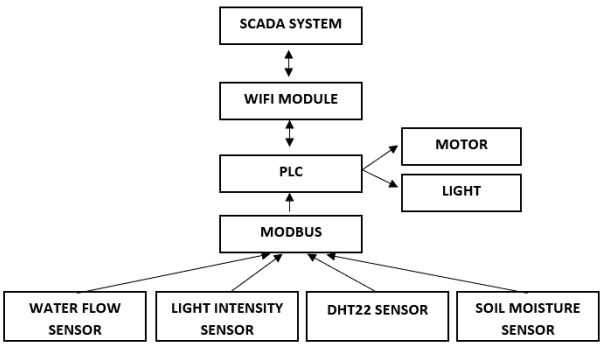



***Fig. 5.*** *Block diagram of the smart village*

A PLC-based control and telemetry system for self-propelled pruning residue mulcher prototype was developed. The developed machine is the first self-propelled agricultural mulcher machine developed in Turkey. This system provides the flexibility for control of the different agricultural machines, meets industry 4.0 requirements such as changeability, reconfiguration and autonomy. The system is shown in Figure 6 [8].




***Fig. 6.*** *The interior view of the pruning mulcher machine cabin*

It has been observed that studies on the development of applications related to control and automation systems have been carried out in the industrial sector for many years and have started to take place in other sectors like agriculture, home automation, power plants. Some of the technological applications used in agriculture are smart farms [9], agricultural robots [10], irrigation automations [11], automatic animal milking/feeding systems [12], greenhouse automations [13] etc.

The developed system in this study consists of real control and automation hardware and software components used in industrial enterprises.

## EXPOSITION

The developed experimental setup consists of an Enda ELC-386RT model PLC, an Enda EOP 41-70ETE model HMI, a Higen servo motor and its driver, a pneumatic cylinder, a sliding table linear motion system, and buttons. The overall system components are shown in Figure 5.

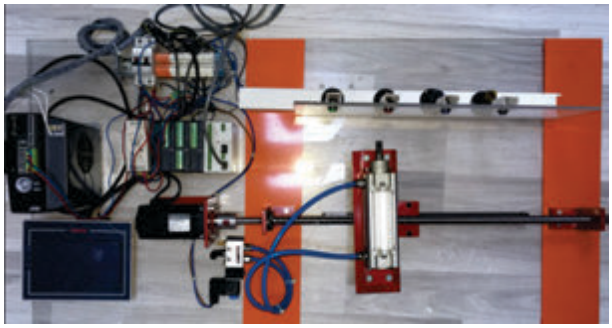


***Fig. 5.*** *Components of experimental setup*

In this system, position, velocity and acceleration of the servo motor were controlled by PLC.

The position information of the button which have to be pressed is entered on HMI screen by users. According to entered information, PLC send commands to servo motor system to let the pneumatic cylinder to take position. The cylinder mounted on the sliding table is moved horizontally forwards and backwards on the ball screw during servo motor runs. After taking the desired position, and the piston is moved, the chosen button is pressed.

The user interface in HMI allows users to interact with the automation system. The users can monitor system variables, send and receive control commands to and from PLC via HMI. The used HMI is directly connected to PC through Ethernet port in order to download/upload programs and for on-line simulation. It has serial communication ports that support RS232/RS485/RS422 protocols.

PLC program of the system was written in EndaSoft PLC ladder editor. After the preparation of automation scenario the program was downloaded to PLC device via Ethernet port.

The visual program for HMI was developed in ENDA.EOP_V1.6_Enu editor software.

## CONCLUSION

In this study, an experimental automation setup has been designed and practically tested. It has been seen that in the setup PLC, HMI, servo system, pneumatic system and linear motion system have been worked smoothly and compatible each other.

It was observed that the position information entered from the HMI screen by the user was correctly executed by PLC controlled servo system and that the pneumatic cylinder was able to push on the knobs at the defined points.

After entering the position information on the HMI, it has been seen that PLC controlled the servo system correctly and that the pneumatic cylinder pressed the desired button.

The control system is extensible because it is modular. By using the digital and analog channels on the PLC, system provides more flexibility for the students performing the different applications.

This setup proposes a hardware and software architecture that allows the university

students to work with real PLCs. They improve their skills on PLC-based automation systems widely used in industrial applications, intelligent buildings, agricultural automation, electrical power generation, transmission and distribution systems etc...

## ACKNOWLEDGE

This work was supported by the Namik Kemal University. Project No. NKUBAP.00.MB.AR.13.03

## REFERENCE

[1] Jadhav, K. P., Chaudhari, V. D., & Kurkure, G. N. (2017). Case Study on SCADA and Power Transmission System Automation. International Journal of Advanced Electronics and Communication Systems, 6(2), pp: 92-97.

[2] Fernandes, S., & Borkar, S. (2016). Development of PLC Based Industrial Automation with System Monitoring. 4th International Conference on Science, Technology and Management, ISBN:978-81-932074-8-2. pp 421-425.

[3] Bayrak, G., & Cebeci, M. (2012). An automation platform designs for electrical and electronics students: an application study. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 47, 950-955.

[4] Öztürk, Z. (2010). Development of Sample Automation Laboratory and PLC Applications, Marmara University, Institute of Science and Technology, Master Degree Thesis, İstanbul.

[5] Silva, P. M., Oliveira, P. C., Carvalho, N. C., Leão, C. P., & Soares, F. O. (2007, June). Virtual and Remote Control: an experience by students for students. In International Conference REV07 (p. 3). Porto, Portugal.

[6] Rodríguez, F., del Mar Castilla, M., Sánchez, J. A., Pawlowski, A. & Moreno, J. C. (2016). Architecture to develop semi-virtual industrial laboratories for the interactive learning of process automation. Computer Applications in Engineering Education, vol 24 issue 3, pp: 335–346. doi:10.1002/cae.21709.

[7] Thaj Mary Delsy, T., Haritha, K., Martin, B., & Karthika, G. (2021). Smart Village Monitoring and Control Using PLC And SCADA. 2021 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES), pp. 1-7, doi: 10.1109/ICSES52305.2021.9633950.

[8] Ünal, İ., Çanakcı, M., Topakçı, M., Karayel, D., Çakır, M. (2021). Design and development of the PLC based sensor and instrumentation system for self-propelled pruning residue mulcher prototype. Computers and Electronics in Agriculture, 186, ISSN 0168-1699, https://doi.org/10.1016/j.compag. 2021.106225.

[9] Sreeram, K., Kumar, R.S., Bhagavath, S.V., Muthumeenakshi, K. & Radha, S. (2017). Smart Farming—A Prototype for Field Monitoring and Automation in Agriculture. 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), pp. 2189-2193, doi: 10.1109/WiSPNET.2017.8300148.

[10] Yoshida, T., Onishi, Y., Kawahara, T., & Fukao, T. (2022). Automated harvesting by a dual-arm fruit harvesting robot. ROBOMECH Journal, 9(19). doi:https://doi.org/10.1186/s40648-022-00233-9

[11] Dwinugroho, T. B., Hapsari, Y. T., & Kurniawanti. (2021). Greenhouse automation: Smart watering system for plants in greenhouse using programmable logic control (PLC). Journal of Physics: Conference Series, 1823: 012014. doi:https://doi.org/10.1088/1742-6596/1823/1/012014

[12] Pavkin, D.Y., Shilin, D.V., Nikitin, E.A., Kiryushin, I.A. (2021). Designing and Simulating the Control Process of a Feed Pusher Robot Used on a Dairy Farm. Applied Sciences, 11(22), 10665. https://doi.org/10.3390/app112210665

[13] Karaman, S., Yazarel, S., & Gokalp, Z. (2019). Automation Applications in Greenhouse. Current Trends in Natural Sciences, 8(16), pp. 154-159.

# ПРОЕКТИРАНЕ НА СИНХРОНИЗАЦИОННА СХЕМА ЗА ДВЕ НЕИДЕНТИЧНИ ХАОТИЧНИ СИСТЕМИ

**Драгомир Чантов**[1]

[11]*Технически университет - Габрово*

# DESIGN OF SYNCHRONIZATION SCHEME FOR TWO NON-IDENTICAL CHAOTIC SYSTEMS

**Dragomir Chantov**[1]

[1] *Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**

*In this paper an approach for the design of a chaotic synchronization scheme between two diffrent chaotic systems is proposed. The aim is to control a chaotic system in such way that its dynamics to be changed so that it mimics the dynamics of a completely different chaotic master system. The control functions are designed according to the second Lyapunov stability law.*

**Keywords:** chaotic systems; chaotic synchronization; Lyapunov stability.

## ВЪВЕДЕНИЕ

След 1990 г. активно се развива една специфична област от теорията на управлението – решаване на задачи за стабилизация [1] или синхронизация на нелинейни хаотични системи [2,3]. Особена популярност добиват задачите за синхронизация, при които целта е синтезиране на връзка между две или повече хаотични системи по такъв начин, че динамиката им да бъде в определена зависимост. Актуалността на задачите за хаотична синхронизация се обуславя от факта, че това интересно явление намира приложение за защита на данните в най-различни комуникационни системи или системи за защита на информация [4-6].

Най-често при хаотичната синхронизация се разглеждат две еднопосочно свързани хаотични системи в конфигурация Master – Slave, като при това се търси такъв тип управление към втората система, че тя да извършва идентични хаотични колебания с първата система. Такъв тип синхронизация се нарича *идентична*. Възможно е да се синтезират други типове управление, при които динамиката на Slave системата е в по-сложна функционална зависимост с тази на Master системата, при което се получава *мащабирана*, *изместена*, *осцилираща* синхронизация или *антисинхронизация*. При всички тези случаи Master и Slave системите са идентични.

В научната литература доста по-слабо застъпени са задачите за проектиране на синхронизационни схеми между неидентични хаотични системи.

В настоящия доклад се предлага синхронизационна схема между два различни непрекъснати хаотични модела от трети ред. На базата на прилагане на втория метод за устойчивост на Ляпунов се синтезира активно управление към едната система, което напълно подчинява динамиката й към тази на другата система.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

През последните години в научната литература са представени редица нови абстрактни хаотични модели, преобладаващо от трети ред и с непрекъсната динамика. Такъв е моделът на Wu-Li [7], който се опис-

ва с уравненията:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -ax_2,\\ \dot{x}_2 &= x_3 / a,\\ \dot{x}_3 &= cx_1^2 - ax_2 - bx_3 - d.\end{aligned} \qquad (1)$$

За стойности на параметрите:

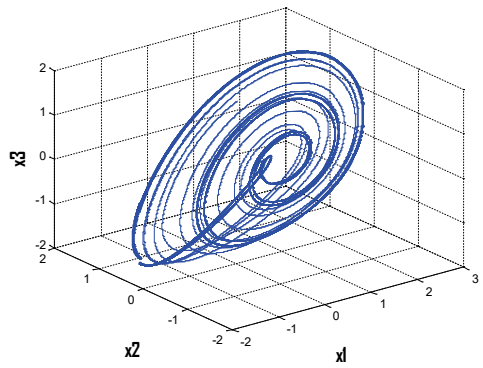
$$a = 1.2,\ b = 0.3,\ c = 0.3,\ d = 0.4 \qquad (2)$$

и начални условия:

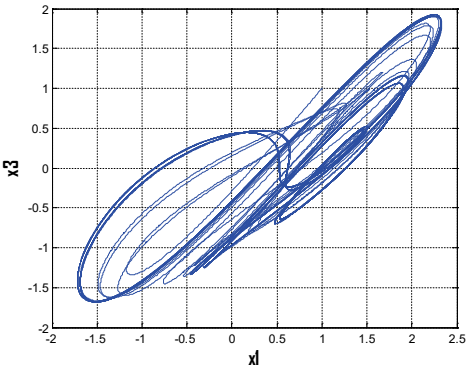
$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} x_1(0) & x_2(0) & x_3(0) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \qquad (3)$$

динамиката на системата е хаотична.

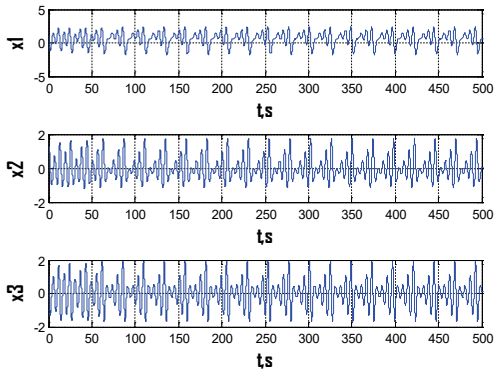
Хаотичният модел (1) е симулиран с помощта на програмния продукт Matlab за стойности на параметрите (2) и начални условия (3). На фиг. 1 е показано пространството на състоянието $(x_1, x_2, x_3)$ на системата. Вижда се, че атракторът на системата е хаотичен, т.е. състои се от множество нагъсто разположени една до друга неустойчиви периодични орбити, ограничени във формата на специфична структура в определена подобласт от пространството на състоянието. За добиване на по-ясна представа за структурата на хаотичния атрактор могат да се наблюдават проекциите на тримерното пространство на състоянието в трите фазови равнини $(x_1, x_2)$, $(x_2, x_3)$ и $(x_1, x_3)$. На фиг. 2 е показана една от тези фазови равнини - $(x_1, x_3)$. На фиг. 3 са показани времевите характеристики на трите променливи на състоянието на модела на Wu-Li. Характерно за променливите на състоянието на всяка хаотична система е, че тяхната динамика видимо е неразличима от динамиката на променлива със случаен характер.




***Фиг. 1***. *Хаотичен атрактор на модела на Wu-Li*




***Фиг. 2***. *Проекция на хаотичния атрактор на модела на Wu-Li в една от фазовите равнини*




***Фиг. 3***. *Времеви характеристики на променливите на модела на Wu-Li*

Друг сравнително нов хаотичен модел от трети ред е моделът на Zhang-Li-Chang [8], описван с уравненията:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_1 &= -\tilde{a}\tilde{x}_1 + \tilde{b}\tilde{x}_2 - \tilde{x}_2\tilde{x}_3,\\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \tilde{x}_1 + \tilde{x}_2 + \tilde{x}_1\tilde{x}_3,\\ \dot{\tilde{x}}_3 &= \tilde{x}_2^2 - \tilde{c}\tilde{x}_3 + \tilde{d}\tilde{x}_1^2.\end{aligned} \qquad (4)$$

За стойности на параметрите:

$$\tilde{a} = 12,\ \tilde{b} = 25,\ \tilde{c} = 8,\ \tilde{d} = 0.5 \qquad (5)$$

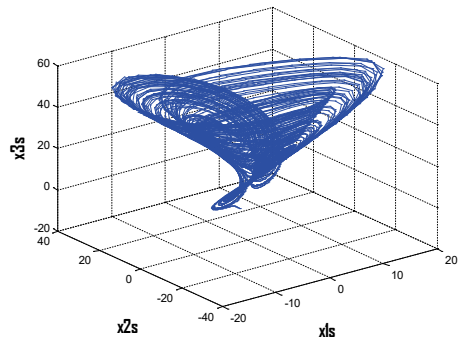
и начални условия:

$$\tilde{\mathbf{x}}(0) = \begin{bmatrix} -1.8 & -1.5 & 2.5 \end{bmatrix}^T \qquad (6)$$

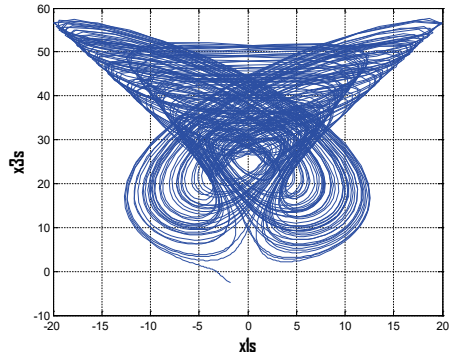
динамиката на системата е хаотична.

На фиг. 4 е показан хаотичният атрактор на системата (4) в пространството на състоянието $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3)$. На всички графики променливите $\tilde{x}_i$ са означени като *xis* поради особеностите на продукта Matlab. Атракторът отново има типичен хаотичен вид, като размерите му са с порядък по-го-

леми спрямо тези на атрактора на системата на Wu-Li от фиг. 1. На фиг. 5 е показана проекцията на хаотичния атрактор във фазовата равнина $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_3)$.

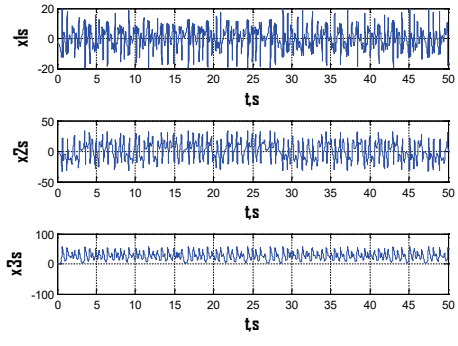



***Фиг. 4**. Хаотичен атрактор на модела на Zhang-Li-Chang*




***Фиг. 5**. Проекция на хаотичния атрактор на модела на Zhang-Li-Chang в една от фазовите равнини*

На фиг. 6 са показани времевите характеристики на трите променливи на състоянието на модела на Zhang-Li-Chang. При сравнение на тези характеристики със съответните на модела на Wu-Li от фиг. 3 се виждат различните времеви скали на динамиката на двете системи. Условно процесите в системата (4) се развиват с порядък по-бързо спрямо тези в системата (1).

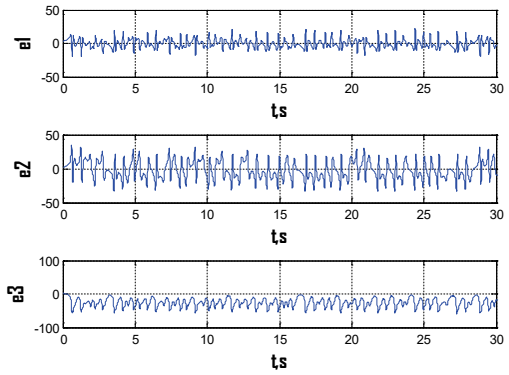



***Фиг. 6**. Времеви характеристики на променливите на модела на Zhang-Li-Chang*

Нека бъдат дефинирани функциите на разсъгласуване между отделните двойки променливи на системите на Wu-Li (1) и Zhang-Li-Chang (4):

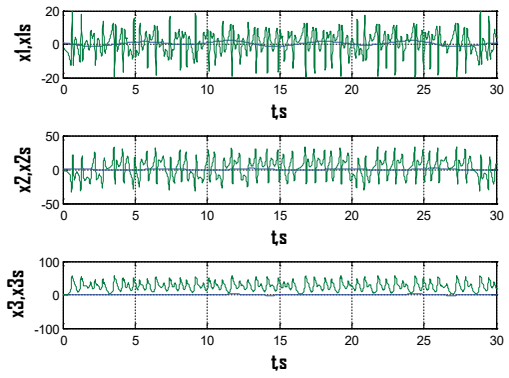
$$e_i = x_i - \tilde{x}_i,\ i = 1 \div 3. \qquad (7)$$

Когато липсва връзка между системите (1) и (4) съответните функции (7) също имат хаотичен характер, както се вижда от фиг. 7.




***Фиг. 7**. Функции на разсъгласуване при липса на връзка между двете хаотични системи*

На фиг. 8 е показана съвместната динамика на променливите $(x_1, \tilde{x}_1), (x_2, \tilde{x}_2)$. и $(x_3, \tilde{x}_3)$. Забелязват се следните три особености: видимо липсва корелация между динамиката на променливите на двете системи, различните времеви скали на динамиката на системите и голямата разлика в амплитудите на колебанията на системите на Wu-Li и Zhang-Li-Chang.




***Фиг. 8**. Съвместна динамика на отделните двойки променливи при липса на връзка*

Идеята за синтез на синхронизационна схема между системите на Wu-Li (1) и

Zhang-Li-Chang (4) предполага еднопосочна връзка между системите, при която системата на Wu-Li да бъде в ролята на Master, или управляваща система, а системата на Zhang-L i-Chang – в ролята на Slave, или подчинена система. При това схемата може да се запише с уравненията:

$$\begin{aligned} & \dot{x}_1 = -ax_2, \\ MASTER \quad & \dot{x}_2 = x_3 / a, \\ & \dot{x}_3 = cx_1^2 - ax_2 - bx_3 - d, \\ & \dot{\tilde{x}}_1 = -\tilde{a}\tilde{x}_1 + \tilde{b}\tilde{x}_2 - \tilde{x}_2\tilde{x}_3 + u_1, \\ SLAVE \quad & \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_1 + \tilde{x}_2 + \tilde{x}_1\tilde{x}_3 + u_2, \\ & \dot{\tilde{x}}_3 = \tilde{x}_2^2 - \tilde{c}\tilde{x}_3 + \tilde{d}\tilde{x}_1^2 + u_3, \end{aligned} \tag{8}$$

където $u_i$, $i = 1 \div 3$ са управляващи функции към Slave системата, които трябва да се синтезират така, че

$$\lim_{t\to\infty} e_i(t) = 0,\ i = 1 \div 3, \tag{9}$$

т.е. целта е да се постигне идентична хаотична синхронизация между двете различни хаотични системи в синхронизационната схема (8). По-конкретно съгласно избраната схема (8) целта е динамиката на системата на Zhang-Li-Chang да бъде подчинена на динамиката на системата на Wu-Li, ако бъдат намерени подходящи управляващи функции $u_i$.

Условието за идентична синхронизация (9) съответства на установяването на системата от разсъгласуването между Master и Slave системите в точката $\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \end{bmatrix}^T = \mathbf{0}$. Ако точката $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ е устойчива, то между системите ще има синхронизация. Устойчивостта на т. $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ може да се изследва чрез дефиниране функция на Ляпунов $V(\mathbf{e})$. Съгласно втория метод за устойчивост на Ляпунов т. $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ е устойчива, ако бъде намерена такава функция на Ляпунов, за която да са изпълнени следните три условия:

$$V(\mathbf{e}) > 0, \quad \forall \mathbf{e} \neq 0, \tag{10}$$

$$V(\mathbf{e}) = 0, \quad \mathbf{e} = 0, \tag{11}$$

$$\frac{dV(\mathbf{e})}{dt} < 0, \quad \forall \mathbf{e} \neq 0. \tag{12}$$

Обикновено при задачи за хаотична синхронизация функцията $V(\mathbf{e})$ се избира във вид на квадратична функция на променливите на разсъгласуването (7):

$$V(\mathbf{e}) = \frac{1}{2}\left(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2\right), \tag{13}$$

за да отговаря на условията (10) и (11). След диференциране на израза (13) за първата производна на $V(\mathbf{e})$ се получава:

$$\frac{dV(\mathbf{e})}{dt} = e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + e_3\dot{e}_3. \tag{14}$$

За да бъде изразът (14) отрицателно дефиниран съгласно условието (12), той трябва да бъде приведен например във вида:

$$\frac{dV(\mathbf{e})}{dt} = -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2, \tag{15}$$

където $k_i$ са положителни константи. Ако за първите производни на функциите на разсъгласуване се получат изразите:

$$\dot{e}_i = -k_ie_i, \ i = 1 \div 3, \tag{16}$$

то изразът (14) ще добие вида (15) и така ще бъде изпълнено и третото условие (12) на втория метод за устойчивост на Ляпунов за разглежданата синхронизационна схема (8).

След диференциране на лявата и дясната част на уравнение (7), за производните на функциите на разсъгласуване $\dot{e}_i$ се получава:

$$\dot{e}_i = \dot{x}_i - \dot{\tilde{x}}_i,\ i = 1 \div 3. \tag{17}$$

От (17) следва, че изразите за $\dot{e}_i$ могат да бъдат получени, като в схемата (8) се извадят уравненията на Slave системата от тези на Master системата:

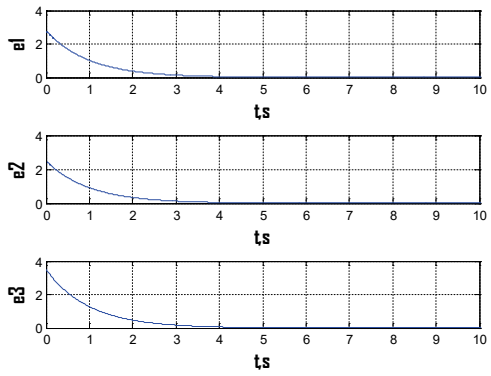
$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{\tilde{x}}_1 = -ax_2 + \tilde{a}\tilde{x}_1 - \tilde{b}\tilde{x}_2 + \tilde{x}_2\tilde{x}_3 - u_1, \\ \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{\tilde{x}}_2 = x_3 / a - \tilde{x}_1 - \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1\tilde{x}_3 - u_2, \\ \dot{e}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{\tilde{x}}_3 = cx_1^2 - ax_2 - bx_3 - d - \\ &\quad - \tilde{x}_2^2 + \tilde{c}\tilde{x}_3 - \tilde{d}\tilde{x}_1^2 - u_3. \end{aligned} \tag{18}$$

За да бъдат приведени изразите (18) в необходимия за постигане на синхронизация вид (16), управляващите функции към Slave системата $u_i$ трябва да се синтезират както следва:

$$u_1 = -ax_2 + \tilde{a}\tilde{x}_1 - \tilde{b}\tilde{x}_2 + \tilde{x}_2\tilde{x}_3 + k_1(x_1 - \tilde{x}_1),$$
$$u_2 = x_3 / a - \tilde{x}_1 - \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1\tilde{x}_3 + k_2(x_2 - \tilde{x}_2),$$
$$u_3 = cx_1^2 - ax_2 - bx_3 - d - $$
$$- \tilde{x}_2^2 + \tilde{c}\tilde{x}_3 - \tilde{d}\tilde{x}_1^2 + k_3(x_3 - \tilde{x}_3). \quad (19)$$

След заместване на управляващите функции (19) в изразите (18) и отчитане на (7), за първите производни на функциите на разсъгласуване в разглежданата хаотична синхронизационна схема (8) се получават изразите (16), което гарантира изпълнението и на третото условие на метода на Ляпунов. Изпълнението на трите условия (10), (11), (12) при така синтезираното управление доказва устойчивостта на проектираната синхронизационна схема.

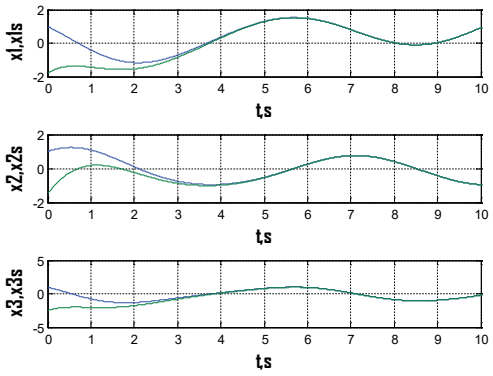
Синхронизационната схема (8) със синтезираните управляващи функции (19) е симулирана в среда на Matlab. Първоначално за константите $k_i$ са избрани стойности $k_i = 1, i = 1 \div 3$. На фиг. 9 са показани получените при симулацията функции на разсъгласуване $e_i = x_i - \tilde{x}_i$, $i = 1 \div 3$. Вижда се, че след преходен процес от около $4s$ те се установяват в нула, т.е. двете хаотични системи се синхронизират идентично. При това Slave системата на Zhang-Li-Chang напълно променя своята динамика, която става идентична на тази на Master системата на Wu-Li. Уравненията на Slave системата са тези на модела на Zhang-Li-Chang, но с помощта на управленията към нея тя се държи като копие на системата на Wu-Li.



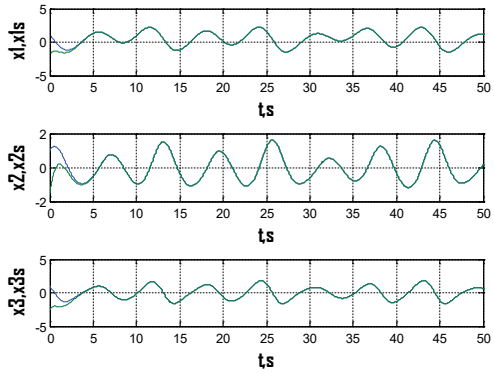

***Фиг. 9**. Функции на разсъгласуване при прилагане на управляващите функции*

На фиг. 10 е показана съвместната динамика на двойките променливи $x_1(t), \tilde{x}_1(t)$; $x_2(t), \tilde{x}_2(t)$ и $x_3(t), \tilde{x}_3(t)$. След преходния процес динамиката на съответните двойки става идентична, но запазва хаотичния характер на променливите на системата на Wu-Li. На фиг. 11 са показани същите двойки променливи в по-голям времеви интервал, за да се види, че веднъж синхронизирани, системите остават в това състояние докато се поддържа управлението към Slave системата.

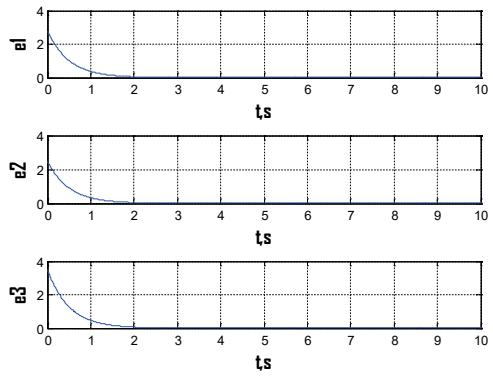
При експериментите е установено, че с помощта на константите $k_i$ може да се регулира продължителността на преходния процес до достигане на синхронизация между системите. На фиг. 12 са показани функциите на разсъгласуване $e_i = x_i - \tilde{x}_i$ за $k_i = 2, i = 1 \div 3$. Преходният процес е около $2s$, т.е. два пъти по-кратък спрямо този от предходния експеримент.




***Фиг. 10**. Съвместна динамика на отделните двойки променливи при синхронизация*




***Фиг. 11**. Съвместна динамика на отделните двойки променливи за по-голям времеви интервал*




***Фиг. 12**. Функции на разсъгласуване при промяна на коефициентите $k_i$*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирана е хаотична синхронизационна схема, при която с помощта на прилагането на втория метод за устойчивост на Ляпунов е постигната синхронизация между две напълно различни непрекъснати хаотични системи от трети ред, с различни с порядък размери на хаотичните атрактори и различни с порядък времеви скали на тяхната динамика. След синтезиране и прилагане на управляващите функции към подчинената система, нейната динамика напълно се променя и става идентична на динамиката на управляващата хаотична система. Получените резултати са потвърдени със симулационни експерименти. Хаотичната синхронизационна схема може да се използва като основа за реализиране на система за защитено предаване на данни или криптиране на информация.

## REFERENCE

[1] Ott, E., C. Grebogi, J. Yorke. Conrolling chaos. Physics Letters, vol.64, 1990, pp.1196-1199.

[2] Carroll, T., L. Pecora. Synchronizing chaotic circuits. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, Vol.38, No.4, 1991, pp.453-456.

[3] Pecora, L., T. Carroll. Synchronization in chaotic systems. Physical Review Letters, Vol.64, No.8, 1990, pp.821-824.

[4] Parlitz, U. *et. al.* Encoding messages using chaotic synchronization. Physical Review E, Vol.53, No.5, 1996, pp.4351-4361.

[5] Zaher, A., A. Abu-Rezq. On the design of chaos-based secure communication systems. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 16 (2011), pp.3721-3733.

[6] Cho, K., T. Miyano. Chaotic cryptography using augmented Lorenz equations aided by quantum key distribution. IEEE Trans Circ Systems-I, Vol. 62, No 2, 2015, pp.478-487.

[7] Wu, Q-Q, T. Li. Analysis, circuit implementation and synchronization of a new chaotic system. Proc. 33 Chinese Control Conference, July 28-30, 2014, Nanjing, China, pp. 6070-6073.

[8] Zhang, X., Z. Li, D. Chang. Design, circuit implementation and synchronization on a new three dimensional fractional-order system. Int. J. Electron. Commun. 82 (2017), pp. 435-445.

# СИНХРОНИЗАЦИЯ МЕЖДУ ХАОТИЧНИ МОДЕЛИ НА WANG ПОСРЕДСТВОМ ВРЪЗКА ПО ЕДНА ПРОМЕНЛИВА

**Драгомир Чантов**[1]

[1]*Технически университет - Габрово*

# SYNCHRONIZATION OF WANG CHAOTIC MODEL BY MEANS OF ONE-VARIABLE COUPLING

**Dragomir Chantov**[1]

[1] *Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**

*In this paper chaotic synchronization schemes for two identical Wang chaotic systems are designed. The main purpose of the synchronization schemes is to achieve synchronization with the most economical coupling between the systems, namely with one variable only. For this purpose, different approaches are used. First, the most basic approach is to replace one of the variables of the slave system with the corresponding variable of the master system and to test the stability of the synchronization scheme by calculating the conditional Lyapunov exponents. If no synchronization can be achieved, additional feedback couplings with the same variable are added.*

**Keywords:** chaotic systems; chaotic synchronization; feedback coupling; partial replacement.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Теорията на хаоса е специфична подобласт от теорията на управлението и по-конкретно от теорията на нелинейните системи, която използва свой понятиен апарат и в която се решават задачи, частично свързани с основните задачи за анализ и синтез от класическата теория на управлението. Една такава основна задача е тази за синхронизация между две или повече хаотични системи, която може да се реши по много различни начини и има много специфични особености [1,2].

Повечето методи за хаотична синхронизация разглеждат случая, при който една, най-често непрекъсната, хаотична система участва в хаотичната синхронизационна схема в ролята на управляваща система и осигурява синхронизиращ сигнал за друга, идентична на нея система, наречена управлявана или подчинена система. Съществуват различни подходи за синтез на такива синхронизационни схеми, като характерна особеност на тези задачи е, че няма универсален метод, който винаги да гарантира постигането на синхронизация между системите. Освен това, съществуват и различни подходи за анализа на устойчивостта на дадена синхронизационна схема, което свойство гарантира постигането на синхронизация.

Повечето известни методи за хаотична синхронизация предполагат синтезирането на сложни управляващи функции, подавани към подчинената хаотична система, които в общия случай могат да съдържат няколко или всички променливи на управляващата система, както и променливи от самата подчинена система [3]. В някои случаи това може да затрудни физическото реализиране на дадена синхронизационна схема, ако част от тези променливи не са постоянно или временно достъпни. В други случаи е нежелателно или неефективно подаването

на няколко сигнала/променливи по трасето за връзка между управляващата и подчинената системи.

В настоящия доклад се предлага реализирането на хаотични синхронизационни схеми между два хаотични модела на Wang, при които винаги връзката между системите е само по една променлива. Устойчивостта на всяка синхронизационна схема е изследвана посредством изчисляване на т.н. условни показатели на Ляпунов.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Хаотичната система на Wang [4,5] представлява сравнително нов, типичен непрекъснат абстрактен хаотичен модел от трети ред. Уравненията на модела са:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= ax_1 - ax_2 - x_2x_3, \\ \dot{x}_2 &= -bx_2 + x_1x_3, \\ \dot{x}_3 &= -cx_3 + dx_1 + x_1x_2, \end{aligned} \qquad (1)$$

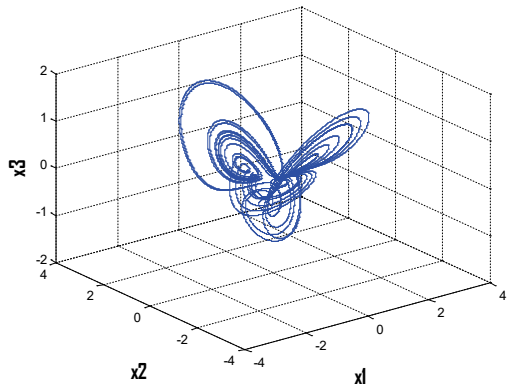
където номиналните стойности на параметрите са:

$$a = 1,\ b = 5.7,\ c = 5,\ d = 0.06. \qquad (2)$$

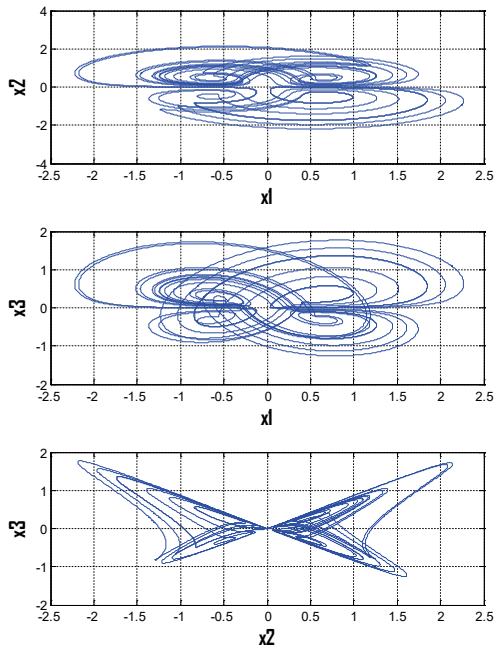
Моделът на Wang е симулиран с програмния продукт Matlab за произволно избрани начални условия:

$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} x_1(0) & x_2(0) & x_3(0) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0. \end{bmatrix}^T \qquad (3)$$

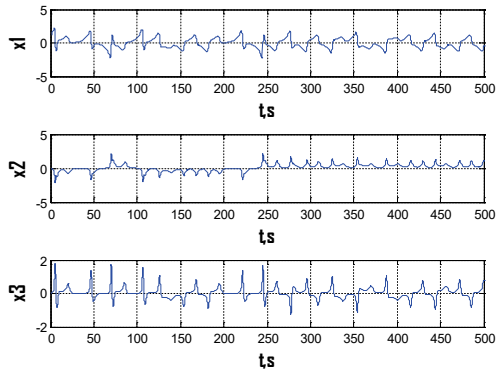
На фиг. 1 е показан хаотичният атрактор на модела в пространството на състоянието $(x_1, x_2, x_3)$. Атракторът е 4-секторен. Тази структура на атрактора се вижда по-добре при наблюдаване на проекциите на пространството на състоянието в трите фазови равнини $(x_1, x_2)$, $(x_1, x_3)$ и $(x_2, x_3)$, показани на фиг. 2. На фиг. 3 са показани времевите характеристики на променливите на състоянието на модела на Wang, които имат типичния за хаотична система вид.




***Фиг. 1**. Хаотичен атрактор на модела на Wang*




***Фиг. 2**. Проекция на хаотичния атрактор на модела на Wang в трите фазови равнини*




***Фиг. 3**. Времеви характеристики на променливите на модела на Wang*

Базовият вид на хаотична синхронизационна схема между два модела на Wang, първоначално без връзка между тях, може да се даде с уравненията:

$$\begin{aligned} & \dot{x}_1 = ax_1 - ax_2 - x_2x_3, \\ \textit{Master} \quad & \dot{x}_2 = -bx_2 + x_1x_3, \\ & \dot{x}_3 = -cx_3 + dx_1 + x_1x_2, \end{aligned} \tag{4}$$

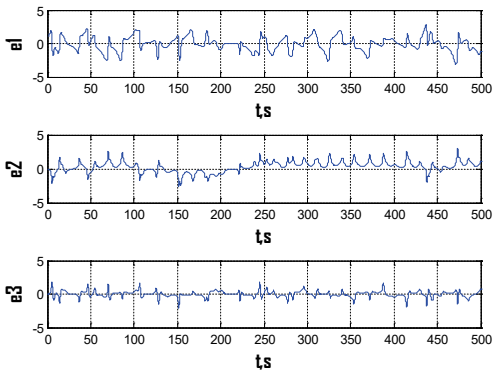
$$\begin{aligned} & \dot{\tilde{x}}_1 = a\tilde{x}_1 - a\tilde{x}_2 - \tilde{x}_2\tilde{x}_3, \\ \textit{Slave} \quad & \dot{\tilde{x}}_2 = -b\tilde{x}_2 + \tilde{x}_1\tilde{x}_3, \\ & \dot{\tilde{x}}_3 = -c\tilde{x}_3 + d\tilde{x}_1 + \tilde{x}_1\tilde{x}_2, \end{aligned}$$

където с $\tilde{x}_i$, $i = 1 \div 3$ са означени променливите на втората система, която в следващите схеми ще бъде в ролята на подчинена (Slave) система, а първата система ще бъде в ролята на управляваща (Master) система.

Двата хаотични модела в схемата (4) са идентични модели на Wang, с еднакви стойности на всички параметри, които са стойностите от (2). Въпреки, че в схемата (4) има два идентични хаотични модела, ако те се стартират от различни начални условия, динамиката им няма да бъде корелирана по никакъв начин, въпреки, че и двете инстанции на модела на Wang ще се движат по хаотичния атрактор от фиг. 1. За илюстриране на това интересно и присъщо на хаотичните системи явление са получени функциите на разсъгласуване или грешките между отделните двойки променливи в двете системи на Wang;

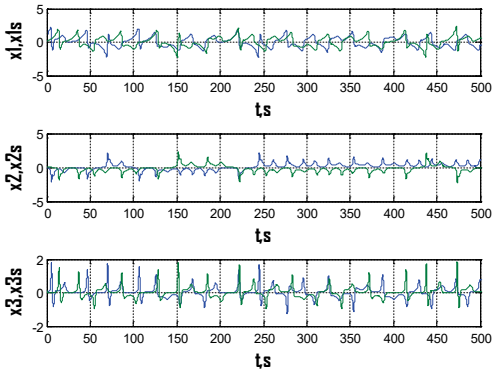
$$e_i = x_i - \tilde{x}_i,\ i = 1 \div 3, \tag{5}$$

които са показани на фиг. 4




***Фиг. 4**. Функции на разсъгласуване при липса на връзка между двата модела на Wang*

Вижда се, че динамиката на тези функции сама по себе си също е хаотична. На фиг. 5 е показана динамиката на двойките променливи $(x_1, \tilde{x}_1), (x_2, \tilde{x}_2)$ и $(x_3, \tilde{x}_3)$. Фигурата потвърждава индивидуалното и независимо движение на двете системи по хаотичния им атрактор.




***Фиг. 5**. Съвместна динамика на отделните двойки променливи при липса на връзка*

Съществуват различни подходи за реализиране на управление към Slave системата в схемата (4) с цел синхронизация между системите. Най-общо, ще се приема, че системите в (4) са идентично синхронизирани, ако за дадено управление е изпълнено условието:

$$\lim_{t \to \infty} e_i(t) = 0,\ i = 1 \div 3. \tag{6}$$

Няма универсален метод за постигане на синхронизация. При повечето методи към уравненията на Slave системата се добавят сложни управляващи функции, които в общия случай могат да съдържат всички променливи както от Master системата, така и от самата Slave система. Не винаги този подход е удачен, понякога е желателно връзката между двете хаотични системи да е максимално „икономична".

Нека се модифицира схемата (4), като в Slave системата една от променливите, само на една позиция, да бъде заместена от съответната променлива от Master системата. Например като първи вариант на този подход, наречен частично заместване [6], променливата $x_1$ ще замести променливата $\tilde{x}_1$ само в първото уравнение на Slave системата, като това съответства на подаване-

то на управляващ сигнал. Тогава Slave системата добива вида:

$$\begin{aligned} &\dot{\tilde{x}}_1 = a\underline{x_1} - a\tilde{x}_2 - \tilde{x}_2\tilde{x}_3, \\ \textit{Slave}\quad &\dot{\tilde{x}}_2 = -b\tilde{x}_2 + \tilde{x}_1\tilde{x}_3, \\ &\dot{\tilde{x}}_3 = -c\tilde{x}_3 + d\tilde{x}_1 + \tilde{x}_1\tilde{x}_2. \end{aligned} \qquad (7)$$

По такъв начин между двата хаотични модела вече има връзка, но това само по себе си не гарантира получаването на синхронизация между тях. Условието за синхронизация се свежда до анализ на устойчивостта на точката $\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \end{bmatrix}^T = \mathbf{0}$, която е центърът на координатната система, осите на която са функциите (5). Ако линеаризираната в тази точка система от разсъгласуването между Master и Slave системите е устойчива, то ще бъде изпълнено условието за синхронизация (6). Тази система се получава при изваждане на уравненията на Slave системата (7) от тези на Master системата от (4) и отчитане, че $e_i = x_i - \tilde{x}_i$ и $\dot{e}_i = \dot{x}_i - \dot{\tilde{x}}_i$:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -ae_2 - x_2x_3 + \tilde{x}_2\tilde{x}_3, \\ \dot{e}_2 &= -be_2 + x_1x_3 - \tilde{x}_1\tilde{x}_3, \\ \dot{e}_3 &= -ce_3 + de_1 + x_1x_2 - \tilde{x}_1\tilde{x}_2. \end{aligned} \qquad (8)$$

В уравненията (8) може да се направи заместването $\tilde{x}_i = x_i - e_i$, което следва от (5), при което, след извършване на съответните действия по умножение, системата от разсъгласуването ще добие вида:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -ae_2 - e_2x_3 - e_3x_2 + e_2e_3, \\ \dot{e}_2 &= -be_2 + e_1x_3 + e_3x_1 - e_1e_3, \\ \dot{e}_3 &= -ce_3 + de_1 + e_1x_2 + e_2x_1 - e_1e_2. \end{aligned} \qquad (9)$$

Якубианът на системата (9) е:

$$\mathbf{J_x} = \begin{bmatrix} 0 & -a - x_3 + e_3 & -x_2 + e_2 \\ x_3 - e_3 & -b & x_1 - e_1 \\ d - e_2 & x_1 - e_1 & -c \end{bmatrix}. \qquad (10)$$

Линеаризацията на системата (8) в т. $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ съответства на заместването на $e_i = 0$ в Якубиана (10). Ако собствените стойности на $\mathbf{J_x}$ са в лявата полуравнина на комплексната равнина, то синхронизационната схема ще е устойчива и ще се изпълнява необходимото условие за синхронизация. Наличието на променливите $x_i$ в (10) възпрепятства точното изчисляване на собствените стойности на $\mathbf{J_x}$. Възприета е методика, при която тези променливи се заместват с техните математически очаквания за достатъчно голям времеви диапазон. Реалните части на изчислените след това приближение собствени стойности на $\mathbf{J_x}$ се наричат условни показатели на Ляпунов.

С помощта на продукта Matlab са изчислени математическите очаквания на променливите на системата на Wang за период от 500*s*, който е съобразен с динамиката на системата, представена на фиг. 3:

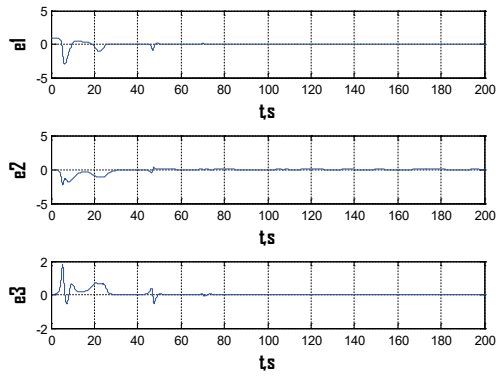
$$\bar{x}_1 = 0.0053, \bar{x}_2 = 0.0998, \bar{x}_3 = 0.0295. \qquad (11)$$

След заместване на (11) в (10) и отчитане, че $e_i = 0$, за собствените стойности на $\mathbf{J_x}$ в т. $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ се получава:

$$\lambda_1 = -0.0065, \lambda_2 = -5.6948, \lambda_3 = -4.9987. \qquad (12)$$

Собствените стойности (12) са отрицателни, от което следва, че синхронизационната схема ще е устойчива. Тъй като стойностите (12) са реални, те съвпадат и с условните показатели на Ляпунов за тази схема. На фиг. 6 са показани получените при симулацията функции на разсъгласуване $e_i = x_i - \tilde{x}_i$. След преходен процес от около 50*s* хаотичните системи се синхронизират идентично, тъй като се изпълнява условието за синхронизация (6).

Реализацията на предходната синхронизационна схема е с възможно „най-икономична" връзка – само една променлива от Master системата участва само на една позиция в уравненията на Slave системата. Практиката показва, че често пъти подобни схеми с частично заместване не водят до синхронизация. Освен това липсва възможност за допълнителна настройка, например с коефициент, който да регулира продължителността на преходния процес.




***Фиг. 6**. Функции на разсъгласуване при Slave система (7)*

За да има повече възможности за настройка на синхронизационната схема се предлага добавяне на вторичен управляващ сигнал към Slave системата със същата управляваща променлива от Master системата. Вторичният сигнал се генерира на принципа на известния метод за синхронизация с обратна връзка [7] и за разглежданията вариант на връзка само по променливата $x_1$ Slave системата (7) може да се модифицира например във вида:

$$\begin{aligned} & \dot{\tilde{x}}_1 = a\underline{x_1} - a\tilde{x}_2 - \tilde{x}_2\tilde{x}_3 + \underline{\alpha(x_1 - \tilde{x}_1)}, \\ \textit{Slave} \quad & \dot{\tilde{x}}_2 = -b\tilde{x}_2 + \tilde{x}_1\tilde{x}_3, \\ & \dot{\tilde{x}}_3 = -c\tilde{x}_3 + d\tilde{x}_1 + \tilde{x}_1\tilde{x}_2, \end{aligned} \tag{13}$$

където $\alpha$ е коефициент на вторичната връзка, който може да се избере експериментално при симулацията.

Якубианът на системата от разсъгласуването за новата Slave система (13) е:

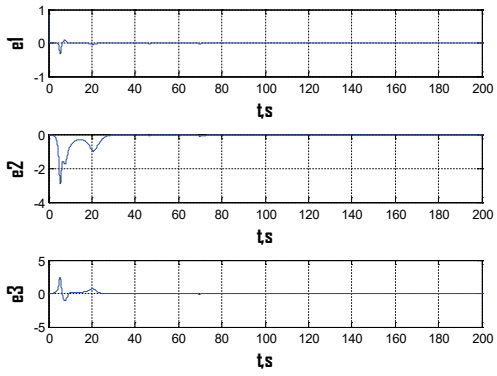
$$\mathbf{J_x} = \begin{bmatrix} -\alpha & -a - x_3 + e_3 & -x_2 + e_2 \\ x_3 - e_3 & -b & x_1 - e_1 \\ d - e_2 & x_1 - e_1 & -c \end{bmatrix}, \tag{14}$$

при което след заместване на (11) в (14) и отчитане, че $e_i = 0$, за собствените стойности на $\mathbf{J_x}$ в т. $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ за $\alpha = 10$ се получава:

$$\lambda_1 = -5.0012, \lambda_2 = -5.707, \lambda_3 = -9.9917, \tag{15}$$

т.е. отново се изпълнява условието за синхронизация. При това числата (15) са по-отдалечени от ординатната ос на комплексната равнина спрямо тези от (12), което предполага по-бърза синхронизация.

На фиг. 7 са показани получените функции на разсъгласуване $e_i = x_i - \tilde{x}_i$ за модификацията на синхронизационната схема със Slave системата (14). Вижда се, че системите се синхронизират, при това по-бързо спрямо предишния вариант от фиг. 6.




***Фиг.** 7. Функции на разсъгласуване при Slave система (13)*

Друг вариант за първична връзка по променливата $x_1$ по метода на частично заместване между системите от синхронизационната схема е със следната Slave система:

$$\begin{aligned} & \dot{\tilde{x}}_1 = a\tilde{x}_1 - a\tilde{x}_2 - \tilde{x}_2\tilde{x}_3, \\ \textit{Slave} \quad & \dot{\tilde{x}}_2 = -b\tilde{x}_2 + \tilde{x}_1\tilde{x}_3, \\ & \dot{\tilde{x}}_3 = -c\tilde{x}_3 + d\underline{x_1} + \tilde{x}_1\tilde{x}_2, \end{aligned} \tag{16}$$

при който управляващият сигнал е в третото уравнение.

При този случай след получаване на системата от разсъгласуването и линеаризирането й по начин, аналогичен на този от предишния вариант, се получава следния Якубиан:

$$\mathbf{J_x} = \begin{bmatrix} a & -a - x_3 + e_3 & -x_2 + e_2 \\ x_3 - e_3 & -b & x_1 - e_1 \\ -e_2 & x_1 - e_1 & -c \end{bmatrix}, \tag{17}$$

за собствените стойности на който в т. $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ при прилагане на същия алгоритъм с осреднените стойности (11) се получава:

$$\lambda_1 = 0.0095, \lambda_2 = -5.6955, \lambda_3 = -5 . \qquad (18)$$

Наличието на положителна собствена стойност показва, че синхронизация между Master и Slave системите при тази връзка няма да се получи, което се потвърждава и от направената симулация. Функциите на разсъгласуване са подобни на тези от фиг. 4, когато няма връзка между системите.

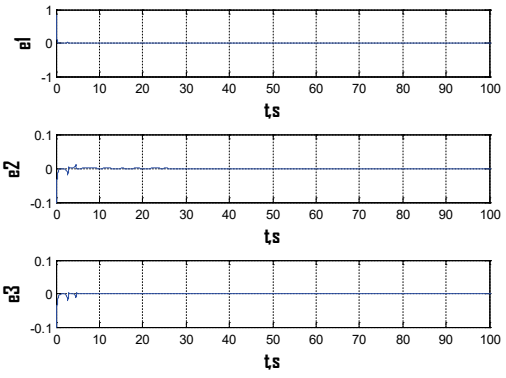
Към Slave системата (16) също може да се добави вторичен управляващ сигнал със същата управляваща променлива от Master системата, аналогично на (13):

$$\begin{aligned} & \dot{\tilde{x}}_1 = a\tilde{x}_1 - a\tilde{x}_2 - \tilde{x}_2\tilde{x}_3 + \underline{\alpha(x_1 - \tilde{x}_1)}, \\ \textit{Slave} \quad & \dot{\tilde{x}}_2 = -b\tilde{x}_2 + \tilde{x}_1\tilde{x}_3, \\ & \dot{\tilde{x}}_3 = -c\tilde{x}_3 + d\underline{x_1} + \tilde{x}_1\tilde{x}_2. \end{aligned} \qquad (19)$$

В този случай за собствените стойности на $\mathbf{J_x}$ в т. $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ за $\alpha = 10$ се получава:

$$\lambda_1 = -5,\ \lambda_2 = -5.7093, \lambda_3 = -8.9908 . \quad (20)$$

На фиг. 8 са показани получените при симулацията на схемата функции $e_i = x_i - \tilde{x}_i$ , които потвърждават наличието на идентична синхронизация.




***Фиг. 8**. Функции на разсъгласуване при Slave система (19)*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирани са хаотични синхронизационни схеми на основата на сравнително нов и по-слабо известен хаотичен модел от трети ред. Основната цел е да се получи идентична синхронизация между две системи на Wang, свързани в конфигурация Master-Slave с възможно най-облекчена връзка между тях. Предложен е подход, при който връзката е само по една променлива. За по-голяма гъвкавост и тестване на повече варианти на връзката се предлага съчетаване на управляващ сигнал от тип частично заместване с такъв, синтезиран на принципа на обратната връзка. Този подход дава възможност за реализиране на множество схеми на връзка само по една променлива, което увеличава възможностите за намиране на устойчив вариант и за регулиране на продължителността на преходния процес. Подобни схеми могат да се реализират с с връзка по някоя от останалите две променливи на хаотичната система.

## REFERENCE


[1] Pecora, L., T. Carroll. Synchronization in chaotic systems. Physical Review Letters, Vol.64, No.8, 1990, pp.821-824.

[2] Carroll, T., L. Pecora. Synchronizing chaotic circuits. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, Vol.38, No.4, 1991, pp.453-456.

[3] Boccaletti, S., C. Grebogi, "The control of chaos: theory and applications", Physics Reports, vol. 329, 2000, pp.103-197.

[4] Karthikeyan, R., V. Sundarapandian. Hybrid synchronization of four-scroll systems via active control. J. Electrical Engineering, Vo. 65, No. 2, 2014, pp.97-103.

[5] Wang, L. 3-scroll and 4-scroll chaotic attractors generated from a new 3-D quadratic autonomous system. Nonlinear Dynamics 56 (2009), pp.453-462.

[6] Pecora, L., T. Carroll, G. Johnson, D. Mar, J. Heagy, Fundamentals of synchronization in chaotic systems, concepts, and applications, Chaos 7(4), 1997, pp.520-543.

[7] Boccaletti, S., J. Kurths, G. Osipov, D. Valladares, C. Zhou, The synchronization of chaotic systems, Physics Reports 366 (2002), pp.1-101.

# ЛАБОРАТОРНА МУЛТИ-АГЕНТНА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАФИКА

**Станимир Йорданов[1], Георги Михалев[2], Христина Стойчева[3] , Валентин Владимиров[4]**

*[1,23,4]Технически университет – Габрово*

# LABORATORY MULTI-AGENT TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM

**Stanimir Yordanov[1], Georgi Mihalev[2], Hristina Stoycheva[3], Valentin Vladimirov[4]**

*[1,2,3,4] Technical University of Gabrovo*

**Abstract**

*The problem of car traffic and traffic jams is getting bigger and bigger. Measures need to be taken to reduce congestion and ease traffic in major cities. One possible approach to alleviate the traffic burden is based on the construction of intelligent traffic management systems. This paper presents the structure and operation of a laboratory multi-agent traffic management system.*

**Keywords:** Multi-Agent Systems; Intelligent Transportation Systems; Traffic Signal Timing.

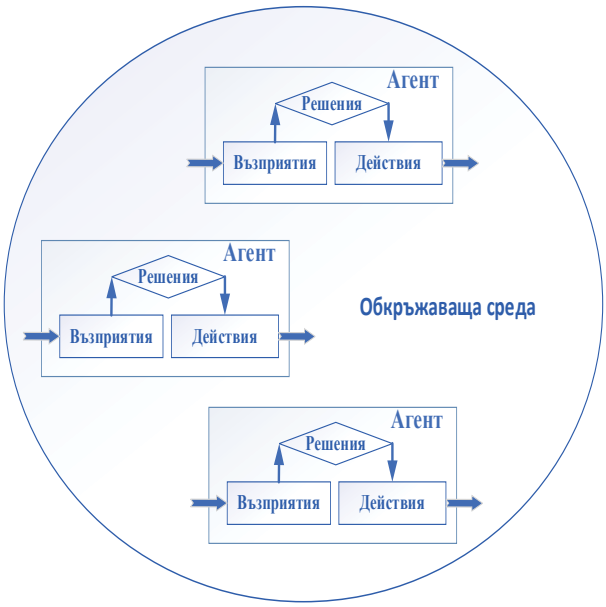
## ВЪВЕДЕНИЕ

С развитието на икономиката населението в големите градове се разраства бързо. Това води до увеличаване на трафика и често се случва появата на задръствания. Особено в някои големи градове проблемите с трафика се превърнаха в пречка, ограничаваща развитието на града [1]. Съществуващите системи за децентрализиран контрол на трафика страдат от много ограничения поради естеството на частичната видимост на цялата транспортна мрежа, както и нейните силно динамични модели на трафик. Един от подходите за намаляване влиянието на този ефекта е използването на изкуствен интелект при управлението на трафика в населените места. Интелигентното управление спомага за постигане целта на контрола чрез симулиране на човешки интелигентни методи за вземане на решения. Ключът за решаване на проблема е да се даде възможност за съвместна координация на действията между кръстовищата, така че непрекъснатият трафик да може да тече през няколко кръстовища в главните посоки с най-малко закъснения [2,3].

Най-голямото предимство на интелигентно управление е, че неговият алгоритъм за управление има способността силно да апроксимира нелинейни функции и не зависи от точни математически модели. Интелигентните методи за управление като размито управление, изкуствена невронна мрежа и генетични алгоритъм могат да постигнат подобри резултати от традиционния метод базиран на контрол на времето. От друга страна комбинацията от множество интелигентни методи за контрол е стратегия която би спомогнала за решаване на проблемите възникващи при управлението на градския трафик. В последното десетилетие основно място в системите за управлението на трафика заемат мулти-агентните системи

Агентът е автономно физическо или абстрактно образувание, което е в състояние да действа и възприема себе си и своята

среда, може да комуникира с други агенти и чието поведение е резултат от неговите наблюдения, знания и взаимодействия с други агенти. Агентът разполага със собствени ресурси и умения. Агентът може както да предлага услуги, така и евентуално да ги възпроизвежда. [4]. Мултиагентна система (МАС) е общност от автономни агенти, еволюирали в обща среда (фиг.1), според начините на сътрудничество, конкуренция или дори конфликт, за постигане на глобална цел. Тези агенти представляват сложна система, която включва интелект, който може да бъде описан като колективен. [5]



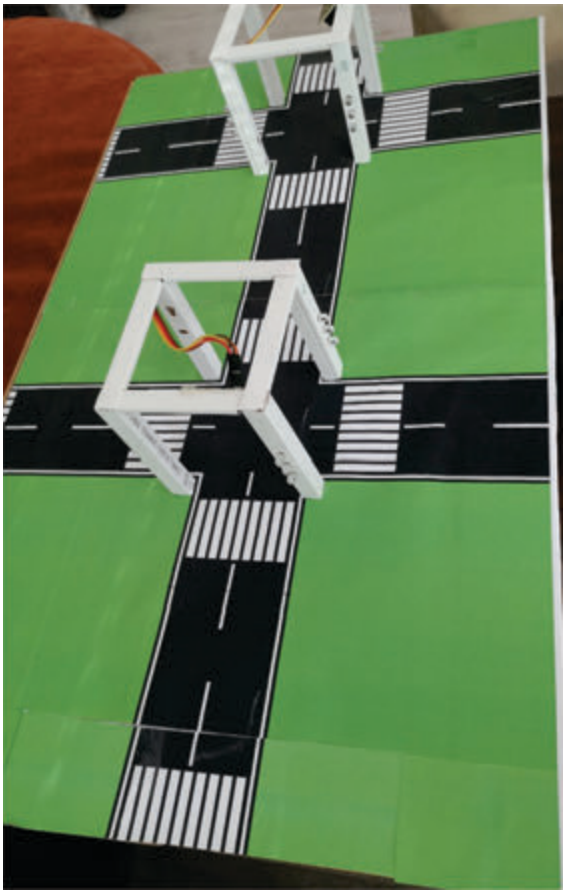

***Фиг. 1**. Процеси в мултиагентна система*

На базата на теорията на агента и характеристиките на самата транспортна система в статията се предлага структура на децентрализирана система за контрол на сигналите за управления за градски трафик, посредством мулти-агентна система работеща в режим на реално време.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Обекта на изследване в настоящата разработка е лабораторна мулти-агентна система за управление на трафика (фиг.2), а на фиг. 3 е показана функционалната блок диаграма на системата.

Системата е изградена на предположението, че всяко кръстовище е самостоятелен обект (агент) чието функциониране се определя от текущия локален трафик и от състоянието на съседните кръстовища. Нивото на трафик в едно кръстовище се определя от броя на превозните средства, видът на превозните средства, тяхната дължина и скорост на движение. Въз основа на тези предположения са избрани съставните елементи на мулти-агентната система.



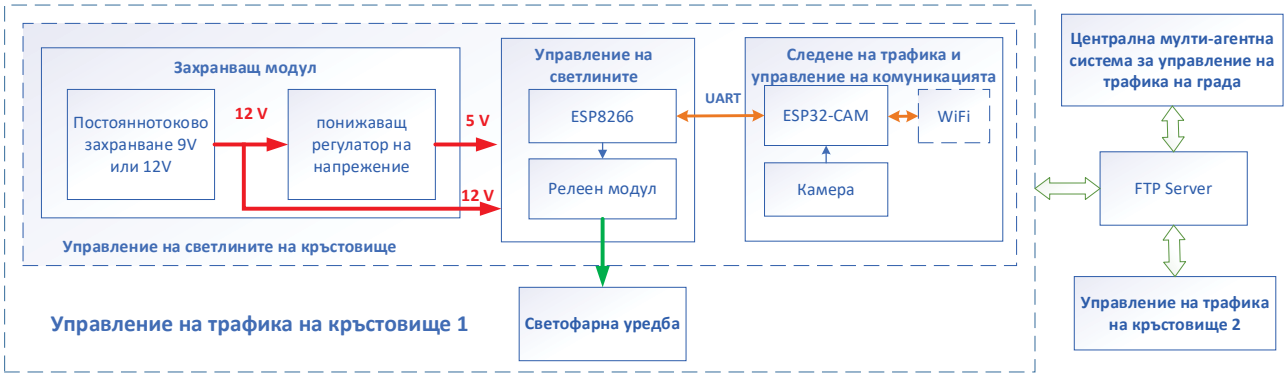
***Фиг. 2**. Лабораторна мулти-агентна система за управление на трафика*

Тя е разделена на три нива. На първо ниво се управляват светлините. За това се грижи микроконтролер ESP8266, който посредством релета и контактори управлява светлините източници.

В този контролер е изграден агент за контрол на светлините, чието функциониране се задава от третото ниво наречено „Централна мулти-агентна система за управление на трафика на града“. За дейности като събиране и обработка на данни за трафика се назначава агент за събиране на данни, агента за обработка на данни и комуникационен агент. Тези три агента са разположени в модула за „Следене на трафика и управление на комуникацията“.

Задачата на агент за събиране на данни да изследва данните получени от сензорите

(видео камера), те са брой на превозните средства и категоризация на превозните средства. Реализиран е посредством дълбока невронна мрежа. Той действа като първи представител в многоагентния системен подход. Агент за обработка на данни е следващият агент в системата за управление трафик. Неговата роля е да определя дължината на превозното средство, скоростта и относителното количество трафик. Данните за трафика се обработват и се подават на комуникационния агент за изпращане към централната мулти-агентна система за управление на трафика. И двамата агенти са независими и са интегрирани в микроконтролер ESP32-CAM.




***Фиг. 3**. Функционална блок-диаграма на лабораторна мулти-агентна система за управление на трафика*

Задачата на този контролер е да следи трафика в реално време. Да открие превозните средства. Да определи видът им. Да преброи превозните средства. И да изпрати данните към FTP сървъра. FTP сървъра се използва в ролята на „пощенска кутия“. В него се записват два файла TraficControl.txt и TraficControlTimeOut.txt съдържащи JSON команди.

Файла TraficControl.txt е предназначен за съхраняване на данните за състоянието на кръстовищата изпращани от контролерите за следене на трафика. Синтаксиса на JSON командата е следният:

{"deviceID":10001,"carCount":[4,3,2,4,5],"
date":"22.06.2022 20:44M:52"}

Полето deviceID от командния стринг съдържа идентификационният номер на кръстовището. Този номер е уникален за системата и се назначава при инсталирането на системата. По този номер се идентифицира кръстовището в централната мулти-агентна система за управление на трафика. Полето carCount съдържа броят ленти на даденото кръстовище (първа стойност на масива). Останалите стойности на масива са броят на преминалите превозни средства през съответната лента за даден отчетен период. Този период е динамичен и може да се коригира от централната мулти-агентна система за управление на трафика (ЦМАСУТ). По подразбиране е 5 минути. Броят на отчетените автомобили зависи от техния вид. Дефинирани са четири категории превозни средства: велосипет/мотоциклет; лек автомобил, камион/автобус, тир/камион с ремарке.

Това деление е направено от презумпцията, че времето за преминаване на дадено превозно средство през кръстовището зависи от неговата големина и динамика. Като базова единица се приема лекият автомобил (ЛА). При отчитане на другите превозни средства бройката която се изпаща към ЦМАСУТ се определим се определя като броят на отделните превозните средства от дадена категория умножени по тегловен коефициент. Тегловните коефициенти за отделните категории са:

$$T_{\text{велосипет/мотоциклет}} = 0.5; T_{\text{лек автомобил}} = 1;$$
$$T_{\text{камион/автобус}} = 2; T_{\text{тир/камион с ремарке}} = 4;$$

Например ако в дадена лента на кръстовището има 4 автомобила, 1 автобус и 2 мотоциклета то полето carCount ще има следната стойност:

$$carCount = 1 * 4 + 2 * 1 + 0.5 * 2 = 7$$

Последният параметър на JSON командата date съдържа датата и часът на направените измервания. Този запис се прочита от

агента за четене в ЦМАСУТ, след което се изтрива от файла. По този начин в даден момент във файла TraficControl.txt има само по един запис за дадено кръстовище.

Вторият файл TraficControlTimeOut.txt съдържа командите изпращани от ЦМАСУТ към съответните кръстовища. Форматът на командите в него са:

{"deviceID":10001,“Lenta”=1,"Red":[10,2,0,0],"Yellow":[0,2,0,2],"Green":[0,0,10,0],"date":"22.06.2022 20:44M:52"}

Тук новите елементи са Lenta, Red, Yellow и Green. Параметъра Lenta съдържа номера на лентата от дадената светофарна уредба за която се задават времевите интервали в секунди за съответните цветове Red, Yellow и Green. В посоченият пример по-горе се светофарната уредба работи в четири състояния. В първото състояние свети само червеният сигнал. Във вторият червени и жълто и т.н. Стойност 0 в съответната позиция означава, че даденият сигнал не работи, а стойностите различни от 0 колко секунди ще свети.

За да приложим нашия софтуерен дизайн, ключът е да изградим всеки агент и да осъществим координацията чрез взаимодействията на агентите. В най-горното ниво (ЦМАСУТ) информационният агент се моделира за всяко кръстовище, за да поддържа локалното състояние, от което се нуждае, за да се вземе решения. В най-долното ниво контролните агенти в рамките на едно кръстовище работят съвместно, за да разрешат конфликтите на различни потоци от трафик. Средните агенти също са създадени, за да координират всички тези контролни агенти в модела. Чрез изграждането на тези тристепенни агенти, координацията между кръстовищата се постига главно от информационните агенти разположени в ЦМАСУТ, а конфликтите в рамките на всяка пресечна точка могат да бъдат разрешени от средния агент (следене на трафика и управление на комуникацията) и агенти управляващ светлините.

*Организация и функциониране на ЦМАСУТ*

Мулти-агентните система (МАС или "самоорганизирана система") е компютъризирана система, съставена от множество взаимодействащи интелигентни агенти [6]. Мулти-агентните системи могат да решат проблеми, които са трудни или невъзможни за решаване на отделен агент или монолитна система. Те се състоят от агенти и тяхната среда. Обикновено тези агенти са софтуерни агенти. Въпреки това, те биха могли да бъдат контролери, роботи, хора или човешки екипи и комбинация от тях. МАС са в основата си софтуерни платформи или библиотеки прилагащи общи стандарти (като FIPA и OMG MASIF стандарти). Някой от свободните за реализиране на МИС отговарящи на стандартите от FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) са JADE и ActressMas.

JADE (Java Agent DEvelopment Framework) е софтуерна платформа, изцяло внедрена в езика Java. Система, базирана на JADE, може да бъде разпределена на различни машини, а конфигурацията може да се управлява чрез отдалечен GUI.

Друга платформа за разработване на мулти-агентни системи е ActressMas.

ActressMAS е мултиагентен фреймворк, използващ модела Actor. Основната му цел е простотата и първоначално е насочен към студенти, които се запознават с агентните системи. Това е една от малкото агентни рамки, налични за C#. В тук представената разработка използваме ActressMAS и C# за реализирането на ЦМАСУТ. За целта са създадени два агента дефинирани като класове в програмата: CrossroadAgent и FileTransferAgent.

CrossroadAgent класа описва всяко едно от кръстовищата в проекта. Чрез него се определя интервала от времената на светлините на светофарите на текущото кръстовище. Класът се състои от няколко метода чието предназначение е следното:

- Setup(): Този метод се използва за първоначална инициализация и изпращане на съобщения за стартиране мулти-агентния протокол.
- Act(): Този метод се активира, когато агент получи съобщение. Ако има повече съобщения, които трябва да бъдат получени, методът Act се активира веднъж за всяко съобщение.
- ActDefault(): Този метод се изпълнява, когато няма повече налични съобщения между агентите в опашка.

-ProcDataAndGenerateMessForNextAgent(): Този метод се използва за обработка на

файловете от FTP сървъра, като резултатът се сериализира в JSON формат и се праща обратно към сървъра.

- SetConfigJsonModel: Този метод съдържа самата логика за обработка на информацията постъпила от сървъра.

Агентите декларирани посредством FileTransferAgent клас описват и управляват комуникацията между мулти-агентната система и FTP сървъра. CrossroadAgent-а генерира JSON обект и го предава като параметър на FileTransferAgent-а за изпращане към FTP сървъра.

- Setup() метода се използва за инициализация.
- Act(): Този метод се активира, когато агент получи съобщение.
- ActDefault(): Този метод се извиква, когато няма повече налични съобщения между агентите в опашка.
- GenerateMessageForNextAgent: Този метод се извиква, за да се прочете файла от FTP сървъра. Прочетените данни от файла се изпращат като съобщение към текущият агент.

*Процедура за изчисляване на продължителността на време на основния цикъл на набор от координирани светофари*

Изчисляването на цикъла на работа на светофарите позволяващи повишаване на ефективността на автомобилния транспорт

Това може да се постигне чрез по-правилно изчисление на основните и междинните цикли на работа на светофарите. В настоящата разработка е използвана методиката за определяне времената за работа на светофарите представена в [7], която се състои в следното:

При известна почасова активност на превозните средства в най-натовареното направление на кръстовище ($N_a$), първо се определя броят на пристигащите превозни средства за определения интервал от време ($N_a^i$).

$$N_a^i = \frac{N_a.120}{3600} \quad (1)$$

където $N_a^i$ — е стойността на трафик потока по разглежданото направление по време на цикъла, un/120sec; $N_a.$ — почасовата стойност на трафик потока в разглежданото направление. За най-висока стойност на трафик потока се определя по потока в най-натоварената лента, а не по целия поток в кръстовището.

Мястото на което отстои последното превозно средство от Stop линията на кръстовището се определя по зависимостта:

$$S_{enter}^i = n_i.(B + l) \quad (2)$$

където $ni$ — е брой превозни средства в една лента за движение, пристигнали на кръстовище по време на един цикъл на светофара; B — средната дължина на автомобил (в изчисленията може да се приеме 4,5 m); $l$ — средното разстояние между превозните средства, (при изчисленията може да се приеме 1 m).

$$N_a = \frac{N_a^i}{c} \quad (3)$$

където $N_a^i$ е стойността на потока на трафика в изследваната посока по време на цикъл, un/120 sec, $c$ - брой ленти за движение, определени за тази посока.

Продължителността на основния цикъл трябва да съвпада с продължителността на времето, необходимо на последното превозно средство да премине през кръстовището.

Първият автомобил достига до мястото, където водачът му има право да се движи през кръстовище за $t_{oi}$ секунди, които съвпадат с продължителността на основния цикъл.

$$t_{oi} = \sqrt{\frac{2.(S_{enter}^i - S_{wait})}{a}} + t_{delay}^i \quad (4)$$

където $(S_{enter}^i - S_{wait})$ − разстояние, изминато от последния автомобил в редицата от момента на подновяване на движението след зелен сигнал на светофара, до достигане на границата, след което водачът няма физическа възможност да спре автомобила на „Stop“ линията, m; a — ускорение на превозно средство, $m/s^2$ (за практически изчисления се приема 1,5 $m/s^2$); $t^i_{delay}$ — забавянето във времето за подновяване на движението на последното превозно средство, s и се определя от зависимостта:

$$t_{delay}^i = n_i.t_{delay}^{av} \quad (5)$$

където $t_{delay}^{av}$ - средното забавяне във времето преди обновяване на всеки автомобил в линията, s (при изчисленията може да се приеме 1,0 s);

Разстоянието на отношение на превозно средство $S_{wait}$ спрямо границата, установено от правилата за движение, при достигане до нея водачът на превозното средство няма

физическа възможност да спре и получава право да продължи движението през кръстовището се определя по зависимостта.

$$S_{wait} = \left(t_1 + t_2 + 0{,}5t_{SLy}\right).\frac{V_a}{3{,}6} + \frac{V_a^2}{26.J_y} \quad (6)$$

където $V_a$ – най-вероятната скорост на последното превозно средство, достигнато до момента на включване на ограничителния сигнал на светофара, km/h (за практически изчисления се приема 40 km/h); $J_y$ — забавяне на автомобила при включен ограничителен (жълт) сигнал, m/s$^2$ (за сухо асфалтово покритие за практически изчисления се приема 4,6 m/s$^2$); $t_1$- времето за реакция на водача на превозното средство в развита ситуация на шофиране, s (за практически изчисления се приема като 0,6 s); $t_2$— времето на закъснение на реакцията на предавката на превозното средство, s (за практически изчисления се приема 0,1 s); $t_{SLy}$— времето за натрупване на забавяне на превозно средство в развита ситуация на шофиране, s (за практически изчисления се приема като 0,35 s).

По този начин продължителността на времето, необходимо на последното превозно средство за навлизане в кръстовището, ще се определя от времето на основния цикъл в съответното направление, което позволява безпроблемно преминаване от пристигналите превозни средства, като се има предвид неговата конфигурация и броя на лентите, определени за движение в тази посока.

*Регулирането на основния цикъл на една от фазите на работа на светофарите*

По принцип регулирането на основния цикъл може да се извърши, като се има предвид минималното и максималното време за включване. Минималната продължителност на времето за включване на основния цикъл трябва да бъде не по-малко от 7 s. По този начин изчисленото време на основния цикъл във всяка фаза на работа на светофарите с време за включване не по-малко от 7 секунди трябва да се коригира, като се има предвид определената стойност. Като се има предвид максималното време за включване на основния цикъл, настройката трябва да се извърши след оценка на възможността за пресичане на лентата от пешеходци по време на зеления сигнал на светофара.

Времетраенето ($t_{ped}$), достатъчно за пресичане на вагон от пешеходци, се изчислява по следната формула:

$$t_{ped} = 5 + \frac{S_{ped}}{V_{ped}} \quad (7)$$

където $S_{ped}$ – разстояние, изминато от пешеходец при пресичане на платното по време на разрешаващия сигнал на светофара, m; $V_{ped}$ – средната скорост на пешеходците при пресичане на вагон по време на разрешителния сигнал на светофара, m/s (при изчисленията се приема 1,3 m/s).

Освен времевата корекция, необходима на пешеходците за пресичане на платното, ако е необходимо, трябва да се извърши и корекция на продължителността на основния цикъл (to) за възможността за преминаване на кръстовището от трамвай (ttr).

$$t_{ped} = \frac{3{,}6(l_i - l_{tr})}{V_{tr}} \quad (8)$$

където $l_i$ – е участък от маршрута, изминат от трамвая от стоп-линия до по-далечна конфликтна точка в посоката му на движение с превозни средства, започващи движението си в следващата фаза, m; (приема се с оглед на размерите и конфигурацията на кръстовището); $l_{tr}$ – дължина на трамвайна мотриса (участък), m; дължината на вагон в изчисленията може да се приеме 15 m; $V_{tr}$ – средната скорост на трамвая (при изчисленията може да се приеме 20 km/h)..

Съответно, общата продължителност на основните цикли ще бъде равна на сумата от основните цикли на конфликтни посоки и се определя съгласно следната формула:

$$\sum T_{mi} = t_{m1} + t_{m2} + \cdots t_{mi} \quad (9)$$

където $t_{m1}, t_{m2}$ до $t_{mi}$ са продължителност на основните цикли на всички направления в съответните фази на работа на светофарите.

За да се опрости изчисляването на продължителността на основните цикли в други направления, е разумно да се извърши, като се вземе предвид пропорционалността на стойността на транспортните потоци. В методическата литература този параметър се определя от т. нар. еднократен коефициент, чиято физическа стойност е съотношението на максималната стойност на най-натоварения трафик на едно платно и максималната

стойност на трафика на платно в противоположната посока.

$$Y_i = \frac{N_{ai} . c_1}{N_{a1} . c_i} \quad (9)$$

където $N_{a1}$ — стойността на трафика на най-натовареното направление по време на цикъла, un/120 sec.; $c_1$— брой на лентите, определени за най-натовареното направление, ед.; $N_{ai}$ — стойността на транспортния поток в една от изследваните посоки по време на цикъла, un / 120 sec.; $c_i$— — брой на лентите за движение, определени за едно от изследваните направлениях.

Съответно, продължителността на основните цикли в другите фази трябва да бъде в същите пропорции спрямо най-натоварената посока като изчислените фазови коефициенти.

$$t_{mi} = Y_i \cdot t_{m1} \quad (10)$$

Съответно, продължителността на основните цикли в другите фази трябва да бъде в същите пропорции спрямо най-натоварената (една лента) посока като изчислените фазови коефициенти.

На заключителния етап, за да се получи най-точната стойност на цикъла на светофарите, като се вземе предвид дадената изчислена продължителност на цикъл, да е помалка от 120 секунди, е необходимо да се извърши допълнителна корекция за основния цикъл в най-натоварената посока (една лента) и съответно за основните цикли в останалите посоки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е представено използването на мулти-агентна системна технология в процеса на регулиране на трафика в градска среда. Така изградените системи повишават гъвкавостта при управление на трафика в населеното място, както и спомага при разрешаването на непредсказуеми ситуации, възникващи в системата.

Използваната методика за определяне трафика води до оптимизиране на работата на основния цикъл на светофарните уредби.

## REFERENCE


[1] ZhengQin Wang, Coordination and Optimization of Urban Traffic Control and Path Guidance Based on Multi-Agent, Journal of Physics: Conference Series 1345 (2019) 042058 doi:10.1088/1742-6596/1345/4/042058

[2] UK's Transport Research Laboratory. Split Cycle and Offset Optimisation Technique. ttps://trlsoftware.co.uk/products/traffic_control/scoot. Accessed November 2019.

[3] UK's Transport Research Laboratory. [n.d.]. Traffic Network and Isolated Intersection Study Tool. https://trlsoftware.co.uk/products/junction_signal_design/transyt. Accessed November 2019.

[4] Ferber, JMulti-agent systems: An introduction to distributed artificial intelligence. Harlow, UK: Addison-Wesley. (1999).

[5] Chopra, N., & Spong, M. W. Passivity-based control of multi-agent systems. In Advances in Robot Control 2006. (pp. 107–134).

[6]Cobeanu I., V. Comnac, Multi-agent systems: traffic control application, Bulletin of the *Transilvania* University of BraşovSeries I: Engineering Sciences Vol. 4 (53) No. 2 – 2011

[7] Gorodokin V., Z. Almetova, V. Shepelev, Procedure for Calculating On-Time Duration of the Main Cycle of a Set of Coordinated Traffic Lights, 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in large cities", SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg, Russia

НАПРАВЛЕНИЕ 6

# ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНЕТО И ПРОЕКТИРАНЕ НА МАШИНИ И ИНСТРУМЕНТИ

SESSION 6

# TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING AND DESIGN OF MACHINES AND INSTRUMENTS

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА ПРИ ОБРАБОТВАНЕ ВЪРХУ СТРУГОВИ МАШИНИ С ЦПУ

**Калин Крумов**

*Технически Университет – Габрово, катедра „Машиностроителна техника и технологии“*
*kalin_krasimirov_krumov@abv.bg*

# PROCESSING EFFICIENCY RESEARCH ON CNC LATHES

**Kalin Krumov**

*Technical University of Gabrovo, department of Mechanical Engineering and Technology, Bulgaria*
*kalin_krasimirov_krumov@abv.bg*

**Abstract**

*A methodology for enhancement of the effectiveness of machining on numerically controlled lathes has been proposed. The methodology is based on determination of the cutting conditions. The volume of the cutting material per unit time has been used as a criterion for the productivity. The correlation between the manufacturing parameters has been read by the power equations of machining and the tool durability.*

**Keywords:** effectiveness, machining on numerically controlled lathes, volume of the cutting material per unit time.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Един от показателите за ефективност на процеса на механично обработване чрез стружкоотнемане се явява производителността (количеството обработени детайли за единица време). Производителността на механичното обработване се оценява с дължината на пътя, преминат от режещия инструмент за единица време или от площта на обработваната повърхнина, обема на снетия при обработването материал, машинното време на операцията и др. Всички тези критерии са свързани по между си, а нивото им се определя от параметрите на режима на рязане (скорост на рязане $V_c$, подаване $f$ и дълбочина на рязане $a_p$) на конкретната операция.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Основното (машинното) време при обстъргване се определя по израза:

$$T_{o(м)} = \frac{L_p}{V_f}.p = \frac{L_p}{f.n_c}.\frac{Z}{a_p}, \text{ min} \qquad (1)$$

където $a_p$ – дълбочина на рязане, mm; $L_p$ – дължината на един работен ход на инструмента, mm; $V_f$ – подавателната скорост, mm/min ($V_f = f.n_c$); $n_c$ – честота на въртене на заготовката, $\text{min}^{-1}$; $p$ – брой на преходите (работните ходове – $p = Z/a_p$); $Z$ – прибавката за обстъргване, mm.

Ако в зависимост (1) поставим израза за определяне на честотата на въртене

$$n_c = \frac{10^3.V_c}{\pi.D}, \text{min}^{-1}$$

където D, mm – диаметър на заготовката, ще получим

$$T_{o(м)} = \frac{L_p.\pi.D}{10^3.V_c.f}.\frac{Z}{a_p}, \text{ min} \qquad (2)$$

Числителят във формула (2) може да се разглежда като пълният обем на прибавката за механично обработване, а знаменателят, като обема стружки, снеман за минута. За намаляване на машинното време $T_{o(м)}$ е необходимо да се увеличи, който и да е параметър от режима на рязане, стоящ в знаменателя на (2). От теорията на рязането е известно, че тези параметри са свързани по между си чрез математическите зависимости за: мощност на рязане – $P_p$ и трайност на инструмента – $T$.

$$\begin{cases} P_p = \dfrac{F_z.V_c}{60.10^3} \\ V_c = \dfrac{C_v.k_v}{T^{m_v}.a_p^{x_v}.f^{y_v}} \\ F_z = C_F.a_p^{x_F}.f^{y_F}.V_c^{m_F} \end{cases}, \qquad (3)$$

където $P_p$ – мощност на рязане, kW; $T$ – период на трайност на инструмента, min; $F_z$ – тангенциална съставяща на силата на рязане, N; $m_v$, $m_F$, $x_v$, $x_F$, $y_v$, $y_F$ – степенни показатели; $C_v$, $C_F$ – константи; $k_v$ – коефициент.

От анализа на система (3) следва, че за да се осигури зададения период на трайност на инструмента ($T$) и мощността на рязане ($P_p$) при изменение на един от параметрите на режима на рязане е необходимо да се изменят другите два. Това трябва да се отчита при избора на рационални параметри на режима на рязане по критерия производителност. Много автори не отчитат тази връзка между $V_c$, $f$ и $a_p$ в системата (3). Например в [1-3], критерият производителност е свързан с периода на трайност на инструмента, като един от факторите, влияещи на производителността на процеса рязане.

$$T_{П\max} = \frac{(1-m)\tau_{см}}{m}, \qquad (4)$$

където $T_{Пmax}$ – трайността, осигуряваща най-голяма производителност, $\tau_{см}$ – времето за смяна на инструмента; $m$ – относителен показател на трайността (за инструменти с твърдосплавни пластини $m = 0,2$).

Ясно е, че за да се определи период на трайност на инструмента в съответствие с (4) при предварително избрани $a_p$ и $f$, трябва да получим скорост на рязане $V_c$, осигуряваща най-голяма производителност на механичното обработване.

Авторите в [2] предлагат подход, препоръчвайки снижаване на периода на трайност до 15 ÷ 25 min и увеличавайки за сметка на това $V_c$, като увеличените загуби от време за смяна и настройване на инструмента, да се компенсират за сметка на автоматичната смяна на режещия инструмент.

Методиките в [1-3] притежават недостатъците:

- критерият трайност не отчита мощността на главното движение на конкретната машина, която осигурява определена производителност при обработването;
- предложенията за промяна само на скоростта на рязане $V_c$, не отчита връзката ѝ с $f$ и $a_p$;
- отсъства връзка с критерия „производителност при рязане”.

Традиционната таблична методика за определяне на параметрите на режима на рязане от справочници [4], също не гарантира максимална производителност на обработването, тъй като има своите недостатъци:

- подбраната първоначално максимално възможна $a_p$ за снемане на $Z$ за един работен ход на инструмента, нарушава връзката между $a_p$, $f$ и $V_c$, изразена в (3);
- намаляването на $V_c$, когато мощността на рязане превишава мощността на главния превод на машината, става без корекции на $a_p$ и $f$ по системата (3);
- отсъства методика за определяне на режима на рязане, осигуряващ максимална производителност.

В разработката в качеството на критерия „производителност на рязане” (при обстъргване) е прието произведението $П_p = V_c.\, f.\, a_p$ (cm$^3$/min), като е отчетена връзката между параметрите на режима на рязане в съответствие с (3). Чрез даденото произведение могат да бъдат изразени и другите критерии за производителност (например анализирайки формула (2) е правилно да се смята, че за увеличаване производителността на рязане е необходимо да се увеличава произведението $V_c.\, f.\, a_p$).

Проведените експериментални изследвания (в широк диапазон на изменение на $f$ и

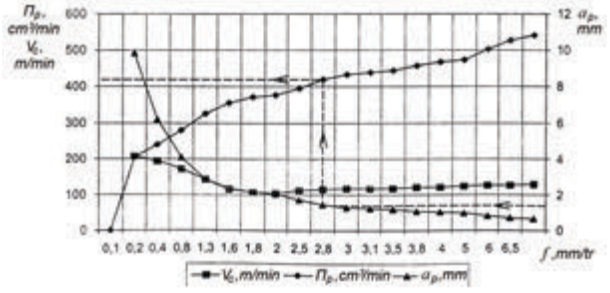
$a_p$) показаха една закономерност при изменение на степенните показатели на $f$ и $a_p$ в системата (3), като изследванията се проведоха в областта на *„правата”* и *„обратната”* стружка (рязането в областта на „обратната” стружка възниква, когато функцията на главният режещ ръб по изпълнението на основната работа, свързана със снемането на стружката се осигурява от спомагателния режещ ръб на инструмента – в този случай $f > a_p$).

За стомана с твърдост НВ = 200 във формулата за определяне скоростта на рязане в системата (3), показателите са: за „обратна” стружка при $f/a_p > 1 \rightarrow x_v = 0,3$ и $y_v = 0,15$; в областта на „правата” стружка при $f/a_p < 1 \rightarrow x_v = 0,15$ и $y_v = 0,3$, а при $f/a_p = 1 \rightarrow x_v = 0,3$ и $y_v = 0,3$.

***Табл. 1.*** *Производителност и режими на рязане по критерия „трайност при максимална производителност“*

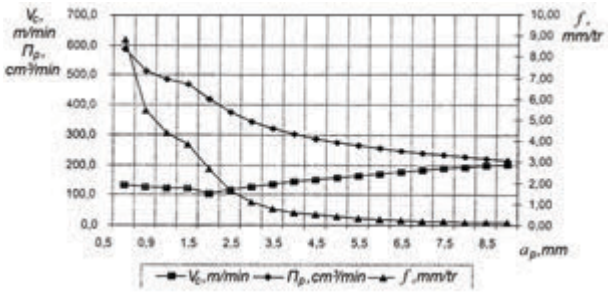
| $T_{изч.}$, min | $П_p$, cm³/min | $V_c$, m/min | $P_p$, kw | $a_p$, mm |
|---|---|---|---|---|
| 20 | 148.9 | 248.2 | 3.1 | 0.5 |
| 20 | 218.1 | 181.7 | 4.7 | 1 |
| 20 | 291.4 | 161.9 | 6.4 | 1.5 |
| 22.8 | 362.6 | 151.1 | 8 | 2 |
| 58.1 | 351.1 | 121.9 | 8 | 2.4 |
| 182.5 | 337.5 | 93.8 | 8 | 3 |
| 271.5 | 321.5 | 91.9 | 8 | 3.5 |
| 538.7 | 314 | 78.5 | 8 | 4 |
| 986.1 | 307.6 | 68.3 | 8 | 4.5 |

От решението на системата (3) следва, че при зададена мощност на рязане и период на трайност на инструмента, максималната производителност $П_p$ се достига при максимално подаване (фиг. 1), като при това $a_p$ и $V_c$ числено могат да се изменят, до колкото са свързани с $f$ от системата (3), но при условие, че $P_p$ и $T$ не се променят.




***Фиг. 1.*** *Зависимост на $V_c$, $П_p$ и $a_p$ от f, (T = 20 min)*

От системата (3) следва, че с увеличаване на $a_p$, производителността на рязане – пада (фиг. 2) и следователно, при определяне (задаване) на режими на рязане не трябва да се стремим към задаването на максимално възможна $a_p$.

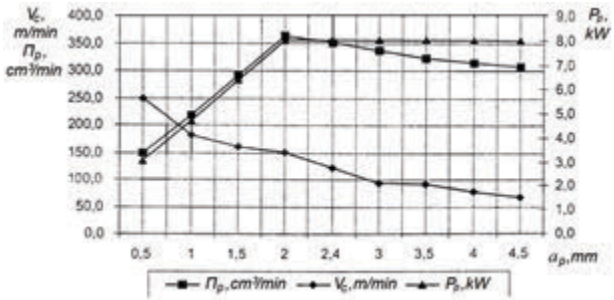



***Фиг. 2.*** *Зависимост на $V_c$, $П_p$ и f от $a_p$, (T = 20 min)*

За пример сравняваме режимите на рязане при обстъргване на заготовки от С45, получени чрез решаване на системата (3) и по справочни таблици по традиционната методика [4].

В двата случая трайността на инструмента е приета за 20 min в съответствие с препоръките в [2], мощността на рязане допускана от машината е $P_p = 8$ kW.

По данните от изчисленията са построени графики (фиг. 1 и фиг. 2). До колкото първата методика предлага максимално увеличаване на $f$, а втората – на $a_p$, то на фиг. 1 са показани зависимости на основните параметри при увеличение на $f$, а на фиг. 2 при увеличение на $a_p$.




***Фиг. 3.*** *Зависимост на $П_p$, $V_c$ и $P_p$ от $a_p$, (по методиката от* [4]*)*

В табл. 1 са нанесени изчислените значения на параметрите на режима на рязане, определени по традиционната методика с корекцията им по $P_p$ [4], като в графа $T_{изч}$ са дадени значенията на фактическата трайност на инструмента при изчислени след

корекцията на режима при мощност на рязане, превишаваща мощността, допускана от машината (в последните случаи, както отбелязахме, сме намалявали скоростта на рязане и съответно увеличавали периода на трайност на режещия инструмент).

От табл. 1 и фиг. 3 се вижда, че по традиционната методика с използването на критерия „трайност при максимална производителност" при $a_p = 1{,}5$ mm се осигурява производителност на обработването 291,4 $cm^3$/min. В същото време, режимът на рязане, получен от решението на системата (3), при $a_p = 1{,}5$ mm осигурява производителност 420 $cm^3$/min, като при същата трайност на инструмента може да се достигне и по-висока производителност (фиг. 1).

Анализирайки получените резултати може да се констатира следното:

- производителността на обработването, изчислена на основата на решението на система (3), расте с увеличаване на подаването, като при това $V_c$ при увеличение на $f$ (фиг. 1), отначало намалява, а след това постепенно расте (това става в момента, когато процеса на рязане преминава в зона „обратна" стружка и влиянието на $f$ върху $V_c$ намалява – затова при обстъргване в областта на „обратната" стружка, ефектът от увеличаване на $f$ е по-значим, от колкото в областта на „правата" стружка);
- при назначаването на режимите на рязане по традиционната методика [4], при увеличаване на дълбочината на рязане до $a_p = 2$ mm, $П_p$ от начало нараства, а след това намалява (фиг. 3) (това е свързано със ситуацията, че при $a_p > 2$ mm, мощността на рязане превишава мощността допустима от машината), след корекция на режима по мощност, скоростта на рязане намалява, което води до намаляване на производителността.

Отчитайки резултатите от изследванията е предложена методика за избор на режими на рязане, основана на отчитане на връзката между параметрите на режима на рязане с техническите възможности на машината и режещия инструмент, изразени със системата (3). По нея от начало се задава максимално възможното подаване $f$, след решение на системата (3) се определя скоростта $V_c$ и дълбочината на рязане $a_p$. Броят на работните ходове на инструмента $p$ се определя, като цяла част (int) от израза:

$$p = \text{int}\left(\frac{Z}{a_p}\right) + 1. \qquad (5)$$

Ако се базираме на особеностите при нормиране на програмни операции в [5], то можем да определим времето за обработване на един детайл.

Направено е сравнение на предложените режими на рязане по разработената и традиционната методика за обстъргване на заготовки от С45 с диаметър *ø100* mm до *ø80* mm при мощност на главния превод на машината 10 kW. В първия случай $t_{eд} = 0{,}31$ min, а във втория $t_{eд} = 0{,}54$ min. Вижда се, че при определяне на режимите на рязане по предложената методика производителността на процеса се увеличава с 74%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- При определяне на параметри на режима на рязане, изхождайки от критерия „трайност при максимална производителност", при наличие на ограничение по мощността на рязане, повишаването на производителността на обработването с увеличаването на дълбочината на рязане е възможно само при малки дълбочини (при средни и големи дълбочини на рязане, след корекция на режимите, производителността намалява);
- В разработената методика за определяне на режимите на рязане в качеството на критерия „производителност на обработването" е използван обема на снемания материал за единица време, като едновременно с това, връзката между $a_p$, $f$ и $V_c$ е отчетена чрез мощността на рязане и трайността на инструмента – това позволява увеличаване на производителността до 74%;
- За стругови машини с ЦПУ, многопроходното обработване при снемане на грубата прибавка е по-ефективно от еднопроходното – максимална производителност на рязане се достига при максимално подаване на инструмента.

## REFERENCE


[1] Yashtericin P.I. i dr. Teoria rezanya tehnologicheskih sistemah. Izd. Vishaishaya Shkola, 1990, 512 s.

[2] Gjirov R.I., Srebrenickii P.P. Programmirovanie obrabotki na stankah s CHPU, spravochnik, L., Mashinostroenie, 1990, 591 s.

[3] Sharin YU.S. Tehnologicheskoe obespechenie stankov s CHPU. M. Mashinostroenie, 1986, 176 s.

[4] Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya. Tom 1 (Pod red. A.G. Kosilovoy i R.E. Meshteryakowa. 4 izdanie preraboteno i dopulneno. M., Mashinostroenie, 1985, 656 s.

[5] Kuzmanov T. i dr. Tehnologicheski procesi za metalorejeshti mashini s CPU. “EKS-PRES”, P. 2007, 188 s.

# ОБРАБОТВАНЕ НА СЛОЖНИ ДЕТАЙЛИ С ПРОМЕНЛИВИ РЕЖИМИ НА РЯЗАНЕ В УСЛОВИЯТА НА ЧАСТИЧНА АВТОМАТИЗАЦИЯ

**Калин Крумов**

*Технически Университет – Габрово, катедра „Машиностроителна техника и технологии“*
*kalin_krasimirov_krumov@abv.bg*

# PROCESSING OF COMPLEX DETAILS WITH VARIABLE CUTTING MODES IN THE CONDITION OF PARTIAL AUTOMATION

**Kalin Krumov**

*Technical University of Gabrovo, department of Mechanical Engineering and Technology, Bulgaria*
*kalin_krasimirov_krumov@abv.bg*

**Abstract**

*In this article prerequisites for optimization of the methods for cutting of workpieces with complicated form have been created. These prerequisites provide a possibility for theoretical analysis of special features of mechanical treatment in the conditions of dynamical cutting. The relationships for wear and life-time have been found.*

**Keywords:** mechanical treatment; longitudinal-profile surfaces; dynamical cutting; wear; life-time.

## ВЪВЕДЕНИЕ

В техниката, наред с цилиндричните и равнинни повърхнини, широко приложение намират и различни криволинейни повърхнини, обединени под общото наименование профилни [1,3,4,5,6], а детайлите с такива повърхнини образуват групата на детайлите със сложна форма (ръкохватки, профилни валове, копири, валове на прокатни и калибровъчни машини, шайби за плоски и клиновидни ремъци, вагонни оси и бандажни колела, профилни кръгли ножове и фрези и др.).

Най-разпространените видове профилни повърхнини са ротационните, образувани от движението на криволинейна образуваща по направляваща окръжност.

Всички цилиндрични детайли (гладки и стъпални) се явяват частен случай на детайлите със сложна форма и ситуациите, отнасящи се към технологиите за обработване на детайлите със сложна форма могат да бъдат отнесени, към технологиите за обработване на цилиндрични детайли.

Имайки предвид това е ясно, че класът на детайлите със сложна ротационна форма, се явява много обширен, обединява значително количество наименования на различни машиностроителни детайли от всички отрасли на промишлеността и във връзка с това обработването на детайлите от този клас заема значително място в операциите за механично обработване.

Детайлите със сложна ротационна форма, преди всичко, се обработват на стругови машини, което прави изучаването на процеса формообразуване при струговане важна технико-икономическа задача. Процесът е особено актуален в условията на частична автоматизация на производството, характеризираща се с използването на машини с ЦПУ и друго скъпоструващо автоматизирано оборудване.

Целта на изследването е анализ на методите за обработване на сложни ротационни детайли, определяне трайността T и износването VB на инструмента, с оглед създаване на предпоставки за оптимизацията им при нестационарно рязане в условията на частична автоматизация на производството.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### • *ОБРАБОТВАНЕ НА ДЕТАЙЛИ СЪС СЛОЖНА РОТАЦИОННА ФОРМА НА СТРУГОВИ МАШИНИ*

Основните методи за обработване на детайли със сложна ротационна форма на стругови машини са [1,2,3,4,5,6]:

1) струговане със стандартни ножове без копир (с комбинирано надлъжно и напречно подаване);

2) обработване с профилни ножове;

3) обработване със стандартизирани ножове с помощта на приспособление за кръгово подаване;

4) обработване със специални кръгли профилни ножове;

5) струговане със стандартизирани ножове с помощта на копирно приспособление;

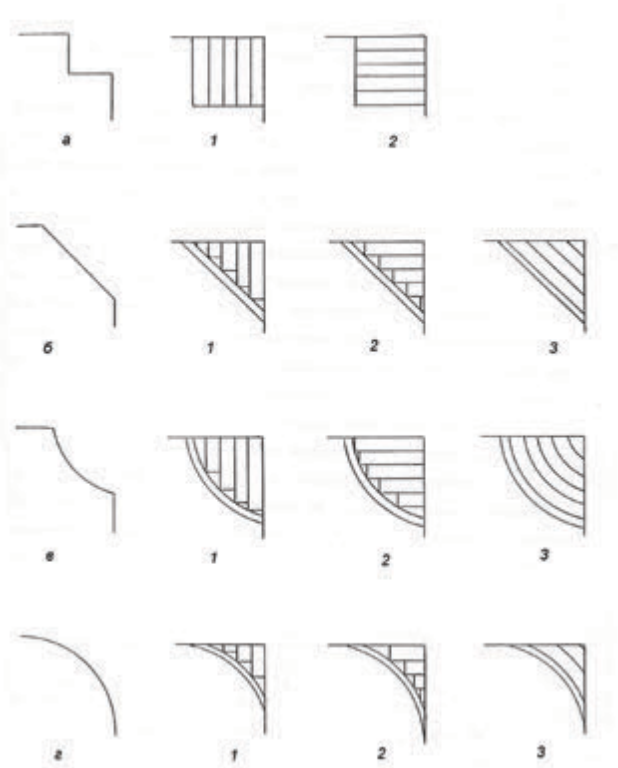
6) струговане със стандартизирани ножове на стругови машини с ЦПУ.

Всеки метод има своя област на приложение, предимства и недостатъци. Всичките детайли могат да бъдат обработени по два различни начина.Първият се основава на движение на режещия ръб на инструмента по криволинейна траектория *(метод на следата)*, втория – чрез праволинеен работен ход на инструмента, режещият ръб на който има криволинеен контур идентичен с контура на обработваната повърхнина *(метод на копирането)*.

При първия начин се изразходва многократно значително време и средства, за да се възпроизведе на машината сложната форма на детайла много пъти. При втория начин се изразходва еднократно значително време и средства, необходими след това на машината за възпроизвеждане многократно сложния път на инструмента.

Схемите на движение (преместване) на инструмента при снемане на основната прибавка са:

- успоредно на оси OY или OX (фиг. 1*б*, *а1*, *а2*);
- еквидистантно на контура на обработения детайл (фиг. 1*б*, *б3*, *в3*, *г3*);
- успоредно на OY или OX при грубите проходи и еквидистантно на контура на обработвания детайл за чистовите проходи (фиг. 1*б*, *б1*, *б2*, *в1*, *г1*, *г2*) (схемата обединява предните две схеми).



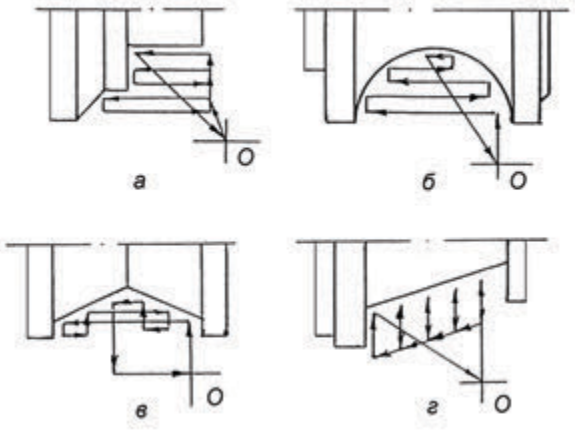
***Фиг. 1**. Схеми на преместване на инструмента при обработване на елементарни повърхнини (а - цилиндрични и челни; б - конусни; в - вдлъбнати сферични; г - изпъкнали сферични; 1 – перпендикулярно на оста на детайла; 2 - успоредно на оста на детайла; 3 - еквидистантно на профила)*

Един от пътищата за повишаване производителността и качеството при обработване на детайли, имащи сложни профилни повърхнини, в условията на частична автоматизация на производството, се явява използването на машини с ЦПУ. Тези машини съчетават в себе си високата производителност на автоматизираното оборудване с гъвкавостта на универсалното, което ги прави основни технически средства за автоматизация в условията на единичното и

дребносерийно производства. Използването на машини с ЦПУ за обработване на детайли със сложна форма се явява най-ефективно, тъй като позволява автоматизиране на металообработващия процес без да е необходимо изработването на сложна и трудоемка специална екипировка или специални инструменти.

При обработване на стъпални валове на стругове с ЦПУ грубото обработване може да се извърши по различни начини: ако разликата в диаметрите на шийките е по-голяма от дължината им, обработването се извършва с напречно подаване, в противен случай – с надлъжно подаване. Съвременните системи за ЦПУ позволяват тези видове обработване да се извършват при постоянен цикъл. Възможни са и варианти с надлъжно подаване при грубите проходи и еквидистантно на контура подаване при чистовите или еквидистантно при грубите и чистовите проходи.

При разработване траекториите на движение на инструментите на машини с ЦПУ се препоръчват типови схеми на движение на инструмента [3,4,7]. Схемата *"бримка"* (фиг. 2*а*) се използва за обработване на заготовки с ножове, които работят в едно направление. Схемата *"зиг-заг"* (фиг. 2*б*) се прилага главно при работа в двете направления за обработване на дълбоки падини с чашковидни ножове. Схемата *"витка"* (фиг. 2*в*) се отличава малко от схемата *"зиг-заг"*, но има предимства при обработването на дълбоки падини, съставени от конусни повърхнини с чашковидни ножове. Схемата *"спускане"* (фиг. 2*г*) е предназначена за работа на канални ножове.

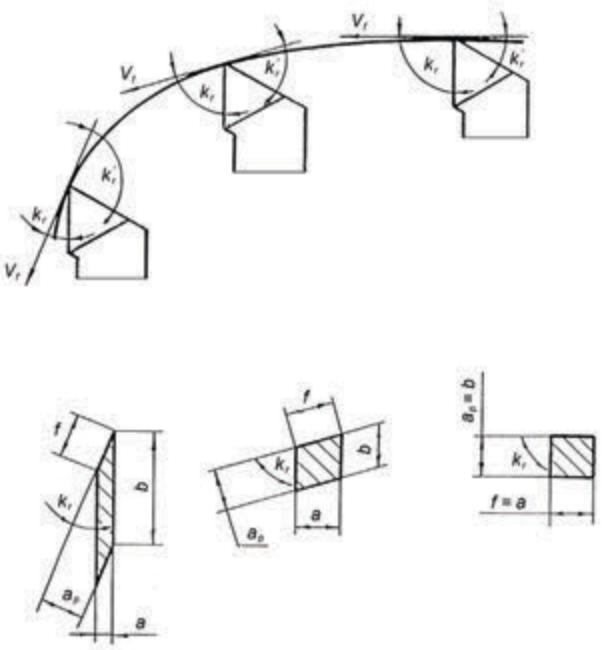



***Фиг. 2.*** *Типови схеми на движение на инструмента при обработване върху стругови машини с ЦПУ (а -"бримка"; б -"зиг-заг"; в -"витка"; г -"спускане")*

Обработването на детайли със сложна форма е нестационарен процес. Под стационарно се разбира такова рязане, при което средните значения (математическото очакване) и полето на разсейване (дисперсията) на външните въздействия (дълбочина на рязане, подаване, скорост на рязане и др.) не се изменят за периода на трайност на режещия инструмент. *Пример за нестационарно рязане е обстъргването на стъпален вал, когато обработването на отделните стъпала се извършва с различни, но постоянни по стойност за съответното стъпало режими на рязане.*

С използването на машините с ЦПУ и системите за адаптивно управление става възможно такова изменение на режимите на обработване, когато един или няколко параметъра на режима на рязане се променят непрекъснато в течение на един работен ход на инструмента (частен случай на нестационарно рязане). Променливото рязане намира голямо приложение при струговане на детайли със сложна форма с променлива скорост на рязане, когато инструмента се премества по контура на детайла, а честотата на въртене на вретеното на машината остава постоянна. Благодарение на променливия режим на рязане може да се постигне повишаване на производителността и намаляване себестойността на обработването при осигуряване желано качество на обработваните повърхнини. *Например в много случаи е целесъобразно обработването на детайли със сложна форма да се извършва с променлива дълбочина на рязане, за да се снеме цялата прибавка за минимален брой проходи.* Променливият режим на рязане се прилага за по-добро използване възможностите на машините с помощта на такива системи, които позволяват осигуряване постоянна площ на сечението на срязвания слой метал, за сметка на управление на подаването и дълбочината на рязане. Управлението на режима на обработване се прилага за осигуряване постоянството на технологическите параметри (сила и мощност на рязане, точност на обработването, деформации в системата МПИД, грапавост на обработваната повърхнина и др.) с цел повишаване на производителността и намаляване себестойността на операциите.

При обработване на криволинейни участъци на детайли върху машини с ЦПУ, направлението на подаването $f$ ($v_f = f.n_c$) непрекъснато се изменя, главният установъчен ъгъл $k_r$ намалява, а спомагателният $k_r$' нараства. При намаляване на ъгъла, широчината на срязвания слой метал $b$ нараства, а дебелината $a$ намалява, като номиналната площ на срязвания слой метал остава постоянна (фиг. 3): $K = a_p f = ab$.



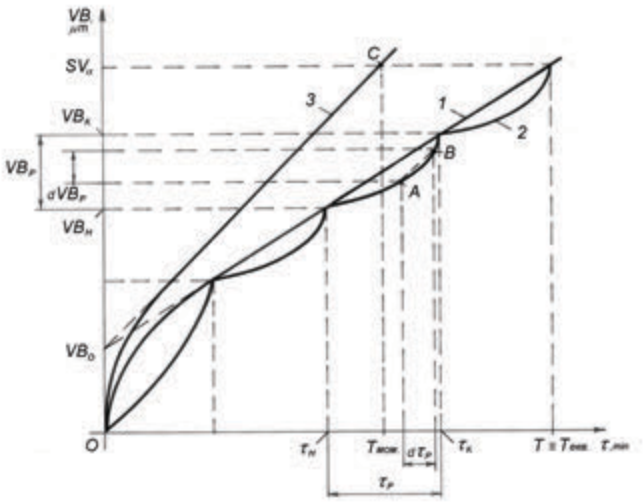
***Фиг. 3.*** *Установъчни ъгли и сечение на срязвания слой метал при обработване на криволинейни участъци*

При движението на ножа по криволинейна траектория се наблюдава изменение на силите на рязане, в резултат на влиянието на $a$ и $b$ върху главна съставна на силата на рязане $(F_z = C_{Fz} a^{0,75} b)$. Изменението на установъчните ъгли влияе върху грапавостта на обработваната повърхнина и на направлението на движение на стружката, което е перпендикулярно към диагонала на сечението на срязвания слой метал. От ъгъла на движение на стружката зависи действителният преден ъгъл на ножа и съотношението на съставните на силите на рязане $F_x$ и $F_y$ [1].

По този начин обработваните детайли със сложна форма на стругови машини с нестационарно рязане, частен случай на което се явява променливия режим на рязане е перспективно направление, което изисква решаването на такива въпроси като времето за рязане, износване и трайност на ножовете, сили на рязане и др.

## • *ИЗНОСВАНЕ И ТРАЙНОСТ НА ИНСТРУМЕНТИТЕ*

Кривата на износване на инструмента при обработване на елементарна криволинейна повърхнина с променлив режим на рязане има формата на последователни криволинейни участъци (фиг. 4, крива 2), началото и края на които съответства на началото и края на обработването на елементарната повърхнина. За всеки променлив режим на рязане може да се избере постоянен такъв, наречен *еквивалентен режим*, оказващ такова влияние на износването и трайността на инструмента, както и променливият (фиг. 4, крива 1).



***Фиг. 4.*** *Крива на износване на инструментите (1-при постоянен еквивалентен режим на рязане; 2-при променлив режим на рязане; 3-при постоянен моментен режим на рязане, съответстващ на режима 2 в момента $d\tau$)*

Трайността съответстваща на еквивалентният режим се нарича *еквивалентна* - $T_{екв.}$

За зоната на нормално износване

$$\frac{VB_к - VB_н}{SV_\alpha - VB_0} = \frac{\tau_к - \tau_н}{T}, \qquad (1)$$

*където $VB_н$ и $VB_к$ са износване на инструмента по задната повърхнина, съответно в началото и края на обработване на*

*елементарната повърхнина; $SV_\alpha$ – допустимо износване на инструмента за периода на трайността му T; $VB_0$ – начално износване; $\tau_н$ и $\tau_к$ – времена съответстващи на началото и края на обработване на елементарната повърхнина.*

В зависимост (1) $VB_к - VB_н = VB_p$ и $\tau_к - \tau_н = \tau_p$, откъдето за износването $VB_p$ се получава

$$VB_p = (SV_\alpha - VB_0)\frac{\tau_p}{T} \cdot \qquad (2)$$

При *постоянен еквивалентен режим* на рязане, зависимостта за $VB_p$ има вида

$$VB_p = (SV_\alpha - VB_0)\frac{\tau_к - \tau_н}{T} = (SV_\alpha - VB_0)\frac{\tau_p}{T_{екв.}}, \qquad (3)$$

*където* $T_{екв.}=T$.

При *променлив режим на рязане*, се преминава към диференциална форма на зависимост (2)

$$dVB_p = (SV_\alpha - VB_0)\frac{d\tau}{T_{мом}}, \qquad (4)$$

*където $T_{мом}$ е моментен период на трайност на инструмента т. е. време, за което износването на новия инструмент достига допустимата стойност $SV_\alpha$ , при условие, че за целият период на обработване параметрите на режима на рязане остават постоянни (фиг. 4, крива 3) и равни на разглежданите моментни стойности, съответстващи на момента от време $d\tau \equiv d\tau_p$ .*

Интензивността на износване на инструмента при променлив режим на рязане в момента $d\tau$ е равна на интензивността на износване при моментен постоянен режим, т.е. *AB // $VB_0C$*.

При интегриране на (4) се получава

$$VB_p = (SV\alpha - VB_0)\int_{\tau_н}^{\tau_к}\frac{d\tau}{T_{мом}} \cdot \qquad (5)$$

След приравняване на (3) и (5)

$$\frac{\tau_к - \tau_н}{T_{екв.}} = \int_{\tau_н}^{\tau_к}\frac{d\tau}{T_{мом}}, \qquad (6)$$

откъдето, отчитайки че $T_{екв.}=T$, за трайността $T$ се получава

$$T = \frac{\tau_к - \tau_н}{\int_{\tau_н}^{\tau_к}\frac{d\tau}{T_{мом}}} = \frac{\tau_к - \tau_н}{\int_{\tau_н}^{\tau_к}\frac{d\tau}{T_{мом}(a_p, f, v_c, \chi_r, ...)}} \cdot \qquad (7)$$

В (7), зависимостта на $T_{мом}$ от параметрите на режима на рязане се предполага че е известна.

Използването на зависимост (5) за определяне на $VB_p$ е възможно само при наличие на зависимост от вида $T = f(a_p,f,v_c,SV_\alpha ,...)$. В останалите случаи, а така също при неизвестно $SV_\alpha$, износването на инструмента при обработване на една елементарна повърхнина може да се определи, използвайки диференциалното уравнение за скоростта на износване

$$v_{VB} = \frac{dVB}{d\tau}, \qquad (8)$$

*където $V_{VB}$ е скорост на износване на инструмента, която е обратно пропорционална на трайността и за разлика от нея не зависи от приетия критерий за износване, а само от режимите на рязане и условията на обработване (например от обработвания и инструменталния материал, геометрията на инструмента, използваната МОТ и др.).*

В общия случай може да се запише

$$V_{VB} = V_{VB}(a_p,f,v_c,\chi_r, ...). \qquad (9)$$

От зависимости (8) и (9) може да се определи износването на инструмента при обработване на елементарна повърхнина с променлив режим на рязане

$$VB_p = VB_к - VB_н = \int_{\tau_н}^{\tau_к} v_{VB}(a_p f, v_c, \chi_r, ...)d\tau \cdot \qquad (10)$$

Замествайки в (7) и (10) с изразите за $\tau_н$, $\tau_к$, $T_{мом}$ и $V_{VB}$, за всеки конкретен случай на обработване, се получават зависимости за определяне на $T$ и $VB_p$ при обработване на елементарна повърхнина с променлив режим на рязане. При това е необходимо да се има предвид, че изчисленията по зависимости (7) и (10) трябва да се извършват са-

мо за тези диапазони на изменение на параметрите, за които са получени изходните изрази за трайността и износването при обработване с постоянен режим на рязане. Изборът на изрази за $T_{мом}$ и $V_{VB}$ определя точността на изчисленията и ако изборът е правилен, то точността с която са определени $T$ и $VB_p$ зависи само от точността, с която са определени трайността и износването в случая на обработване с постоянен режим на рязане.

За определяне на трайността в областта на практически използваните режими на рязане се използва формулата на Ф. Тейлор

$$T = C_T a_p^x f^y v_c^z, \qquad (11)$$

*където $C_T$, x, y и z са коефициент и степенни показатели, зависещи от условията на обработване*.

В този случай зависимост (7) добива вида

$$T = \frac{\tau_к - \tau_н}{\frac{1}{C_T}\int\limits_{\tau_H}^{\tau_K} \frac{d\tau}{a_p^x f^y v_c^z}}. \qquad (12)$$

За скоростта на износване може да се използва зависимост

$$V_{VB} = V.VB_{отн.}, \qquad (13)$$

*където $VB_{отн}$ е относително износване*

$$VB_{отн.} = C_h a_p^q f^u v_c^{m'} к_{\chi_r} к_м к_и, \qquad (14)$$

*където $C_h$, q, u, m', $к_{\chi r}$, $к_м$, $к_и$ са коефициент и степенни показатели зависещи от условията на обработване.*

Замествайки в (13) , зависимостта за $V_{VB}$ добива вида

$$v_{VB} = C_{VB} a_p^q f^u v_c^{m'+1} к_{\chi_r} к_м к_и, \qquad (15)$$

в която след полагане на $m = m' + 1$, $C_и = C_{VB} к_{\chi_r} к_м к_и$ се получава

$$v_{VB} = C_и a_p^q f^u v_c^m. \qquad (16)$$

Зависимостта за $VB_p$ след заместване на (16) в (10) добива вида

$$VB_p = \int\limits_{\tau_н}^{\tau_к} C_и a_p^q f^u v_c^m d\tau = C_и \int\limits_{\tau_н}^{\tau_к} a_p^q f^u v_c^m d\tau. \qquad (17)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Класът детайли със сложна ротационна форма, съдържа в себе си групата на цилиндричните детайли (гладки и стъпални) и поради това всички положения, отнасящи се към методите за обработването на цилиндричните детайли, могат да бъдат отнесени към технологиите за обработване на ротационни профилни повърхнини.
- Съществуват различни технологически варианти (схеми) за снемането на прибавката за грубо обработване при струговане на детайли със сложна форма, което прави ефективно обработването им в условията на частична автоматизация.
- В повечето случаи обработването на детайли със сложна ротационна форма е многопроходно, с работни ходове, изпълнявани успоредно или перпендикулярно на оста на детайла, а също и еквидистантно на контура му.
- Режимите на рязане при струговане на детайли със сложна ротационна форма са нестационарни и при използването на стругове с ЦПУ и системи за адаптивно управление, за един работен ход те са променливи (частен случай на нестационарно рязане).
- Изведени са зависимости в общ вид за определяне на трайността $T$ (7) и износването $VB_p$ (10) при стругова обработка на елементарни повърхнини (*челни, конусни, сферични и др.*) с променливи режими на рязане.
- При използване на зависимости (11) и (15) се получават зависимости (12) и (17) в областта на практически използваните режими на рязане.

## REFERENCE

[1] Vachev A.A. Sintez i analiz na kinematichni shemi na ryazane pri vurtyashti se instrument i zagotovka. P. TU-Plovdiv, 1998.

[2] Drujinskii I.A. Slojnie poverhnosti: matematicheskoe opisanie i tehnologicheskoe obezpechenie. Spravochnik. L. Mashinostroenie, 1985.
[3] Metev H., T. Kuzmanov, K. Krumov. Tehnologia na mashinostroeneto (chast II. Tehnologicheski metodi za obrabotvane). "EKS-PRES", G. 2016, 164 s.
[4] Kuzmanov T., H. Metev. Tehnologicheski procesi za metalorejeshti mashini s CPU. "EKS-PRES", G., 2006, 215 s.
[5] Maximov J.T. Forming of cross-profile holes by adding rotations round coplanar axes. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42 (3) (2002) 313-320.
[6] Maximov J.T. A new method of manufacture of hypocycloidal polygon shaft joints. Journal of Materials Processing Technology, 166 (1) (2005) 144-149.
[7] Spravochnik na tehnologa po mehanichna obrabotka, t.2 (pod obsht. red. na S. Pashov i P. Petkov). S., Tehnika, 1990, 664 s.
[8] Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya. Tom 1 (Pod red. A.G. Kosilovoy i R.E. Meshteryakowa. 4 izdanie preraboteno i dopulneno. M., Mashinostroenie, 1985, 656 s.

# 3D SIMULATION AND RESIDUAL STRESS ANALYSIS OF JOINING AA7075 ALLOY SHEET WITH LASER WELDING METHODS

**Cenk MISIRLI[1], Isik CETINTAV[2]**

[1] *Trakya University*

**Abstract**

*A numerical simulation model of the laser beam welding (LBW) process has been created with the goal of estimating residual stress and distortion fields with high accuracy. Because LBW is a thermo-mechanical process, a thermal analysis is done based on a mechanical analysis to compute residual stresses and distortions. For the estimate of size and shape necessary for thermal analysis, a new and efficient model that is independent of any experimental parameter is presented. The model incorporates all of the major physical processes connected with the LBW process, such as heat radiation, thermal conduction, and convection heat losses. Due to significant temperature fluctuations and material phase shifts during welding, thermal and mechanical material characteristics are expressed as temperature-dependent functions. Within the MSC Marc Mentat finite element code, the simulation method is coded as a macro procedure.*

**Keywords:** Laser beam welding, Keyhole modelling, Thermo-mechanical analysis, Welding simulation

## INTRODUCTION

Laser beam welding (LBW) is based on high power density welding technologies that can focus beam power to a very tiny spot diameter. As a result, the LBW method is superior to traditional welding procedures such as arc welding, resulting in smaller Heat Affected Zones (HAZ), reduced distortions, residual stresses, and strains.

Most welding techniques function in conduction-limited mode, which means that the heat delivered to the surface of the irradiated material by laser light absorption is essentially transmitted to the surrounding material via conduction. When the laser power density is high a keyhole is formed, which is accompanied by phase change processes such as melting and evaporation. Because of the numerous physical processes occurring [1,] the optimization of the laser welding process often relies on welding experiments and trial and error techniques, which have many operational challenges, increasing the total cost of the process.

Simulation models of the welding process that have been validated by experimental results are critical for a variety of reasons, including a thorough understanding of the LBW physics, the reliable extension of the process applicability to modern demanding industrial applications, and the efficient definition of the LBW process parameters at a low cost.

Accurately mapping the heat input to the material is the most important issue in LBW thermal analysis. The keyhole phenomenon is mostly responsible for non-uniform localized heating of the material volume. According to experimental data, the shape of the taphole of deep penetration welding is almost conical, and the apex angle decreases as the depth of the taphole increases [12-15]. A method for mathematical modeling of keyhole formation in laser welding of steel can be found in [16,17], but no reference can be found for aluminum materials.

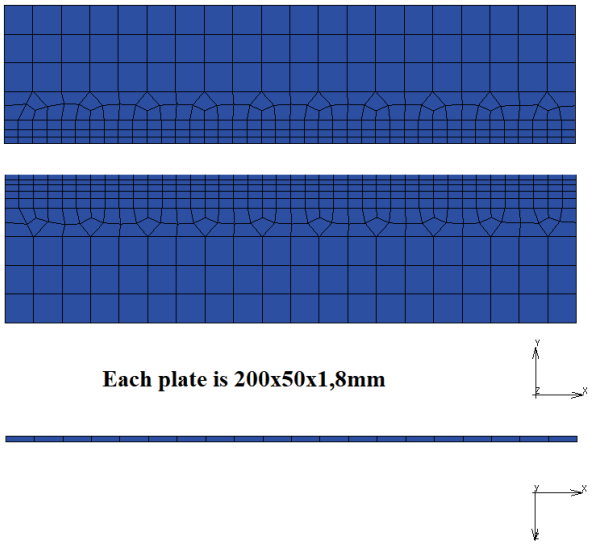
Many researchers have developed mathematical models of weld pool and keyhole geometries and positions in steel LBWs [18–24] by properly accounting for energy and pressure balances. However, these models are very complex and difficult to apply in practice to different geometries, materials and connection types.

In this paper, a thermo-mechanical FE model is developed to predict stress, strain and distortion fields to simulate butt joint welding of aluminum components. The main innovations of the model are an innovative keyhole prediction approach with the ability to machine any steel or aluminum alloy, as well as an advanced numerical approach that enables efficient prediction of residual stress and distortions of LBW components. Moreover, the proposed simulation methodology is particularly effective for lap- and T-joint LBW, which, although widely used in many industrial applications, is not adequately covered in the literature.

## THERMO-MECHANICAL ANALYSIS

For the LBW simulation, the global coupled thermo-mechanical model assumes a three-dimensional Gaussian heat flux distribution in a conical volume that travels along the weld line. As mentioned in Section 2, this conical volume forms as an approximation of the expected keyhole. A coupled thermo-mechanical analysis may be performed using the thermal and mechanical boundary conditions, and temperature distributions, residual stresses, and distortions can be determined.

The model is illustrated below, with 580 components and 1322 nodes at first. The element type 7 with assumed strain formulation is employed in this simulation. This element captures bending better than the traditional brick element(Figure 1).



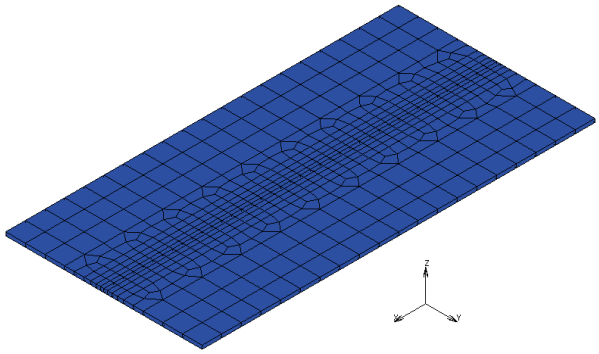



***Fig. 1.*** *Meshed welded parts*

Note that additional support tools are often used in precision welding to clamp the shell or prevent out-of-plane movement. This also reduces buckling, especially when the sheets are thin. In this model, the panels are each 0.2 m long, 0.05 m wide and 0.0018 m thick.

Marc Mentat has different levels of material behaviors for modeling metals. In this example, the mechanical and thermal properties are temperature dependent, but the effect of phase change on mechanical properties is not included in the model. Steel is defined by the options isotropic, table and latent heat.

The plate is glued to the clamp to simplify the example problem. This is not a conventional method as it causes unnecessary thermal stress. Contact bodies are defined in the contact option. The interaction of these locations is defined with the con intera option. The two plates are in contact at the start of the analysis. When a heat source heats the bodies to a temperature that meets the temperature criteria of the selected heat-driven bonding option, they bond during the analysis. This data is provided via the con intera option. Additional physical structural properties are not defined, but there is convection from the plate to ambient, which is room temperature. This data is in the contact option. The option 'Bonding over a temperature threshold paired with a peak temperature' is utilized. The peak temperature criteria assures that the material reached 1300°C during the study, regardless of whether the bodies were in touch or not. The temperature threshold, on the other hand, guarantees that when the two bodies come into touch, they are still warm enough to bind. The temperature and the peak temperature are both mean values between the temperatures of the

touching body and the temperatures of the touched body. Stress-free initial projection is enabled to compensate for any mistakes in mesh creation.

The thermal contact coefficient is 1000 W/m2 and is utilized before bonding occurs. The coefficient of close thermal contact is 50 W/m2. In theory, neither is necessary in this model because it is symmetric, but in practice, this is not the case.

The two plates' starting temperature is reported as 20ºC. It is not essential to assign a fixed temperature or displacement to any node of the model since contact with the clamps ensures solution stability. A laser heater is moved around a curve along the plate's edge. The heat source is positioned in the negative z global direction, as indicated below. The Mentat menu, which is used to determine these quantities, may also be seen. The weld path option in Marc is used to specify this.

The weld flux option controls the intensity of the source, its speed, and the shape/penetration level of the heat source. The heating source has a power output of 4000, 4200 and 4500 W. The heating source has two types of fluxes: surface fluxes and cylindrical volumetric fluxes. This is accomplished by applying the same power but assigning a surface flux efficiency of 4% and a volumetric flux efficiency of 96%. The source's velocity is 0.05 m/s.

## CONCLUSION

Figure 2 shows the stress fields in the center plane of the weld during the 24 second period from the start of the welding process for the tested laser powers.

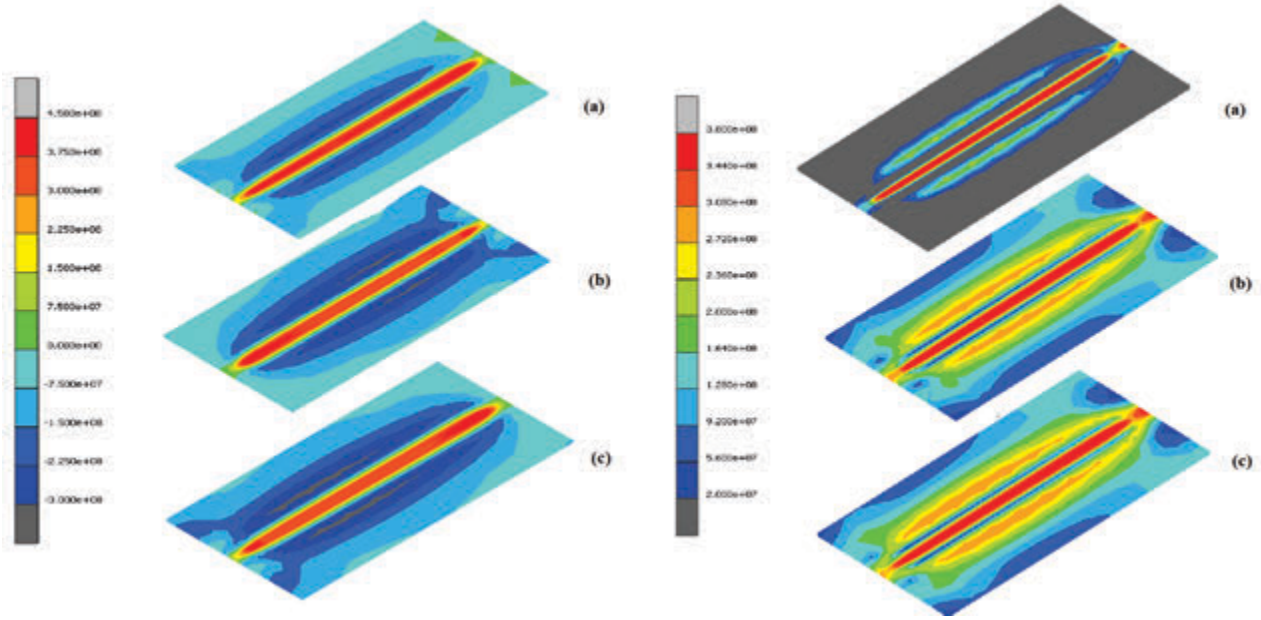



***Fig. 2.*** *Simulation results; C11stresses on the left, Von mises stresses on the right; (a)4000W, (b)4200W, (a)4500W*

The variation of the stresses in the weld direction for each laser power is shown on the left side of Figure 2. The highest stress values have been reached for 4500W. Von mises stresses for each power value are shown on the right side. At low power values, a decrease was observed in the stress value in the regions far from the weld pool. At 4500W power, the dispersion around the weld pool is increasing.

Figure 3 shows the temperature change in the weld pool for 24 hours. At 4500W, the highest temperature of 1455 C was reached.

Figure 4 shows the residual stress change on an arc passing through the midpoint.

The main purpose of the article was to develop and apply a simulation model for the analysis of temperature fields during the formation of different Al7075 alloy weld joints to adjust the appropriate laser power using

numerical simulation in the MSC Marc Mentat program code.

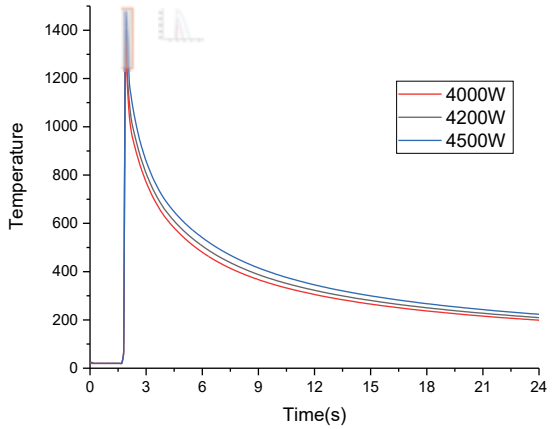



***Fig. 3.*** *Temperature variation during welding process*

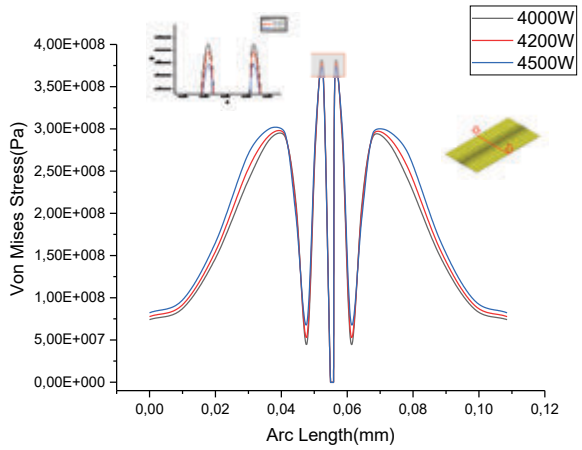



***Fig. 4.*** *Von Mises Stresses on mid-line of the weld*

It can also be assumed that the laser beam offset has a significant effect on the complete melting of materials and the production of high-quality weld joints. Therefore, the effect of laser beam offset on the temperature distribution in welded materials can be investigated in the next step. Finally, numerically optimized parameters will be used for the experimental fabrication of Al7075 alloy weld joints. Comparison of the obtained numerical results with the experimentally measured temperatures will be used to validate the developed simulation model.

## REFERENCE


[1]Solana, P., Negro, G., 1997. A study of the effect of multiple reflections on the shape of the keyhole in the laser processing of materials. J. Phys. D: Appl. Phys. 30, 3216–3222.

[2]Okerblow, N., 1958. The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures. Her Majesty's Stationery Office, London, UK. Masubuchi, K., 1980. Analysis of Welded Structures. Pergamon Press, Oxford, UK.

[3]Yang, L.J., Xiao, Z.M., 1995. Elastic–plastic modeling of theresidual stress caused by welding. J. Mater. Process. Technol. 48, 589–601.

[4]Tanigawa, Y., Akai, T., Kawamura, R., Oka, N., 1996. Transient heat conduction and thermal stress problems of a nonhomogeneous plate with temperature-dependent material properties. J. Therm. Stresses 19, 77–102.

[5]Chakravarti, L., Malik, M., Goldak, J., 1986. Prediction of distortion and residual stresses in panel welds. In: Computer Modeling of Fabrication Processes and Constitutive Behavior of Metals. Canadian Government Publishing Centre, Ottawa, Ontario, pp. 547–561.

[6]Fujii, S., Takahashi, N., Sakai, S., Nakabayashi, T., Muro, M., 2000. Development of 2D simulation model for laser welding. In: Proceedings of SPIE, vol. 3888.

[7]Frewin, M.R., Scott, D.A., 1999. Finite element model of pulsed laser welding. Weld. J. Weld. Res. Suppl. (January), 15s–22s. Reinhart, G., Lenz, B.,

[8]Rick, F., 1999. Finite element simulation for the planning of laser welding applications. In: Proceedings of the 18th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO'99), San Diego, CA.

[9]Carmignani, C., Mares, R., Toselli, G., 1999. Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a single-pass butt-welded thick steel plate. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 179, 197–214.

[10]Kang, D.-H., Son, K.-J., Yang, Y.-S., 2001. Analysis of laser weldment distortion in the EDFA LD pump packaging. Finite Elem. Anal. Des. 37, 749–760.

[11]Lankalapalli, K.N., Tu, J.F., Gartner, M., 1996. A model for estimating penetration depth of laser welding processes. Phys. D: Appl. Phys. 29, 1831–1841.

[12]Lampa, C., Kaplan, A.F.H., Powell, J., Magnusson, C., 1997. An analytical thermodynamic model of laser welding. Phys. D: Appl. Phys. 30, 1293–1299.

[13]Williams, K., 1999. Development of laser welding theory with correlation to experimental welding data. Laser Eng. 8, 197–214.

[14]Duley, W.W., 1999. Laser Welding. John Wiley & Sons, New York.

[15]Solana, P., Ocana, J.L., 1997. A mathematical model for penetration laser welding as a free-boundary problem. J. Phys. D: Appl. Phys. 30, 1300–1313.

[16]Kar, A., Mazumder, J., 1995. Mathematical-modeling of key-hole laser-welding. J. Appl. Phys. 78, 6353–6360.
[17]Dowden, J., Wu, S.C., Kapadia, P., Strange, C., 1991. Dynamics of the vapor flow in the keyhole in penetration welding with a laser at medium welding speeds. J. Phys. D 24, 519–532.
[18]Kar, A., Rockstroh, T., Mazumder, J., 1992. 2-dimensional model for laser-induced materials damage-effects of assist gas and multiple reflections inside the cavity. J. Appl. Phys. 71, 2560–2569.
[19]Metzbower, E.A., 1993. Keyhole formation. Met. Trans. B Process Met. 24, 875–880. Klein, T., Vicanek, M., Kroos, J., Decker, I., Simon, G., 1994. Oscillations of the keyhole in penetration laser-beam welding. J. Phys. D 27, 2023–2030.
[20]Matsunawa, A., Semak, V., 1997. The simulation of front keyhole wall dynamics during laser welding. J. Phys. D 30, 798–809.
[21]Kapadia, P., Solana, P., Dowden, J., 1998. Stochastic model of the deep penetration laser welding of metals. J. Laser Appl. 10, 170–173.
[22]Fabbro, R., Chouf, K., 2000. Keyhole modeling during laser welding. J. Appl. Phys. 87, 4075–4083.
[23]Rosenthal, D., 1946. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. 68, 849–866.
[24]Swift-Hook, D.T., Gick, A.E.F., 1973. Penetration welding with lasers. Weld. Res. Suppl., 492s–498s.

# АНАЛИЗ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО НА ОКОЛНАТА СРЕДА ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА БИОПЛАСТМАСИ

**Емил Велев**[1]

[1]*Пловдивски Университет „Паисий Хилендарски”*

# ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES FOR REDUCING ENVIRONMENTAL POLLUTION THROUGH THE USE OF BIOPLASTICS

**Emil Velev**[1]

[1]*Paisii Hilendarski University of Plovdiv*

**Abstract**

*Bioplastics are alternative raw materials for the production of plastic products without polluting the environment and a source of material that will be available after we abandon the production of petroleul. They can be produced from renewable sources such as such as vegetable fats and oils, corn starch, straw, woodchips, sawdust, recycled food waste, etc. These products are increasingly relevant after the European Union adopted Directive (EC) 2019/904 on reducing the environmental impact of certain plastic products.*

**Keywords:** bioplastics, PLA, biodegradation, compostable.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Използването на пластмасови изделия датира от десетилетия. Първоначално тяхното разпространение не е било така голямо както в последните години. Пластмасовите изделия се произвеждат предимно от суровина получена от преработването на петролни продукти, което води до голямо замърсяване на околната среда. С преоткриването на биопластмасите се дава възможност за ограничаване на тяхното влияние върху замърсяването на околната среда.

Основен концептуален контекст, който е поставен в статията е възможността за намаляване вредните последствия от използването на пластмаси изделия от петролни продукти.

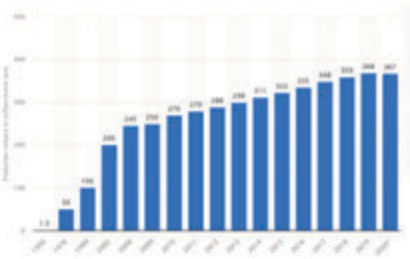
## ИЗЛОЖЕНИЕ

Данни за индустриално производство на детайли от пластмаса датират от петдесетте години на двадесети век. От фиг.1 са видни етапите през които е преминало, а именно [1]:

- 1950÷1976 г. – производството достига 50 милиона кубични метра;
- 1976÷1989 г. – 100 милиона кубични метра;
- 1989÷2000 г. - 200 милиона кубични метра;
- 2000÷2019 г. - 368 милиона кубични метра.

Видно е, че приблизително на 20 години производството бива дублирано.

След 2019 г., която е рекордна в производството на пластмаса, се забелязва едно намаляване което сигурно е продължило и през 2020 и 2021 г. вероятно се дължи на пандемията от Covid 19. Въпреки това количествата са огромни и влиянието върху околната среда са големи.



***Фиг. 1**. Производство на пластмаса през годините*

На фиг. 2 е показано как се разпределя производство на пластмаса в света[2].

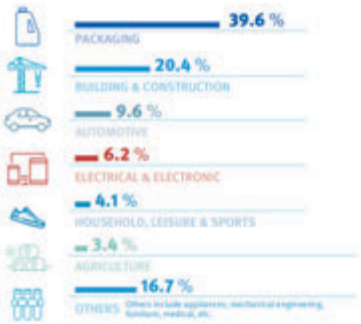



***Фиг. 2**. Производство на пластмаса*

Най-голям процент от това производство е съсредоточено в Азия, като 31% се пада на Китай.

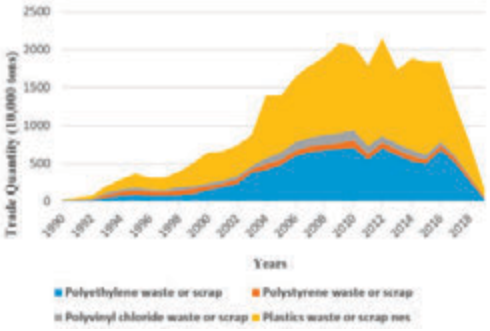
Ето защото проблемите със замърсяване на околната среда се задълбочават все повече и по-вече.

Изделията от пластмаса са навлезли широко както в промишлеността така и бита. Тяхното заместване в много сфери на приложение, ще бъде много трудно, но не и невъзможно.



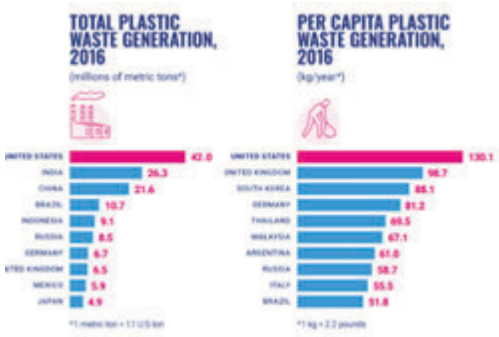

***Фиг. 3**. Използване на пластмасата*

От фиг. 3 се вижда, че почти 40% от произведените изделия от пластмаса са за опаковка, други 20% са в строителството и 10% в автомобилната промишленост[2].




***Фиг. 4**. Пластмасови отпадъци*

С увеличаването на производството се увеличават и обемите на отпадъците от пластмаса. На фиг. 4 е видно как се изменя, по обем и вид, през годините отпадъците от производството на пластмаса[3]. Видно е, че до 2019 г., с малки изключения както произведената пластмаса както и отпадъците се увеличават, което от своя страна води и до увеличаване рисковете от замърсяване на околната среда. Ето защо учени от много страни и организации алармират, че този проблем може да достигне до нива при които екосистемата ще бъде поставена под натоварване, след което няма да може да се възстанови баланса.



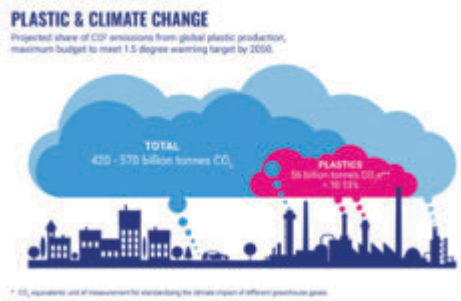

***Фиг. 5**. Пластмасов отпадък*

Сред най-големите производители на пластмасови отпадъци са САЩ, Индия и Китай. Може да се отчете, че развитите страни са и сред най-големите потребите и следователно генерират повече пластмасови отпадъци, което може да се види от фиг. 5.



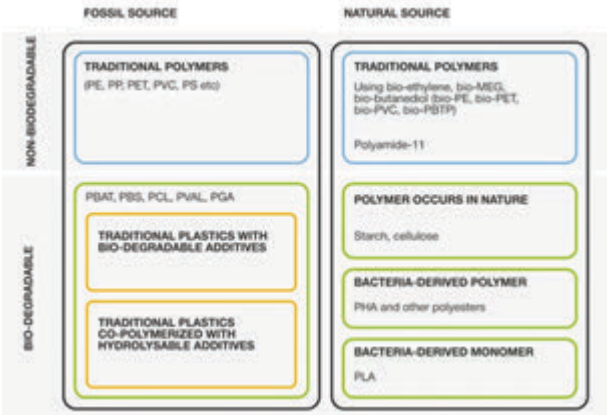

***Фиг. 6**. Използване на пластмасата*

Сред фирмите, генериращи най-много отпадъци от тяхното производство също са САЩ фиг. 6.




***Фиг. 7**. Отделен въглероден диоксид*

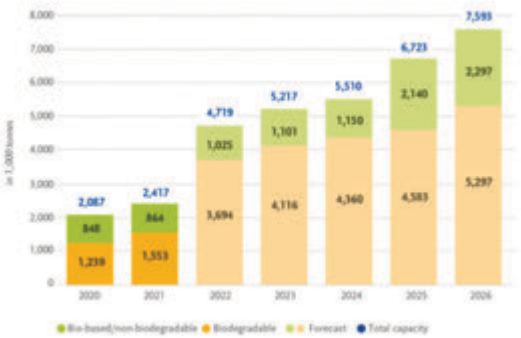
Пластмасите са изходни сурови за много производства. Очаквано е, че най-големите компании използващи пластмасови опаковки, техните отпадъци ще бъдат най-големия замърсител на околната среда. За производството на тези изделия се отдела въглероден диоксид в атмосфера, които представлява между 10-13% от всичкия отделен фиг. 7.




***Фиг. 8**. Класификация на пластмасите*

На фиг.8 е показана класификация на пластмасите. Те могат да бъдат с фосилен и биологичен първоизточник. От своя страна те са биоразградими и небиоразградими[5].

Като мярка за намаляване на това замърсяване, Европейския съвет прие Директива 2019/904 от 5 юни 2019 година относно намаляването на въздействието на определени пластмасови продукти върху околната среда. Целите на тази директива са да се предотврати и да се намали въздействието на определени пластмасови продукти върху околната среда, и по-специално върху водната среда, и върху здравето на човека, и да се насърчи преходът към кръгова икономика с иновативни и устойчиви бизнес модели, продукти и материали, като по този начин се допринесе и за ефикасното функциониране на вътрешния пазар. Настоящата директива ще допринесе за постигането на цел за устойчиво развитие № 12 на Организацията на обединените нации (ООН) за осигуряване на устойчиви модели на потребление и на производство, което е част от Програмата до 2030 г. за устойчиво развитие, приета от Общото събрание на ООН на 25 септември 2015 г. Чрез запазване на стойността на продуктите и материалите за възможно най-дълъг период от време и чрез образуване на по-малко отпадъци икономиката на Съюза може да стане по-конкурентоспособна и по-устойчива, като същевременно се намалява натискът върху ценните ресурси и околната среда [6].




***Фиг. 9**. Производство на биопластмаси*

Като частично решение на проблема със замърсяване се явяват биопластмасите. С тях се дава възможност да се продължи използването им, но като източници ще се използват възобновяеми суровини, като например растителни мазнини и масла, царевично нишесте, слама, дървени стърготини, дървени стърготини, рециклирани храни-

телни отпадъци и др. От фиг.9 се вижда, че тенденцията в използването на биопластмаси като изходни суровини ще се увеличава с течение на времето[7].

Биопластмасите могат да бъдат биоразградими и компостеруеми.

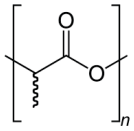
Биоразградимите пластмаси са такива пластмаси, който мога да бъдат разградени благодарение на микроорганизми и температурата. Този процес може да бъде бърз или бавен. Те не допринасят към замърсяването на околната среда тъй като те могат да бъдат разградени по естествен начин, дори и да попадна в природата. Небиоразградимите пластмаси се делят на такива които могат да бъдат рециклирани, като например полиетилена и такива които не могат, като например полистирен или поливенилхрорид. Те са най-голямата заплаха за околната среда. Ето защо е необходима да се намали до минимум използването на небиоразградимите пластмаси. Така пример може да се посочи използването на стъклени бутилки вместо пластмасови, на хартиени чанти вместо на полиетиленови. Явно е, че това ще доведе до оскъпяване на крайния продукт, но е време да се замислим върху опазване на околната среда. Тя не е само и единствено наша, тя е за всички, но най-вече за следващите поколения. По добре да им завещаем една по чиста натура.

Важно е да се знае, че биоразградимите пластмаси са проектирани да се разграждат в различни среди, едни се разграждат в земята други се разграждат във водата и това се извършва при определени условия и време.

Компостеруемите пластмаси са биопластмаси, за които е необходимо да се приложат индустриални методи за разграждането им, когато трябва да се обработят промишлени количества отпадъци или битови компостери при домашни условия. Използват се анаероби технологии при промишлените инсталации за компостиране.

Оксо-разградимите пластмаси включват добавки, които чрез окисляване водят до тяхното фрагментиране в микропластмаси или до химическо разлагане.

Най-широко приложение са намерили биоразградимите PLA пластмаси или полимлечната киселина, известна още като поли или полилактид, е термопластичен полиестер с основна формула ($C_3H_4O_2$), официално получен чрез кондензация на млечна киселина $C(CH_3)(OH)HCOOH$ с отстраняването на вода [7].




***Фиг. 10.*** *Химичната формула на PLA*

Основните подвидове на PLA са :

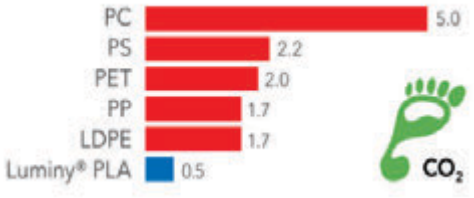
- PLLA: Биоразградим полимер с приложение в медицински устройства и фармацевтични приложения.
- PDLLA: Използва се за производство на медицински изделия, за които е предвидимо се разграждат в продължение на месеци при физиологични условия[8].

Съществуват акредитирани лаборатории за извършване на тестове за установяване дали една пластмаса е биоразградима или компостеруема. TUV Austria е една от тях. С повече от 2900 служители в над 30 страни работят за клиенти и партньори по целия свят. С персонализирани услуги в областта на тестване, инспекция, киберсигурност, защита на данните и сертифициране, както и обучение и допълнително образование. [8]. Важно е да се отбележи, че продължителността на сертификатите е между 2 и 4 години.



***Фиг. 11.*** *TUV Австрия*

Друга компания е SGS, която е световен лидер в контрола, инспекциите, изпитването и сертификацията.

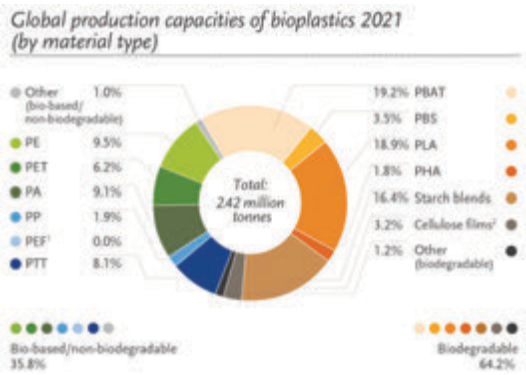



***Фиг. 12**. Въглероден отпечатък*

Друга причина да се използват биопластмасите от възобновяеми източници е, че въглеродния отпечатък от тяхното производство е в пъти по-малък от другите пластмаси фиг.12. Това е може би тяхната най-голяма полза в борбата за опазване на околната среда и намаляване на ефекта от парниковия ефект върху Земята.

За тестване за биоразградимост или компостеруемост има одобрени стандарти. В тях са описани методиката за тестване на пластмасите, като се посочва времето за тяхното разграждане. По долу са посочени някои от стандартите:

- EN 13432:2000: Този европейски стандарт определя изискванията и процедурите за определяне на способността за компостиране и анаеробна обработка на опаковки и опаковъчни материали, като разглежда четири характеристики: 1) биоразградимост; 2) разпадане по време на биологично третиране; 3) ефект върху процеса на биологично третиране; 4) ефект върху качеството на получения компост. В случай на опаковка, съставена от различни компоненти, някои от които са компостируеми, а други не, самата опаковка като цяло не е компостируема.;
- ASTM D6400: Методът за изпитване ASTM D6400 използва набор от условия, които благоприятстват микроорганизмите, които вирeят над 50 градуса по Целзий, което прави метода за изпитване донякъде селективен за бактериално биоразграждане. Този компонент от метода за изпитване предпочита видовете биопластични материали. В допълнение, методът не е предназначен за промишлени компостери.
- ISO 17088:2021: Пластмаси - Органично рециклиране - Спецификации за компостируеми пластмаси . Този документ определя процедури и изисквания за пластмаси и продукти, направени от пластмаси, които са подходящи за възстановяване чрез органично рециклиране.




***Фиг. 13.** Произведени биопластмаси за 2021*

За 2021 г. може да се види, че биопластмасите биоразградимите пластмаси представляват 64.2% фиг.13. Запазването на тази тенденция може да повлияе положително върху замърсяването на природата.

Използването на биоразградими пластмаси е част от Кръговата икономика към която се стреми Европейския съюз, икономика която ще доведе до по-пълноценно използване на природните ресурси и намаляване на зависимостта както на продукти така и на енергия добивана от фосилни материали фиг.14[9]. Главната идея на кръговата икономика е отпадъчните материал за една промишленост да бъда изходен материал за друга, като по този начин се удължи живота на материалите и продуктите.

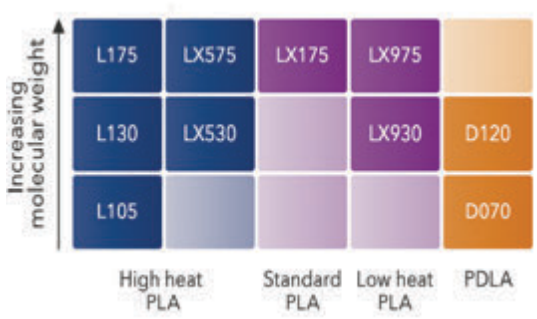


***Фиг. 14.** Кръгова икономика*

В света има много производители на биоразградими пластмаси, както техния броя брой постоянно се увеличава, както се увеличава и предлаганите от тях продукти. Към 2021 г. техният брой превишава 80. По

долу са посочения някой от най-големите производители във света:

- TOTALENERGIES: Създадена през 1924 г. във Франция петролна компания под името Total. Total Carbion е подразделението което разработва и произвежда продукти на базата на PLA.




***Фиг. 15.*** *PLA на Total Carbion*

Портфолиото на фирма Total Carbion е показано на фиг.15.

- BASF : Европейският лидер в научноизследователската и развойна дейност и най-голямата в света химическа компания BASF. Техния продукт ecovio® е висококачествен сертифициран за компостиране продукт;
- BIOTEC - е германска фирма за производство на пластмаси с голям диапазон на приложимост. Произвежданите от тях пластмаси са: BIOPLAST 105, 300, 400, 500, 900 GF 106/02 и GS 289;
- NOVAMONT – италианска фирма която е разработила следните продукти: Mater-Bi, Matrol-Bi и Celus-Bi.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Използването на биоразградими материали, като източник на материал за промишлеността, ще доведе до значително намаляване на вредните емисии с което ще допринесе за намаляване на замърсяването на околната среда и ще намали зависимостта на човечеството от използване на фосилни материали.

## REFERENCE


[1] www.Plastic production worldwide 2020 | Statista.

[2] https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/09/Plastics_the_facts-WEB-2020_versionJun21_final.pdf.

[3] Changping Zhao, Mengru Liu , Huanzheng Du, Yu Gong ,The Evolutionary Trend and Impact of Global Plastic Waste Trade Network, Sustainability 2021, 13, 3662.

[4] https://www.plasticsoupfoundation.org/en/plastic-facts-and-figures/

[5] https://ect-center.com/blog/biopolymers-market-2019

[6] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0904&from=EN.

[7] https://www.european-bioplastics.org/market/.

[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid.

[9] https://www.europarl.europa.eu/news/bg/headlines/economy/20151201STO05603/krghovata-ikonomika-kakvo-predstavliava-tia-i-zashcho-e-vazhna/

# АНАЛИЗ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА НА ВЪРТЯЩ МОМЕНТ ПРИ РЕЗБОФОРМИРАНЕ С РАЗЛИЧНИ ВИДОВЕ МЕТЧИЦИ

**Христо Радев** *hradew81@abv.bg*
**Христиан Митев** *hristian_mitev@abv.bg*
**Христо Якимов** *Yakimov.h@abv.bg*
*катедра МТТ, ТУ-Габрово, 5300, БЪЛГАРИЯ*

# ANALYSIS OF TAPPING TORQUE STUDIES WITH DIFFERENT TYPES OF TAPS

**Hristo Radev** *hradew81@abv.bg*
**Hristian Mitev** *hristian_mitev@abv.bg*
**Hristo Yakimov** *Yakimov.h@abv.bg*
*Department of Mechanical Engineering and Technologies, Technical university Gabrovo*

**Abstract**
*Thread forming is one of the most common technological tasks in mechanical engineering. The purpose of the article is to present an experimental comparative analysis of the torque obtained in the formation of internal threads with different designs of taps working by cutting, plastic deformation and a combination of the two methods.*

***Keywords:*** taps, forming tap, cutting-deformation tap, torque, thread.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Формообразуването на вътрешни скрепителни резби с метчици е техноло- гичен проблем, свързан с възникването на големи въртящи моменти и сили на рязане. За облекчаване на работните условия и постигане на необходимата геометрична точност и грапавост на обработената повърхнина се използват редица методи сред които са прилагането на мажещо - охлаждащи течности, на различни видове покрития, компютърни симулации и др.

Анализът на предимствата и недостатъците и качествената оценка на обработването на резби в непластични материали [1], [10] показват, че за обезпечаване на високо качество на вътрешните резби по отношение на геометрична точност, грапавост и якостни параметри е целесъобразно изследването на въртящия момент с различни видове метчици.

В статията е направен анализ и сравнение на въртящия момент, получен при формообразуването на вътрешни резби с различни конструкции метчици. Представени са и резултатите от изследване и сравнение на въртящия момент при обработката на резба М8 с режещ, деформиращ и режещо – деформационен метчик в материал С45.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Основните резултати, получени при обработване на резби, са свързани с изследване и моделиране на въртящия момент и силата на рязане и влиянието им върху качеството на инструментите. Важността на изследването на въртящия момент е свързана основно с възможността за счупване на инструментите поради увеличаване на усилията на рязане по време на резбонарезния процес. От друга страна, големината на силата на рязане има пряка връзка с грешките в стъпката и качеството на резбовия профил.

Модели за прогнозиране на въртящ момент и сила на рязане са представени в[2, 4,6,7,13]. Као и Съдърланд [4] са анализирали въртящия момент и силата на рязане при обработка с метчик на резба в детайли

от стомана SAE1018 (EN1.7218), доказвайки, че запълването със стружки на стружковите канали може да бъде отговорно за значителна част от счупванията в процеса на резбонарязване, като то може да бъде намалено чрез оптимизиране на геометрията на метчика.

Армарего и Чен [2] са предложили модел чрез компютърна симулация за определяне на въртящия момент и силата на рязане, верността на който е проверена експериментално. Авторите установяват, че силата и въртящият момент могат да бъдат предвидени, но са необходими повече изследвания за прогнозиране на небалансираната нормална сила, както и за определяне на влиянието на ъгъла на подема на винтовата линия върху въртящия момент.

Занг и др. [18] са акцентирали върху изследване на резбонарязването при наличие на вибрации с цел намаляване на въртящия момент. Според авторите има оптимална амплитуда, респективно честота на трептенето, при които настъпва минимален въртящ момент. Сравнени са две ситуации – обработка без вибрации и с наличието на вибрации, и е доказано намаляването на въртящия момент при използване на вибрации. Влияние оказва и формата на вълната, като квадратните вълни имат по-голямо влияние отколкото синусоидните.

Точното определение на въртящия момент и силата на рязане е сложно, и няма общ модел, който да опише влиянието на входните фактори.

Пузович и Кокотович [13] са разработили стратегия за симулация на процеса резбонарязване, използвайки математични модели за въртящия момент и подавателната сила при обработка на резби с метчици M8 и M10. Авторите са отчели влиянието на смущаващи фактори, като откъртване на ръбове и износване на инструмента.

Чен и Смит [6] са разработили математични модели за въртящия момент, подавателната сила и мощността на рязане, които позволяват тяхното анализиране в преходните и стационарните процеси. Предложен е и модел за прогнозиране на въртящия момент и подавателната сила при машинно нарязване на резби. Изследванията са направени на метчици в стомана S1214(EN 1.0715) с инструменти без покритие, както и с покритие от TiN, които се различават по геометрията на режещата си част.

Проучванията върху ефективността на износоустоичивите покритията са проведени с фокус върху въртящия момент и подавателната сила на рязане [3,9,11,16]. Въз основа на това Боумич и др. [3] провеждат експериментални изсле-двания за определяне на температурата, въртящия момент и микротвърдостта при нарязване на резби M8 с метчици с диамантено DCL покритие и без покритие в автомобилни компоненти, изработени от Al-Si сплав 319Al с използване на минимално количество МОТ, както и без смазване. Резултатите показват, че сухото нарязване е съпроводено с незабавна повреда на инструмента, поради адхезията на алуминия при увеличаване на въртящия момент. Инструментът с диамантено покритие е с увеличена трайност и генерира по-нисък среден въртящ момент, дължащ се на намаляване на адхезията на алуминия, и осигурява високо качество на резбата. Максималният въртящ момент обаче е 2,4 пъти по-голям от този при нарязване на резба с метчик от HSS без покритие. Малкият коефициент на триене е отговорен за избягването на натрупването на наслойка, а минимално количество на МОТ намалява температурата и осигурява минимална адхезия на алуминия към метчика, а в резултат и по-малки стойности на въртящия момент.

Стейнингер и др. [16] изследват въртящия момент и силата на рязане при нарязване на резби с твърдосплавни метчици с различни покрития от TiCN, CrN и TiB2, както и на два вида DLC покрития. Резултатите показват, че най-нисък въртящ момент, висока производителност и минимална грапавост се постигат при използване на инструменти с DLC покрития.

Узун и Коркут [17] изследват въртящ момент при нарязване на резби в аустенитна неръждаема стомана AISI 304 (EN 1.4301) с метчици с различни диаметри при различни условия на рязане. Авторите установяват, че въртящият момент има основно влияние върху производителността на рязане, като отчитат счупванията на инструмента при обработка. Освен това се наблюдава и натрупана наслойка върху режещите ръбовете на инструментите.

Рибейро и др. [14] изследват въртящия момент и силата на рязане при обработка с режещ и валцоващ метчик M3 в сплав Ti-6Al-4V. Авторите установяват, че въртящият момент и силата са по-малки при валцоване отколкото при рязане.

Сикуейра и др. [15] изследват въртящия момент и силата на рязане при обработката на материал SAE1020 (EN1.0044) с метчици с различен ъгъл на подема на винтовата линия (15° и 35°) и с метчици с прави канали, като са използвани инструменти с покритие и без покритие. Авторите установяват, че силата на рязане намалява с нарастване на скоростта на рязане, като тази тенденция е по-силно изразена при инструменти с по-голям ъгъл на винтовата линия.

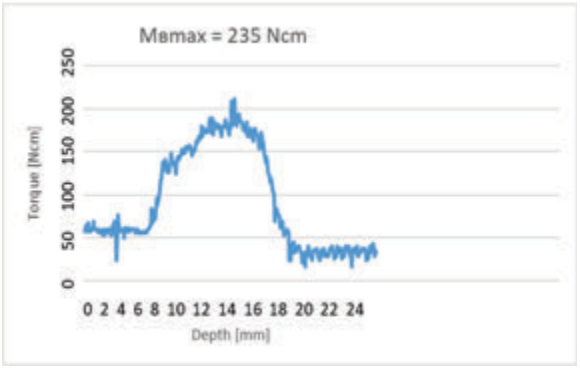
Фрометин и др. [9] провеждат изследване на въртящия момент, микротвърдостта и температурата на рязане, като са използвали девет марки масла и два вида емулсии на водна основа с 5% и 20% концентрация. Установено е, че ефективността на МОТ изразяваща се в силата на триене, зависи основно от добавките в маслата и в по-малка степен от вискозитета им.

Силите и моментите при валцуването на резба са по-високи от силите при нарязване на резба и това може да доведе до значителна повреда на валцоващите метчици. В тази връзка, Карвало и др. [5] са изследвали въртящия момент и силата на рязане в зависимост от скоростта на формоването при обработка на магнезиева сплав AM60 с метчици с покритие и без покритие. Резултатите показват, че въртящият момент е по-голям при обработка с инструменти без покритие, а силата на рязане е постоянна при ниските стойности на скоростта на формоване. Най-добър профил на резбата обаче е постигнат, когато са използвани инструменти без покритие при обработка с високи стойности на скоростта на формоване.

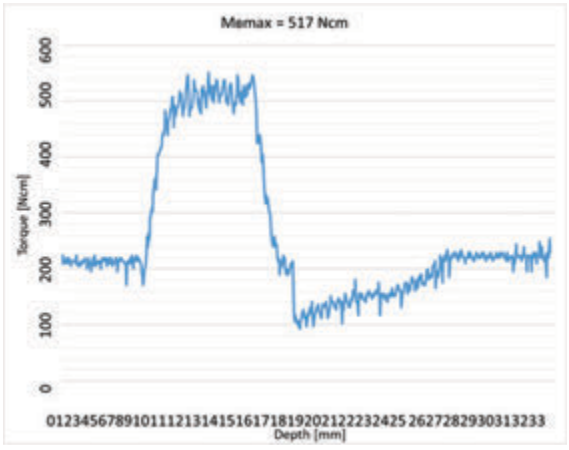
Чоудари и др. [7] са разработили модели за прогнозиране на силата на рязане и въртящия момент при формообразуване на резба. Проведени са експериментални изследвания с охлаждане при обработване на месинг, като резултатите показват, че големината на силите зависи от скоростта на формообразуване и големината на прибавката. По-големите стойности на експериментално измерения въртящ момент в сравнение с определените по модела се дължат на еластичното възстановяване на материала. Анализа на предложения модел доказва и влиянието на контактния ъгъл, като с неговото увеличаване се увеличава и стойността на въртящия момент.

Александрова и Ганев [1] са разработили нова конструкция режещо-деформационни метчици за обработка на резби. Николова-Пенчева и др. [10] са изследвали въртящия момент при обработка с тези инструменти при прилагането на четири МОТ, показвайки тяхното влияние върху работоспособността на метчиците.

За да се сравни максималният въртящ момент *Мв* с различни видове метчици са проведени експериментални изследвания при обработване на резби M8 в стомана C45 с режещ и валцоващ метчик. Като МОТ е използвано вретенно масло MS 10. Големината на въртящия момент е измерена на стенд за изпитване на въртящ момент при постоянна честота на въртене n=315 $min^{-1}$, а дебелината на детайла е 22 mm.




*а)*




*б)*

***Фиг. 1**. Въртящ момент при обработване на резба M8 с а)режещ метчик; б) валцоващ метчик*

***Табл. 1**. Максимален въртящ момент при обработка с различни видове метчици*

| $M_{вMax}$ (Ncm) | Вид метчик | | |
|---|---|---|---|
| | Режещ | Валцоващ | Режещо-деформационен |
| 1 | 244 | 473 | 780 |
| 2 | 303 | 517 | 600 |
| 3 | 235 | 423 | 840 |

Характерът на изменение на въртящия момент и измерените максимални стойности на момента $M_{Bmax}$ при различни метчици са представени съответно на Фиг. 1 и в Таблица 1, като резултатите за режещо-деформиращия метчик с прави стружкови канали ($\lambda_s$=0⁰) са въз основа на проведените изследвания в [1], [10].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С оглед практическото приложение на различните конструкции метчици при обработване на различни материали е необходимо да се изберат инструмент и метод на обработка в зависимост от твърдостта на материала и неговата податливост на пластична деформация.

Основните параметри, изучавани от изследователите в процеса на формообразуване на вътрешни резби с метчици, са въртящият момент и силата на рязане. Получените резултати показват голямото влияние на МОТ и вида на покритията върху тези параметри, както и върху износването и трайността на метчиците.

Установено е, че прилагането на МОТ и различни повърхностни покрития водят до намаляване на пластичната деформация на обработвания материал, на силата и мощността на рязане, както и до повишаване на качеството на обработените повърхнини. Намалява се износването на инструмента и се повишава неговата трайност, което от своя страна води до увеличаване на производителността.

Проведените изследвания на въртящия момент и силите, както и построените модели на тези параметри са валидни за обработка с метчици с дадена конструкция и конкретен обработван материал. Не са разработени обобщени модели за определяне на въртящия момент и силата на рязане, които да отчитат влиянието на физико-механичните свойства на обработвания материал, вида на МОТ, геометрията на инструмента и елементите на режима на рязане.

В тази връзка изследването на въртящия момент и силата на рязане за всяка нова конструкция метчици, каквато е новосъздадената конструкция режещо-деформационни метчици представена от [1,10], налага задълбочено и комплексно изследване, за да се докажат режещите качества на инструмента. Също така отчетеният висок въртящ момент на новата конструкция режещо-деформационни ме- тчици налага използване на инструменти с наклонени стружкови канали ($\lambda_s \neq 0$⁰).

## REFERENCE


[1] Aleksandrova, I.S., Ganev, G.N. Combined cutting-deforming taps (2013) Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, 59 (2), pp. 106-111.

[2] Armarego EJA, Chen MNP (2002) Predictive cutting models for the forces and torque in machine tapping with straight flute taps. CIRP Ann 51(1):75–78

[3] Bhowmick, S., M. Lukitsch, A. Alpas. Tapping of Al–Si alloys with diamond-like carbon coated tools and minimum quantity lubrication. Journal of Materials Processing Technology 210, 2010, 2142–2153.

[4] Cao T, Sutherland JW (2002) Investigation of thread tapping load characteristics through mechanistics modeling and experimentation.Int J Mach Tool Manu 42:1527–1538

[5] Carvalho AO, Brandão LC, Panzera TH, Lauro CH (2012) Analysis of form threads using fluteless taps in cast magnesium alloy (AM60). J Mater Process Technol 212:1753–1760

[6] Chen NM, Smith AJR (2011) Modelling of straight-flute machine tapping. Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf 225:1552–1567

[7] Chowdhary S, DeVor RE, Kapoor SG (2003) Modeling Forces Including Elastic Recovery for internal thread forming. J ManufSci Eng,doi.org/10.1115/1.1619178

[8] Fromentin G, Poulachon G, Moisan A, Julien J, Giessler J (2005) Precision and surface integrity of threads obtained by form tapping. CIRP Ann 54(1):519–522

[9] Fromentin, G., A. Bierla, C. Minfray, G.Poulachon. An experimental study on the effects of lubrication in form tapping. Tribology International, 43, 2010, 1726–1734

[10] Nikolova-Pencheva, M., I. Alexandrova, J. Mitev. Effect of lubricant-coolant fluids on the working performance of taps**.** Report from the National Conference on Mechanical Engineering, 2019, Varna.

[11] Oliveira JA, Ribeiro Filho SLM, Brandão LC (2018) Investigation of the influence of coating and the tapered entry in the internal forming tapping process. Int J AdvManuf Technol 101:1051–1063

[12] Popović M, Stoić A, Tanović L (2016) Prediction of tapping forces and torque for 16MnCr5 alloyed steel. Tehnički vjesnik 23(3):873–879.

[13] Puzović R, Kokotović B (2006) Prediction of thrust force and torque in tapping operations using computer simulation. FME Trans 34:1–5.

[14] Ribeiro Filho SLM, Lauro CH, Bueno AHS, Brandão LC (2016) Influence cutting parameters on the surface quality and corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in synthetic body environment (SBF) using response surface method. Measurement 88:223–237.

[15] Siqueira BS, Freitas SA, Pereira RBD, Brandão LC (2019) Influence of chip breaker and helix angle on cutting efforts in the internal threading process. Int J Adv Manuf Technol 102:1537– 1546

[16] Steininger A, Siller A, Bleicher F (2015) Investigations regarding process stability aspects in thread tapping Al-Si alloys. Procedia Eng 100:1124–1132.

[17] Uzun G, Korkut I (2016) The effects of cutting conditions on the cutting torque and tool life in the tapping process for AISI 304 stainless steel. Mater Tehnol 50(2):275–280.

[18] Zhang B, Yang F, Wang J (2003) Fundamental aspects in vibrationassisted tapping. J Mater Process Technol 132:345–352.

# ВЕКТОРНО-МАТРИЧЕН ПОДХОД ПРИ АНАЛИЗА НА РАПИРЕН СТАН

**Марин Йорданов Маринов**

*Катедра "ИДТТ", ТУ - Габрово*

# VECTOR-MATRIX APPROACH IN ANALYSIS OF RAPIER LOOM

**Marin Jordanov Marinov**

*Department of Industrial Design and Textile Engineering, TU-GABROVO*

**Abstract:**

*The "MAV" loom rapier mechanism for driving is examined. The kinematics parameters of the rapiers' motion are determined by vector-matrix method.*

**Keywords:** kinematics analysis, loom, rapier mechanism, vector-matrix method.

## ВЪВЕДЕНИЕ

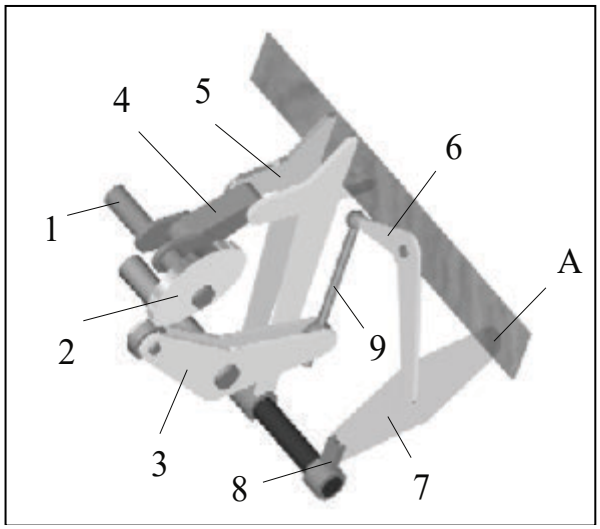
При тъкачната машина "MAV" полагането на вътъчната нишка в тъкачната уста се извършва от две рапири, които представляват твърди тела (тръби) с приспособление (щипка) на върха за захващане на вътъчната нишка. Едновременно от двете страни на тъканта двете рапири влизат в образуваната от основните нишки уста. По средата на ватъла става предаването на вътъчната нишка от входната на изходната рапира – реализира се принципа на Dewas [1]. За технологичния процес е важна скоростта на прекарване на вътъчната нишка, защото тя е свързана с изменението на напреженията и деформациите в нея [2]. Неблагоприятното изменение на скоростта на полагане на вътъка може да се избегне, ако предаването на нишката между двете рапири се осъществи при висока абсолютна скорост на движение и нулева относителна скорост между тях [3] [4].

Целта на настоящата разработка е да се определят кинематичните параметри на движение на рапирите (вътъчната нишка) и се посочат пътищата за една евентуална модернизация на механизма чрез подобряване на кинематичните параметри.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### 2. Кинематичен анализ

Кинематичният анализ е извършен при условия, максимално близки до реалните, с действителната метрика на звената на тъкачната машина "MAV".




***Фиг. 1.*** *3-D модел на механизъм за задвижване на рапирите*

### 2.1 Определяне на функцията на положението и първата предавателна функция на механизма съставен от звена 1, 4 и 5.

Определят се координатите на центъра на въртящата двоица **G,** за произволно положение на механизма.

$$(1)\qquad \begin{bmatrix} X_{G_i} \\ 0 \\ Z_{G_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_{1i} & 0 & \sin\varphi_{1i} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi_{1i} & 0 & \cos\varphi_{1i} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X_{G_1} \\ 0 \\ Z_{G_1} \end{bmatrix} .$$

Определят се координатите на центъра на въртящата двоица **H** за същото положение на механизма.

$$(2)\qquad \begin{bmatrix} X_{H_i} \\ 0 \\ Z_{H_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{1i} & 0 & \sin\theta_{1i} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{1i} & 0 & \cos\theta_{1i} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X_{H_1} - X_b \\ 0 \\ Z_{H_1} - Z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_b \\ 0 \\ Z_b \end{bmatrix} .$$

От (1), (2) и условието за геометрична принуда на звеното 4 се определя функцията на положението $\psi = \psi(\varphi)$ на механизма съставен от звена 1, 4 и 5.

$$(3)\qquad \theta_{1i} = a\cos\frac{-a.c \pm b.\sqrt{a^2+b^2-c^2}}{a^2+b^2} \quad ,$$

където

$$(4)\qquad \begin{aligned} a &= 2.[(X_b - X_{G_i})(X_{H_1} - X_b) + (Z_b - Z_{G_i})(Z_{H_1} - Z_b)] \\ b &= 2.[(X_b - X_{G_i})(Z_{H_1} - Z_b) - (Z_b - Z_{G_i})(X_{H_1} - X_b)] \\ c &= (X_{H_1} - X_b)^2 + (Z_{H_1} - Z_b)^2 + (X_b - X_{G_i})^2 + (Z_b - Z_{G_i})^2 - \ell_4^2 \\ \ell_4^2 &= (X_{H_1} - X_{G_i})^2 + (Z_{H_1} - Z_{G_i})^2 \end{aligned}$$

След числено диференциране на (3) се получава първата преводна функция $\theta' = \theta'(\varphi)$ . Координатите на центъра на въртящата двоица **E,** за разгледаното произволно положение на механизма имат следния вид:

$$(5)\qquad \begin{bmatrix} X_{E_i} \\ Y_{E_i} \\ Z_{E_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{1i} & 0 & -\sin\theta_{1i} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_{1i} & 0 & \cos\theta_{1i} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X_{E_1} - X_b \\ Y_{E_1} \\ Z_{E_1} - Z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_b \\ 0 \\ Z_b \end{bmatrix} .$$

### 2.2 Определяне функцията на положението и първата преводна функция на гърбичния механизъм.

Функцията на положението апроксимирана с полином съгласно фиг.1 има следния вид:

$$(6)\qquad \begin{aligned} &\psi_1 = 52°, \quad \text{при} \quad 0 \le \varphi \le 139{,}52° \\ &\psi_2 = 2{,}506 - 1{,}746.\varphi + 0{,}260.\varphi^2 \\ &\text{при} \quad 139{,}52° \le \varphi \le 247{,}27° \end{aligned}$$

а първата предавателна функция е :

$$(7)\qquad \begin{aligned} &\varphi_1' = 0° \\ &\varphi_2' = -1{,}746 + 0{,}52.\varphi \end{aligned}$$

### 2.3 Определяне функцията на положението и първата предавателна функция на четири-звенния пространствен RSSR механизъм (звена 3, 9, 6)

Определят се координатите на центъра на сферичната двоица **C**, при положение ***i*** на механизма.

$$(8)\qquad \begin{bmatrix} X_{C_i} \\ Y_{C_i} \\ Z_{C_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi_i & 0 & \sin\psi_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\psi_i & 0 & \cos\psi_i \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X_{C_1} - X_m \\ Y_{C_1} \\ Z_{C_1} - Z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_m \\ 0 \\ Z_m \end{bmatrix}$$

Определят се координатите на центъра на сферичната двоица **D,** при положение ***i*** на механизма:

$$(9)\qquad \begin{bmatrix} X_{D_i'} \\ Y_{D_i'} \\ Z_{D_i'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_i & -\sin\gamma_i \\ 0 & \sin\gamma_i & \cos\gamma_i \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X_{D_1} \\ Y_{D_1} - Y_{E_1} \\ Z_{D_1} - Z_{E_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Y_{E_1} \\ Z_{E_1} \end{bmatrix},$$

$$(10)\qquad \begin{bmatrix} X_{D_i} \\ Y_{D_i} \\ Z_{D_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & -\sin\theta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_i & 0 & \cos\theta_i \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X_{D_i'} - X_b \\ Y_{D_i'} \\ Z_{D_i'} - Z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_b \\ 0 \\ Z_b \end{bmatrix}$$

.

Като се използват (8), (10) и геометричното условие за принуда на звено 9, се получава функцията на положението на механизма.

$$(11)\qquad \gamma_{1i} = a\cos\frac{-d_i.f_i \pm \sqrt{d_i^2 + e_i^2 - f_i^2}}{d_i^2 + e_i^2},$$

където

$$(12)\qquad \begin{aligned} d_i &= 2.(D_i.Z_{DE} - B_i.Y_{DE}) \\ e_i &= 2.(D_i.Y_{DE} - B_i.Z_{DE}) \\ f_i &= Y_{DE}^2 + Z_{DE}^2 + A_i^2 + B_i^2 + C_i^2 - \ell^2 \\ Y_{DE} &= Y_{D_1} - Y_{E_1} \\ Z_{DE} &= Z_{D_1} - Z_{E_1} \\ A_i &= (Z_{E_i} - Y_b).\cos\theta_{1i} + X_b - X_{C_i} \\ B_i &= Y_{E_i} - Y_{C_i} \\ C_i &= (Z_{E_i} - Y_b).\cos\theta_{1i} + Z_b - Z_{C_i} \\ D_i &= C_i.\cos\theta_{1i} + A_i.\sin\theta_{1i} \\ \ell^2 &= (X_{D_1} - X_{C_1})^2 + (Y_{D_1} - Y_{C_1})^2 + (Z_{D_1} - Z_{C_1})^2 \end{aligned}$$

Чрез числено диференциране се определя първата преводна функция на механизма.

**2.4 Определяне функцията на положението на първата преводна функция на коляно-мотовилковия механизъм (звена 6, 7, 8).**

Определят се координатите на центъра на въртящата двоица **F**.

$$(13)\quad \begin{bmatrix} X_{F_i} \\ Y_{F_i} \\ Z_{F_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_{1i} & -\sin\gamma_{1i} \\ 0 & \sin\gamma_{1i} & \cos\gamma_{1i} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 0 \\ Y_{F_1} - Y_{E_1} \\ Z_{F_1} - Z_{E_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{F_1} \\ Y_{F_1} \\ Z_{F_1} \end{bmatrix},$$

Където:

$$(14)\quad \begin{bmatrix} X_{F_i} \\ Y_{F_i} \\ Z_{F_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{1i} & 0 & -\sin\theta_{1i} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_{1i} & 0 & \cos\theta_{1i} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X_{F_1} + X_b \\ Y_{F_1} \\ Z_{F_1} + Z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_b \\ 0 \\ Z_b \end{bmatrix} .$$

Като се използва (13) и (14) и геометричното условие за принуда на отсечката $\overline{FK}$ от звеното 7, се определят координатите $Y_k$ на центъра на цилиндричната двоица 8.

$$(15)\quad Y_{K_i} = a \pm \sqrt{a^2 - b}\,, \qquad \text{където}$$

$$a = Y_{F_i}$$

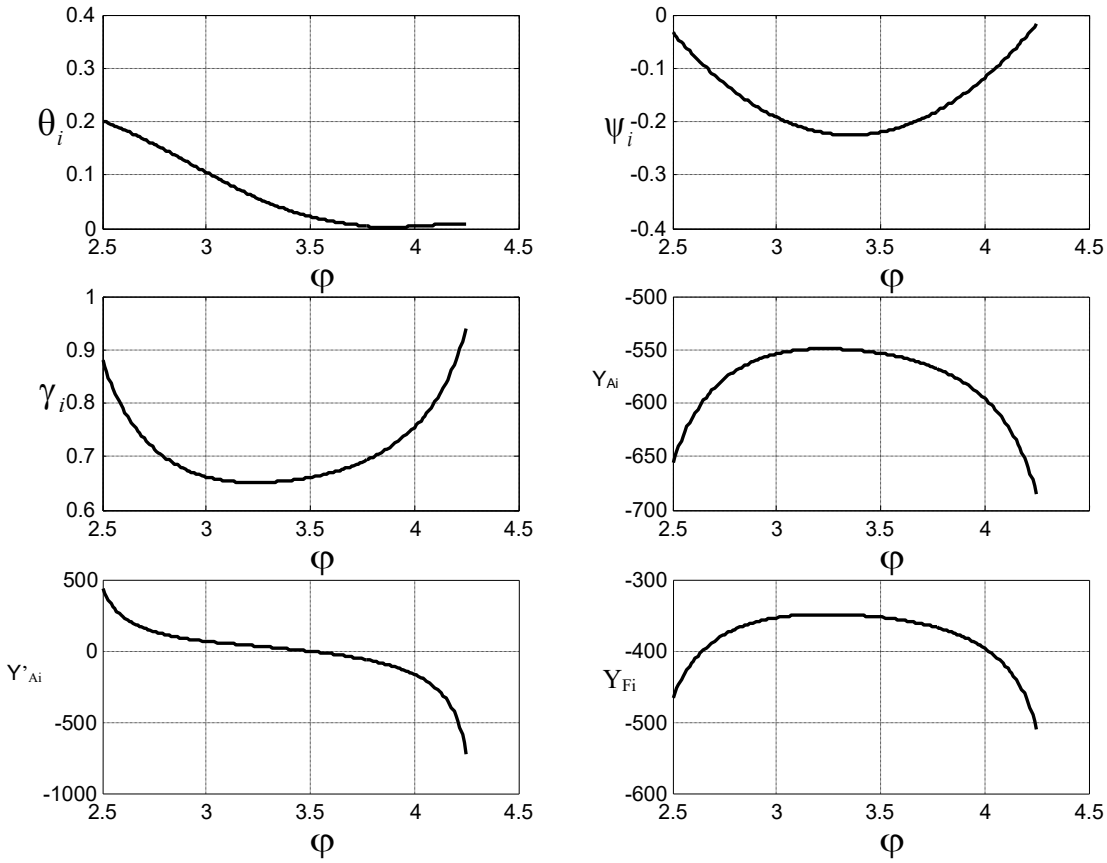
$$(16)\quad b = (X_{K_1} - X_{F_i})^2 + Y_{F_i}^2 + (Z_{K_1} - Z_{F_i})^2 - (X_{K_1} - X_{F_1})^2 - (Y_{K_1} - Y_{F_1})^2 - (Z_{K_1} - Z_{F_1})^2$$

Функцията на положението на рапира ще бъде:

$$(17)\quad Y_{A_i} = 2.Y_{F_i} - Y_{K_i}$$

След последващо цифрово диференциране, се определя и първата преводна функция.

***Пример:*** Да се определят: функцията на положението и първата преводна функция, да се изчертаят съответните графики на функциите на механизма от *фиг.1* задвижващ рапирите на стан "MAV" при зададени координати на центровете на кинематичните двоици посочени на кинематичната схема в началното им положение




***От Фиг. 2. до Фиг. 7.***

а именно: $X_{G_1}$ = -75,6 mm; $Y_{G_1}$ =0 mm; $Z_{G_1}$ =65,46 mm; $X_{H_1}$ =17,6 mm; $Y_{H_1}$ =0 mm; $Z_{H_1}$ =9,5 mm; $X_b$ =480 mm; $Y_b$ =0 mm; $Z_b$ = -600 mm; $X_m$ =100 mm; $Y_m$ = -100 mm; $Z_m$ = -100 mm; $X_{C_1}$ =480 mm; $Y_{C_1}$ = -100 mm; $Z_{C_1}$ = -399,44 mm; $X_{D_1}$ =480 mm; $Y_{D_1}$ = -100 mm; $Z_{D_1}$ = -59,44 mm; $X_{E_1}$ =480 mm; $Y_{E_1}$ = -360 mm; $Z_{E_1}$ = -159,44 mm; $X_{F_1}$ =480 mm; $Y_{F_1}$ = -600 mm; $Z_{F_1}$ = -380 mm; $X_{K_1}$ =480 mm; $Y_{K_1}$ = -670 mm; $Z_{K_1}$ = -600 mm. Началната ъглова ориентация на звено 1 е $\varphi_0 = 139{,}11°$.

След въвеждане на алгоритмите и началните условия, посочени в условието на примера, се извърши анализ на механизма. Той е извършен за интервала между двете крайни положения на ватала $(2{,}418 \le \varphi \le 4{,}83)$.

На *фиг.2* е показана графиката на функцията на положението $\theta = \theta(\varphi)$, на ШЧМ (звена 1,4,5).

На *фиг.3* е изчертана графиката на функцията на положението $\psi = \psi(\varphi)$ на гърбичния механизъм, който осигурява престоя на нишката и вътъка и връщането им в изходно положение. На *фиг.4* е показана графиката на функцията на положението $\gamma = \gamma(\varphi)$, на КММ (звена 3, 6 и 9). На *фиг.5* е изчертана функцията на положението $Y_A = Y_A(\varphi)$ , а на *фиг.6* – първите преводни функции $Y'_A = Y'_A(\varphi)$, на механизма за задвижва-не на рапирите.

Натрупаните масиви от данни дават възможност да се определят кинематичните параметри на звената и двоиците на механизма, ако изследванията налагат това.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направен е кинематичен анализ на механизма за задвижване на рапирите, като са определени функцията на положението и преводните функции посредством векторно матричния метод и методите за цифрово диференциране в Math LAB 6 for Windows.

Както се вижда от направения анализ, скоростта на прекарване на вътъчната нишка за един работен цикъл два пъти променя стойността си от нула до максимум и обратно. Това е неблагоприятно за технологичния процес и води до повишена късливост на нишката. Това се избягва, като се синтезира нов профил на гърбиците с подходящи предавателни функции и се дефазира работата на двата механизма.

## REFERENCE


[1] **Dzhivanov K., Goranova R., Kabadjov A.,** Non-classical weaving machines, Technology, 1978.

[2] **Marinov M.,** Synthesis of planar mechanisms by finitely distant discrete positions. Author's abstract of a dissertation for obtaining a scientific and educational degree "PhD" - TU Sofia 2002, p.36.

[3] **Marinov M.,** Synthesis of planar SCMs by discrete positions "Mechanics of Machines" 1999. page 67.

[4] **Rusev, R.,** Structural and metric synthesis of mechanisms for weaving machines, Author's abstract of a dissertation for obtaining the degree of " PhD", TU - Sofia, 2002, 31 pages.

[5] **Kevorkyan A.,** Textile material science and testing, Sofia, Technica, 1977.

[6] **Artobolevsky I. I.,** Theory of Mechanisms, Nauka, Moscow, 1967.

[7] **Harrisberger, L.,** Review of methods of structural synthesis of three-dimensional mechanisms, construction and technology of mechanical engineering, Mir, 1965.

НАПРАВЛЕНИЕ 7

# ХИДРАВЛИКА, ПНЕВМАТИКА И ТОПЛОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА, МЕТРОЛОГИЯ И УПРАВЛЕНИЕ НА КАЧЕСТВОТО

SESSION 7

# HYDRAULICS, PNEUMATICS AND HEAT ENGINEERING AND MECHATRONICS, METROLOGY AND QUALITY MANAGEMENT

# CHANGING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF FIRE HOSES WHEN THEY TRANSPORT WATER

**Stas S. V., Kolesnikov D. V., Bychenko A. O., Horenko L. M.**

*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Defence of Ukraine*

**Abstract**

*Main hose lines are usually laid to transport water and working solutions of foaming agents to the centre of the fire when extinguishing large fires or fires with remote water sources. Their components are separate pressure fire hoses, they come in different diameters. As a result of their operation during the transportation of fire-extinguishing substances, fire hoses can change their geometric parameters, first of all, their length. For different types of hoses and their different diameters, it was revealed that their elongation occurs under hydrodynamic pressure. In some cases, when using a plug at the end of a fire hose, the coefficient of relative elongation of fire hoses was 1.04. 3 types of hoses were used for the research: latex pressure hoses with diameters of 51 mm 77 mm type T and fire hoses with double-sided polymer coating with 51 mm type T. All hoses were previously used during the real work of fire calculations. The results presented in the paper are an average of each of the three hose types. The experiments were carried out under typical conditions in the open air using a Protek 366 fire barrel under constant fluid flow and different pressure values at its entrance. Fire hoses were placed on a horizontal surface. The amount of fire hoses elongation when transporting water depended on the physical and mechanical properties of the materials from which they are made, the pressure of the liquid at their entrance, and the flow rate. The maximum elongation (62 cm with a hose length of 1960 cm, the relative extension was 0.032) was recorded when transporting water with a fire hose with a diameter of 77 mm at a pressure at its entrance of 1.0 MPa and a flow rate of 1.9 l/s, the issue of changes in head loss along the length were not considered. There were no significant changes in the diameters of fire hoses.*

**Keywords:** fire hose, hose line, water transportation, fire extinguishing liquid.

When using fire hoses, the same phenomena are observed that are characteristic of ordinary pipelines, such as loss of pressure along the length, water hammer, etc. In firefighting, special attention is paid to pressure losses along the length of hose lines, Actually, the size of hose lines is limited both by the capabilities of fire pumps and by pressure losses in hose lines. The study of the parameters of fire hoses when they transport fire-extinguishing liquids is complicated by the significant expansion of the nomenclature of the types of hoses used.

At the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, a study of the behaviour of fire hoses during the delivery of extinguishing agents was carried out [1]. Firstly, the issues of changing their geometric parameters, namely lengths and diameters, were studied. The paper [1] presents the results of measuring the main geometric parameters of several types of fire hoses during water transportation (their outer diameter and length). 3 types of hoses were used, the samples were randomly selected, and all hoses were previously used during the work of fire calculations. 6 units of each type of hose were taken. The results presented in [1] are an average for each of the three types of hoses. The most significant value of change in length using a plug at the end of a fire hose (without using a PROTEK 366 fire barrel) was recorded when generating a flow of extinguishing liquid for hoses with a diameter of 77 mm at an inlet pressure of 0.8 MPa. The change in length averaged 790 mm, and the relative elongation was 0.04 with an average initial hose length of 2011 cm [1].

The results mentioned above of the study of the fire hoses' behaviour during the delivery of fire extinguishing substances [1] were carried

out without the use of a jet-forming device - a fire barrel, which to some extent distorted the value of actual changes in the geometric parameters of the hoses when they were used during firefighting.

## ANALYSIS THE LATTER ACHIEVEMENTS AND PUBLICATIONS

To correct the situation, it was decided to use fire barrels, which are widely used by practical units of the operational and rescue service of the State Emergency Service of Ukraine - PROTEK 366 barrels.

According to the data of the official representative of the Protek company in Ukraine [2], the PROTEK 366 fire hydrant has 4 fixed flow values, allowing to rationally regulate the flow of liquid (water) from 1.9 to 7.9 l/s (115–230–360–475 l /min) and the shape of the jet depending on the operating conditions. At the same time, the actual avoidance of excessive water consumption is achieved by combining the parameters of type A and B barrels with barrel protection, i.e., functioning in full spray mode as a "protective screen" [2].

Although the phenomenon of "stretching" of fire hoses when transporting fire-extinguishing liquids is known, taking into account the amount of elongation can be helpful for firefighters when creating new fire extinguishing means [3, 4] in automatic water fire extinguishing systems [5, 6], and when using fire extinguishers hoses [7] or special fire barrels and nozzles [8, 9], or, for example, in cases of modelling the three-dimensional behaviour of hydraulic hoses under pressure when transporting certain liquids [10].

## EXPOSITION

Calculation mechanisms of pump-hose systems based on hydraulic calculation methods must consider such features of pressure hoses as changes in their diameters and lengths during the transportation of fire-extinguishing substances to the device for forming a jet, for example, a fire barrel or attachments [1]. It is essential that in work [1], there was some, albeit insignificant, thickening of the sleeves, but in practice, both their diameter increase and a narrowing were recorded. At the same time, the values of diameter changes remained within the margin of error of the chosen measurement method.

To calculate pressure losses in fire hoses, the value of the specific hydraulic resistance of one meter of a fire hose of a particular diameter and the weight of the hydraulic resistance of a standard fire hose with a length of 20 meters of a specific diameter is used. For practical calculations, the value of the hydraulic resistance of one fire hose is most often used [1].

Fire hoses were randomly selected for the experiments: pressure fire latex hoses with a diameter of 51 mm; compression latex fire hoses with a diameter of 77 mm, type T; pressure fire hoses with double-sided polymer coating 51 mm type T. 6 units of each of the three selected types of hoses were taken. Next, the results of the experiments for the averaged values of the geometric parameters of each hose type are presented. The research were conducted under normal conditions at a temperature of about 20 ºC on a horizontal surface.

As in previous studies [1], we do not indicate the manufacturers of fire hoses but only their type. The main difference in the conduct of these experiments concerning [1] was the use of the PROTEK 366 fire barrel in different modes of its application in the formation of a continuous water jet. According to the four fixed values of the liquid flow rate for the PROTEK 366 fire barrel, 1.9 – 3.8 – 6.0 – 7.9 l/s (at a nominal pressure of 0.7 MPa) were selected. The studied hoses were located on a horizontal surface after a 20 m long hose was connected to a fire truck.

During experiments using the PROTEK 366 fire barrel, the constancy of the liquid flow was ensured, and the modes of "protective screen" and washing were not used. The barrel "worked" in forming a continuous jet of constant flow within each experiment.

The thicknesses and lengths of pressure fire hoses were measured identically according to previous studies (Fig. 2) [1].



***Fig. 1.*** *Study changes in the geometric parameters of fire hoses when using the PROTEK 366 fire barrel.*

As a result of the conducted research, it was established that the thickening of the hose was insignificant. Moreover, in some cases narrowing of the hose was recorded. However, according to the methods of carrying out the measurements and the tools used, it can be assumed that the established values of changes in diameters did not exceed the measurement errors.

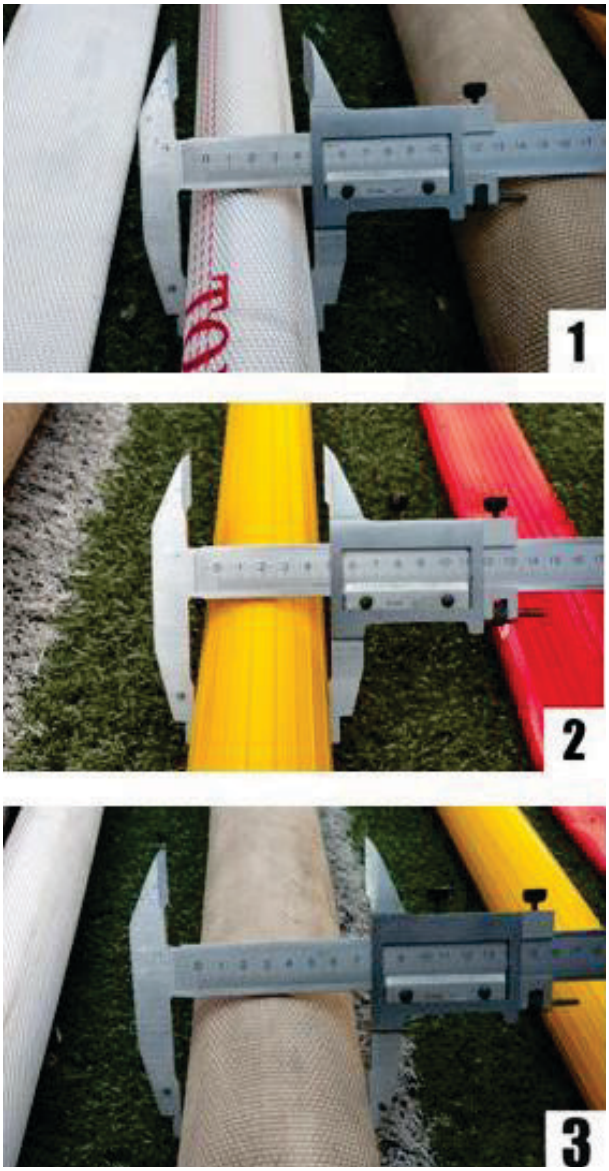



***Fig. 2.*** *Determination of the geometric parameters of the investigated fire hoses (change in diameter),*
*1 – pressure fire latex hose with a diameter of 51 mm, type T;*
*2 – pressure fire hose with double-sided polymer coating 51 mm, type T;*
*3 – pressure latex fire hose with a diameter of 77 mm, type T [1].*

Therefore, it can be assumed that the diameters of the fire hoses selected for research remain unchanged in the entire range of applied pressures and consumption of the fire extinguishing agent - water.

According to the technical characteristics of the PROTEK 366 fire hydrant, the water flow

rate was chosen discretely as 1.9 – 3.8 – 6.0 – 7.9 l/s (115 – 230 – 360 – 475 l/min), and the pressure in front of the hydrant was 0.2 – 0.4 – 0.6 – 0.8 – 1.0 MPa.

The results of experiments for three types of fire hoses are presented in Fig. 3.

The maximum elongation was recorded when generating a flow of a fire-extinguishing liquid using a hose with a diameter of 77 mm at a pressure at its inlet of 1.0 MPa and a flow rate of about 1.9 l/s. The change in length was 620 mm (Fig. 4). Thus, for this hose, the relative elongation was 0.032 (the length of the studied hose is 1960 cm). Note that according to the current DSTU 9069:2021 "Fire-fighting equipment. Fireman's hoses are flat-folded for fire-rescue vehicles. General requirements and test methods" even the most among the relative elongation values determined in the study (0.032) corresponds to the current requirements for the use of fire hoses.

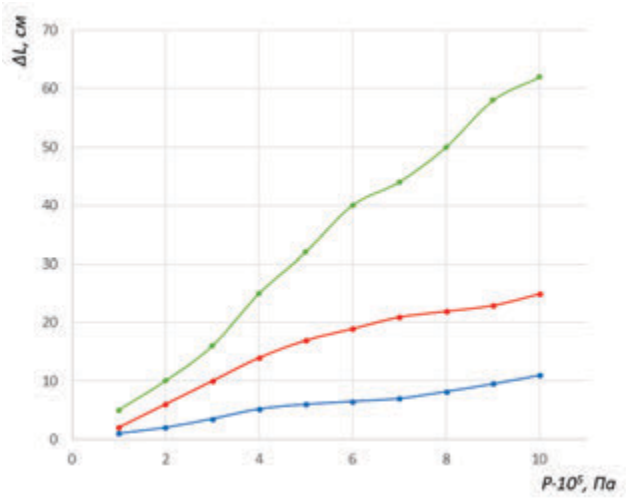



***Fig. 3.*** *The pattern of changes in the lengths of the investigated fire hoses when using the PROTEK 366 fire barrel,*
*1 – pressure fire latex hose with a diameter of 51 mm, type T;*
*2 – pressure latex fire hose with a diameter of 77 mm, type T;*
*3 – pressure fire hose with double-sided polymer coating 51 mm, type T.*

In the future, it is planned to test the investigated types of hoses for maximum tension without transporting water, possibly using a burst testing machine with electrohydraulic or electromechanical load devices.

Such studies are intended to contribute to the determination of some optimal modes of operation of fire hoses, since their longitudinal stretching and thickness stretching/contraction during the transportation of liquids, together with mechanical damage during service, eventually lead to their failure.

The picture of the change in the length of the pressure latex fireman's hose with a diameter of 77 mm, type T, when using the PROTEK 366 fire barrel is presented in Fig. 5.

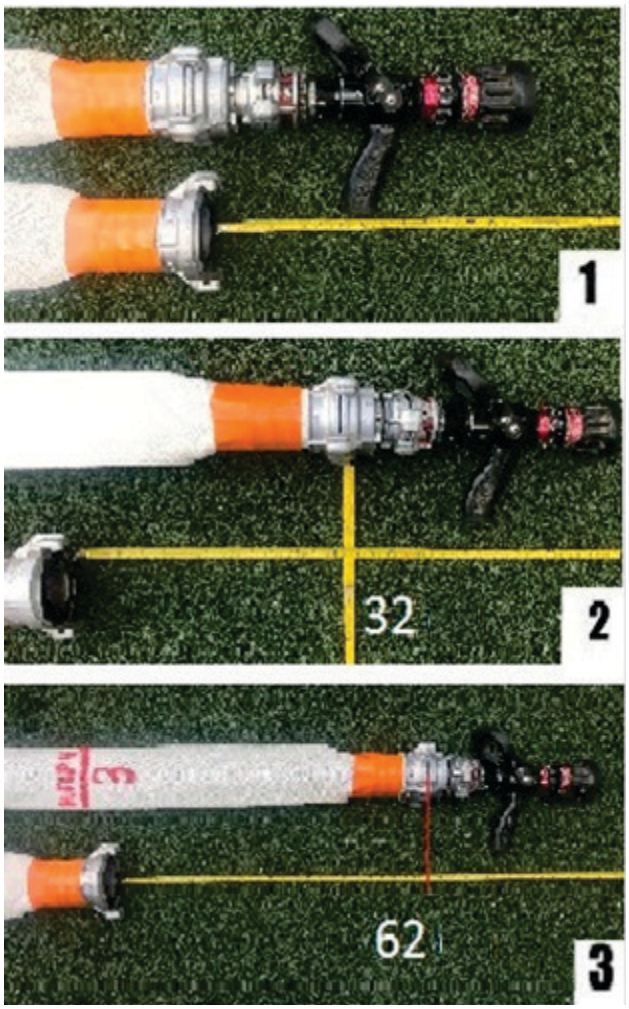



***Fig. 4.*** *Measurement of the geometric parameters of pressure latex fire hoses with a diameter of 77 mm, type T (changes in length) when using the PROTEK 366 fire barrel,*
*1 – fixation of the initial state;*
*2 – a comparative increase in the size of the hose at a flow rate of 475 l/min and a pressure of 1.0 MPa;*
*3 – a relative increase in the length of the hose at a flow rate of 115 l/min and a pressure of 0.4 MPa.*

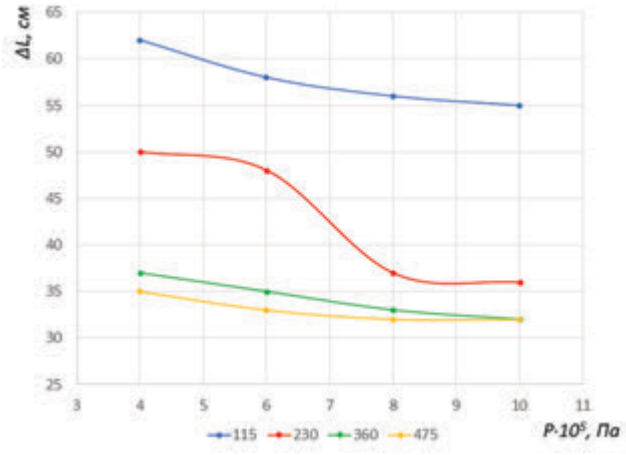



***Fig. 5.*** *Picture of the change in the length of the pressure latex fireman's hose with a diameter of 77 mm, type T, when using the PROTEK 366 fire barrel.*

Under the recommendations for the use of the investigated types of hoses, the value of the maximum pressure at the entrance of the PROTEK 366 fire barrel did not exceed 1.0 MPa. A further increase in the pressure value does not affect the growth in the range of the water jet generation. Therefore it does not make practical sense for this type of fire barrel and will most likely lead to a further lengthening of the hoses.

## CONCLUSION

1. The conducted experiments made it possible to state minor changes in the diameters of the investigated fire hoses, which do not significantly impact the process of transporting fire extinguishing liquids to fire barrels or nozzles. In addition, the established values of diameter changes did not exceed the measurement error values.
2. The facts of the lengthening of the investigated fire hoses have been established. The maximum change in length was observed when using a plug at the end of the hose line and gradually decreased with the increasing flow rate of the fire barrel under the condition of a constant pressure value. Thus, it can be stated that in connection with the change in consumption, there is a longitudinal deformation of the fire hose, which is related to the physical and mechanical properties of the material from which it is made, primarily its elasticity. Another reason for the lengthening of the fire hose is the manifestation of hydrodynamic pressure, as a quantity characterized by the arithmetic mean value of the sum of normal stresses in the liquid.
3. The maximum elongation was recorded when generating a flow of a fire-extinguishing liquid using a hose with a diameter of 77 mm and a length of 1960 cm at a pressure at its inlet of 1.0 MPa and a flow 1.9 l/s, which meets the requirements of current regulations on the operation of fire hoses (the relative elongation was 0.032).
4. The amount of extension of fire hoses when transporting fire-extinguishing liquids (water in the conducted research) depends on the physical and mechanical properties of the materials from which they are made, the fluid pressure at their entrance and consumption. The temperature dependence of the change in the geometric parameters of fire hoses when using the PROTEK 366 fire barrel was not investigated.

## REFERENCE

[1] Stas S. V. Eksperymentalne doslidzhennia zminy heometrychnykh parametriv pozhezhnykh rukaviv pid chas podachi vohnehasnykh rechovyn / S. V. Stas, A. O. Bychenko, D. V. Kolesnikov, O. I. Myhalenko, M. O. Pustovit. // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu" KhPI". Seriia:" Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty". – 2021. – №2. – S. 39–42. https://doi.org/10.20998/2411-3441.2021.2.06.

[2] Ruchnyi kombinovanyi stvol 366. Ofitsiinyi predstavnyk Protek v Ukraini. URL: http://protekfire.com.ua/products/ruchnyie-stvolyi/ruchnoy-kombinirovannyiy-stvol-366.html (дата звернення: 04.07.2022).

[3] Hisato Ando, Yuichi Ambe, Tomoka Yamaguchi, Yu Yamauchi, Masashi Konyo, Kenjiro Tadakuma, Shigenao Maruyama & Satoshi Tadokoro (2020) Fire extinguishment using a 4 m long flying-hose-type robot with multiple water-jet nozzles, Advanced Robotics, 34:11, 700-714 https://doi.org/10.1080/01691864.2020.1769723.

[4] Snytiuk V.Ie., Tymchenko A.A., Stas S.V. Evoliutsiina paradyhma proektuvannia tekhnichnykh system // Cherkasy: Visnyk Cherkaskoho inzhenerno-tekhnolohichnoho instytutu. – 2001. – № 4. – S. 104–108.

[5] Stas S., Maglyovana T., Nyzhnyk T., Kolesnikov D., Strikalenko T. Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, vol. 1, no. 10 (103), pp. 20–25. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196881.

[6] Stas' S. V. Analiz gidrodinamicheskikh kharakteristik potoka zhidkosti v spetsial'nykh pozharnykh stvolakh i nasadkakh shchelevogo tipa [Analysis of the hydrodynamic characteristics of fluid flow in special fire nozzles and slot-type nozzles]. Visnyk Nats. tekhn. un-tu Ukrayiny "KPI". Seriya: Mashynobuduvannya [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series: Engineering]. Kiev, NTUU "KPI" Publ., 2009, no. 57, pp. 139–142.

[7] Yakhno O., Stas S., Gnativ R. Taking into account the fluid compressibility at its unsteady flow in pressure pipelines of fire extinguishing systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015, vol. 3, no. 7 (75), pp. 38–42. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42447.

[8] Yakhno O. M., Seminskaya N. V., Kolesnikov D. V., Stas S. V. Destabilizatsiya potoka v kanale s izmenyayuschimsya po dline rashodom [Destabilization of flow in the channel with variable flow length]. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. 2014, vol. 3, no. 7 (69), pp. 45–49. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24658.

[9] Stas S. V. Osobennosty raspredelenyia skorosty y davlenyia vodianoi struy na vыkhode yz pozharnoho stvola yly nasadky / S.V. Stas, O.M. Yakhno, E.V. Lavrukhyn. // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu" KhPI". Seriia:" Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty". – 2020. – №1. – S. 31–35. https://doi.org/10.20998/2411–3441.2020.1.05.

[10] Païdoussis, M. P., 2008. The canonical problem of the fluid-conveying pipe and radiation of the knowledge gained to other dynamics problems across applied mechanics. Journal of Sound and Vibration 310, 462–492. https://doi.org/10.1177/1687814020916110.

[11] Minas, S, Paidoussis, MP. Experimental and analytical investigation of hanging tubular cantilevers with discharging axial and radial flow. In: ASME 2017 international mechanical engineering congress and exposition, Tampa, FL, 3–9 November 2017, paper no. IMECE 2017-70446. https://doi.org/10.1115/IMECE2017-70466.

# EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR RESEARCHING THE EFFICIENCY OF THE COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE SYSTEM

**Oleksandr Haletskyi**[1]

[1] *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*

**Abstract**

*Previously, the author proposed a compressed air energy recovery system that can be used for road transport. To confirm the effectiveness of the proposed system, it became necessary to build experimental equipment. In this work, it is shown that the principal diagram of the compressed air energy storage system has been developed, which, due to the use of a special pneumatic distributor, allows implementing the volumetric control principle with the possibility of computer or controller control. The system creates potential opportunities for functional flexibility and energy efficiency. Experimental equipment was developed as a result of the conducted research. The use of equipment will make it possible to bring the conditions of research into the effectiveness of the compressed air energy storage system as close as possible to real operating conditions.*

**Keywords:** recuperation; compressed air; experimental equipment; energy efficiency; functional flexibility.

## INTRODUCTION

Modernity presents a fairly wide range of applications of various types of energy and their combinations for the needs of mankind. One of the types of energy carrier in industry is compressed air, the volume of its use in Ukraine is up to 30%. The use of this type of energy carrier has both advantages and disadvantages. The advantages include: local environmental friendliness, purity of the energy carrier, high speed, the possibility of transmitting signals over long distances, and others. The main drawback is the low energy efficiency of systems that use compressed air as a working medium. [1, 2]

The use of compressed air in mobile machines or vehicles also has advantages and disadvantages. The main drawback is the low energy efficiency of the systems. But for air compression in such machines, it is desirable to reduce the energy use of hydrocarbon-based fuel as much as possible. This causes a rather significant increase in emissions of harmful substances. Therefore, it is quite urgent to use devices and systems that allow to increase the energy efficiency of mechanisms that work on the energy of compressed air. [1, 2, 3]

## EXPOSITION

Consider the module for recuperating mechanical energy into compressed air energy for vehicles [1, 2, 3, 4], it turned out that such recuperative braking modules theoretically allow to accumulate energy in the form of pneumatic energy and further use it for the needs of low-pressure pneumatic systems. Also, the use of a more complex compressor, which can work in the mode of a pneumatic engine and low-pressure receivers, will allow to partially reduce the load on the engines when the vehicle moves.

Using generally available data on the technical characteristics of vehicles [3]. After carrying out calculations and modeling of the compressed air energy recovery process, it was established that the accumulated energy during vehicle braking will amount to 33,680 kJ. At the same time, it is possible to reuse 21,000 kJ, which is 8.95% of the energy spent to accelerate the vehicle. Previous studies show that 70-90% of the energy used to accelerate the vehicle during braking, without the use of energy recovery, is converted into heat and dissipated into the environment.

It is proposed to introduce a kinetic energy recovery module into compressed air energy.

A preliminary calculation showed the effectiveness of the proposed system up to 8.5% of the energy spent to move the vehicle [4].

A special 3/2 flow distributor including a pressure valve has been developed for the compressed air energy storage module. This makes it possible to control the pressure in the pneumatic line in front of the pressure valve, which allows the pneumatic air energy module (Fig. 1) to ensure a constant load at the moment of breaking the axles of the drive wheels.

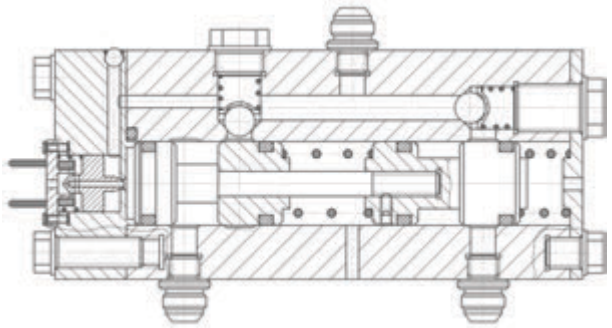


***Fig. 1.*** *Pneumatic distributor with pressure bypass valve*

In the initial position, pneumatic energy is supplied to the pressure valve, which is implemented together with the cylindrical spool. Adjustment of the degree of load is realized by a small distance from the compressor and placing the pressure valve on the spool of the pneumatic distributor. When switching the distributor, the accumulated compressed air from the receiver is fed into the pneumatic network [4, 5, 6, 7].

The use of the proposed pneumatic distributor in the module significantly reduces the number of elements in the module system, its dimensions, and makes the recuperation system cheaper, due to the reduction of auxiliary parts for a sharp increase in the load on the axles of the drive wheels (Fig. 2).

The system works as follows: accumulated pneumatic energy from the compressor enters the receiver through a special distributor with a pressure valve. In turn, it provides the initial effort, that is, the pipeline from the compressor to the entrance to the distributor will always have the initial pressure. This ensures a constant load on the compressor shaft. Depending on the amount of pressure in the main line to the pneumatic distributor, the braking intensity of the drive wheels of the vehicle changes. When using the accumulated pneumatic energy, the distributor is switched and compressed air from the receiver is supplied to the vehicle's on-board network.

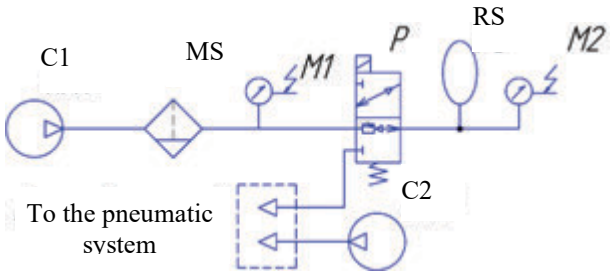



***Fig. 2.*** *Schematic diagram of the compressed air recovery system module*
*(C1, C2 - compressor, MS - moisture separator filter, P - special distributor, M1, M2 - pressure gauge, RS - receiver.)*

In order to correctly assess the functionality of the proposed system, it was necessary to develop an experimental stand. The experimental stand (Fig. 3) is designed for the practical solution of energy reuse problems in pneumatic systems. The work of the stand is to convert the simulated kinetic energy of movement during the operation of the recuperation system into the energy of compressed air.

The braking process is implemented using the load of the hydraulic motor, which is fixed by an electric clutch with the compressor, by changing the revolutions of the hydraulic motor, we change the operation of the compressor.

The experimental stand is designed with: pneumatic energy storage system compressor C1, mobile machine compressor C2, filter moisture separator MS, pneumatic distributor 2/3 with pressure valve P1, hydraulic distributor 2/4 with proportional control P2, pressure gauge M1 - M5, receiver RS, pump station PS, motor M, pressure valve PV, valve Fa, check valve RV, filter F, tank T.

The hydraulic part ensures the braking process, with the help of a 2/4 hydraulic distributor with proportional control, which supplies liquid to the tank, and the other part through the system further to the pressure valve, with the help of which we change the pressure in the compressed air energy storage system and set the load on the hydraulic motor

changing its rotation frequency.

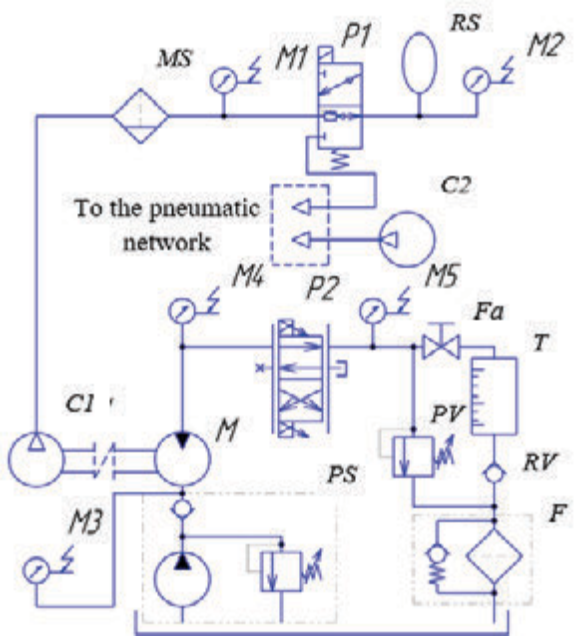



***Fig. 3.*** *A stand for researching the effectiveness of the system for converting kinetic energy into compressed air energy*
*(C1 – compressor, C2 – mobile machine compressor, MS – moisture separator filter, P1 – pneumatic distributor 2/3 with pressure valve, P2 – hydraulic distributor 2/4 with proportional control, M1 – M5 – manometer, RS – receiver, PS – pump station, M – motor, PV – pressure valve, Fa – faucet, RV – non-return valve, F – filter, T – tank)*

During the development of the stand, the necessary calculations of hydraulic and pneumatic components were carried out. This made it possible to choose pneumatic and hydraulic equipment of the necessary characteristics to ensure the flexibility of the laboratory stand. High flexibility allows conducting field studies in wide ranges of input parameters of the system.

## CONCLUSION

The developed experimental stand will allow to evaluate the efficiency of the compressed air energy recovery module.

The proposed method of combining different types of energy carrier allows to evaluate the efficiency of the compressed air energy recovery module in a wide range. This will make it possible to choose rational modes of operation of the recuperation system and, due to the control of the controller, ensure higher efficiency of the system.

## REFERENCE

[1] Gavva, O. Scientific bases of method of synthesis for the structure of machines that provide packing process by foodstuffs / O. Gavva, L. Kruvoplyas-Volodima, M. Maslo // Ukrainian Journal of Food Science. – 2014. – #2 – p. c 96.

[2] Deremed V.S. The feasibility of using pneumatic energy recovery in railway transport/ V.S. Deremed, O.S. Galetsky // theses of the report All-Ukrainian scientific and technical conference of young scientists and students "innovations of youth - mechanical engineering" // Kyiv – 2017

[3] Deremed V.S. Kinetic energy recovery system into compressed air energy for vehicles / V.S. Deremed, O.S. Galetsky // theses of the report All-Ukrainian scientific and technical conference of young scientists and students "innovations of youth - machine building" // Kyiv – 2018.

[4] Deremed V.S. Experimental stand for researching the efficiency of the system of converting kinetic energy into energy of compressed air / V.S. Deremed, O.S. Galetsky // theses of the report All-Ukrainian scientific and technical conference of young scientists and students "innovations of youth - mechanical engineering" // Kyiv – 2019.

[5] Sukhovi O.O. Modernization of the laboratory stand for the study of a piston pneumatic drive with a compressed gas energy storage system / O.O. Sukhovi, O.S. Galetsky // theses of the report All-Ukrainian scientific and technical conference of young scientists and students "innovations of youth - machine building" // Kyiv – 2018

[6] Uzunov A.V. Cyclic-modular approach to the problem of modeling objects with hydraulic components. Industrial hydraulics and automation. All-Ukrainian Scientific and Technical Bulletin. No. 1(23) 2009

[7] Gorchakova O.M. Study of the effectiveness of the pneumatic drive with the function of energy recovery in packaging equipment devices / O.M. Gorchakova, M.V. Yakymchuk, L.I. Ivanova // Food Industry No. 20 – 2016

# GEROTOR PUMP OF VARIABLE PERFORMANCE

**Oleksandr Haletskyi**[1]
**Oleksandr Yukhymchuk**[1]

[1] *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*

**Abstract**

*The essence of the work is to develop a fundamentally new design solution for the gerotor pump to improve its energy efficiency and technical performance. The main idea is to provide variable performance of the pump in order to expand its possibilities of use and maintain high energy efficiency in different operating modes of the system. Also, one of the main tasks is the expanded use of the pump in various industries, which will make it possible to reduce the costs of energy resources in mechanical engineering and mobile technology, as a result of which the saving of energy resources will be ensured in systems where the gerotor pump is used.*

**Keywords:** hydraulic pump; gerotor pump; variable productivity; energy efficiencies; industry; mobile equipment.

## INTRODUCTION

Gerotor pumps are used in the automotive industry, in agricultural machinery, as well as in special machinery. When using gerotor pumps to ensure high energy efficiency, it is necessary to ensure a stable rotation frequency of the pump shaft. But modern systems are quite flexible, which makes it necessary to operate the pump in an inefficient mode. Therefore, the development and creation of a gerotor pump of increased efficiency is an important decision. The proposed design is considered based on the operation of an internal combustion engine, but may have extended applications.

The gerotor pump is a gear pump with an internal gear without a separate sickle-shaped segment, the gears are located with the appropriate eccentricity. The inner gear always has one less serrature than the outer gear. [1]

In the automotive industry, it is used as an oil pump for the internal combustion engine oiling system. In agricultural machinery, is often used as a pump-dispenser for the hydraulic control system of a tractor [2]. In the construction industry, such pumps are mainly used for pumping polystyrene concrete, paint and plaster mixes, floor pouring and similar work [3]. The use of this type of pump in a wide range of machines, mechanisms, and equipment shows the feasibility of finding ways and methods to increase the energy efficiency of the gerotor pump.

## EXPOSITION

Since technological processes require a variable pump supply, which is currently implemented by changing the frequency of rotation of the input shaft of the pump, it leads to the manifestation of the main drawback of the gerotor pump. We propose to realize structurally combined two gerotor pumps. The idea is to use a small pump to ensure the supply of working fluid to the system when the needs are close to the minimum and the possibility of connecting a large pump. Pumps can be connected in two ways: in an axial connection and in a radial connection. Placement in an axial connection is possible provided the radial size of the pump is preserved. Nevertheless, the use of a combination of radial pumps is preferred (Fig. 1). Such a scheme has a slight increase in the overall dimensions of the pump and at the same time it is quite easily arranged in the system of existing mechanisms. [3, 4, 5]

The proposed pump works as follows. A constant rotation frequency is applied to the input shaft of the pump. The input shaft is rigidly connected to the inner rotor of the

small pump. The operation of a small gerotor pump ensures a 10-20% higher supply of working fluid than the minimum.

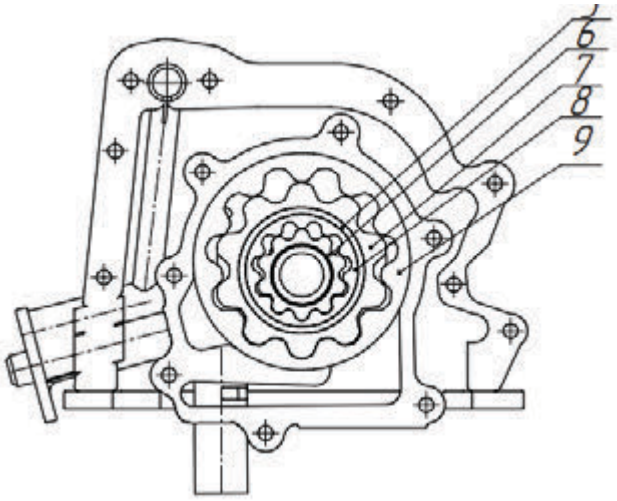



***Fig. 1.*** *Energy-efficient gerotor pump*

At the same time, the outer rotor of the small pump is connected to the inner rotor of the large pump through an electromagnetic coupling. The connection through the electromagnetic coupling allows to implement variable rotation frequency of the rotors of the large pump. As a result, we will get a pump that can be directly controlled by the controller, which will provide quite high flexibility when working as part of a mechanical system. Energy efficiency is achieved due to the constant operation of the small pump in an efficient mode, and when it is necessary to increase the supply of the working fluid, the large pump is turned on.

Also, such a scheme can be inversion. If in the system there is a need to change the supply of the working fluid in a small range of values, then a large pump is rigidly connected to the input shaft of the pump, and a small pump is connected due to an electromagnetic coupling. Such a pump switching scheme significantly increases the energy efficiency of the gerotor pump.

As a result, we get a pump with the ability to adjust the flow of the working fluid, which has a fairly simple design. In turn, such a pump is cheaper to manufacture compared to adjustable axial-piston or radial-piston pumps.

Figure 2 shows the graph of the efficiency of the gerotor pump at the input shaft rotation frequency of 1200 rev/min (a) and 1800 rev/min (b). [4, 5]

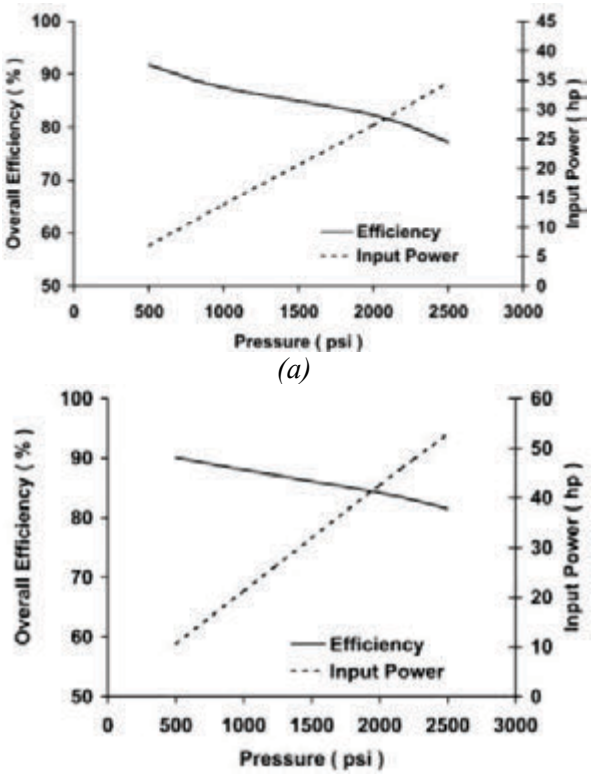



***Fig. 2.*** *Efficiency index of the gerotor pump*

It can be seen from the graphs that the maximum efficiency of the pump is achieved at low pressure values (500 psi) and decreases slightly (by 10%) when the pressure increases by 4 times (up to 2000 psi). At the same time, when increasing the rotation frequency of the pump shaft from 1200 to 1800 rev/min, there is a decrease in the efficiency of the pump by 5% under the same conditions of pressure change.

The above data are valid only with a constant supply of working fluid. If a similar pump is used in the system and at the same time it becomes necessary to change the supply of the working fluid, the efficiency of the pump under the same conditions of pressure change decreases in one case to 30% (at 1200 rev/min), in the other to 22% (at 1800 rev /min).

The calculations of the proposed design of the gerotor pump show an improvement in the efficiency of operation when the supply of the working fluid is changed. Thus, under the above operating conditions, in the case of an additional pump connection, to increase the supply of working fluid, the efficiency of the pump increases to 21% (at 1200 rev/min) and 16% (at 1800 rev/min), when the supply of working fluid is increased by 40%, in

comparison with the classic design of the gerotor pump with similar characteristics.

## CONCLUSION

The increase in efficiency of the proposed design of the gerotor pump has been theoretically confirmed. The increase in efficiency is up to 21% compared to the classic design of the gerotor pump with similar characteristics.

The proposed gerotor pump will increase the efficiency of equipment or mobile machines with the possibility of control from the controller, which will additionally ensure the flexibility of the systems.

## REFERENCE


[1] Stryczek, J., Bednarczyk, S. & Biernacki, K. Gerotor pump with POM gears: Design, production technology, research. Archiv.Civ.Mech.Eng 14, 391–397 (2014). https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.12.008

[2] Y. J. Chang, J. H. Kim, C. H. Jeon, Chul Kim, S. Y. Jung Development of an Integrated System for the Automated Design of a Gerotor Oil Pump. J. Mech. Des. Oct 2007, 129(10): 1099-1105 (7 pages) https://doi.org/10.1115/1.2757629

[3] S. Bednarczyk, J. Stryczek, Z. Zienowicz, Gerotor pumps with plastic gears, Hydraulika i Pneumatyka 5 (2006) 16–19, Available at www.simphip.not.pl.

[4] S. Bednarczyk, K. Biernacki, J. Stryczek, Application of plastics in manufacture of the gerotor pump, in: The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power SICFP'11, May 18–20, Tampere, Finland, vol. 3(4), (2011), pp. 369–383.

[5] Research into ultrasonic and hydrodynamic cavitation phenomena in a hydraulic system / J. Stryczek, P. Antoniak, M. Banaś, P. Stryczek, O. Luhovskyi, V. Kovaliov, D. Kostiuk, O. Jahno // Mechanics and Advanced Technologies. – 2021. – Vol. 5, No. 1. – C. 33-40. https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.1.234496

# EFFECTS OF THE PROJECTILE POSITION INSIDE THE CARTRIGE AND CARTRIDGE THICKNESS ON THE COOK-OFF

**Çiğdem Susantez[1], Kamil Kahveci[1], Oktay Hacıhafızoğlu[1], Hilmi Kuşçu[1]**

[1] *Trakya University Engineering Faculty Mechanical Engineering Department*

**Abstract**

*Cook-off is an undesired situation regarding the accuracy of the shot and accidents. In this study, effects of the thickness of the cartridge and projectile position inside the cartridge on the cook-off phenomena have been investigated numerically by Comsol Multiphysics and Simulation software. Results showed that generally increasing the thickness of the cartridge and placing projectile further back inside the cartridge prolongs the cook-off time.*

**Keywords:** cook-off, barrel, cartridge.

## INTRODUCTION

The power of the firearms shows the power of the armies. Inner ballistics is very important scientific field for the gun design. It models processes inside the barrel in inner ballistic time which is in miliseconds. Studies related to the gun barrel inner temperature and cook-off analysis is very important regarding the inner ballistics.

One of the undesired incident is the cook-off inside the barrel. It is the self-ignition of the propellant and may cause accidents. Işık and Göktaş [1] performed experimental and numerical study related the cook-off of a 7.62 mm rifle. They showed that shot number can be increased without cook-off by increasing the time between two magazines, wall thickness of the combustion chamber and cartridge case. Mishra et.al [2] proposed exponentially decaying heat flux for the numerical modelling of the temperature variation of 155mm gun barrel in their study. They also experimentally validated their model. Suyadnya et. al [3] suggested an experimentally validated numerical study on the heat transfer modelling of a 155mm cannon barrel. They presented the result that the maximum number of shots without cook-off is 27 in 294 seconds (time interval of 10 seconds for a shot and rest time of 6 seconds for every six shots). Akçay and Yükselen [4] applied their numerical, one-dimensional, unsteady heat transfer model on the 7.62mm M60 Machine gun barrel for sustained firing. They obtained convective heat transfer coefficient inside the barrel calculated by internal ballistics and considered temperature dependent gun barrel material in their study.

In this paper, we have numerically solved the unsteady heat transfer problem for the combustion chamber of a 7.62mm barrel during sustained firing. We have also investigated the effects of the cartridge thickness and projectile position inside the cartridge on the cook-off phenomena.

## MATERIAL AND METHOD

Geometry of the investigated region of the combustion chamber is given in Fig. 1. The length of the investigated geometry of the combustion chamber (L) and cartridge (except from the thickness of the primer region which is 1.6mm) are 55 mm and 52.12mm (53.72mm-1.6mm) respectively. Geometric dimensions of the outer surface of the cartridge has been taken for 7.62x54mmR [5]. Geometric dimensions of the combustion chamber has also been obtained from the study of Işık and Göktaş [1] by using Web Plot Digitizer software. Lengths given in Fig. 1 are proportional, their dimensions have also been presented on Table 1.

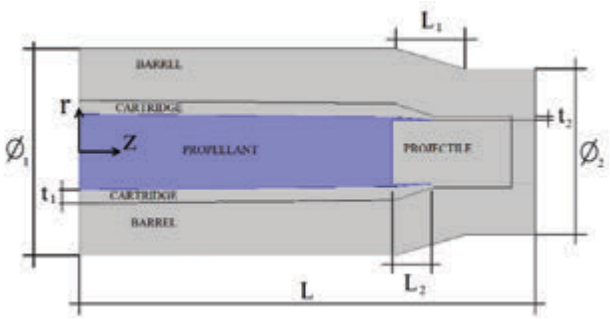



***Fig. 1.*** *Combustion chamber with cartridge*

***Table 1.*** *Dimensions of the investigated geometry*

| **Dimension** | **Value (mm)** |
|---|---|
| L | 55 |
| $L_1$ | 8.4 [1] |
| $L_2$ Investigated parameter | 0 and 5 |
| $t_1$ Investigated parameter | 1.6 and 2.4 |
| $t_2$ measured | 0.455 |
| $\emptyset_1$ | 24.9 [1] |
| $\emptyset_2$ | 20 [1] |

Constant thermopysical properties have been considered for the cartridge, barrel, projectile material and propellant. Thermophysical properties of the materials investigated in this study are presented on Table 2. Barrel is made of AISI 4140 steel [1], cartridge and projectile materials are brass and lead, respectively. WC846 is a popular propellant for the 7.62mm guns [6] and it contains 87% of Nitrocellulose [7]. Consequently, thermophysical properties of the projectile could be taken these of the Nitrocellulose.

***Table 2.*** *Thermophysical properties*

| **Property** | **Value** |
|---|---|
| Thermal conductivity of the barrel $k_{steel}$ (W/mK) | 37.7 [1] |
| Density of the barrel $\rho_{steeel}$ (kg/m$^3$) | 7850 [1] |
| Specific heat of the barrel $c_{steeel}$ (J/kgK) | 519 [1] |
| Thermal conductivity of the cartridge $k_{brass}$ (W/mK) | 111 [1] |
| Density of the cartridge $\rho_{brass}$ (kg/m$^3$) | 8600 [1] |
| Specific heat of the cartridge $c_{brass}$ (J/kgK) | 162 [1] |
| Thermal conductivity of the propellant $k_{\text{propellant}}$ (W/mK) | 0.09 [7] |
| Density of the propellant $\rho_{propellant}$ (kg/m$^3$) | 980 [8] |
| Specific heat of the propellant $c_{propellant}$ (J/kgK) | 1109 [7] |
| Thermal conductivity of the projectile $k_{projectile}$ (W/mK) | 34.7 [9] |
| Density of the projectile $\rho_{projectile}$ (kg/m$^3$) | 11340 [10] |
| Specific heat of the projectile $c_{projectile}$ (J/kgK) | 130 [11] |

The governing equation for the model and related initial and boundary conditions are presented in Eqs. (1)-(7). Eqs (1)-(3) are valid for the whole domains (barrel, cartridge, projectile and propellant) with their thermophysical properties. Eqs. (4) is defined for the outside surface of combustion chamber.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) \quad (1)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=0} = 0 \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=L} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{n} \cdot (-k_{barrel} \vec{\nabla} T) = h_{out}(T - T_{out}) + \varepsilon\sigma(T^4 - {T_{out}}^4) \quad (4)$$

where $\varepsilon$, $\sigma$ and $h_{out}$ are the emissivity of the barrel surface (0.85), Stefan-Boltzmann constant ($5.67 \cdot 10^{-8}$W/m$^2$K$^4$) and outside heat convective coefficient of the barrel (25W/m$^2$K), respectively [1]. Outside medium temperature $T_{out}$ and initial temperature $T_i$ are assumed to be 21°C.

$$T|_{t=0} = T_i \quad (5)$$

Eq. (6) is valid on the contact surfaces of the materials.

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial n} = -k_j \frac{\partial T}{\partial n} \quad (6)$$

where i and j shows the corresponding material which are in contact with the each other.

Inside surface of the combustion chamber is subjected to the heat flux varying with position

and time during multiple shots. Corresponding boundary condition is presented in Eq.(7).

$$-\vec{n} \cdot (-k_{barrel}\vec{\nabla}T) = h_{gas}(T_{gas} - T) \quad (7)$$

While the time for inner ballistics is 1.2ms, time interval between two shots is 1s for the investigated 7.62mm barrel [1].

Inner ballistics is a very short time and it is hard to model the phenomena such a very short time. In fact, the temperature of the combustion gases and heat convection coefficient inside the barrel depends on time and position of the projectile during inner ballistics. As time dependent temperature distribution only for the combustion chamber, not for the whole barrel is investigated in this study, gas temperature and heat convection coefficient inside the barrel as a function of position have been used from the study of Işık [12] for the case of 21°C ammunition. They are also presented on Fig. 2. 21°C ammunition condition is one of the NATO standards [13].

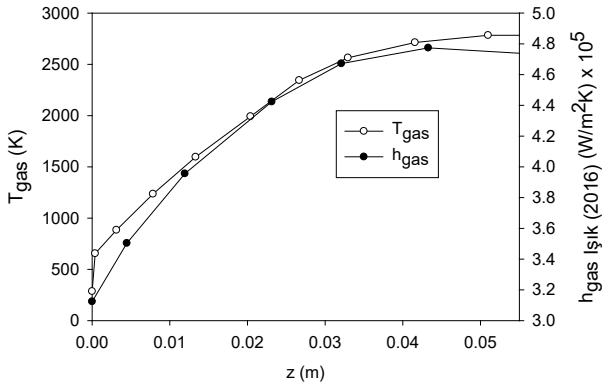



***Fig. 2.*** *Gas temperature and inside heat transfer coefficient form the study of Işık [12]*

As different from other numerical models, in this study gas temperature inside the barrel and inside heat transfer coefficient defined by interpolation function as shown on Fig.3. As it can be seen from Fig. 3, interpolation function rises linearly from 0 to 1 during inner ballistics (1.2m) and decreases linearly from 1 to 0 until the time when second shot starts. Because of this interpolation function defined, heat convection coefficient taken from the study of Işık [12] is not valid in this study. Convenient heat transfer coefficient inside the barrel for this model has been obtained by parametric study, in order to solve this problem. Convenient inside heat transfer coefficient for this study has been obtained as given in Eq. (8).

$$h_{gas} = 2 \cdot 10^{-3} h_{gas\ Işık\ (2016)} \quad (8)$$

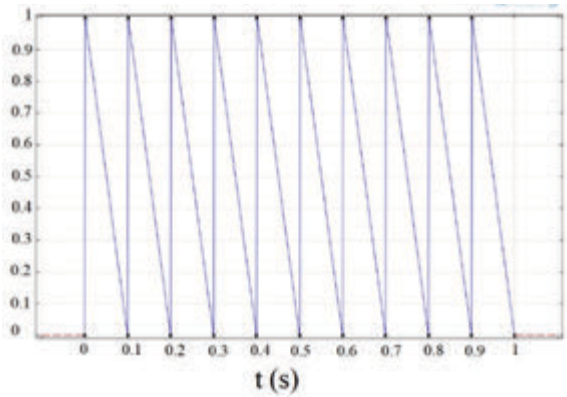



***Fig. 3.*** *Application of interpolation function during successive shots*

Validation of the code has also been shown by Fig.4 by comparing thermal camera measurements on the combustion chamber.

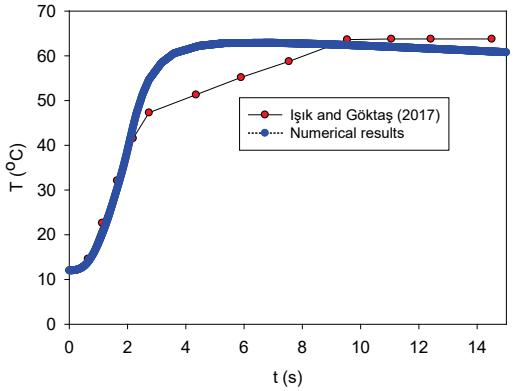



***Fig. 4.*** *Temperature on the combustion chamber (for multiple 20 shots within 2s) [1]*

Mesh dependency analysis for the study was performed as shown in Fig.5. Extremely fine mesh consisting of 6178 triangular elements used in this study.

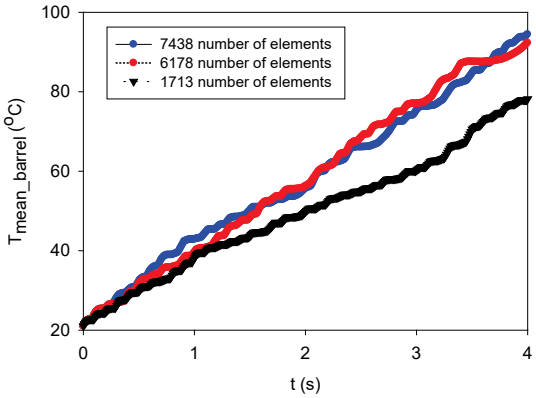



***Fig. 5.*** *Mean temperature of the combustion chamber for successive shots*

## RESULTS AND DISCUSSION

The effect of the cartridge thickness $t_1$ and projectile position inside the cartridge, which is related to $L_2$, on the cook-off phenomena have been investigated by Comsol Multiphysics and Simulation Software.

Firstly, numerical model has been performed for 80 successive shots only for combustion chamber during 8s. After 8s, cartridge with propellant and projectile at the initial temperature is inserted in the hot combustion chamber, waited for a while until the time when the temperature of the propellant reaches the cook-off temperature, which is 173ºC [1]. Fig. 6 shows the temperature simulation at the time when cold cartridge gets in contact with the combustion chamber.

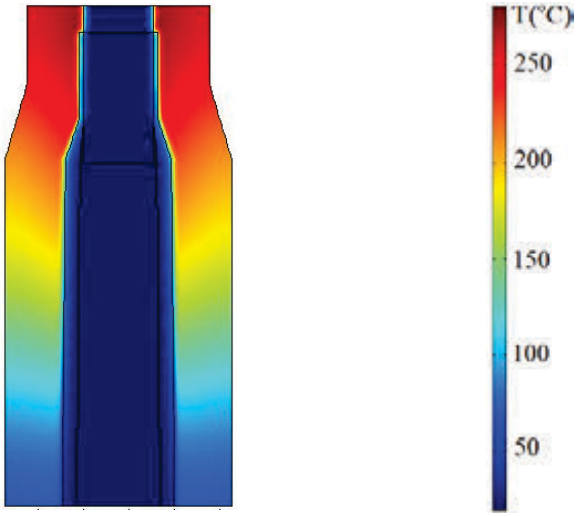



***Fig. 6.*** *Temperature simulation at the t=0s ($t_1$=1.6mm, $L_2$=5mm)*

Fig. 7-10 shows heating behavior of the cartridge with propellant and projectile after 10 seconds of getting contact for the investigated cases. Although the maximum temperature in the region of propellant has exceeded cook-off temperature (173ºC [1]) at this time, it has been easily observed that generally the hot surface which is in contact with the propellant has higher temperature for the cases of thinner cartridge and front positioning of the projectile. On the other hand, as seen on Fig.8, there are two narrow hot regions in contact with the propellant for the case of $t_1$=1.6mm, $L_2$=5mm. It can also be predicted that this increased heat transfer surface will cause cook-off take place previously for this case.

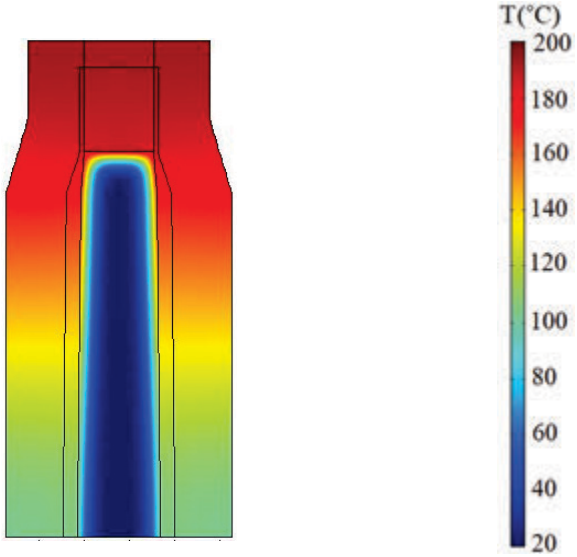



***Fig. 7.*** *Temperature simulation at the t=10s ($t_1$=1.6mm, $L_2$=0mm)*

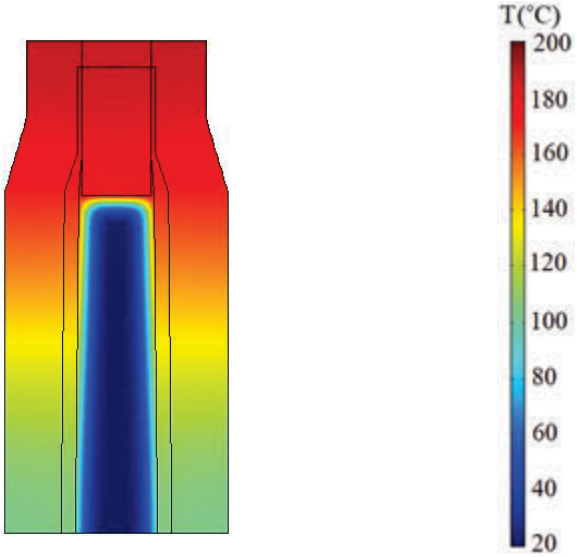



***Fig. 8.*** *Temperature simulation at the t=10s ($t_1$=1.6mm, $L_2$=5mm)*

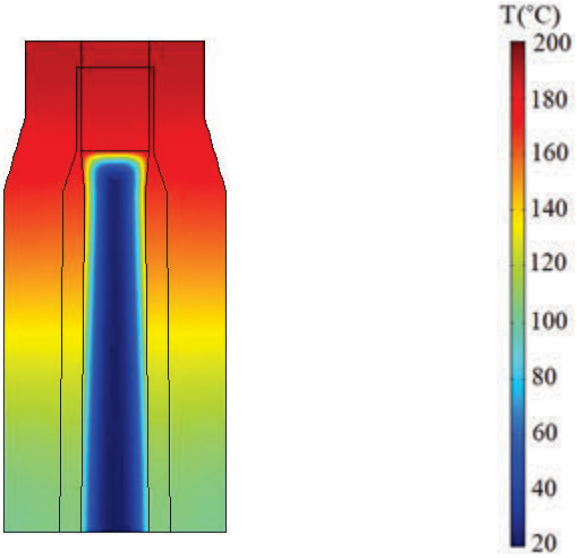



***Fig. 9.*** *Temperature simulation at the t=10s ($t_1$=2.4mm, $L_2$=0mm)*

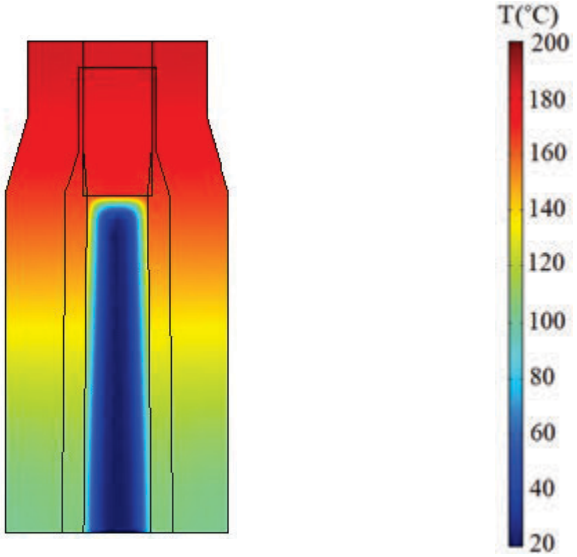



***Fig. 10.*** *Temperature simulation at the t=10s ($t_1$=2.4mm, $L_2$=5mm)*

Cook-off time has been calculated by taking the maximum temperature in the propellant region as a function of time for each cases. The cook-off time and corresponding maximum temperature in the propellant region has been presented in Table 3 for each cases.

***Table 3.*** *Comparison of the investigated cases*

| Investigated parameters | cook-off time (s) | $T_{max}$ (°C) |
|---|---|---|
| $t_1$=1.6mm, $L_2$=5mm | 0.09 | 173.707 |
| $t_1$=1.6mm, $L_2$=0mm | 0.11 | 173.480 |
| $t_1$=2.4mm, $L_2$=0mm | 0.24 | 173.223 |
| $t_1$=2.4mm, $L_2$=5mm | 1.34 | 173.034 |

## CONCLUSION

This study presents the effect the projectile position and the cartridge thickness on the cook-off. Results show that heat transfer area between the hot region and the propellant increases for the case of $t_1$=1.6mm, $L_2$=5mm and cook-off starts earlier in this case.

It has also been shown that, regarding the minimum heat transfer surface between the propellant and the hottest region, thicker cartridge and rear positioning of the projectile inside the cartridge prolongs the time for cook-off.

Front side of the cartridge is in contact with the hotter region. Consequently, the design of the front side of the cartridge with projectile positioning is very important factor in order to prevent cook-off.

## REFERENCE

[1] Işık H., Göktaş F. Cook-off analysis of a propellant in a 7.62 mm barrel by experimental and numerical methods. Applied Thermal Engineering 2017;112:484–496. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.104.

[2] Mishra A., Hameed A., Lawton BA. Novel scheme for computing gun barrel temperature history and its experimental validation. Journal of Pressure Vessel Technology 2010;132(6):061202-1-6. https://doi.org/10.1115/1.4001740.

[3] Suyadnya KA, Tarwidi D., Setiawan EB, Umbara RF. Numerical modeling of heat transfer in gun barrel with experimental validation. International Journal of Engineering & Technology 2019;8(1.9):62-66. DOI: 10.14419/ijet.v8i1.9.26369.

[4] Akçay M., Yükselen MA., Unsteady thermal studies of gun barrels during the interior ballistic cycle with non-homogenous gun barrel material thermal characteristics. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi (Journal of Thermal Science and Technology) 2014;34(2):75-81.

[5] https://tr.wikipedia.org/wiki/7.62x54mmR

[6] Technical manual, army ammunition data sheets small caliber ammunition FSC 1305, TM 43-0001-27, Headquarters Department of The Army, Washington, D.C., April 1994.

[7] Lawless ZD., Hobbs ML., Kaneshige MJ. Thermal conductivity of energetic materials. Journal of Energetic Materials 2020;38(2):214–239. https://doi.org/10.1080/07370652.2019.1679285.

[8]https://www.alternatewars.com/BBOW/Ballistics/Int/Propellants.htm

[9]http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/thrcn.html

[10] https://en.wikipedia.org/wiki/Lead

[11] https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.html

[12] Işık H. Modeling the ballistic parameters in a barrel. Savunma Bilimleri Dergisi (The Journal of Defense Sciences) 2016;15(2):157-177.

[13] Nato standard AEP-97 multi-calibre manual of proof and inspection (M-CMOPI) for Nato small arms ammunition, Edition A Version 1, Nato Standardizatıon Office (NSO), Nato/Otan, October 2020.

# VALVES AND DRIVE METHODS OF VALVES USED IN THE HYDRAULIC INDUSTRY

**Hilmi KUSCU[1], Umut EREN[2]**

[1] *Trakya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Edirne, Turkey, hilmi@trakya.edu.tr*

[2] *Trakya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Edirne, Turkey, umuteren@trakya.edu.tr*

**Abstract**

*The power of fluids is widely used in contemporary industrial applications today. Valves used in the hydraulic industry are operated as hydraulic system elements to provide the ability to do work by using the power of the hydraulic fluid. Directional control valves are used to direct the pressurized hydraulic fluid to the element that will perform the work to be done. In this study, the types of hydraulic valves and the methods used to control these hydraulic valves are examined. The advantages and disadvantages of various actuation methods of the spool inside the valve are mentioned. In addition, stepper motor actuated hydraulic directional control valve, which is one of the electro-hydraulic valve types, has been introduced. The application of electro-hydraulic valve with stepper motor is mentioned. As a result, proportional valves are given due to the necessity of using in hydraulic systems and their capabilities are mentioned.*

**Keywords:** Electro-Hydraulic, Hydraulic Actuator, Fluid Control.

## INTRODUCTION

In fluid power systems, work is done by transmitting power through fluid. The fluid can be liquid, such as oil and water, or gas, such as compressed air, nitrogen, carbon dioxide. Systems that use liquid as the transmission fluid are called hydraulic systems. [1]

Hydraulic systems are used in almost every branch of industry to generate and control force and motion in a wide variety of applications. Industrial applications such as iron and steel industry, presses, machine tools; construction and power generation applications such as bridge movements, mining machinery, nuclear reactors; in construction machines such as excavators, cranes; There are hydraulic systems and control in special application areas such as the propulsion of wing and landing gear in aircraft, military applications, entertainment industry, drilling and many other areas. [2]

The development of today's hydraulic industry has been based on some of the basic principles put forward by Archimedes and Blaise Pascal on hydrostatics. Various hydraulic presses, lifting and transport vehicles were made. Today, hydraulic energy has become an indispensable need of the industry. Hydraulic energy has a wide range of uses, from the controls of simple works in small workshops to the most advanced automation systems.

When the hydraulic system is mentioned, a system in which the fluid is pressed at a certain pressure and flow rate with a hydraulic pump driven by an electric motor and linear, circular or angular motion is produced with this hydraulic energy should come to mind. Electrical energy is given as input energy to the system. With this energy, the shaft of the hydraulic pump rotates by taking action from the electric motor to which it is connected with the clutches and absorbs the static oil in the oil chamber by vacuuming and presses the system. It is possible to express it as hydraulic energy, since the obtained pressurized fluid has the ability to do work, move and produce force.

The hydraulic energy obtained previously mentioned is the fluid at a certain pressure and flow. It is necessary to direct it to the desired location of the hydraulic circuit, to keep the pressure between certain limits and to control the speed by adjusting the amount of fluid. For this, it is necessary to ensure that the pressurized fluid performs the desired tasks, and to control the large energy that can create a dangerous environment at high pressure. Only by controlling it in this way, it is possible to do the desired work with this energy and make use of it. For this purpose, pressure control valve, directional control valve and flow control valve are used in the circuit. [2]

## EXPOSITION

In the hydraulic system, directional control valves are used to ensure that the pressurized fluid can be directed to the desired parts of the hydraulic cylinders or hydraulic motors. It is necessary to control the direction of the fluid in order to provide the forward and backward movements of the pistons and to rotate the hydraulic motor shafts in both directions. Direction control valves have been developed in order to direct the hydraulic fluid to the target volumes. These directional control valves can be controlled in different ways. [2]

### 1.1. Directional Control Valves

Hydraulic directional control valves are circuit elements that direct hydraulic oil and move it to the desired position. They can control the connection or closure of an oil line to another oil line, as well as directing the oil transferred by the pump to the lines of the hydraulic cylinder or hydraulic motor, allowing the movements of the actuators to be controlled. [3]

### 1.2. Manipulating Methods of Directional Control Valves

What is typically called an exciter or actuator is the method of manipulating the slide or rotating element of a direct-acting directional valve to actuate it. We can examine the actuators (manipulator) that provide the movement of the spool in the directional control valves in five categories. It is possible to classify these manipulating methods as manual, mechanical, pneumatic, hydraulic and electrical. Various manipulating methods have been developed for the movement of the spools. Sub-categories with similar working principles can be included in these general categories. For example: levers, foot pedals are "manual" manipulating methods. A cam roller device is considered a "mechanical" method of excitation. [3]

#### 1.2.1. Manual Actuator

A manual actuator is usually a simple lever attached to some kind of link. There are also some foot operated valves, but they are generally considered unsafe in today's workplaces. While lever-operated valves are still quite common in mobile applications, repeatability, accuracy, and electronic control requirements are beginning to eliminate this type of operation outside of simple industrial machines. Figure 1 gives a picture of this type of actuator. And also the hydraulic diagram given is the diagram showing that the valve is lever controlled and spring centered, that is, it comes back to the neutral position with spring force. [4]

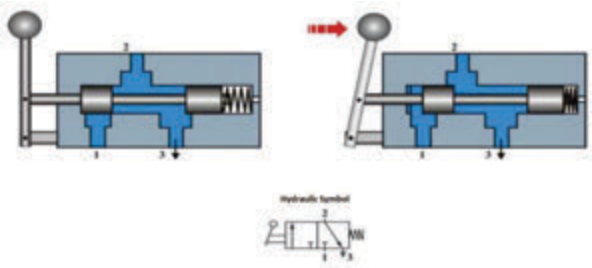


***Fig. 1.*** *Manual Actuator*

#### 1.2.2. Mechanical Actuator

The designs of mechanical actuators are usually made with a wheel or piston based on a wedge or cylinder that performs the movement at the slide head. As a result of the movement of the mechanical actuator (cam, cylinder, etc.), the spool based on the actuator also moves. [3] The movement state and movement feature of the spool take shape according to the cam form on which the spool is based. As given above, at the right end of the spool, a wheel in contact with the cam allows the spool to go in as the cam moves. As the spool moves, the hydraulic fluid is directed to the desired channels. After the spool is pushed in, the force on the spool is removed depending on the cam action and the spool

comes to its starting position with the spring force at the left end of the spool. The hydraulic diagram in Figure 2 shows that the valve is mechanically actuated and spring-returned, as well as a two-position 4-way valve. [4]

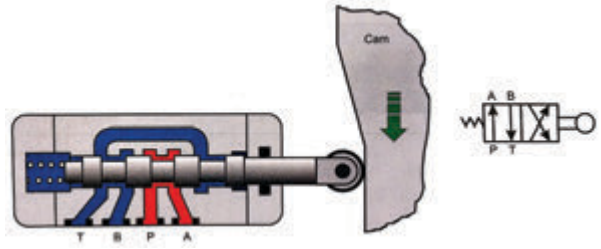



***Fig. 2.*** *Mechanical Actuator [4]*

### 1.2.3. Pneumatic Actuator

A pneumatic actuator uses air pressure applied to a piston to move the valve slide. In valves using this type of actuator, the parts are usually made of aluminum or other non-corrosive material so that moisture in the air lines does not cause the parts to corrode and stick. Typically, a small hole in the actuator allows any accumulated moisture to escape. [4]

Because the air pressure can be quite low in pneumatically actuated valves, the actuator piston must be relatively large to overcome the spring and flow forces and move the spool. Sealing areas and materials should be properly selected and positioned in accordance with the design.

In Figure 3, centering springs are used on both sides of the spool. With the compressed air supplied from the left inlet, the piston is pushed and the movement of the spool based on the piston is provided. The hydraulic diagram provided shows that the valve is three position four way, spring centered and pneumatically actuated.

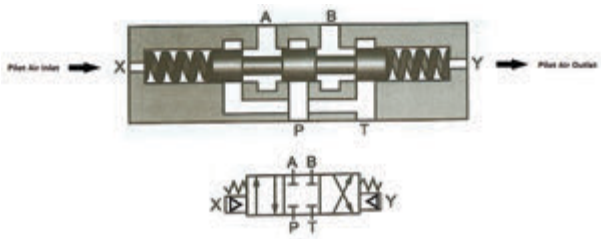



***Fig. 3.*** *Pneumatic Actuator [5]*

### 1.2.4. Hydraulic Actuator

Hydraulic actuators use pilot oil flow and pressure to move the valve spool. The pilot flow and pressure controlling these actuators are usually controlled by a directly mounted directional valve (pilot valve). For this reason, these hydraulically actuated valves are often referred to as two-stage valves, consisting of a pilot stage and a hydraulically actuated main stage.

While the pilot valve can use any type of actuation, a solenoid operated valve is often preferred. This allows hydraulic circuits to be installed that can achieve loads greater than those that single-stage solenoid-driven hydraulic valves can handle. In addition to achieving high loads with this design, the advantages of electrical control are also allowed. [4]

In the hydraulic diagram given in Figure 4, it is seen that centering springs are used on both sides of the spool. In addition, the spool of the valve is moved with the pilot oil supplied from the left inlet. The hydraulic diagram provided shows that the valve is three position four way, spring centered and hydraulic actuated.

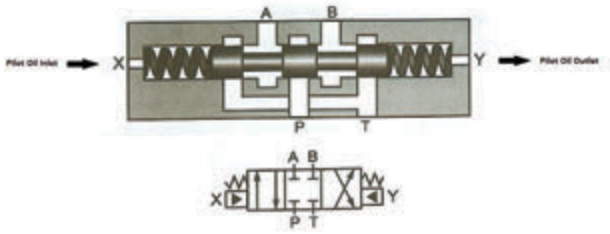



***Fig. 4.*** *Hydraulic Actuator [5]*

### 1.2.5. Electric Actuator

The electrical control type is the most commonly preferred control type in terms of industrial automation. In addition, electrical impulses can take many different forms. [3] Electrically actuated valves are preferred in transmission valves of tractors, controls of front loaders, backhoe and loader controls of construction machines, and industrial applications that require sensitive and fast response. Common examples of electric actuators are solenoids. Generally used solenoids are "on-off" solenoids. When an

electrical signal is received in on-off solenoids, the slide or pin of the solenoid suddenly switches to the fully open or closed position. Besides on-off solenoids, the structures of proportional solenoids are substantially different from those of on-off solenoids. And it needs an electronic circuit board to be driven. They perform work by providing a smoother transition than on-off solenoids.

A solenoid consists of two basic parts. These parts are a coil that provides an electromagnetic field and an armature with parts in which the mechanical function takes place. Applying electricity to the coil creates a magnetic field on the armature. The magnetic field formed around the armature pushes the spool or a small bar called a pin inside the armature. This causes the valve spool to apply counterforce to a spring at the other end of the valve. As soon as the force applied by the solenoid overcomes the spring force, the spool is directed and the hydraulic oil flow flows in the desired direction. In the linear solenoid, the force generated in response to the electric current applied to the winding is balanced with the force of the centering spring, and the valve slider is tried to be positioned proportionally to the current input. In some applications a position sensor (LVDT) can be added to the end of the slider by removing the centering springs to improve positioning accuracy. Position accuracy is ensured by receiving feedback with LVDT. [6]

### 2.1. Stepper Motor Actuated Hydraulic Valve Design

Stepper motor exciter can be given as an example of the electric actuators mentioned earlier.

In the hydraulic system, directional control valves are used to ensure that the pressurized fluid can be directed to the desired parts of the hydraulic cylinders or hydraulic motors. It is necessary to control the direction of the fluid in order to provide the forward and backward movements of the pistons and to rotate the hydraulic motor shafts in both directions. In order to direct the fluid to different sections, directional control valves that can be controlled in different ways have been developed.

Hydraulic systems are used in order to fulfill the desired function of vehicles such as tractors, front loaders of tractors, work machines. Valves are used as hydraulic elements in directing the fluid oil used in hydraulic systems. Equipment controlled by the valves include front loaders, backhoes, etc. is located. The valves used for the control of these equipment fulfill their function by directing the passage of oil. For the safety of the attachment, the operator and the environment, it is essential that the oil diversion be controlled. Valve designs are designed considering such situations. Non-proportional on/off valves are usually used when the equipment has two states, such as on/off. However, if it is desired to control the equipment in intermediate positions, this means that the spool in the valve can be positioned in every position and therefore the manipulating system needs to be proportional.

In tractor front loaders or work machines, a smoother transition of the hydraulic valve slide may be desired, or it may be desired that the spool can work in intermediate positions in addition to its inside and outside positions. In such cases, front loader manufacturers require proportional valves from their suppliers with the ability to perform proportional control of the hydraulic system.

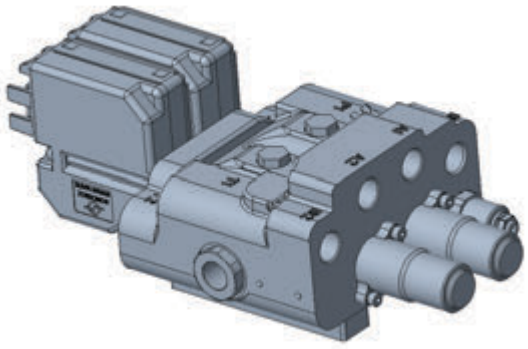


***Fig. 5.*** *Stepper Motor Actuated Hydraulic Valve*

In the stepper motor-controlled sliding directional control valve, the stepper motor, which is the hydraulic valve actuator, performs the steering of the spool (Figure 5.). In the event that an operation is not desired, the stepper motors are not signaled, so the rack gear in the stepper motor does not move. In cases where the rack gear does not move, the spool of the valve also maintains its neutral

position. If the spool is in the neutral position, the oil coming from the pump and entering the valve is discharged into the tank line in the easiest way.

If a signal is given to the stepper motor by the operator, the gear of the motor and thus the spool of the valve moves. According to the amount of directing, the desired amount of oil flow can be provided to the port. By delivering the desired flow to the work port, it also has the ability to do sensitive work.

The purpose of using the stepper motor manipulating in the directional control valve is to measure the weight of the load taken on the tractor front loader or the work machine loaders by keeping it in intermediate positions on the loader. The weight of the load taken to the front loader is realized by the load cell mounted on the loader. With this application, the necessity of going to the weighbridge for weight measurement and repeating the operations of getting on and off the scale is eliminated.

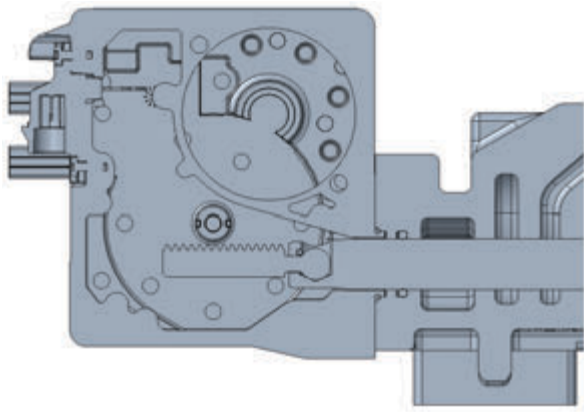


***Fig. 6.*** *Stepper Motor Integration for manipulating the hydraulic valve spool*

In Figure 6, the integration of the rack gear of the stepper motor actuator into the valve with the special processing on the slide of the valve is provided. The spool performs its movement with every movement coming from the actuator. There is no need to add an LVDT position sensor as an add-on to the valve spool to check whether the valve spool is in the desired position. Because there is an encoder integrated that measures the position of the gear movement of the stepper motor.

## CONCLUSION

In this study, the valves used in the hydraulic industry and the manipulating methods of these valves are emphasized. The advantages and disadvantages of these manipulating methods are stated. While designing the hydraulic control valve, it is essential to design according to the characteristics of the system to be used. Proportional control should be provided in systems where precise control is required. Proportional control allows the work to be done with the targeted precision.

Proportional solenoids can be used to achieve proportional control. However, in slide valves, the proportional solenoid does not have the capacity to keep the valve spool fixed in every desired position in millimeters and do the work. The idea of a stepper motor actuated directional control valve is presented as a solution to the desired situations for precise spool movements in hydraulic system control.

Electro-hydraulic valve application with step motor stimulated provides the desired proportionality. This application has the ability to move the spool very precisely in slide valves. This allows precise control of the operator controlling the system.

## REFERENCE


[1] HANIEH, Ahmed Abu. Fluid Power Control: Hydraulics and Pneumatics. Cambridge, 2012.

[2] KARACAN, Ismail. Hydraulic and Pneumatic. 8th Edition. Karabuk, 2003.

[3] AKDER (Fluid Power Association), Hydraulic circuit elements and application techniques, TMMOB Chamber of Mechanical Engineers, publication no: MMO/292/3, Istanbul, 2010.

[4] EATON. (2008). Industrial hydraulics manual, your comprehensive guide to industrial hydraulics.

[5] FITCH, E.C. HONG, E.C. Hydraulic Component design and Selection. Oklahoma, 1997.

[6] Yuksel, Ibrahim. SENGIRGIN, Mesut. Development of electrohydraulic valves and investigation of their characteristics. II. National Hydraulic Pneumatic Congress and Exhibition.

# FULLY AUTOMATIC SAMPLING AND DATA MONITORING AUTOMATION FOR WASTEWATER TREATMENT PLANTS

**Aydin GULLU[1], Emir OZTURK[2], Mustafa ARDA[2]**

[1] *Ipsala Vocatonal School Trakya University Edirne, Turkey*
[2] *Engineering Faculty Trakya University Edirne, Turkey*

**Abstract**

*After using clean water, giving it back to nature causes environmental pollution. Treatment processes are used to clean the used wastewater. The water passed through various processes is cleaned and given to the environment. Some organizations are in charge of providing and cleaning water in collective settlements. However, the inspection is carried out by a ministry from a single point. The sensor data of the wastewater treatment plants from a single point are continuously monitored and a sample request can be made from the treated water at any time. In this study, an automation has been developed by the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change of the Republic of Turkey to automatically monitor the wastewater treatment plant. This automation was operated by applying it to the treatment plant of Bursa Hasanağa Organized Industrial Zone.*

**Keywords:** Wastewater, Automation, Automatic Sampling, Data Monitoring

## INTRODUCTION

After the use of natural brandy, the wastes are given back to nature. The wastes that are given to nature without any cleaning cause environmental pollution. Nature has self-cleaning mechanisms. However, as the amount of pollution increases, cleaning cannot be achieved naturally[1, 2]. In addition, it is very difficult to clean the chemicals, oil and petroleum wastes in the wastes by themselves[3]. Such wastes need to be subjected to a special cleaning process[4]. Waste water treatment plants are established in order to clean the waste water generated after use in places where there is collective life and production[5]. In these plants, which treat biologically and chemically, the waste water is cleaned and given to the nature. During the operation of these facilities, discharge water is periodically checked and cleanliness is monitored[6, 7]. However, due to the problem occurring in some facilities, the waste water is given to the nature without being cleaned. Waste water treatment plants in Turkey are inspected by the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. Instant inspection of facilities that are physically located in very different locations is physically very difficult. In addition, unannounced samples should be taken in wastewater treatment plants to determine the source of pollution in clean water resources.

In this context, the Ministry has established a permanent monitoring center. This center periodically collects instant sensor information in wastewater treatment plants. In addition, the Ministry can initiate sampling in the discharge water by triggering the sampling device at any time. In this study, integration to the continuous monitoring center was provided for the Hasanağa Organized Industrial Zone wastewater treatment plant in Bursa, Turkey. In addition, the sampling function was added to the automation of the wastewater treatment plant by integrating the sampling device. With the automation installed, the ministry is constantly monitoring the facility and will be able to take samples whenever it wants.

In the study, the wastewater treatment plant will be mentioned. In the next section, the continuous monitoring system and the received data will be discussed. Also, the sampling system will be mentioned.Finally, results and discussion will be given.

## HASANAĞA WASTEWATER TREATMENT PLANT AUTOMATION

Hasanağa Organized Industrial Zone consists of 157 industrial enterprises. The clean water used in these enterprises is treated in the wastewater treatment plant located in the organized industrial zone. The Scada image of the wastewater treatment plant is given in Figure 1.

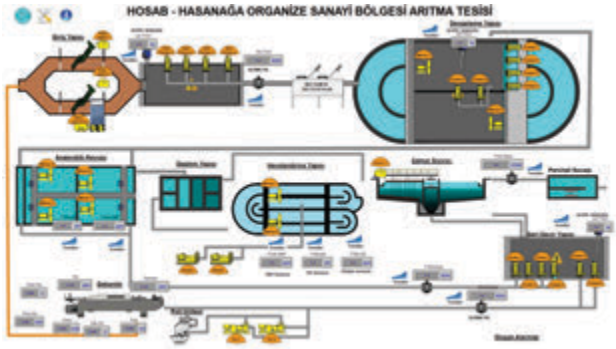



***Fig. 1.*** *HOSAB SCADA*

As seen in Figure 1, the wastewater entering the facility is subjected to a purification process by passing through coarse screen and sand oil traps. The water cleaned in the facility is given back to the nature. Biological treatment is carried out at the facility. Water is decomposed by various beneficial bacteria. As a result of decomposition, the amount of dirt is stored as sludge[8, 9].

The flow rates of the dirty water entering the facility and the clean water leaving the facility are measured. In addition, in certain sections, data such as oxygen levels, pH, ORP conductivity, temperature are constantly monitored by SCADA and the necessary pumps operate automatically. The facility is operated and monitored locally. The pollution level of the clean water is checked with the sample taken periodically, and if the pollution is high, necessary corrections are made. The supervision of the local operation by the ministry is carried out by the continuous monitoring system. If there is a problem in the facility, if dirty water is supplied to the environment, this ministry can also be inspected unannounced by remote sampling. In addition, the amount of water entering and leaving the facility is constantly monitored by the ministry.

For this, an application has been developed and integrated into Scada. In the next section, the Application developed for the Continuous Wastewater Monitoring System will be mentioned.

## CONTINUOUS WASTEWATER MONITORING SYSTEM

A permanent monitoring center was established by the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change of the Republic of Turkey. In this center, businesses that provide wastewater and gas to the environment are requested to transfer the data to the center via a web application. The data is monitored by the center and intervened in case of any problems. In this center, data is obtained from 470 wastewater treatment plants, 725 emission measurement facilities, and 347 air quality monitoring units. In this study, a web application was developed for the continuous wastewater monitoring system and the wastewater treatment plant was integrated. A web application was run for the Hasanağa organized industrial zone treatment plant in Bursa. With this application, periodic sensor data is sent to a center in Ankara over the web. The data is monitored instantaneously through a website. The facility information and location on the website are shown in Figure 2.[10]



***Fig. 2.*** *The Facility Information and Location*

The data transmission status of the facilities is monitored instantly via the interface. Data that does not send data or incomplete data are tracked. Figure 3 shows the web interface where station information and data transmission status are monitored.

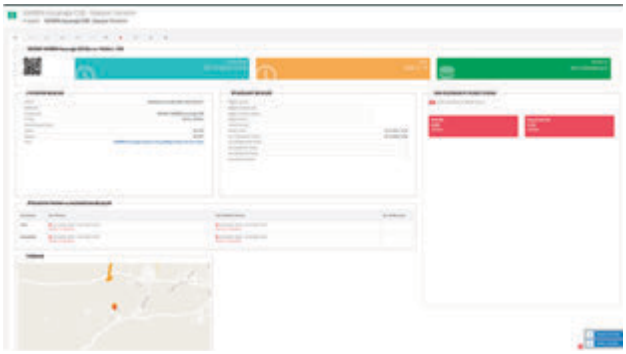


***Fig. 3.*** *Central web interface*

Both the business and the inspectors follow up and intervene in any negative situation. In addition to monitoring, samples are taken from the facility whenever requested and stored for analysis by ministry officials. The sampling device is shown in figure 4 (Hach AS950)[11]. When sampling is requested, the device will operate and take samples independently of the facility operation. This sample will be kept locked until ministry officials arrive. Authorities will have information about the status of the facility by analyzing the sample taken. The facility operator will not be informed of the sampling process.



***Fig. 4.*** *Hach AS950 Samples Device*

Some information is required depending on the size of the facility. The minimum amount of dirty water entering the facility and clean water leaving the facility is monitored periodically. Periods can be selected remotely as minutes, seconds and hours. Instantly received information can also be viewed from the web interface. The information received in Figure 5 is shown graphically and in Figure 6 as a table.



***Fig. 5.*** *Central web interface*

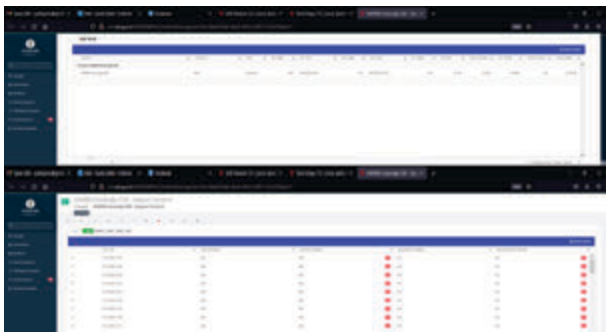


***Fig. 6.*** *Central web interface*

Figures 3,5 and 6 are of the web interface provided by the computer connected to the continuous monitoring center. SCADA works on the computer in the station. In addition, an application has been developed on this computer. The application works in conjunction with both SCADA and continuous monitoring center. The data received through automation is sent to the ministry via web application. Here, it is monitored that the data is sent and which data was sent last. If there is a problem in the system, missing data is sent automatically. For this process, the station and central clocks must be synchronized. Synchronization is also constantly checked. In addition, control is provided for the sample request, and if the request is received, it gives a command to the automation and starts the sampling process. When this process starts and is completed, information is sent to the relevant units via e-mail. If there is a problem during sampling, an e-mail is sent as an error again. In the automation system, data receiving and sending is done with Siemens S7 315 PLC. WinCC was used as SCADA.

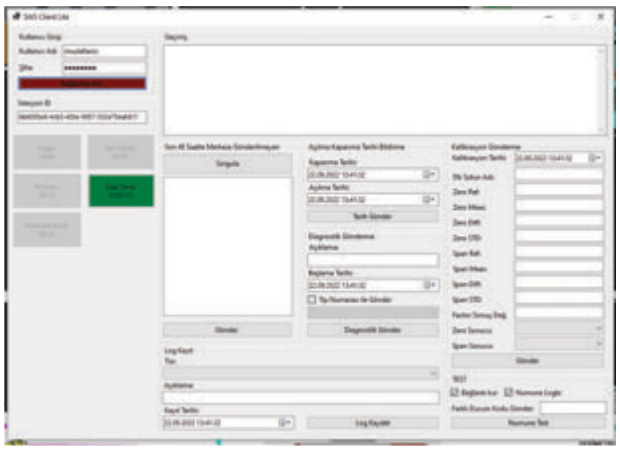


***Fig. 7.*** *Continuous Monitoring Center Client Application*

All data is kept in a database. If there is a problem with the central computer, the missing information is pulled from the database and sent. MongoDB is used as the database. The application was developed in visual studio c#. The interface developed on the local computer is shown in figure 7.

## CONCLUSION

An application has been developed to monitor the instantaneous incoming dirty water and outgoing clean data of wastewater treatment plants from a central location. This application does not work depending on the SCADA and automation devices in the station. It stores the sensor data received from the field locally and sends it to the center. The data sent to the continuous monitoring center are tracked instantly over the web. In addition, the sampling process can be started by sending a signal from the facility to the sampling device at any time from the center. In this way, control can be provided for any negativity. The application developed for the continuous wastewater monitoring center was implemented for Turkey Bursa and Hasanağa wastewater treatment plants. The data received from this facility was automatically sent to the continuous monitoring center of the Republic of Turkey Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. Developing software checks for missing data and automatically sends missing data when any problem occurs. When the application running on the computer and SCADA are open, any data receiving and sending process is provided automatically.

## REFERENCE


[1] BİRGÜL, A. and S.K. AKAL SOLMAZ, **Tekstil endüstrisi atıksuları üzerinde ileri oksidasyon ve kimyasal arıtma prosesleri kullanılarak KOI VE RENK GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI.** Ekoloji, 2007. 16(62): p. 72-80.

[2] Droste, R.L. and R.L. Gehr, ***Theory and practice of water and wastewater treatment***. 2018*: John Wiley & Sons*.

[3] Yalcinkaya, F., et al., **A review on membrane technology and chemical surface modification for the oily wastewater treatment.** Materials, 2020. 13(2): p. 493.

[4] Zhang, W., N.B. Tooker, and A.V. Mueller, **Enabling wastewater treatment process automation: leveraging innovations in real-time sensing, data analysis, and online controls.** Environmental Science: Water Research & Technology, 2020. 6(11): p. 2973-2992.

[5] Vesilind, P., ***Wastewater treatment plant design***. Vol. 2. 2003*: IWA publishing*.

[6] Han, H., et al., **Data-driven intelligent monitoring system for key variables in wastewater treatment process.** Chinese journal of chemical engineering, 2018. 26(10): p. 2093-2101.

[7] Russo, S., et al., **Anomaly detection using deep autoencoders for in-situ wastewater systems monitoring data.** arXiv preprint arXiv:2002.03843, 2020.

[8] AYVAZ, Z., **Atıksu arıtma çamurlarının değerlendirilmesi.** Ekoloji Çevre Dergisi, 2000. 9(35): p. 3-12.

[9] Turovskiy, I.S. and P. Mathai, ***Wastewater sludge processing***. 2006*: John Wiley & Sons*.

[10] SIM. **CONTINUOUS WASTEWATER MONITORING SYSTEM.** 2022; Available from: http://sim.csb.gov.tr/.

[11] Hach. **Hach AS950.** 2022; Available from: https://tr.hach.com/as950-tas-nabilir-numune-al-c/product?id=27562075845.

# INVESTIGATION OF SWARM ROBOT APPLICATIONS AND SWARM ROBOT EXPERIMENT PLATFORMS

**Aydin GULLU[1], Gurkan TUNA [2], M. Ozan AKI [1], Ozcan CETINKAYA[3], Hilmi KUSCU[4]**

*[1] Ipsala Vocatonal College Trakya University Edirne, Turkey*
*[2] Edirne Vocational School of Technical Sciences Trakya University Edirne, Turkey*
*[3] Kesan Vocatonal College Trakya University Edirne, Turkey*
*[4] Engineering Faculty Trakya University Edirne, Turkey*

**Abstract**

*Robots are used to make human life easier. In our daily life, the work done with classical machines is done with autonomous robots by reducing human intervention. Thanks to the network infrastructure, remote command operation and communication with each other can be provided. It is also possible to do the work done with only one robot in a shorter time with many robots. In this case, it is necessary for the robots to communicate and coordinate with each other. Various algorithms have been developed on this situation, which is evaluated within the scope of swarm robot studies. Coordinated movement is envisaged in studies with more than one robot of the same type. In some cases, the swarm may also consist of heterogeneous robots. In this case, it is necessary to coordinate according to the abilities of robots with different characteristics. In this study, information will be given on swarm robots, their usage purposes, and structures. Physical robot applications used to test academic studies will be mentioned.*

**Keywords:** Swarm Robots, Robot Applications, Autonomous Robot

## INTRODUCTION

Autonomous mobile robots are used in many areas in our daily lives. Intelligent robots are widely used in housework for some reasons such as developing computer-based software technologies and cheaper hardware. A software algorithm is used in robots that sense their surroundings, make decisions, receive remote commands and scan areas. Their efficiency is gradually increasing with artificial intelligence-based algorithms. These robots, which are used to make people's work easier, work autonomously and can do many jobs such as scanning the area and making their own decisions. The next step is for these commercial robots to act as a swarm. It is more efficient to use collaborative robots to clean large areas or scan an area in less time. In some areas where robots are used, using more than one robot shortens the time to complete the task[1]. Increasing the number of robots further can further shorten the time. In this optimization, it should be ensured that the robots work in coordination with each other, so that the robots communicate with each other. Thanks to this communication, the robots will share information with each other and perform the given task together.

Swarm robots are groups of robots in which many robots are coordinated in a distributed and decentralized manner. Multiple simple robots will be able to perform complex tasks more efficiently than a single robot. This can add durability and flexibility to the application[2, 3].

In studies with swarm robots, the improvement of 30-60% as a result of the use of swarm intelligence instead of individual task in studies based on the communication of robots with each other by eliminating the ground station and the detection of a 90% reduction in the additional communication load from the ground station was tested for 20 tasks with 18 robots. This application has been experimentally investigated on simulation[4, 5]. Another study on the importance of swarm

intelligence and robotic applications based on swarm intelligence, algorithms used in swarm intelligence and studies using these algorithms are discussed [4]. A simulation study on the task sharing of swarm robots and how to switch between tasks and the methods of task functioning in swarm robots are discussed in Ducatelle's study[6]. Some studies have been carried out to perform algorithmic approaches to task assignment in swarm intelligence with multidisciplinary studies, and these studies have pioneered the concept of artificial intelligence in herd robots. Inspired by natural life, swarm behaviors were examined. Algorithms including the transfer of these swarm behaviors to the computer environment were created by examining in detail.

The behaviors of ants and bees working in harmony with each other to perform their duties were examined and the software was converted into algorithms. For similar tasks, robots are coded with these algorithms to create swarm intelligence [7-9]. With the use of this intelligence and infrastructure in various engineering fields, the importance of swarm robots has increased [10]. Comprehensive studies with swarm robots, heterogeneous robotics studies and current use were published in 2013, and an even greater momentum was gained for the future [2, 11]. After the academic studies were followed by commercial robots, new usage areas of swarm robots were presented to end users. iRobot autonomous cleaning robot, mi robot are a few of them[12, 13]. Before the commercialization of autonomous robots, the target area in this project is to run academic studies in the real world. Within the scope of this project, which aims to combine academic infrastructure and practice, real task-based studies will be carried out by testing the tasks closest to commercial robots. For this purpose, suitable hardware was selected to test the academic algorithms, which is the post-test before the commercial product. Selected robots should support open source ROS (robot operating system)[14-16] and be able to make applications on academic development platforms.

In this study, an exemplary platform for physical performance of academic tests of swarm robot features and heterogeneous collaborative robots will be discussed.

## SWARM ROBOTS

Swarm robots are groups of robots in which many robots move in a decentralized manner. Robots in this group act autonomously. It has sensors that detect the environment and decision-making mechanisms on it. Swarm robots can be homogeneous or heterogeneous. There may be similar robots or different robot groups may be part of the swarm[1, 2, 11, 17]. Some hardware is required for robots to communicate with each other locally. Swarm robots are expected to perform certain behaviors. These behaviors are defined below.[18]

*Rallying*

Before the swarm robots fulfill the given tasks, they are expected to gather in an area and share tasks. During the gathering, the robots in the swarm with communication structure are expected to communicate with each other.[19]

*Distribution*

It is the dispersal feature that the robots in time settle in the area at the appropriate distance between each other and in the appropriate pattern. With a good distribution, field scanning and search activities are done more efficiently.[20]

*Assignment*

Robots work on a task basis to do a job. The task in the swarms is clear, but it is not clear how and by which robot this task will be done. Various algorithms have been developed for this process. The robot performs the given operation by sharing tasks among themselves[21].

*Collective Action*

Swarm robots can move together simultaneously. Groups of robots formed in a suitable distribution can move harmoniously without disturbing the distribution distance.

*Collective Mapping*

Using multiple robots to scan large areas reduces the time. In swarm robots, large areas can be scanned with robots and appropriate maps can be drawn.

*Source Search*

Herds are encountered by many living things in natural life. In a certain search activity, the herd members can reach the source in a faster time by searching for the source. It can then direct other robots to this resource.

*Transport*

There is a workforce that a robot can do. One robot may not be enough for larger workforces. In this case, cooperation can be made and a single job can be done with two or more robots. It is possible to transport a heavy object with more than one robot.

## SWARM ROBOT EXPERIMENT PLATFORM

Some commercial robots have been developed to test academic studies with swarm robots on a real robot. The basic features of these robots are the ability to communicate with each other, move and receive data from the environment. They are offered for sale at different prices depending on the hardware features they use. In swarm robots, the robots must be numerically higher in order to behave like a swarm.

Robots used in swarming applications with dimensions of 2-5 cm are Colias, Jasmine and Kilobot. All these robots have distance and light sensors. The movement uses Colias and Jasmine DC motors due to its small structure. This offers a faster mobility. It has a speed of about 35cm/s. Kilobot, on the other hand, provides movement with vibration. However, its speed is around 1 cm/s. This is slower than robots using dc motors. E-puck, SwarmBot, Kobot and R-one swarm robots between 5 and 13 cm in size can be given as examples.[4, 18, 22, 23]

In robots of this size, movement is provided by a DC motor. With the increase in size, additional equipment is also offered in robots. In addition to the sensors found in small robots, the camera is also found in these robots. Again, the processor structure used in proportion to the dimensions also differs. With advanced processors, it is possible to run more comprehensive artificial intelligence software. TurtleBots, which have emerged in recent years and are controlled by the widely used raspberry pi[24], are also used in swarm applications[24-26]. Linux-based robots support ROS. In this way, tests can be performed in both simulation and physical environments. Other robots with ROS support offer validation and testing in academic studies[14-16]. Figure 1 shows the Turtlebot Burger Pi. Figure 2 shows the Turtlebot Waffe with its robotic arm.

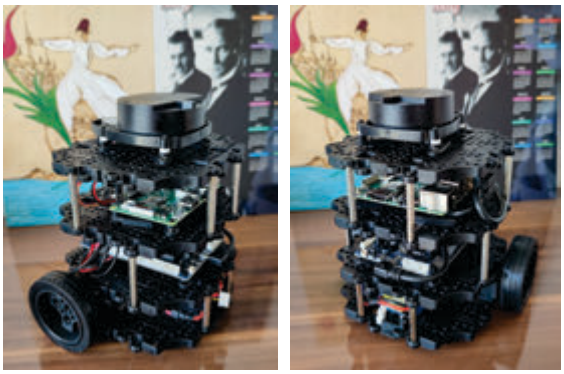


***Fig. 1.*** *Turtlebot Burger Pi*

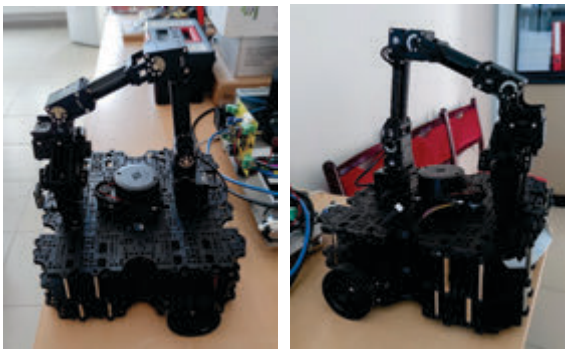


***Fig. 2.*** *Turtlebot Waffe and Arm*

## CONCLUSION

In this study, information about swarm robots is given. Rallying, distribution, assignment, collective action, collective mapping, source search and transportation behaviors expected from swarm robots are explained. Unlike autonomous robots, they are robots that act and accomplish tasks by communicating with each other thanks to the communication they establish among themselves. Academic studies with this robot and the experimental platforms used in these studies were also examined. Robots classified according to their size and abilities are mentioned. For herd robot applications, the turtle bot platform, which is currently based on ROS and has a Raspberry pi, is mentioned. In the study, swarm robot definition features and commercial swarm robots that can be tested are discussed.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study is supported by Trakya University Scientific Research Project (Project No. TUBAP 2021/131).

.

## REFERENCE

[1] Barca, J.C. and Y.A. Sekercioglu, **Swarm robotics reviewed.** Robotica, 2013. 31(3): p. 345-359.

[2] Navarro, I. and F. Matía, **An introduction to swarm robotics.** International Scholarly Research Notices, 2013. 2013.

[3] Parker, L.E., ***Heterogeneous multi-robot cooperation***. 1994, *Massachusetts Inst of Tech Cambridge Artificial Intelligence Lab*.

[4] Jevtić, A. and D. Andina de la Fuente, **Swarm intelligence and its applications in swarm robotics.** 2007.

[5] Hoeing, M., et al. ***Auction-based multi-robot task allocation in comstar.*** in *Proceedings of the 6th international joint conference on autonomous agents and multiagent systems*. 2007.

[6] Ducatelle, F., et al. ***New task allocation methods for robotic swarms.*** in *9th IEEE/RAS conference on autonomous robot systems and competitions*. 2009.

[7] TSai, P.-W., et al., **Enhanced artificial bee colony optimization.** International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2009. 5(12): p. 5081-5092.

[8] Wang, J., Y. Gu, and X. Li, **Multi-robot task allocation based on ant colony algorithm.** J. Comput., 2012. 7(9): p. 2160-2167.

[9] Chen, J., Y. Yang, and Y. Wu. ***Multi-robot task allocation based on the modified particle swarm optimization algorithm.*** in *2011 Seventh International Conference on Natural Computation*. 2011. IEEE.

[10] Brambilla, M., et al., **Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective.** Swarm Intelligence, 2013. 7(1): p. 1-41.

[11] Tan, Y. and Z.-y. Zheng, **Research advance in swarm robotics.** Defence Technology, 2013. 9(1): p. 18-39.

[12] iRobot. **Robot dealers and iRobot accessories.** 2022; Available from: https://www.irobot.com.tr/satis-kanallari.html.

[13] Kafiev, I., P. Romanov, and I. Romanova. ***The Method of Selecting the Best Technical System by the Set of Characteristics.*** in *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2019. IEEE.

[14] Quigley, M., B. Gerkey, and W.D. Smart, ***Programming Robots with ROS: a practical introduction to the Robot Operating System***. 2015*: " O'Reilly Media, Inc."*.

[15] Koubâa, A., ***Robot Operating System (ROS)***. Vol. 1. 2017*: Springer*.

[16] Quigley, M., et al. ***ROS: an open-source Robot Operating System.*** in *ICRA workshop on open source software*. 2009. Kobe, Japan.

[17] Dorigo, M., G. Theraulaz, and V. Trianni, **Swarm robotics: past, present, and future [point of view].** Proceedings of the IEEE, 2021. 109(7): p. 1152-1165.

[18] Schranz, M., et al., **Swarm robotic behaviors and current applications.** Frontiers in Robotics and AI, 2020. 7: p. 36.

[19] Tuzel, O., **Artificial Swarm Control Through Learning Based Leadership.** 2018.

[20] Martinoli, A., K. Easton, and W. Agassounon, **Modeling swarm robotic systems: A case study in collaborative distributed manipulation.** The International Journal of Robotics Research, 2004. 23(4-5): p. 415-436.

[21] Xu, D., et al., **Behavior-based formation control of swarm robots.** mathematical Problems in Engineering, 2014. 2014.

[22] Arvin, F., K. Samsudin, and A.R. Ramli, **Development of a miniature robot for swarm robotic application.** International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2009. 1(4): p. 436-442.

[23] Dias, P.G.F., et al., **Swarm robotics: A perspective on the latest reviewed concepts and applications.** Sensors, 2021. 21(6): p. 2062.

[24] Bergeon, Y., V. Křivánek, and J. Motsch. ***Raspberry Pi as an Interface for a Hardware Abstraction Layer: Structure of Software and Extension of the Turtlebot 2–Kobuki Protocol.*** in *2019 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. 2019. IEEE.

[25] Amsters, R. and P. Slaets. ***Turtlebot 3 as a robotics education platform.*** in *International Conference on Robotics in Education (RiE)*. 2019. Springer.

[26] Singh, D., et al. ***TurtleBot: Design and Hardware Component Selection.*** in *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. 2018. IEEE.

# IMPROVED RELIABILITY OF PSEUDORANDOM OPTICAL ROTARY ENCODER

**Goran Miljković, Ivana Ranđelović, Dragan Denić, Milan Simić**

*University of Niš, Faculty of Electronic Engineering*
*Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia*

**Abstract**

Modern servo systems rely on position information for their quality and reliability of operation. Optical rotary encoders are mainly used when reliable, high-resolution position information is required. The paper presents a pseudorandom optical rotary encoder that has been improved with introducing two phase-shifted pseudorandom code tracks and using two reading heads that are in line and one against the other in relation to the disc encoder. This type of code reading offers a number of advantages in terms of improving the reliability and redundancy of encoder operation.

**Keywords:** absolute pseudorandom position encoder, code scanning, redundancy, reliability

## INTRODUCTION

Modern devices and industrial systems are increasingly demanding regarding certain parameters of position information, such as its resolution, accuracy, reliability, etc. That increase in demand must be accompanied by optical position encoders, which are often used to measure the position of a motor within a moving system. Classical absolute position encoders have the number of code tracks that depends on the resolution of the encoder, and the paper will present an improved pseudorandom absolute encoder that has one code track. This encoder has serially arranged code words along one code track, whereby the operation of the encoder exploits some convenient properties of the pseudorandom binary sequence [1, 2, 3, 4, 7, 11]. Pseudorandom absolute encoders are suitable for the application of various methods of detecting code reading errors, which contribute to the overall reliability of the encoder. Also, with these encoders, it is possible to implement algorithms that facilitate mounting the encoder on the motor shaft and easier definition of the zero position [6].

The disc of pseudorandom optical rotary encoders usually contains a synchronization track and at least one code track, side by side. Signals from the synchronization track are used to define the moment of reading pseudorandom bits from the code track, then to determine the direction of rotation of the encoder, and sometimes to increase its resolution [2, 8]. Reading bits from the code track can be implemented as serial with one or more reading heads or in parallel when the number of heads depends on the resolution of the pseudorandom code [1, 4]. In order for the position information to be suitable for further processing, transmission and presentation, it is necessary to convert the pseudorandom code into a natural code. Different types of code converters can be implemented that differ in conversion time, complexity and cost of the hardware used [1, 4, 9, 10]. Three types of converters can be distinguished: fast parallel converters that use fast memory, then slower but simpler serial converters that use a pseudorandom binary sequence generator, and there are also serial-parallel converters that are a compromise solution applicable to high-resolution encoders.

In the first part of the paper, an improved layout of the pseudorandom encoder disc is presented, which contains synchronization and two phase-shifted code tracks. Next, the practical realization of reading the encoder disk with two optical modules, which are located opposite each other, is described. At

the end, the working principle of such an encoder and the possibilities for increasing its redundancy and reliability in operation were discussed.

## PSEUDORANDOM OPTICAL ENCODER WITH SERIAL READING

Reading of the pseudorandom code from the code track of the encoder disc can be realized as serial by means of a single reading head. This is possible thanks to the fact that adjacent code words differ in one bit. Reading a pseudorandom code using a single head is shown in Fig. 1, where the read bits are placed into a bidirectional shift register that is a buffer for forming the read code word. Two heads, AUT and VER, are needed to obtain signals from the synchronization track, and they are used to synchronize the readings of the pseudorandom code track and to determine the direction of rotation.

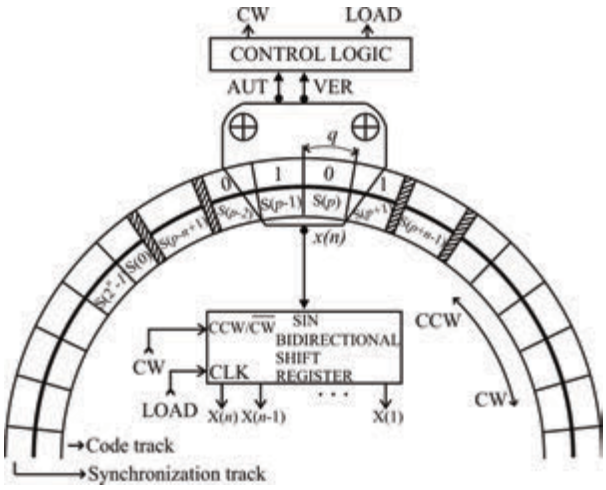



***Fig. 1*** *Serial reading of pseudorandom code with one reading head*

However, single-head pseudorandom code reading faces the problem of losing position information when changing the direction of rotation. A more elegant and advanced solution is reading with two heads that are at a distance of $nq$, where $n$ is pseudorandom code resolution. The code words that are formed after changing the direction of movement now correspond to the current positions of the encoder disc, Fig. 3. Also, the continuity of the formation of code words is achieved even in case of possible oscillation of the moving system in the direction of movement. This method of reading the code enables the application of continuous verification of the correctness of the formed code words.

Serial reading of the pseudorandom code that will be applied in this paper is based on the use of two code reading heads along with two pseudorandom code tracks carrying the same PRBS code but phase shifted for $2n$-1+$n$-1 bits, Fig. 2. The sensor heads are located opposite each other, on a straight line passing through the center of the encoder disc. First code reading head reads pseudorandom bit $S(p)$ from first code track and other code reading head bit $S'(p+n)$ from the shifted code track. Compared to the previous solution, the sensor heads read bits from two different code tracks, they are easier to mount and adjust. This arrangement of code tracks and their reading has the continuity of the formation of code words, Fig. 3, as well as the possibility of applying error detection techniques for code reading. If the error detection method described in reference [5] were applied to the this encoder solution, the main code word would be formed from bits from one code track, and the control code word from bits from a phase-shifted code track. In this way, a more reliable reading of the pseudorandom code is obtained in industrial operating conditions.

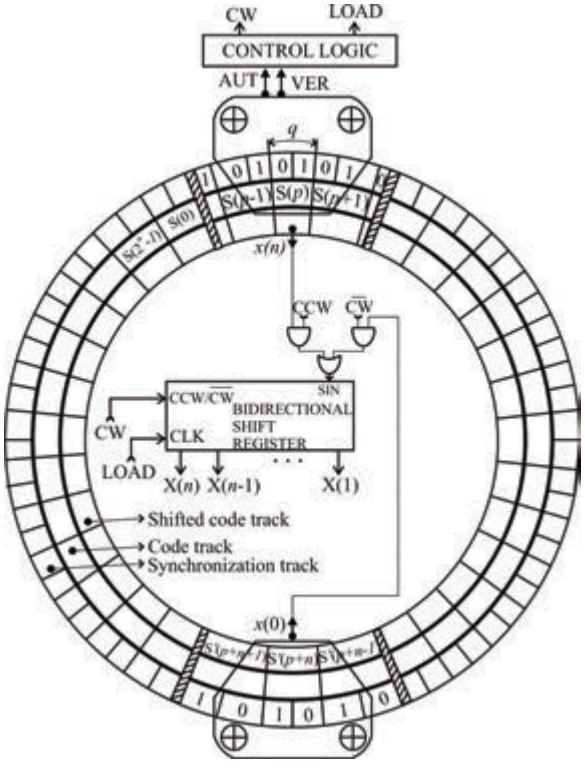



***Fig. 2*** *Improved serial reading of pseudorandom code*

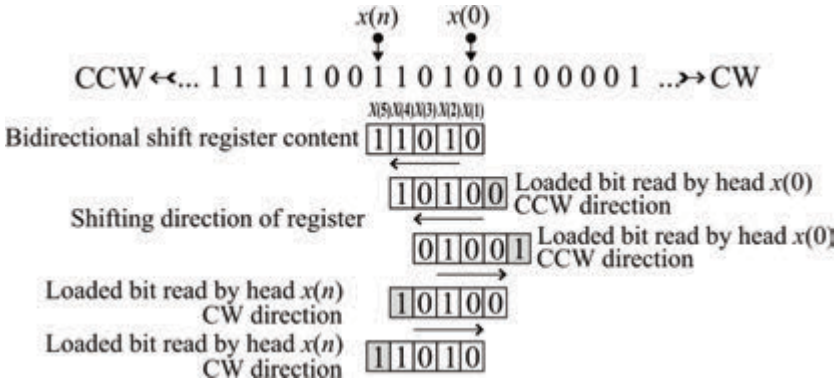



***Fig. 3*** *Code word forming in bidirectional shift register in case of reading with two heads*

## PRACTICAL IMPLEMENTATION OF PSEUDORANDOM OPTICAL ENCODER

The presented pseudorandom code reading solution was practically tested using the experimental setup shown in Fig. 4. In this experimental setup, the encoder plastic disc with a diameter of ϕ 45 mm has an 11-bit synchronization track (2048 slits), 10-bit pseudorandom code track (1024 slits), and another same but phase shifted 10-bit pseudorandom code track. 10-bit pseudorandom binary code obtained by linear feedback shift register (LFSR) with feedback set [10, 3] for maximum length sequence is printed on two pseudorandom code tracks. This arrangement of code tracks as well as the use of a pseudorandom code enabled the use of ready-made optical modules for reading, which can be found on the market for use with incremental encoders. An optical encoder module M832-1024-6T-U manufactured by Dynapar is used and the width of the tracks is customized for this concrete reader. Also, the encoder module must be selected for the appropriate incremental track resolution. Fig. 4 shows a magnified photo of a code disc, from which it can be observed that each pseudorandom code track has its inverted version beside it due to differential scanning.

One encoder module is used to read the synchronization track (signals A and B) and the first pseudorandom code track (PRBS1), while the other is used to read the shifted pseudorandom code track (PRBS2), Fig. 5. The index sensor head of the applied encoder module was used to read the pseudorandom code track. One encoder module is positioned closer to the center of the disc so that the index sensor head reads a pseudorandom track closer to the center of the disc.

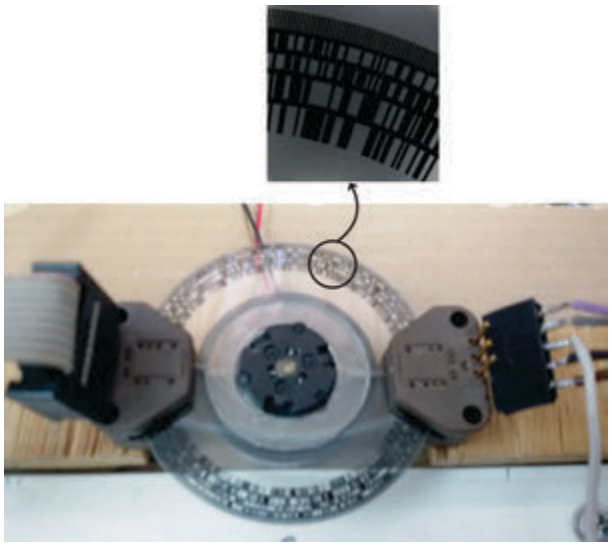


***Fig. 4*** *Encoder disc with two optical modules*

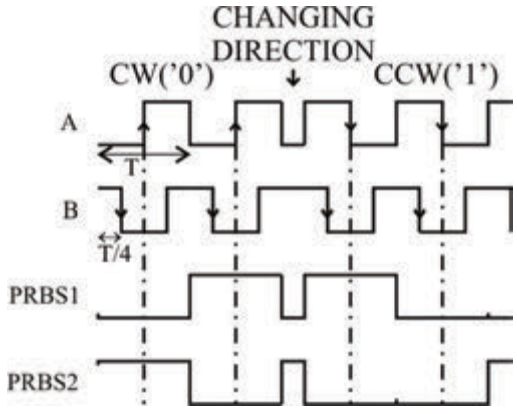



***Fig. 5*** *Output signal from reading heads*

After the initialization of the system, this encoder must form the first valid pseudorandom code word and determine the

absolute position after that. The accepted initial code word stays the same for both code tracks. After initialization and forming the first code word, the reading a new bit from the corresponding code track depending on the direction of rotation is followed. The accuracy of the read bit is checked according to method [5].

If there was no error reading the code, the encoder continues to operate in normal 10-bit mode. The absolute position is determined after the pseudorandom/natural code conversion of pseudorandom code word. In 12-bit mode, between two read code words from a pseudorandom code track and their conversion, position is determined using two quadrature signals from the synchronization track. For both, 10-bit and 12-bit, operation modes it is necessary to form a main code word to determine the position and control code word in order to detect a code reading error, [5].

In the worst case, when the error of the read bits has occurred in both code tracks, the encoder can continue to work in the incremental mode. This is provided by rising and falling edges of signals A and B from synchronization track.

However, if the bit read errors occurred in a single code track, due to failure of one encoder module or due to the contamination of one code track, the encoder can continue to operate in mode of reduced reliability with a single code track. As possibility, if only part of the code track is damaged or contaminated, the encoder can only operate in that part in reduced reliability mode. In this way, the reliability of the position encoder operation is significantly increased. As a code reading error can occur due to some immediate external influence, such as vibration, temperature, it can be introduced a testing procedure whether the error occurs again in the same place in the subsequent reading of these same bits.

## CONCLUSION

Arrangement of the synchronization and code reading heads provides reliable code reading and checking of code reading errors in presented pseudorandom encoder. In the event of a code reading head failure or contamination of one code track, the encoder can continue to operate with reduced reliability. Experimental results verify the validity of the implemented solutions and operation modes in presented encoder.


## ACKNOWLEDGEMENT

This work has been supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.


## REFERENCES


[1] E.M. Petriu, Absolute position measurement using pseudorandom binary encoding, IEEE Instrum. and Meas. Magazine, vol. 1, no. 3, pp. 19–23, 1998.

[2] E.M. Petriu, Scanning method for absolute pseudorandom position encoders, Electronic Letters, vol. 24, no. 19, pp. 1236–1237, 1988.

[3] M. Arsić, D. Denić, New pseudorandom code reading method applied to position encoders, Electron. Lett., vol. 29, no. 10, pp. 893–894, 1993.

[4] E.M. Petriu, J.S. Basran, F.C.A. Groen, Automated guided vehicle position recovery, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 39, no. 1, pp. 254–258, 1990.

[5] D. Denic, M. Arsic, Checking of pseudorandom code reading correctness, Electronic Letters, vol. 29, no. 21, pp. 1843–1844, 1993.

[6] D. Denić, G. Miljković, J. Lukić, M. Arsić, Pseudorandom position encoder with improved zero position adjustment, Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, vol. 25, no. 2, pp. 20-28, 2012.

[7] H. Wang, J. Wang, B. Chen, P. Xiao, X. Chena, N. Cai, B. W.-K. Ling, Absolute optical imaging position encoder, Measurement, vol. 67, pp. 42-50, 2015.

[8] D. Denić, G. Miljković, Code reading synchronization method for pseudorandom position encoders, Sens. Actuators A, vol. 150, pp. 188–191, 2009.

[9] D. Denić, I. Stojković, Pseudorandom/natural code converter with parallel feedback logic configuration, Electronic Letters, vol. 46, no. 13, pp. 921–922, 2010.

[10] D. Denić, M. Dinčić, G. Miljković, and Z. Perić, A contribution to the design of fast code converters for position encoders, International Journal of Electronics, vol. 103, no. 10, pp. 1654-1664, 2016.

[11] F.J. MacWilliams, N.J.A. Sloane, Pseudo-random sequences and arrays, Proc. of the IEEE, vol. 64, pp. 1715-1729, 1976.

НАПРАВЛЕНИЕ 8

# СОЦИАЛНИ И ХУМАНИТАРНИ НАУКИ, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ, ПРЕДПРИЕМАЧЕСТВО И ИКОНОМИКА, И МАТЕМАТИКА

SESSION 8

# SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES, ORGANIZATION AND MANAGEMENT, ENTREPRENEURSHIP AND ECONOMY, MATHEMATICS

# EVALUATION OF THE INTELLECTUAL CAPITAL IMPACT ON THE COMPANY'S ATTRACTIVENESS

**Rima Tamošiūnienė[1], Monika Sajavičiūtė[2]**
[1 2] *Vilnius Gediminas Technical University, Financial Engineering Department, Saulėtekio ave. 11, LT-10223, Vilnius, Lithuania*

**Abstract**
*At present, the most effective tool that allows strategic and operational restructuring of the business system is the business value management process, which helps to increase capitalization and attractiveness of investments, ensure efficient use and formation of all kinds of resources. Therefore, in the knowledge economy, which is characterized by innovation and greater influence of intellectual processes on economic activity at all levels of the economy, this process is impossible without determining the role of intellectual capital as an intangible component of the company's value and its effective management. The article examines the structure of intellectual capital, which consists of three components: human capital, relational capital and structural capital. The aim of the article is to make a ranking of companies attractiveness by application of criteria decision-making method TOPSIS considering the structure of intellectual capital. To achieve the goal, an analysis of scientific literature, secondary data analysis, comparative analysis and the criteria decision-making method TOPSIS are emphasized.*

**Keywords:** structure of intellectual capital, technique for order of preference by similarity to ideal solution, human resources capital, structural capital, relational capital.

## INTRODUCTION

The influence of intellectual capital on the performance of companies and their business value is a relevant topic until now. Although this topic has been more actively analyzed since 1990, technological changes, constantly changing operating conditions and challenges force scientists and practitioners, company managers to look for new opportunities to increase the influence of intellectual capital in order to achieve the company's competitiveness in conditions of risk and uncertainty. The survival of many companies depends on their willingness and ability to adapt to such changes. Most scientists have proven through their research that intellectual capital is the main driver of successful and efficient economic activity [2][3][5]. According to Abdulaali [1], intellectual capital is a driver of intangible value in an organization that brings benefits in the future. To prove this, the aim is to investigate what influence intellectual capital has on the profitability of companies, the development of innovations, added value, and increasing value. As noted by Simanavičienė & Gižienė [15], in economic activity, as a result of globalization processes, more and more importance is given not to material resources (financial, etc.), but to human capital, which is formed from knowledge, abilities and skills. Using intellectual capital, companies can quickly adapt to changes and remain competitive in the markets. Intellectual capital is increasingly becoming a source of competitive advantage due to the comprehensive implementation of innovation [2][11]. As a result, the use of new and innovative technologies has created a growing need for competent and educated, qualified workers. Countries with few natural resources should focus on the development and implementation of the latest technologies in order to achieve a competitive advantage for companies in World markets. At the same time, they must pay more attention to human capital as a component of intellectual capital.

As it was already mentioned, in the current scientific literature, much attention is paid to the intellectual capital of the organization, which involves all intangible resources in order to increase the value of the company and its competitiveness. Most of the conducted

scientific studies have proven that all components of intellectual capital affect the company's added value and business value, but it should be noted that only a very small part of the indicators characterizing intellectual capital are presented in financial reports. For this reason, information is only partially provided to interested parties. Therefore, researchers often use multi-criteria decision-making methods, expert evaluation and other methods in research to prove the impact of all components of intellectual capital on the value of the company, as well on the company's attractiveness.

The aim of the article is to make a ranking of companies attractiveness by application of criteria decision-making method TOPSIS considering the structure of intellectual capital. To achieve this goal the structure of intellectual capital has to be described. In this paper the structure of intellectual capital consists of three components: human capital, relational capital and structural capital. To achieve the goal, an analysis of scientific literature, secondary data analysis, comparative analysis and the criteria decision-making method TOPSIS are emphasized.

## CONCEPT AND THE STRUCTURE OF THE INTELLECTUAL CAPITAL

Various definitions have been given by researchers to the concept of intellectual capital. Most of them give very similar definition of the concept of intellectual capital and try to answer to the similar questions. Stewart [16], Cricelli at al. [3][4], Survilaite [17] and others were analysing what resources actually make up these generic capital forms is unique to each and every organisation, as only those resources that are important for creating value should be included in constructing the distinction tree for an organization. Intellectual capital approach helps us to develop a strategy that focuses on intangible resources, allowing them to be managed more effectively and increasing in shareholder value. Mostly scientists understand intellectual capital as the sum of all knowledge in the company that is able to generate company's value added and is affected by knowledge quality and knowledge productivity [3][5][11]. In fact intellectual capital is the concept without any clear guidance as to what exactly it is and what structure it has. Nevertheless, it is agreed that intellectual capital is an intangible concept, which is difficult to define and evaluate [19][20]. It is also agreed that intellectual capital is observed as a value driver of company's successful activity and performance. Joint-stock companies have a huge quantity of intellectual capital and the potential not just to maintain it, but also to strengthen and develop it more applying innovations, educating and motivating of employees etc. Thus intellectual capital can be understood as the economic value of intangible assets of a company. In this case company is perceived in general.

After analyzing the scientific literature, it is possible to distinguish six main features that describe and reveal the complexity of the concept of intellectual capital. Based on research conducted by researchers, it can be said that intellectual capital is unique and thus contributes to the creation of an organization's competitive advantage [8][12]. Thus intellectual capital, by creating a competitive advantage, affects the successful operation of the company. Most researchers emphasize the influence of intellectual capital, which consists of intangible resources in the company, on increasing the company's business value [12][13]. Many authors emphasize that the concept of intellectual capital is holistic and dynamic [9][10]. Some of them emphasized that intellectual capital is irreplaceable [4][19]. Thus the main features of intellectual capital are such: it is unique, creating of competitive advantage of the company, intangible and invisible, dynamic, creating of the companies' added value and market value; irreplaceable.

The ability to foster and increase the value added in companies is one of the most important intellectual capital functions. Summarizing the examined scientific literature we could emphasize that intellectual capital is the total amount of intangible capital of a company, which significantly increases the value added of the respective company.

The structure of intellectual capital is discussed in many scientific papers by various authors and can be understood as the sum of:

- Human capital, structural capital and customercapital [9][16];
- Human capital, structural capital and

relational capital [5][17];

- Human capital, structural capital, market capital and innovational capital [1][10];
- Human capital, customer capital, process capital and innovation capital [4][11].

The intellectual capital literature draws on aspects of practical applications, providing a framework for explaining the value creation process as the link between resources and shareholder value [19]. By these authors intellectual capital is present in three dimensions of business or in one of these three dimensions: its staff (Human Resource Capital), its structures (Structure Capital) and its customers (Relational Capital).

- By Macerinskiene & Survilaite [18], Edvinsson & Malone [5], Seo & Kim [14] Human Recourse capital indicators are selected for further research: number of employees, education of employees; productivity of employees, and personnel costs that consists of two main indicators: expenses per employee and proportional costs of employee.
- As Structural capital indicators are selected for further research: financial leverage, company's identity that consists of two main indicators: company's age and strategy implementation.
- As Juridical capital indicators are selected for further research: intangible assets, legally protected information that was treated as the number of patents, licences, trademarks, also characteristics of the company that consists of two main indicators: location in the capital and number of subsidiaries.
- As Relational capital indicators are selected for further research: relational expenses that are treated as marketing, advertising, representation expenses and dissemination of company's awareness that consists of three main indicators: social networks, evaluation of the social networks, respectability of the company e.t.c. [5][14][18]

Thus in this paper intellectual capital is considered to be the sum of human capital, structural capital (including organizational capital and juridical capital) and relational capital (social capital).

**METHODOLOGICAL PART OF THE STUDY**

Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method for decision support system is quite widely applied in decision making process solving of problems in economics and management. TOPSIS is the part of the analytical multi-criteria decision-making technique first introduced by Yoon and Hwang. The main idea of this technique, the preferred alternative is the one with the most close to the positive ideal solution and the further to the negative ideal solution [6][7].

TOPSIS indicates the best and the worst solutions with regard to each criteria [6][7]. The TOPSIS method is based on vector normalization:

$$\widetilde{r}_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} r_{ij}^2}}, \qquad (1)$$

where $\widetilde{r}_{ij}$ is a normalized value of $i^{th}$ criterion for $j^{th}$ object.

The best ($V^*$) and the worst ($V^-$) solutions are calculated by formula:

$$V^* = \{V_1^*, V_2^*, ..., V_n^*\} = \{(\max_j \omega_i r_{ij} / i \in I_1), (\min_j \omega_i \widetilde{r}_{ij} / i \in I_2)\}$$

$$V^- = \{V_1^-, V_2^-, ..., V_n^-\} = \{(\min_j \omega_i r_{ij} / i \in I_1), (\max_j \omega_i \widetilde{r}_{ij} / i \in I_2)\} \qquad (2)(3)$$

where: $I_1$ is a set of maximizing criteria, $I_2$ is a set of minimizing criteria, $r_{ij}$ is a normalized value of $i^{th}$ criterion for $j^{th}$ object, $\omega_i$ – weight of $i^{th}$ criterion ($\sum_{i=1}^{n} \omega_i = 1$).

The distance of each alternative to the best and the worst solutions is calculated:

$$D_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\omega_i \widetilde{r}_{ij} - V_i^*)^2}, \qquad (4)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\omega_i \widetilde{r}_{ij} - V_i^-)^2}. \qquad (5)$$

where $D_j^*$ – distance to the best solutions, $D_j^-$ – distance to the worst solutions.

The main criterion $C_j^*$ is calculated by formula:

$$C_j^* = \frac{D^-}{D_j^* + D_j^-}, \qquad (6)$$

where ($j$ = 1,…, $n$), and $C_j^*$ must be between $(0 \le C_j^* \le 1)$.

Followed by the TOPSIS method criterion $C_j^*$ with maximum value corresponds to the best alternative. Finally all alternatives should be ranked in descending order [6][7].

## RANKING COMPANIES BY IMPACT OF INTELLECTUAL CAPITAL

Criteria and alternatives must be selected in order to evaluate the influence of intellectual capital of companies on their attractiveness. Small capitalization companies operating in Lithuania were chosen as alternatives for tendering. These are companies with a market value of less than 150 million euro. Indicators of components of intellectual capital were selected as criteria. The data for the study was taken from financial statements of companies of 2020 year. The weights assigned to each criterion are the same. It should be noted that for accurate research results, the AHP method should be applied for determination the weights of each criterion [6]. All results are presented in the Table 1. After this step should be prepared a normalised matrix of presented alternatyves – companies and it's criteria (2 table).

**1 table.** Lithuanian Joint Stock Companies for ranking and it's criteria

| Companies | Amount of employees | Education of employees | Part of personnel costs, % | Costs per one employee thousand Eur | Finan-cial leverage | Age of the company | Intangible assets, thousand Eur | Marke-ting expenses, thousand Eur |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | max | max | max | max | min | max | max | max |
| Weights | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| Apranga | 1956 | 0,218 | 0,358 | 2,325 | 1,48 | 28 | 534 | 2021 |
| AUGA group | 1158 | 0,233 | 0,458 | 4,047 | 1,31 | 18 | 2723 | 846 |
| Šiaulių bank | 849 | 0,870 | 0,362 | 27,644 | 7,4 | 29 | 4232 | 2716 |
| Klaipėdos nafta | 411 | 0,599 | 0,478 | 11,406 | 0,29 | 27 | 496 | 54 |
| Panevėžio statybos trestas | 284 | 0,326 | 0,293 | 16,141 | 1,67 | 28 | 290 | 45 |
| Pieno žvaigždės | 1696 | 0,246 | 0,432 | 3,515 | 1,18 | 22 | 86 | 1286 |
| Rokiškio sūris | 1386 | 0,108 | 0,343 | 2,234 | 0,36 | 29 | 82 | 169 |
| Žemaitijos pienas | 1242 | 0,159 | 0,455 | 10,960 | 0,34 | 28 | 53 | 96 |
| Utenos trikotažas | 1081 | 0,103 | 0,333 | 1,749 | 1,23 | 26 | 9448 | 445 |

Source: https://nasdaqbaltic.com/statistics/lt/shares

**2 table.** Normalised Matrix

| Companies | Amount of employees | Education of employees | Part of personnel costs, % | Costs per one employee, thousand euro | Financial leverage | Age of the company | Intangible assets, thousand euro | Marketing expenses, thousand euro |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | max | max | max | max | min | max | max | max |
| Weights | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| Apranga | 0,525 | 0,180 | 0,288 | 0,064 | 0,169 | 0,334 | 0,049 | 0,539 |
| AUGA group | 0,311 | 0,192 | 0,368 | 0,111 | 0,150 | 0,215 | 0,251 | 0,225 |
| Šiaulių bank | 0,228 | 0,717 | 0,291 | 0,757 | 0,845 | 0,346 | 0,390 | 0,724 |
| Klaipėdos nafta | 0,110 | 0,493 | 0,384 | 0,312 | 0,033 | 0,322 | 0,046 | 0,014 |
| Panevėžio statybos trestas | 0,076 | 0,269 | 0,235 | 0,442 | 0,191 | 0,334 | 0,027 | 0,012 |
| Pieno žvaigždės | 0,455 | 0,203 | 0,348 | 0,096 | 0,135 | 0,262 | 0,008 | 0,343 |
| Rokiškio sūris | 0,372 | 0,089 | 0,275 | 0,061 | 0,041 | 0,346 | 0,008 | 0,045 |
| Žemaitijos pienas | 0,333 | 0,131 | 0,366 | 0,300 | 0,039 | 0,334 | 0,005 | 0,026 |
| Utenos trikotažas | 0,290 | 0,085 | 0,268 | 0,048 | 0,140 | 0,310 | 0,871 | 0,119 |

After this step a weighted matrix has to be prepared. In the 3rd table are shown ideal positive and negative solutions.

**3 table.** Positive and negative solutions

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $V^+$ | 0,066 | 0,090 | 0,048 | 0,095 | 0,004 | 0,043 | 0,109 | 0,090 |
| $V^-$ | 0,010 | 0,011 | 0,029 | 0,006 | 0,106 | 0,027 | 0,001 | 0,001 |

After identification of ideal positive and negative solutions the distance to the ideal positive and negative solutions has to be calculated. Finally a ranking of all alternatives should be done (4 table).

**4 table.** Distance to the ideal positive and negative solutions and ranking

| Companies | $S_i^+$ | $S_i^-$ | $P_i$ | Rank |
|---|---|---|---|---|
| Apranga | 0,153 | 0,123 | 0,444 | 2 |
| AUGA group | 0,148 | 0,103 | 0,410 | 6 |
| Šiaulių bankas | 0,124 | 0,158 | 0,560 | 1 |
| Klaipėdos nafta | 0,158 | 0,121 | 0,433 | 4 |
| Panevėžio statybos trestas | 0,166 | 0,099 | 0,374 | 8 |
| Pieno žvaigždės | 0,159 | 0,111 | 0,411 | 5 |
| Rokiškio sūris | 0,182 | 0,109 | 0,373 | 9 |
| Žemaitijos pienas | 0,169 | 0,113 | 0,400 | 7 |
| Utenos trikotažas | 0,151 | 0,122 | 0,441 | 3 |

**5 table.** Annual Returns % (EUR) for 5 years period

| | **2017** | **2018** | **2019** | **2020** | **2021** | **2022** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Rokiskio Suris AB | 60.11 | -5.09 | 4.38 | 19.84 | 2.05 | 7.12 |
| ŠIAULIŲ BANKAS AB | 58.75 | -17.28 | 33.42 | -1.58 | 53.75 | -26.16 |
| Apranga APB | 4.67 | -30.24 | 40.44 | -14.69 | 12.78 | 9.11 |
| NASDAQ OMX Vilnius GR EUR | 16.97 | -5.57 | 15.44 | 14.67 | 18.31 | -7.38 |

Source: https://nasdaqbaltic.com/statistics/lt/shares

The best results show the Šiaulių bankas AB. The uniqueness of this bank is that a very large number of employees have a higher education comparing to other companies. Costs per one employee are also biggest comparing to other companies. The biggest amount of marketing expenses also is seen in this bank. It means that top management of the bank is paying a big attention to the customer relationship management and of course to the intellectual capital of the company. In the second places are Apranga APB. This company is also characterized by big attention to the intellectual capital of the company. In the 5 table are presented annual returns of three companies, two of them are in the first and second place, Rokiskio suris AB – in the ninth place. For further researches should be analyzed correlation between annual returns of companies and impact of intellectual capital on these companies.

## CONCLUSION

After analyzing the scientific literature six main features that describe and reveal the complexity of the concept of intellectual capital were distinguished. It is uniqueness, possibility to create of competitive advantage of the company, as well, to create companies added value and market value also intellectual capital is intangible and invisible, dynamic and irreplaceable.

The structure of intellectual capital in this research is considered to be the sum of human capital, structural capital (including organizational capital and juridical capital) and relational capital (including social capital).

TOPSIS method is appropriate tool for ranking companies by the influence of intellectual capital to the company attractiveness.

## REFERENCE


[1] Abdulaali, A. R. (2018). The impact of intellectual capital on business organization. *Academy of Accounting and Financial Studies Journal.* Iraq: Southern Technical University.

[2] Albertini, E. (2019). Intellectual Capital and Financial Performance: A Meta-Analysis and Research Agenda. *M@n@gement*, *22*(2), 216. https://doi.org/10.3917/mana.222.0216

[3] Cricelli, L., Greco, M., & Grimaldi, M. (2013). The assessment of the intellectual capital impact on the value creation process: a decision support framework for top management. *International Journal of Management and Decision Making*, *12*(2), 146. https://doi.org/10.1504/IJMDM.2013.054460

[4] Cricelli, L., Greco, M., & Grimaldi, M. (2014). An overall index of intellectual capital. *Management Research Review. p. 880-901.*

[5] Edvinson, L., & Malone, M. (1997). Intellectual capital: realizing your company‘s true value by finding its Hidden Brainpower, HarrperCollins. New York: NY.

[6] Ginevičius, R.; Krivka, A.; Šimkūnaitė, J. (2010). The Model of Forming Competitive Strategy of an Enterprise Under the Conditions of Oligopolic Market. *Journal of Business Economics and Management* 11(3): 367–395.

[7] Ginevičius, R.; Podvezko, V. (2008). Compatibility of multicriteria evaluation methods. *Business: Theory and Practice,* 9(1): 73–80.

[8] Jordão, R. V. D., & Almeida, V. R. de. (2017). Performance measurement, intellectual capital and financial sustainability. *Journal of Intellectual Capital*, *18*(3), 643–666. https://doi.org/10.1108/JIC-11-2016-0115

[9] Kristandl, G., & Bontis, N. (2007). *Defining intangible assets and intellectual capital, Management Decision.*

[10] Lentjušenkova, O., & Lapina, I. (2016). The transformation of the organization’s intellectual capital: from resource to capital. *Journal of Intellectual Capital*, *17*(4), 610–631. https://doi.org/10.1108/JIC-03-2016-0031

[11] Maditinos, D., Chatzoudes, D., Tsairidis, C., & Theriou, G. (2011). The impact of intellectual capital on firms’ market value and financial performance. *Journal of Intellectual Capital*, *12*(1), 132–151. https://doi.org/10.1108/14691931111097944

[12] Maditinos, D. (2011). The impact of intellectual capital on firms‘ market value and financial performance. *Journal of Intellectual Capital*, 132-151.

[13] Rahman, S. (2012). The role of intellectual capital in determining differences between stock market and financial performance. *International Research Journal of Finance and Economics*.

[14] Seo, H. S., & Kim, Y. (2020). Intangible assets investment and firms performance: evidence from small and medium-sized enterprises in Korea. *Journal of Business Economics and Management*, *21*(2), 421–445. https://doi.org/10.3846/jbem.2020.12022

[15] Simanavičienė, Ž., & Gižienė, V. (2012). *Žmogiškojo kapitalo vertinimo koncepcija/Business systems and Economics.* Kaunas.

[16] Stewart, T. (1997). *Intellectual Capital: The New Wealth of Organizations*.

[17] Survilaitė, S. (2017). *Įmonių intelektinio kapitalo įtakos jų rinkos vertei vertinimas Baltijos šalyse. Daktaro disertacija.* Vilnius.

[18] Survilaitė, S., & Mačerinskienė, I. (2019). *Intellectual capital in the listed companies of the Baltic States. Whiter our economies - 2019. (p. 46-63).* Vilnius: MRU.

[19] Tamosiuniene, R., & Survilaitė, S. (2015). Assessment of intellectual capital in joint-stock companies. *Business: Theory and Practice*, *17*(1), 56-64. https://doi.org/10.3846/btp.2016.686

[20] Tamosiuniene, R., Survilaitė, S., & Shatrevich, V. (2015). Intellectual capital approach to modern management through the perspective of a company’s value added. *Business: Theory and Practice*, *16*(1), 31-44. https://doi.org/10.3846/btp.2015.553

# ДИНАМИКА НА ДЕМОГРАФСКИ ПОКАЗАТЕЛИ И ЗАБОЛЕВАЕМОСТ ОТ СОЦИАЛНО-ЗНАЧИМИ ЗАБОЛЯВАНИЯ В ГАБРОВСКА ОБЛАСТ

**Иванка Стоянова - Тодорова**
*Технически университет - Габрово*

# DYNAMICS OF DEMOGRAPHIC INDICATORS AND MORBIDITY OF SOCIALLY SIGNIFICANT DISEASES IN GABROVO REGION

**Ivanka Stoyanova - Todorova**
*Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**
*In this report, the dynamics of the statistics of demographic indicators and dynamics of the population in the Gabrovo region are traced: numbers, age and gender composition, birth rate, death rate and natural increase. The mortality rate of the population is linked to the leading socially significant diseases: cardiovascular, oncological, metabolic, respiratory, and digestive system diseases, as well as COVID -19. The negative trends of the demographic situation in the Gabrovo region are outlined.*

**Keywords:** demographic indicators, population, age and gender composition, birth rate, death rate, socially significant diseases.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Населението на една държава е основен фактор за развитието на производството и социалния прогрес на обществото. От неговата численост, ценностна система и мотивация зависят в значителна степен динамиката и ефективността на икономическия растеж.

Демографската катастрофа в България, заедно с бедността, нарастващите неравенства и регионалните диспропорции, са сред най-големите заплахи, пред които е изправено днес българското общество. Динамиката показва продължаващо влошаване на показателите и увеличаване на риска за националната сигурност от ниската раждаемост и миграция, високата смъртност, нарастващото социално разслоение и бедност, продължаващото обезлюдяване на голяма част от регионите на България. [5]

За да бъдат спрени негативните демографски тенденции, е необходимо на първо място закрилата на семейството и децата да се превърнат в ценност за обществото и приоритет за държавата.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### Обща демографска характеристика на българското население

Резултатите от последното преброяване на населението на България през 2021 година потвърждават крайно неблагоприятната демографска ситуация у нас. Отчетено е най-голямото намаление на населението за последните 40 години. Така към 7 септември 2021 г. то е 6 519 789 души, което е спад с 844 781 души или с 11,5 % спрямо предходното преброяване през 2011 г.

Жените са 3 383 527 (51.9%), а мъжете 3 136 262 (48,1%). На 1000 жени се падат 927 мъже. Фактори, които оказват влияние върху броя на населението на страната са естественото движение (раждания и умирания) и външната миграция. [4]

Средногодишният темп на намаление на населението на година се ускорява от

0,7 между 2001-2011 г. на 1,2 в периода между 2011 и 2021 г. България е една от държавите с най-ниска раждаемост и с най-висока смъртност измежду всички държави-членки на ЕС. Коефициентът на раждаемост у нас е 9‰ при средно 10,4‰ за ЕС, а коефициентът на смъртност е 15,5‰, при 9,8‰ за ЕС. Болестите на органите на кръвообращението (сърдечно-съдови заболявания, диабет, хипертония, инфаркти, инсулти) и злокачествените новообразувания са най-сериозните причини за смъртност. В европейски план страната се нарежда на първо място измежду всички държави-членки на ЕС по смърт в резултат на болести на органите на кръвообращението, с близо три пъти по-високи нива от средните за ЕС. Отрицателният естествен прираст е основният фактор за топенето на населението у нас. Резултатите от последното преброяване показват, че починалите са с 501 хил. повече от новородените. На отрицателния естествен прираст се дължи 59,3% от общото намаление на населението. Във всичките години между 2011 и 2021 г. естественият прираст е отрицателен, като най-голямо е намалението в броя на населението през 2021 г. – с 90 317 души. Силно отражение върху общата смъртност в страната в последните две години имаше и пандемията от COVID-19. [5]

Продължаващите миграционни процеси на младежи до 30 години допълнително засилват тенденцията за топене и стареене на нацията. Причините за продължаващата емиграция на хора в трудоспособна и детеродна възраст са комплексни, но основните от тях са: липсата на перспектива за професионално развитие и социална сигурност за младите хора и продължаващото изоставане в равнищата на доходите спрямо останалите държави-членки на ЕС, включително и спрямо страните от Централна и Източна Европа.

Напусналите страната българи в десетте години до 2021 г. са 344 хил. души, като външната миграция има дял от 40,7% в стопяването на населението. [1]

Резултатите от преброяването показват, че за десетте години до 2021 г. най-много население е загубила област Видин, то се е стопило почти с една четвърт. Следват областите Смолян, Добрич, Габрово и Велико Търново, които са загубили приблизително една пета от населението си. За 10-годишния период намалява, както населението в градовете, така и в селата, като намалението в селата е по-голямо. В 199 населени места в страната няма нито един жител, а за десетгодишния период между двете преброявания всички 28 области регистрират спад на живеещите в тях хора.

Няма промяна и в друга негативна демографска тенденция у нас – за застаряване на населението. През 1900 г. 40,2% от жителите на страната ни са деца до 14 години, а през 2021 г. те са едва 14,1% от населението. Обратна е картината при най-възрастното население. В началото на миналия век хората над 65 г. са били 5,1%, а към миналата година те вече са 23,5%.

Към 7 септември 2021 год. населението над 65-годишна възраст е малко повече от 1,5 млн. души и е нараснало със 171 хил. души, или 12,6% спрямо предишното преброяване преди десет години. Населението между 15 и 64 години е малко над 4 млн. души и е намаляло с 958 хил. души спрямо 2011 г. Делът на най-младите хора у нас на възраст от 0 до 14 години се увеличава от 13,2% през 2011 г. на 14,1% през 2021 г., но абсолютният им брой намалява от 975 хил. преди десет години на 918 хил. през миналата година, или 5,9% от населението. [5]

Застаряването се отразява повече на жените, като 27,3% от българките са на възраст от 65 години нагоре, докато мъжете в същата възрастова група са 19,4%. Тенденцията е жените у нас да живеят по-дълго от мъжете.

Най-висок е делът на възрастното население в Габрово, където почти всеки трети човек е на 65 години или повече. Следват Монтана, Кюстендил, Силистра и Смолян, където възрастните хора са между 27% и 28% от населението. Най-нисък е делът на възрастното население в София-град, Благоевград, Варна и Бургас. Общо в 21 области делът на възрастното население е над средния в страната от 23,5%.

Най-висок дял на младото население от 0 до 14 години е отчетен в област Сливен с 18,7%, Бургас с 15,3% и Ямбол с 15%. На обратния полюс са Смолян, Видин и Габрово. [4]

Делът на населението в активна възраст (15 – 64 г.) е най-висок в област София – град с 65,8%. Общо у нас на всеки сто души във възрастовата група от 15 до 62 години се падат 60 души под 15 години или от 65 години нагоре. През 2011 г. това съотношение е било 46,5. Най-благоприятно е съотношението в София-град, Благоевград и Варна, където показателят е близо до 50, а на обратния полюс са Видин, Габрово и Ямбол, където е над 70. [6]

**Здравно-демографска характеристика на област Габрово**

**1. Численост и възрастова структура на населението**

Населението на област Габрово към 31.12.2021 год. е 103 404 души, от които 49 703 мъже, 53 701 жени; 82 576 обитатели на градовете и 20 828 обитатели на селата в областта (Таблица 1).

Населението на област Габрово представлява само около 1,6% от населението на страната. От таблица 1 е видно, че населението намалява с 2 384 души (2,25%) спрямо предходната 2020 година. В сравнение с 2000 година населението на областта е намаляло с 48 913 души (32,11%) – близо 1/3 от неговата численост. [2, 3]

За демографските прогнози интерес представлява възрастовата структура на населението. Делът на младото население в област Габрово (до 19 год.) е 15,73% и леко се увеличава спрямо 2020 год. (15,57%). Средно за страната за 2021 год. този показател е 19,19%. Населението в средна възраст (20-64 год.) е намаляло спрямо предходната година – 55,16% при 55,29% за 2020 год. (средно за страната за 2021 год. – 59,44%). Делът на възрастното население (над 65 год.) е леко намалял спрямо предходната година – 29,11% при 29,14% за 2020 год. и е доста по-голям от средния за страната – 21,67% за 2021 год. *(Таблица 2).*

***Таблица 1.*** *Състояние и движение на населението на област Габрово*

| **година** | общо | мъже | Отн. дял % | жени | Отн. дял % | в град | Отн. дял % | В село | Отн. дял % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1975** | 175900 | 104609 | 59,5 | 71291 | 40,5 | 125000 | 71,1 | 50900 | 28,9 |
| **1985** | 181824 | 91054 | 50,1 | 90770 | 49,9 | 138996 | 76,4 | 42828 | 23,6 |
| **1995** | 158048 | 76712 | 48,5 | 81336 | 51,5 | 123767 | 78,3 | 34281 | 21,7 |
| **2000** | 152317 | 73661 | 48,4 | 78656 | 51,6 | 118413 | 77,7 | 33904 | 22,3 |
| **2005** | 135780 | 65497 | 48,2 | 70283 | 51,8 | 108163 | 79,7 | 27617 | 20,3 |
| **2010** | 127750 | 61543 | 48,2 | 66207 | 51,8 | 102407 | 80,2 | 25343 | 19,8 |
| **2015** | 114272 | 55263 | 48,36 | 59009 | 51,64 | 93489 | 81,81 | 20783 | 18,19 |
| **2019** | 106598 | 51298 | 48,12 | 55300 | 51,88 | 87265 | 81,86 | 19333 | 18,14 |
| **2020** | 105788 | 50874 | 48,09 | 54914 | 51,91 | 84547 | 79,92 | 21242 | 20,08 |
| **2021** | 103404 | 49703 | 48,07 | 53701 | 51,93 | 82576 | 79,86 | 20828 | 20,14 |

***Таблица 2.*** *Възрастова структура на населението в област Габрово към 31.12.2021 год.*

| Брой | Общо | Възрастови групи | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0-19 год. | | 20-64 год. | | Над 65 г. | |
| | | брой | % | брой | % | брой | % |
| Общо | 103404 | 16266 | 15,73 | 57036 | 55,16 | 30102 | 29,11 |
| Мъже | 49703 | 8358 | 16,82 | 29408 | 59,17 | 11937 | 24,02 |
| жени | 53701 | 7908 | 14,73 | 27628 | 51,45 | 18165 | 33,83 |

Периодът на стареене е по-продължителен при жените в сравнение с мъжете – през 2021 год. 33,83% от лицата над 65 години са жени и 24,02% - мъже *(Таблица 2).* Това е в пряка връзка със средната продължителност на живота, която за жените в областта е 79,2 години, а за мъжете – 74,0 години *(Таблица 3).* Мъжете в по-голяма сте-

пен боледуват от хронични социално-значими заболявания с фатален изход още в по-млада, активна възраст. От фигура 1 се вижда относителна стабилност по показателя средна продължителност на живота през последните три години. [2,3]

Като цяло демографските показатели очертават трайна тенденция към застаряване на населението в област Габрово.

***Таблица 3.*** *Средна продължителност на живота в област Габрово*

| Година | Общо | Мъже | Жени | Градове | Села |
|---|---|---|---|---|---|
| 2019 | 76,9 | 74,1 | 79,7 | 76,5 | 78,3 |
| 2020 | 76,6 | 73,7 | 79,6 | 76,3 | 77,5 |
| 2021 | 76,7 | 74,0 | 79,2 | 76,4 | 77,8 |




***Фиг. 1.*** *Средна продължителност на живота в област Габрово 2019 – 2021 година*

**2. Динамика на населението в област Габрово – раждаемост, смъртност, естествен прираст.**

През 2021 год. в област Габрово са родени 616 деца (610 живородени и 6 мъртвородени), от тях 307 момчета и 303 момичета. Раждаемостта е 5,8‰ и е по-ниска спрямо 2020 год. – 5,9‰. Средната раждаемост за страната през 2021 год. е 8,5‰. През периода 1980-2021 год. раждаемостта намалява повече от два пъти от 11,7‰ до 5,8 ‰ *(Таблица 4)*.

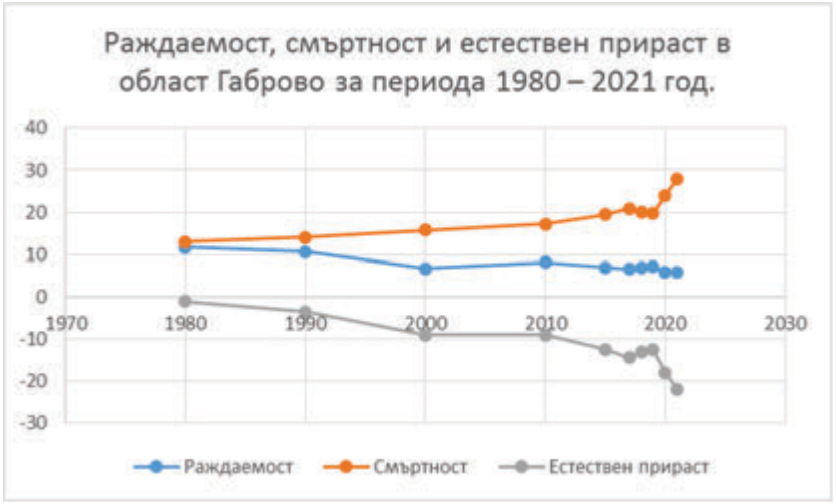
Приблизително 32 на всеки 1000 жени във фертилна възраст раждат, докато около 14 на 1000 правят аборт. През последните две години се наблюдава намаляване, както броя на ражданията, така и броя на абортите, за което е вероятно значението на пандемията от COVID 19.

Общата смъртност в област Габрово за 2021 год. е 26,9‰ (мъже 27,4‰ и жени 26,4‰) и е по-голяма спрямо 2020 год.- 23,96‰. Значително по-висока е смъртността в областта в сравнение със средната за страната, която през 2021 год. е 21,7‰ (23,2‰ мъже и 20,2‰ жени). През периода 1980-2021 год. смъртността нараства от 12,92‰ на 26,9‰. Това се дължи на прогресивното застаряване на населението и миграцията на младото население извън страната и областта. Значителното увеличение на смъртността в област Габрово през 2021 год. се дължи основно на умиранията от COVID 19. [2, 3]

***Таблица 4.*** *Раждаемост, смъртност и естествен прираст в област Габрово за периода 1980 – 2021 год. на 1000 души население*

| Година | Раждаемост | Смъртност | Естествен прираст |
|---|---|---|---|
| 1980 | 11,71 | 12,92 | -1,1 |
| 1990 | 10,56 | 14,09 | -3,53 |
| 2000 | 6,67 | 15,72 | -9,05 |
| 2010 | 8,1 | 17,23 | -9,13 |
| 2015 | 6,9 | 19,4 | -12,5 |
| 2017 | 6,5 | 20,9 | -14,4 |
| 2018 | 6,8 | 20,0 | -13,2 |
| 2019 | 7,01 | 19,66 | -12,65 |
| 2020 | 5,9 | 23,96 | -18,06 |
| 2021 | 5,8 | 26,9 | -21,1 |

Неблагоприятните стойности на основните демографски показатели в област Габрово – ниска раждаемост, висока смъртност и застаряване на населението обуславят и отрицателния естествен прираст. През 2021 год. естественият прираст е -21,1‰, при раждаемост 5,8‰ и смъртност 26,9‰. За страната през 2021 год. естественият прираст е 13,2‰. Това обяснява челното място на област Габрово в негативната демографска класация на областите в страната *(Таблица 4, Фигура 2).*




***Фиг. 2.*** *Раждаемост, смъртност и естествен прираст в област Габрово за периода 1980-2021 година*

На Таблица 5 и Таблица 6 е показана динамиката на смъртността по възрастови групи и по пол в област Габрово.

***Таблица 5.*** *Смъртност по възрастови групи в област Габрово (на 1000 души население от съответната възрастова група)*

| Година | Общо | Под 1 год. | От 1 до 19 г. | От 20 до 64г. | Над 65 год. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1995 | 15,03 | 8,15 | 0,15 | 3,75 | 47,01 |
| 2000 | 15,72 | 4,88 | 0,3 | 3,58 | 53,3 |
| 2010 | 17,23 | 5,86 | 0,17 | 4,76 | 62,87 |
| 2013 | 17,8 | 9,42 | 0,16 | 2,94 | 61,69 |
| 2014 | 18,2 | 0 | 0,32 | 5,3 | 56,29 |
| 2015 | 19,4 | 3,78 | 0,43 | 6 | 58,33 |
| 2016 | 19,1 | 5,5 | 0,19 | 5,44 | 57,93 |
| 2017 | 20,91 | 8,25 | 0,31 | 5,97 | 62,43 |
| 2018 | 19,98 | 5,37 | 0,44 | 5,41 | 59,44 |
| 2019 | 19,66 | 0 | 0,18 | 4,93 | 54,77 |
| 2020 | 23,96 | 6,36 | 0,51 | 7,52 | 67,68 |
| 2021 | 27,9 | 6,6 | 0,38 | 8,14 | 81,09 |

***Таблица 6.*** *Умрели и смъртност по пол в област Габрово*

| Година | Брой | | | Относителен дял | | | На 1000 души население | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | общо | мъже | жени | общо | мъже | жени | общо | мъже | жени |
| 2014 | 2135 | 1077 | 1058 | 100 | 50,44 | 49,56 | 18,2 | 19,0 | 16,6 |
| 2015 | 2234 | 1170 | 1064 | 100 | 52,37 | 47,63 | 19,4 | 21,0 | 17,6 |
| 2016 | 2169 | 1106 | 1063 | 100 | 50,99 | 49,01 | 19,1 | 20,4 | 18,3 |
| 2017 | 2327 | 1142 | 1185 | 100 | 49,08 | 50,92 | 20,91 | 21,3 | 20,6 |
| 2018 | 2184 | 1120 | 1064 | 100 | 51,28 | 48,72 | 19,98 | 21,24 | 18,8 |
| 2019 | 2114 | 1078 | 1036 | 100 | 50,99 | 49,01 | 19,66 | 20,83 | 18,58 |
| 2020 | 2431 | 1246 | 1185 | 100 | 51,25 | 8,75 | 22,89 | 30,26 | 26,49 |
| 2021 | 2811 | 1379 | 1432 | 100 | 49,06 | 50,94 | 26,87 | 27,42 | 26,37 |

На таблица 7 и фигура 3 е представена структурата на общата заболеваемост и болестност по класове болести през 2021 година.

***Таблица 7.*** *Заболеваемост и болестност – регистрирани заболявания в лечебните заведения за първична извънболнична помощ по класове болести през 2021 год.*

| Класове болести по МКБ-10 | Брой | Относителен дял (%) | На 100 000 души население | От тях за първи път |
|---|---|---|---|---|
| Някои инфекциозни и паразитни болести | 12572 | 8,25 | 120,2 | 6625 |
| Новообразувания | 2599 | 1,71 | 24,85 | 564 |
| Болести на ендокринната система | 6732 | 4,42 | 64,36 | 877 |
| Психични и поведенчески разстройства | 1992 | 1,31 | 19,04 | 370 |
| Болести на нервната система | 6433 | 4,22 | 61,5 | 1557 |
| Болести на окото и придатъците му | 6117 | 4,02 | 58,48 | 1696 |
| Болести на ухото и мастоидния израстък | 3628 | 2,38 | 34,69 | 13,23 |
| Болести на органите на кръвообращението | 35095 | 23,04 | 335,53 | 3440 |
| Болести на дихателната система | 25096 | 16,47 | 239,93 | 15758 |
| Болести на храносмилателната система | 6952 | 4,56 | 66,47 | 2628 |
| Болести на костно-мускулната система | 9780 | 6,42 | 93,50 | 2270 |
| Болести на пикочо-половата система | 8877 | 5,83 | 84,87 | 2781 |
| Травми и отравяния | 4775 | 3,13 | 45,65 | 4775 |
| COVID 19 | 13753 | 9,03 | 131,49 | 5718 |
| Други | 53416 | 35,07 | 510,69 | 5739 |
| Общо | 152331 | 100 | 1456,38 | 48320 |




***Фиг. 3.*** *Относителен дял на болестността в област Габрово по класове болести през 2021 година*

През 2021 година в област Габрово са починали 2811 души, от които 571 от COVID 19.

От Таблица 8 и фигура 4 е видно доминирането на болестите на органите на кръвообращението като причина за смърт с относителен дял 53,5%.

***Таблица 8.*** *Смъртност по класове болести през 2021 година в област Габрово*

| Класове болести по МКБ-10 | Брой | Относителен дял (%) | На 100 000 д. население |
|---|---|---|---|
| Инфекциозни и паразитни болести | 14 | 0,5 | 13,38 |
| Новообразувания | 315 | 11,21 | 301,16 |
| Болести на ендокринната система | 48 | 1,71 | 45,89 |
| Психични и поведенчески разстройства | 3 | 0,11 | 2,87 |
| Болести на нервната система | 13 | 0,46 | 12,43 |
| Болести на органите на кръвообращението | 1504 | 53,5 | 1437,91 |
| Болести на дихателната система | 134 | 4,77 | 128,11 |
| Болести на храносмилателната система | 116 | 4,13 | 110,9 |
| Болести на костно-мускулната система | 3 | 0,11 | 2,87 |
| Болести на пикочо-половата система | 25 | 0,89 | 23,9 |
| Травми и отравяния | 47 | 1,67 | 44,93 |
| COVID 19 | 571 | 20,31 | 545,91 |
| Други | 18 | 0,65 | 17,21 |
| Общо | 2811 | 100 | 2687,48 |




***Фиг. 4.*** *Относителен дял на общата смъртност по класове болести в област Габрово през 2021 година*

Таблица 9 и фигура 5 отразяват смъртността от социално-значими заболявания в област Габрово през 2021 год. Доказва се отново водещото място на болестите на органите на кръвообращението, следвани от злокачествените новообразувания и болестите на дихателната система като причина за смърт и в глобален мащаб. [2,3]

***Таблица 9.*** *Смъртност от социално-значими заболявания в област Габрово през 2021 година*

| Класове болести по МКБ-10 | Брой | На 100 000 д. население |
|---|---|---|
| Инфекциозни и паразитни болести, вкл. туберкулоза | 14 | 13,38 |
| Новообразувания - злокачествени | 332 | 317,41 |
| Болести на ендокринната система, вкл. диабет | 48 | 45,89 |
| Болести на органите на кръвообращението | 1540 | 1472,33 |
| Болести на дихателната система | 151 | 144,36 |
| Болести на храносмилателната система | 114 | 108,99 |
| Травми и отравяния | 56 | 53,54 |
| Обща смъртност | 2255 | 2180,77 |




***Фиг. 5.*** *Смъртност от социално-значими заболявания в област Габрово през 2021 година*

Населението на област Габрово е изложено на традиционните рискови фактори, обуславящи нездравословния начин на живот:

- **Нездравословно хранене** – води до редица болести на органите на кръвообращението, някои видове рак, диабет, болести на храносмилателната система и др. Сериозен проблем е високата консумация на мазнини от животински произход, недостатъчният прием на пресни плодове и зеленчуци, ниската консумация на мляко, млечни продукти и риба, високият прием на сол.

- **Ниска физическа активност** – в съчетание с нездравословното хранене води до забавяне на нормалното физическо и психическо развитие при децата, до появата на затлъстяване и други патологични състояния. Тя е рисков фактор за сърдечно-съдови заболявания, рак, диабет тип 2 и други социално-значими заболявания при населението на средна възраст.

- **Тютюнопушене** – и активните и пасивните пушачи са изложени на повишена опасност от рак на белия дроб, исхемична болест на сърцето и др.

- **Злоупотреба с алкохол** – води до соматични, психологични и социални последствия. Увеличава риска за хипертония, мозъчен инсулт, цироза на черния дроб, рак на устната кухина, фаринкса, ларинкса, хранопровода, стомаха, дебелото черво и гърдата. Големи са проблемите, свързани с работното място, производителността на труда, семейството, насилието, престъпленията и самоубийствата.

- **Употреба на психотропни вещества** – силно ограничава работоспособността, води до загуба на трудов и интелектуален потенциал, води до недохранване и отслабване на организма, преждевременна смърт, заразяване с хепатит, СПИН и др. Провокира извършване на тежки престъпления, от което страдат и семейството и обществото.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представените данни и направеният анализ дават възможност да се направят следните обобщения за здравно-демографската ситуация в област Габрово:

- Явно изразена тенденция за намаляване броя на населението, като продължава и неговото прогресивно застаряване;
- Запазват се много ниските стойности за раждаемост в областта в сравнение със средните стойности за страната;
- Утвърждава се тенденция за увеличаване на общата смъртност в област Габрово, като най-висок дял сред причините за смърт заемат болестите на органите на кръвообращението – 53,5%, следвани от COVID 19 – 20,31% и злокачествените новообразувания – 11,21 %.
- При заболеваемостта на първо място, с относителен дял 32,61% са болестите на дихателната система, следвани от инфекциозните и паразитни болести – 13,71% и COVID 19 – 11,83%.

## REFERENCE


[1] Sugareva.M., M.Murgova. Kakvi sa realnite demografski problemi na Bulgaria. Nepublikuvan doklad za administratsiata kam Prezidentstvoto na Republika Bulgaria. Septemvri, 2020. www.nsi.bg › spisaniestatistika › page › download

[2] Godishen analiz na zdravno-demografskoto sastoyanie i zdravnata mrezha v oblast Gabrovo za 2021 god. NSI. RZI-Gabrovo, m. yuli, 2022.

[3] Zdraveopazvane, Kratak statisticheski spravochnik za 2021 g. RZI-Gabrovo, 2022.

[4] https://dnes.dir.bg/na-fokus/prebroyavane-2021-kakvo-stoi-zad-demografskata-kriza

[5] http://www.kontrapunkti.bg/index.php/bg/визия за България/демографската криза

[6] https://www.investor.bg/a/516-politika/361227-naselenieto-na-balgariya-se-topi-po-barzo-i-prodalzhava-da-zastaryava

НАПРАВЛЕНИЕ 9

# ОБРАЗОВАТЕЛНИ ТЕХНОЛОГИИ

SESSION 9

# EDUCATIONAL TECHNOLOGIES

# IMPROVING THE STUDENTS' LEARNING OF OPTICS AND ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS BY COMPUTER-ASSISTED SCHOOL EXPERIMENTS

**Fabien Kunis[1], Konstantin Ilchev[2], Milena Stoyanova[3], Vesela Dimova[3], Tsanislava Genova[4], Stefan Valkov[4,5], Christina Andreeva[3,4]**

*[1]High School 125 Prof. Boyan Penev, Sofia, Bulgaria*
*[2]Private English Language School "Prof. Ivan Apostolov", Sofia, Bulgaria*
*[3]Faculty of Physics, Sofia University "St. Kliment Ohridski", Sofia, Bulgaria*
*[4]Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*
*[5]Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar Str., 5300 Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**

*In the present work, we investigate the possibility to improve the students' understanding of the spectral properties of different light sources and the transmission/absorption of different media by means of a partially computer-based school experiment in physics. Numerous studies have identified certain difficulties in understanding and applying atomic models, and more specifically, atomic spectra. Some examples of students' misconceptions are: they do not take into account the quantization of atomic energy levels; assume that the atom can absorb a photon with arbitrary energy; do not differentiate between the quantities intensity and frequency or assume them to be directly proportional; often assume violation of the energy conservation law with respect to the emission of a photon; do not consider the possibility of an atom to decay into an excited state with lower energy, etc.*

*The experiment includes data acquisition and analysis of the spectra of different light sources, as well as the transmission spectra of different media. The numerical data are then used to calculate and visualize the absorption spectra of the media, with an analysis of the energy level structure of the absorber. A detailed description of the experiments will be provided, together with results from a survey performed among 10-grade students before and after the experimental work. Our hypothesis is that the proposed combined practical work on physics and information technology will improve the students' understanding of optics and atomic and molecular physics, as well as their data analysis skills..*

**Keywords:** computer-assisted experiment; spectroscopy practical education.

## INTRODUCTION

High-school atomic physics covers several multifaceted concepts, the comprehension (and application) of which requires students to develop appropriate mental models. This process takes time and there is recent evidence [1] that diversifying instructional approaches helps students acquire knowledge about the microscopic world.

Generally, high-school students may form misconceptions related to the understanding and application of atomic models [2, 3], and more specifically, atomic spectra [4, 5]. Savall-Alemany [4] identify the following students' misconceptions: not taking into account the quantization of atomic energy levels; assuming that the atom can absorb a photon with arbitrary energy; not differentiating between the quantities *intensity* and *frequency* or assuming them to be directly proportional; violating energy conservation with respect to the emission of a photon; not considering the possibility of an atom decaying to an excited state of lower energy (i.e. not necessarily the ground state) etc.

The above mentioned study [1] suggests that, specifically in relation to understanding atomic transitions and spectra, 10th grade students may require more than one instructional approach - preferably experimental. The development, implementation and discussion of such a practical setup is presented below.

## HYPOTHESIS TESTING

The hypothesis we check with the present work is that computer-based school experiment will lead to an increased interest and better understanding of the studied material. This is realized by comparing the results from testing of students' knowledge of atomic physics before and after working on the laboratory setup constructed specifically for this purpose.

In the Bulgarian textbooks for 10-th grade students there is a plan for a laboratory exercise on making a DIY spectroscope, in which the diffraction grating is replaced by a CD or a DVD [6]. This idea is very appropriate and interesting but it allows for only a qualitative analysis of the spectra observed. On the other hand, the setup proposed by us includes a spectroscope with a CCD matrix allowing for acquisition of quantitative data with a good resolution. Thus, here the computer is used in this laboratory exercise for data acquisition, processing and visualization. We suppose that the students will benefit from this in two ways – first, this will improve their understanding of the basic concepts of atomic physics and second, it will improve their skills to work with certain computer programs. In this sense, the proposed laboratory work is interdisciplinary, since it involves areas such as physics, computer and information technology and mathematics. Moreover, such exercise will give the students a better idea of real scientific experiments.

To validate the hypothesis, we developed a test with seven multiple-choice questions targeting levels of remembering, understanding and application according to the Bloom's taxonomy [7]. More specifically, the questions included are: identification of atomic gas emission spectrum; knowing the definition of thermal emission, photoelectric effect, dispersion and fluorescence; absorption-emission of atoms in ground state; identification of hydrogen spectral line series; relationship between frequency and wavelength of light waves; calculation of emission photon energy from energy level diagram; understanding and application of energy conservation law through the relationship of absorption and fluorescence light colour and its relation to its energy.

Unfortunately, the student sample group was very small (only 12 students), so in the analysis of the preliminary (control) tests and the tests made after laboratory work we will not apply statistics but rather a case study approach.

### Description of the laboratory setup

The laboratory setup was designed for registration of emission, transmission and fluorescence spectra, with subsequent calculation of absorbance spectra (see Fig.1).

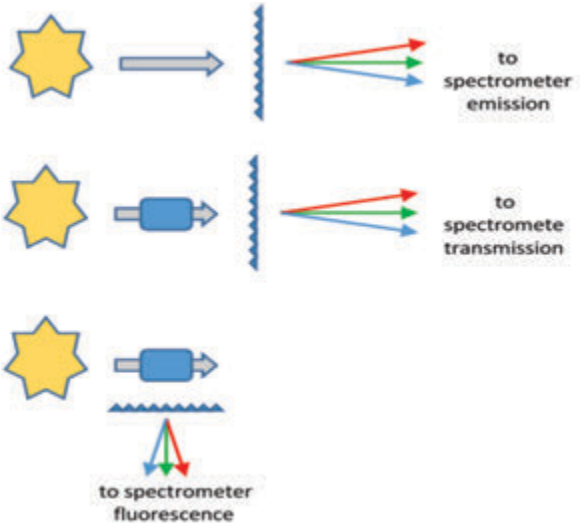



***Fig.1.*** *Schematic representation of the registration of emission, transmission and fluorescence spectra*

The setup includes a ThunderOptics SMA-E spectrometer with an optical fiber and an optional collimator input. The spectrometer has a USB output to a computer with an appropriate software for spectra visualization and data export. The following emission sources were used: solar light, tungsten white source, luminescence light tubes, several LEDs (with wavelength from 380 to 630 nm), He-Ne laser generating at 632.8 nm. The absorbers for the transmission measurement were red wine and an ethanol solution of fluorescein. They were prepared and placed in plastic cuvettes. The materials used for fluorescence measurement were fluorescein, olive oil, rum and tonic (the last three were randomly purchased from food market). They were also contained in cuvettes, held either freely or in a cuvette holder with four fiber outpurts. The free standing cuvettes were used when the collimator was required to collect

weaker signals, while strong signals were collected by means of fiber attached to the cuvette holder.

**Laboratory exercise reports**

In this section we will briefly illustrate some of the obtained spectral results used for discussion, analysis and comparison of the different processes involved.

Fig.2 presents emission spectra, where (a) is a comparison of a tungsten lamp with a luminescence tube (intensities normalized), and (b) presents the difference in the spectra of an LED and a laser with practically the same central wavelength.

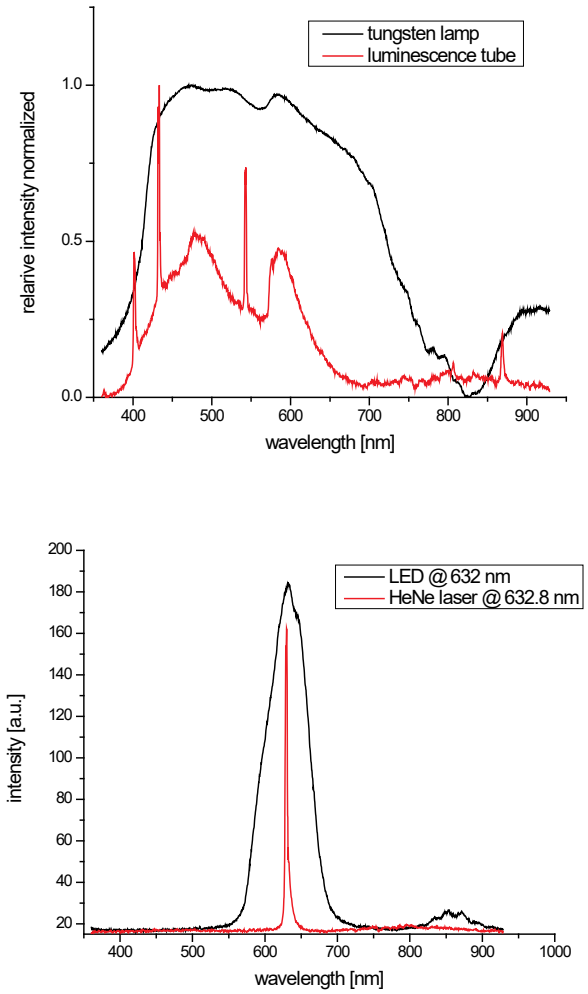



***Fig.2.*** *Emission spectra recorded. (a) tungsten lamp and luminescence tube (intensities normalized), and (b) LED and laser.*

It can be seen that this quantitative visualization is very useful and illustrative for the different kinds of spectral light sources, both in terms of linewidth and structure (spectral shape).

Next, transmission spectra were recorded and absorption spectra were calculated and analyzed. The example of fluorescein is illustrated in Fig.3 (the same was also performed with red wine). The figure shows the tungsten white broadband emission spectrum (purple line) registered when the input (light source) fiber and the output (to the spectrometer) fiber are connected to the empty cuvette holder. Placing an empty cuvette in the cuvette holder gives us the transmission spectrum of the cuvette itself (black line). When the fluorescein solution is added to the cuvette, the transmission again changes (red line in the figure). In general, when the spectrometer is calibrated not only for wavelength but also for intensity and when it is not saturated, the difference between the cuvette transmission and the fluorescein plus cuvette transmission signals should correspond to the absorption spectrum.

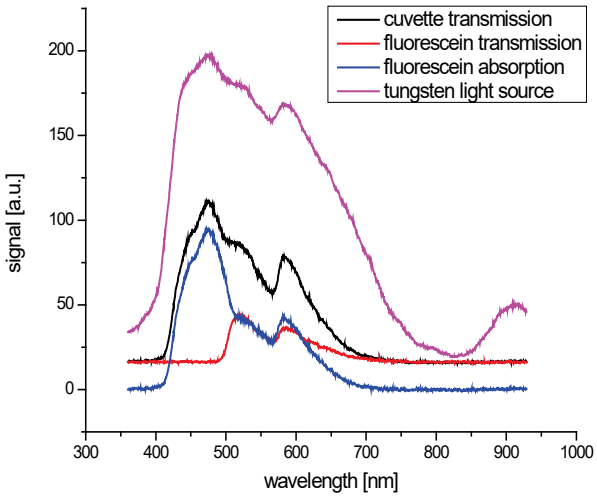



***Fig.3.*** *Transmission and absorption spectra of fluorescein*

In our case this is not so for the intensity calibration. This is mostly seen in the region around 550-560 nm, where there is an artefact dip in the signal due to a hardware related decrease in the sensitivity of the sspectrometer, according to information given by the producers. Work is in progress for a software correction which would make possible to perform more correct relative intensity measurements.

Finally, we recorded several fluorescence spectra by using the collimator, since the signals are weaker and undetectable without it. Four spectra are illustrated on a single plot in Fig.4. The excitation with a 400 nm LED source is seen at the low-wavelength side of the plot. It is indeed very useful from a didactic point of view to see the colour of fluorescence by eye and then see the plot – the greenish of fluorescein, the orange-reddish of olive oil, and the bluish of tonic and rum.

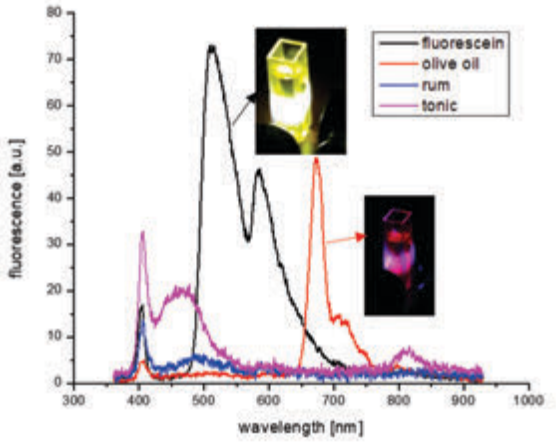



***Fig.4**. Fluorescence spectra registered*

**Analysis of the test results and hypothesis check**

The laboratory exercise being completed, with the spectra recorded, data extracted and processed, an active discussion followed, which showed that the students were very much interested and excited by the laboratory work, especially the fluorescence part. Shortly afterwards the testing was repeated and the results were compared with the results from the control testing.

Generally, the results, taken as a case study, were positive. Surprisingly, a slightly increased number of wrong answers were obtained on the final compared to the control test for the first question, where more students identified an emission spectrum as absorption one. One possible explanation for this effect is that during the laboratory exercise naturally more attention was paid to absorption, as related to transmission, absorption and fluorescence.

There were no wrong answers after laboratory work on the questions related to the definition of thermal emission, photoelectric effect, dispersion and fluorescence (3 wrong on the control); absorption-emission of atoms in ground state (4 wrong on the control); relationship between frequency and wavelength of light waves (7 wrong on the control); understanding and application of energy conservation law through the relationship of absorption and fluorescence light colour (2 wrong on the control).

For the question about identification of hydrogen spectral line series the correct answers increased, but still four of the students did not demonstrate improvement in understanding. The same applies for the question about calculation of emission photon energy from energy level diagram. We suppose (and this was confirmed by an interview with three of the students) that the reason for this is that students are confused by the negative energy values for the levels. Although they have mentioned at school that a negative value for the energy means that energy must be supplied to the system for the electron to overcome the attractive force of the nucleus, still this is not a notion fully comprehended by the students.

## CONCLUSIONS

We have shown that diversifying the teaching approaches is helpful for the students to gain and deepen their knowledge in the field of atomic physics. Unlike areas like mechanics and thermal effects studied at school, in this area students have no background knowledge and real-life experience on which they could rely. The microscopic world and its description therefore require more effort on the side of teachers to compensate for that.

Laboratory work is one of the most powerful tools in the hands of physics teachers. With our study we have shown that the performing computer-assisted laboratory exercise may further contribute to the students' involvement and thus, understanding of the material studied. We propose a laboratory setup based on a very user-friendly and affordable spectrometer connected to a computer for quantitative study of emission, transmission/absorption and fluorescence spectra and the processes lying behind them.

From the tests we made before and after laboratory work with a small number of 10-th

grade students it can be seen that the number of correct answers clearly increases. Moreover, not only the test results in general, but also the feedback from the students showed that the laboratory exercise, combined with visually attractive tasks and with computer work, proved useful both for the understanding of the phenomena and for raising the students' interest in atomic physics and optics.

**Acknowledgements:**
The work is financially supported by the Fund for Scientific Research at the University of Sofia "St. Kliment Ohridski", grant №80-10-42/10.05.2022 г.

## REFERENCE

[1] Ilchev, K.. (2022). On the effect of using diverse instructional methods in high-school atomic and nuclear physics. (to be published)
[2] R. Salazar (2019). Evaluating a Didactic Strategy to Promote Atomic Models Learning in High School Students through Hake's Method. Online Submission, 7(5), 293-312.
[3] Cardoso, P. S. S., Nunes, M. C. S., Silva, G. P. S., Braghittoni, L. S., & Trindade, N. M. (2020). Conceptions of high school students on atomic models, radiation and radioactivity. Physics Education, 55(3), 035030.
[4] F. Savall-Alemany, J. L. Domènech-Blanco, J. Guisasola, J. Martínez-Torregrosa (2016). Identifying student and teacher difficulties in interpreting atomic spectra using a quantum model of emission and absorption of radiation. Physical Review Physics Education Research, 12(1), 010132.
[5] F. Savall-Alemany, J. Guisasola, S. R. Cintas, J. Martínez-Torregrosa (2019). Problem-based structure for a teaching-learning sequence to overcome students' difficulties when learning about atomic spectra. Physical Review Physics Education Research, 15(2), 020138.
[6] Maksimov M, Diimitrovs I (2019), Physics and Astronomy for 10-th grade, ed. Klett, Bulgaria (in Bulgarian).
[7] Bloom, B. S. (1956). "Taxonomy of Educational Objectives, Handbook I: The Cognitive Domain." New York: David McKay Co Inc.

НАПРАВЛЕНИЕ 10

# ХИМИЯ, ФИЗИКА И ЕКОЛОГИЯ

SESSION 10

# CHEMISTRY, PHYSICS AND ECOLOGY

# TRACE – TOXIC ELEMENT ACCUMULATIONS IN WATER OF ATİKHİSAR DAM LAKE (ÇANAKKALE, TÜRKİYE)

**Cem Tokatlı**

*Trakya University, Evrenos Gazi Campus, Laboratory Technology Program, İpsala, Edirne, Türkiye*
*tokatlicem@gmail.com*

**Abstract**

*Atikhisar Dam Lake is located in the west part of Marmara Region and meets the drinking water needs of Çanakkale Province of Türkiye. Therefore, it has a direct and critical impact on the health of many people. In the present research, toxic and trace element concentrations in water of Atikhisar Dam Lake were investigated and the results were compared with the drinking water standards. For this purpose, surface water samples were collected from 3 stations selected on the Atikhisar Dam Lake in winter (rainy) season of 2022. Boron (B), sodium (Na), magnesium (Mg), potassium (K), chromium (Cr), manganese (Mn), nickel (Ni), copper (Cu), zinc (Zn), arsenic (As), cadmium (Cd) and lead (Pb) accumulations in water samples were measured by using an ICP-MS device in the laboratory of Technology Research Development Application and Research Centre of Thrace University an internationally accredited centre. In addition, Cluster Analysis (CA) was applied to the data to classify the investigated stations in terms of similar water quality characteristics. According to the data obtained, it was determined that the toxic and essential element accumulation levels in the waters of Atikhisar Dam Lake did not exceed the limit values reported for drinking water.*

**Keywords:** Atikhisar Dam Lake, Çanakkale, Drinking Water, Trace – Toxic Elements.

## INTRODUCTION

About 3/4 of the earth's crust is covered by water and contamination of these water ecosystems are a threat to life in the biosphere today. One of the major contaminants of the freshwater ecosystems are toxic metals and they emanate from mainly pesticides from agricultural lands and wastes from industrial areas. So, freshwater quality assessment is very significant for an health ecosystem [1 – 6].

Atikhisar Dam Lake is located in the Çanakkale Province of Türkiye and it meets the drinking water needs of the region. Therefore, the reservoir has a very critical impact on the health of many people living in the Çanakkale Province. The reservoir, which has a capacity of approximately 53 million m³, was built on the Sarıçay Stream in 1975 by State Hydraulic Works (DSİ). The body volume of the Atikhisar Dam Lake, which is a soil body fill type, is 1.990.000 m³ and its height from the riverbed is 43 meters. The reservoir volume is about 40 hm³ and the reservoir area is about 3.30 km² at the normal water level [7 – 9].

The aim of this research was to (1) evaluate the water quality of Atikhisar Dam Lake in terms of trace and toxic element accumulations and (2) compare the data with the drinking water standards.

## MATERIAL AND METHODS

### Water Collection

Surface water samples were collected from 3 locations selected on the reservoir in the winter (rainy) season of 2022 with a telescopic water sampling device approximately 3 meters from the shore into the pre – cleaned polyethylene bottles. The map of Atikhisar Dam Lake and the selected stations is given in Figure 1.

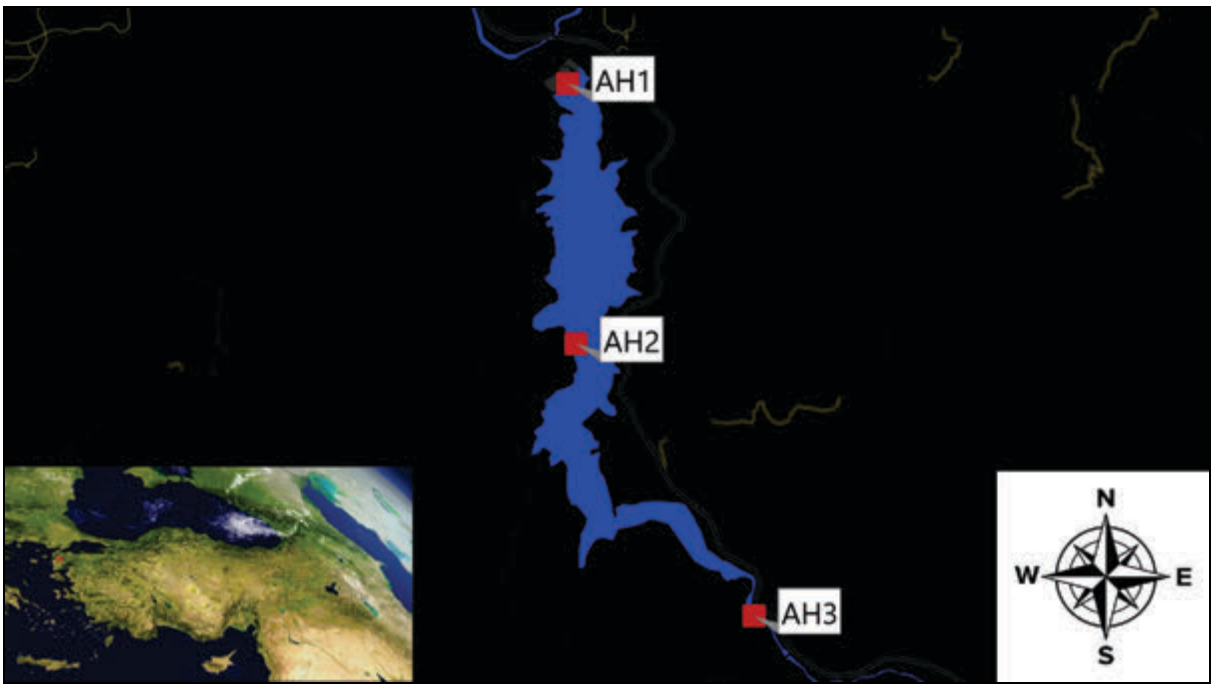



***Fig. 1.*** *Atikhisar Dam Lake and selected station of the reservoir*

**Element Analysis**

pH values of water samples were decreased to 2 by adding about 2 ml of nitric acid per 1 L into each. The samples were filtered by using a 0.45 µm – cellulose nitrate filter. The volumes of samples were made up to 50 ml with ultrapure water. In the acidic – filtered water samples, a total of 12 metal(loid)s (B, Na, Mg, K, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb) were determined with an inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP – MS) in the laboratory of Technology Research Development Application and Research Centre of Trakya University – an international accreditation certificated institution.

All the element analyses were determined as means of triplicate reads (TS EN / ISO IEC 17025) [10, 11]. The accuracy of analytical method was controlled by using a certified reference material (CRM) (CPAchem – Ref Num: 110580.L1).

**Statistical Analysis**

Cluster Analysis (CA) was applied to the detected chemical data in order classify the investigated locations in terms of their similar water quality characteristics by using “PAST” package statistical program.

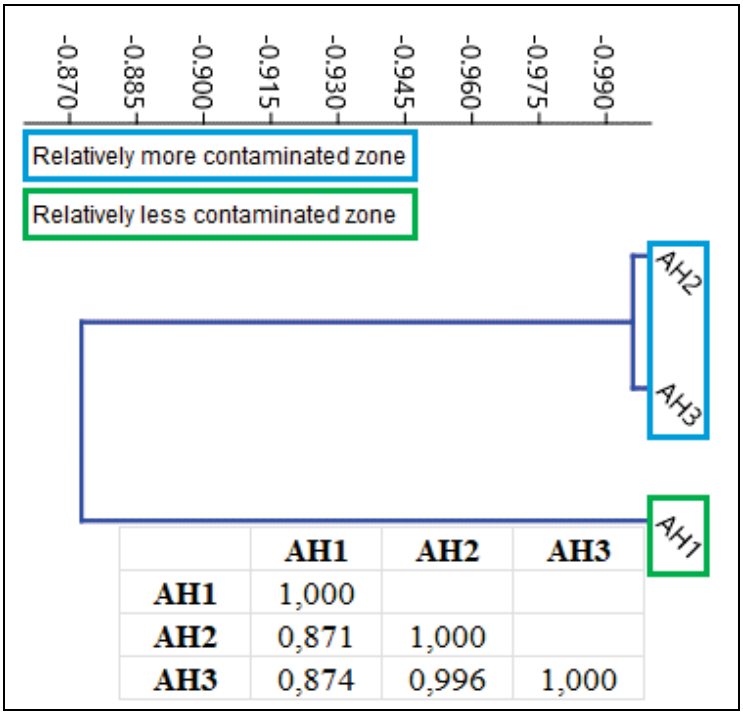
**RESULTS AND DISCUSSIONS**

Cluster Analysis (CA), which enables to classify the objects according to similar characteristics, is one of the most widely used statistical techniques to assess the surface water quality [12 – 15]. CA was used to obtain the similarity groups among the investigated stations selected on the Atikhisar Dam Lake according to similar water quality characteristics.

The diagram of CA calculated by using all the investigated metal(loid)s in water of Atikhisar Dam Lake is given in Figure 2.

As a result of applied CA, 2 statistically significant clusters were formed. Cluster 1, which was named as "Relatively more contaminated zone", corresponded to the stations of AH2 and AH3 that were the input locations of the reservoir; and Cluster 2, which was named as "Relatively less contaminated zone", corresponded to the station of AH1 that was the output location of the reservoir.

In research conducted in the Sakarya River Basin in Türkiye, water qualities of the basin components were investigated. As similar to the present research, Porsuk Dam Lake constructed on the Porsuk Stream has recorded as a significant cleaning capacity and water quality of the dam lake were significantly rising at the stations, which were close to the output of the reservoir [16].




| | AH1 | AH2 | AH3 |
|---|---|---|---|
| **AH1** | 1,000 | | |
| **AH2** | 0,871 | 1,000 | |
| **AH3** | 0,874 | 0,996 | 1,000 |

***Fig. 2.*** *CA diagram of Atikhisar Dam Lake*

Levels of investigated trace and toxic elements in water of Atikhisar Dam Lake are given in Figure 3 as GIS based distribution maps.

The order of investigated metal(loid)s in water of Atikhisar Dam Lake in terms of average concentrations were as follows: Na (649.46362 ppm) > Mg (432.07694 ppm) > K (400.39413 ppm) > Mn (4.81625 ppm) > Zn (1.73647 ppm) > As (1.43195 ppm) > Cu (1.36726 ppm) > Ni (0.82911 ppm) > B (0.30033 ppm) > Pb (0.26668 ppm) > Cr (0.08109 ppm) > Cd (0.03299 ppm).

According to the Water Pollution Control Regulation criteria in Türkiye [17], all the investigated stations in the Atikhisar Dam Lake have 1. Class water quality in terms of all the investigated trace and toxic element accumulations in water.

According to the data obtained in the present research, it was also determined that the toxic and essential element accumulation levels in the waters of Atikhisar Dam Lake did not exceed the limit values reported for drinking water by World Health Organization [18], European Communities [19] and Turkish Standards Institute [20].

## CONCLUSION

In the present investigation, toxic and trace element concentrations in water of Atikhisar Dam Lake were investigated and the results were compared with the drinking water standards. Also, Cluster Analysis (CA) was used to classify the investigated stations in terms of their similar water quality characteristics.

As a result of this research, water of the Atikhisar Dam Lake has recorded as 1. Class water quality in terms of all the investigated elements and the toxic – essential element accumulation levels in the waters of Atikhisar Dam Lake did not exceed the limit values reported for drinking water.

As a result of applied CA, 2 statistically significant clusters were formed. Cluster 1 was named as "Relatively more contaminated zone" and it was corresponded to the input locations of the reservoir; and Cluster 2 was named as "Relatively less contaminated zone" and it corresponded to the station of output location of the reservoir.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The present study was funded by the Trakya University, Commission of Scientific Research Projects (Project No. 2022/63).

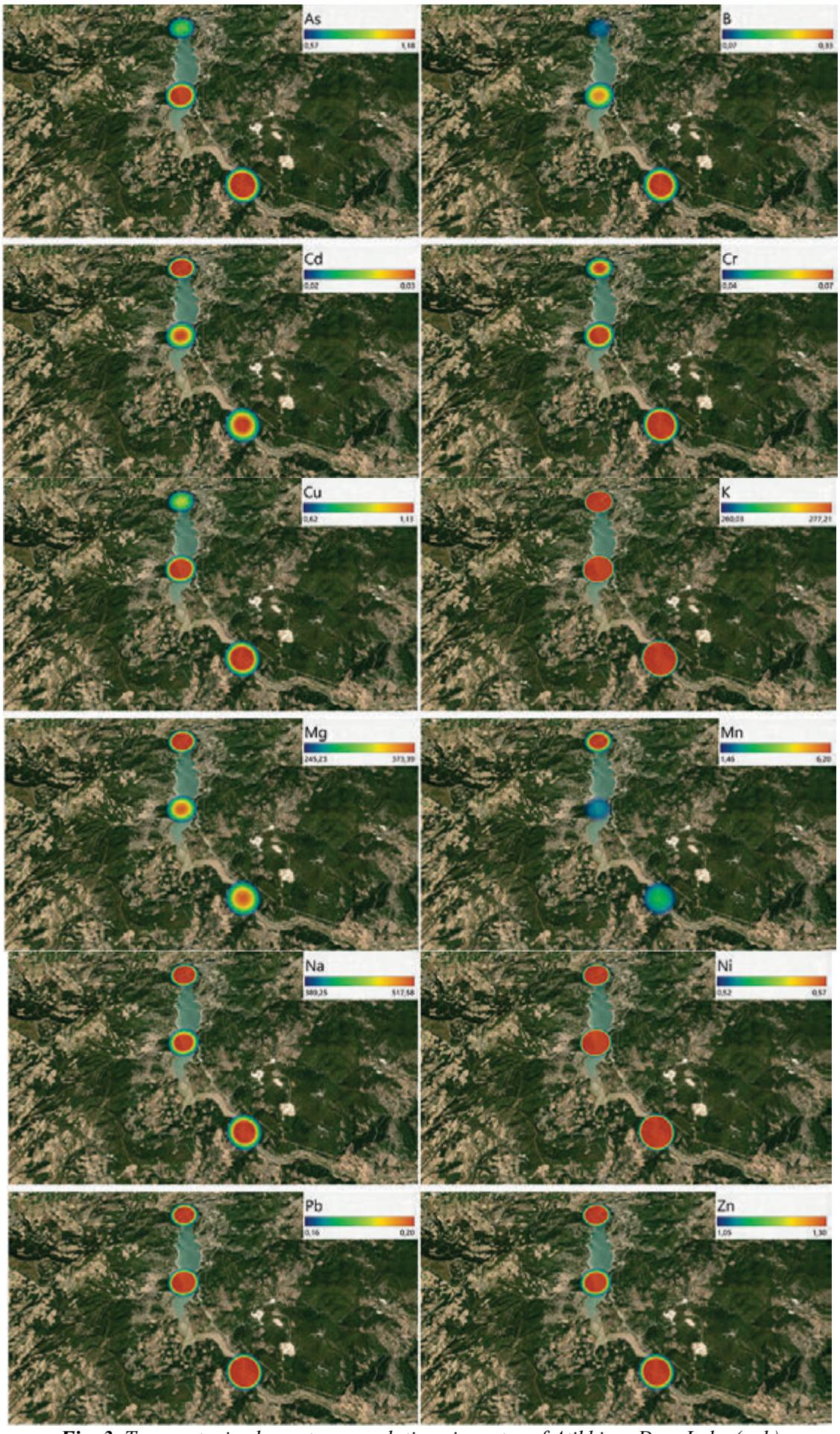



***Fig. 3.*** *Trace – toxic element accumulations in water of Atikhisar Dam Lake (ppb)*

## REFERENCE


[1] Isiuku, B. O. & Enyoh, C. E. (2019). Water pollution by heavy metal and organic pollutants: Brief review of sources, effects and progress on remediation with aquatic plants. Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal, 2, 5–38.

[2] Tokatlı, C. & Ustaoğlu, F. (2020). Health risk assessment of toxicants in Meriç River Delta Wetland, Thrace Region, Turkey. Environmental Earth Science, 79: 426.

[3] Varol, M. & Tokatlı, C. (2021). Impact of paddy fields on water quality of Gala Lake (Turkey): An important migratory bird stopover habitat. Environmental Pollution, 287: 117640.

[4] Varol, M., Ustaoğlu, F. & Tokatlı, C. (2022). Ecological risks and controlling factors of trace elements in sediments of dam lakes in the Black Sea Region (Turkey). Environmental Research, 205: 112478.

[5] Yüksel, B., Ustaoğlu, F., Tokatlı, C. & İslam, S. (2022). Ecotoxicological risk assessment for sediments of Çavuşlu Stream in Giresun, Turkey: association between garbage disposal facility and metallic accumulation. Environmental Science and Pollution Research, 29: 17223–17240.

[6] Tokatlı, C., Titiz, A. M., Uğurluoğlu, A., İslam, S., Ustaoğlu, F. & Islam, A. R. T. (2022). Assessment of the effects of Covid-19 lockdown period on groundwater quality of a significant rice land in an urban area of Türkiye. Environmental Science and Pollution Research, https://doi.org/10.1007/s11356-022-20959-8.

[7] Anonymous (2020). 2020 Environmental status report of Çanakkale Province. Republic of Türkiye, Çanakkale Governorship, Provincial Directorate of Environment and Urban Management.

[8] http://suyonetimiormansu.gov.tr.

[9] http://tr.wikipedia.org/wiki/Atikhisar_Barajı.

[10] Environmental Protection Agency (EPA) METHOD 200.7. (2001). Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry.

[11] APHA (1999). Standard methods for examination of water and wastewater. American Public Health Association.

[12] Tokatlı, C., Köse, E. & Çiçek, A. (2014). Assessment of the effects of large borate deposits on surface water quality by multi statistical approaches: A case study of the Seydisuyu Stream (Turkey). Polish Journal of Environmental Studies, 23 (5): 1741-1751.

[13] Tokatlı, C., Köse, E., Arslan, N., Çiçek, A., Emiroğlu, Ö. & Dayıoğlu, H. (2016). Ecosystem quality assessment of an aquatic habitat in a globally important boron reserve: Emet Stream Basin (Turkey). International Journal of Environment and Pollution, 59 (2/3/4): 116-141.

[14] Tokatlı, C., Mutlu, E. & Arslan, N. (2021). Assessment of the potentially toxic element contamination in water of Şehriban Stream (Black Sea Region, Turkey) by using statistical and ecological indicators. Water Environmnet Research, 93: 2060–2071.

[15] Köse, E., Emiroğlu, Ö., Çiçek, A., Tokatlı, C., Başkurt, S. & Aksu, S. (2018). Sediment quality assessment in Porsuk Stream Basin (Turkey) from a multi-statistical perspective. Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 27, No. 2, 747-752.

[16] Köse, E., Çiçek, A., Uysal, K., Tokatlı, C., Emiroğlu, Ö. & Arslan, N. (2015). Heavy metal accumulations in water, sediment and some cyprinidae fish species from Porsuk Stream (Turkey). Water Environment Research, 87 (3): 195-204.

[17] Turkish Regulations (2015). Regulation on Surface Water Quality Management. Official Gazette Dated April 15, 2015. Number: 29327,

[18] WHO (World Health Organization) (2011). Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization Library Cataloguing-in Publication Data. NLM classification: WA 675.

[19] EC (European Communities) (2007). European Communities (drinking water) (no. 2), Regulations 2007, S.I. No. 278 of 2007.

[20] TS 266 (Turkish Standards) (2005). Waters – Waters Intended for Human Consumption. Turkish Standardization Institute. ICS 13.060.20.

# MACRO – MICRO ELEMENT CONCENTRATIONS IN WATER OF SAZLIDERE DAM LAKE (İSTANBUL, TÜRKİYE)

**Cem Tokatlı**

*Trakya University, Evrenos Gazi Campus, Laboratory Technology Program, İpsala, Edirne, Türkiye*
*tokatlicem@gmail.com*

**Abstract**

*Sazlıdere Dam Lake is located in the north part of Marmara Region and meets the drinking water needs of İstanbul Province of Türkiye. Therefore, it has a significant effect on the health of many people. In this study, macro and micro element accumulations in water of Sazlıdere Dam Lake were investigated and the results were compared with the drinking water standards. For this purpose, surface water samples were collected from 3 stations selected on the Sazlıdere Dam Lake in winter (rainy) season of 2022. Boron (B), sodium (Na), magnesium (Mg), potassium (K), chromium (Cr), manganese (Mn), nickel (Ni), copper (Cu), zinc (Zn), arsenic (As), cadmium (Cd) and lead (Pb) levels in surface water samples were measured by using an ICP-MS device in the laboratory of Technology Research Development Application and Research Centre of Thrace University an internationally accredited centre. In addition, Cluster Analysis (CA) was applied to the data to classify the investigated locations in terms of similar water quality characteristics. According to the data obtained, it was determined that the macro and micro element concentration levels in the waters of Sazlıdere Dam Lake did not exceed the limit values reported for drinking water.*

**Keywords:** Sazlıdere Dam Lake, İstanbul, Drinking Water, Macro – Micro Elements.

## INTRODUCTION

It is known that only about 3% of water is fresh and suitable for human consumption. But numbers of organic and inorganic pollutants sourced from anthropogenic activities have been identified as strong contaminants found in both surface and groundwater resources. Therefore, assessment of freshwater quality has a critical importance both for human and ecosystem health [1 – 6].

Sazlıdere Dam Lake is located in the İstanbul Province of Türkiye and it meets the drinking water needs of the region. Therefore, the reservoir has a very important effect on the health of many people living in the İstanbul Province. The reservoir, which has a capacity of approximately 92 million m³, was built on the Sazlıdere Stream in 1996 by State Hydraulic Works (DSİ). The body volume of the Sazlıdere Dam Lake, which is a rock body fill type, is 1.880.000 m³ and its height from the riverbed is 48 meters. The reservoir volume is about 92 hm³ and the reservoir area is about 11.81 km² at the normal water level [7 – 9].

The aim of the present investigation was to (1) evaluate the water quality of Sazlıdere Dam Lake in terms of macro and micro element concentrations and (2) compare the data with the drinking water standards.

## MATERIAL AND METHODS

### Water Collection

Water samples were collected from 3 stations selected on the reservoir in the winter (rainy) season of 2022 with a telescopic water sampling device approximately 3 meters from the shore into the pre – cleaned polyethylene bottles. The map of Sazlıdere Dam Lake and the selected locations is given in Figure 1

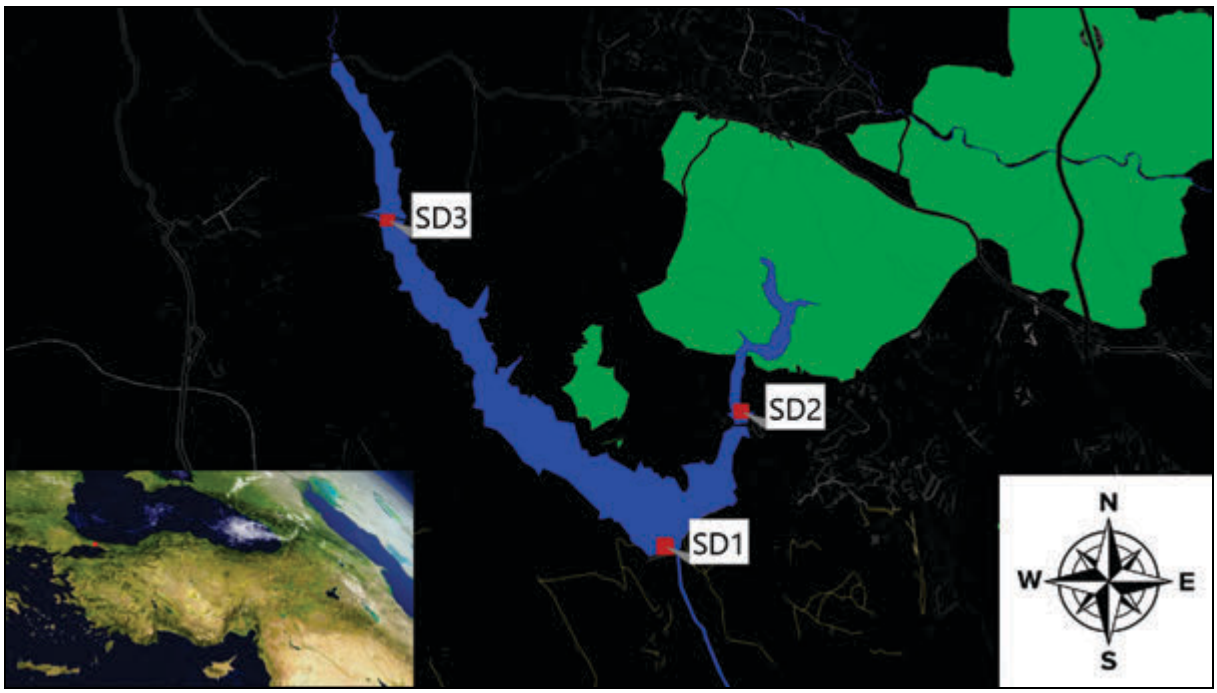



***Fig. 1.*** *Sazlıdere Dam Lake and selected station of the reservoir*

**Element Analysis**

pH values of water samples were decreased to 2 by adding about 2 ml of nitric acid per 1 L into each. The samples were filtered by using a 0.45 µm – cellulose nitrate filter. The volumes of samples were made up to 50 ml with ultrapure water. In the acidic – filtered water samples, a total of 12 metal(loid)s (B, Na, Mg, K, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb) were determined with an inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP – MS) in the laboratory of Technology Research Development Application and Research Centre of Trakya University – an international accreditation certificated institution.

All the element analyses were determined as means of triplicate reads (TS EN / ISO IEC 17025) [10, 11]. The accuracy of analytical method was controlled by using a certified reference material (CRM) (CPAchem – Ref Num: 110580.L1).

**Statistical Analysis**

Cluster Analysis (CA) was applied to the detected chemical data in order classify the investigated locations in terms of their similar water quality characteristics by using “PAST” package statistical program.

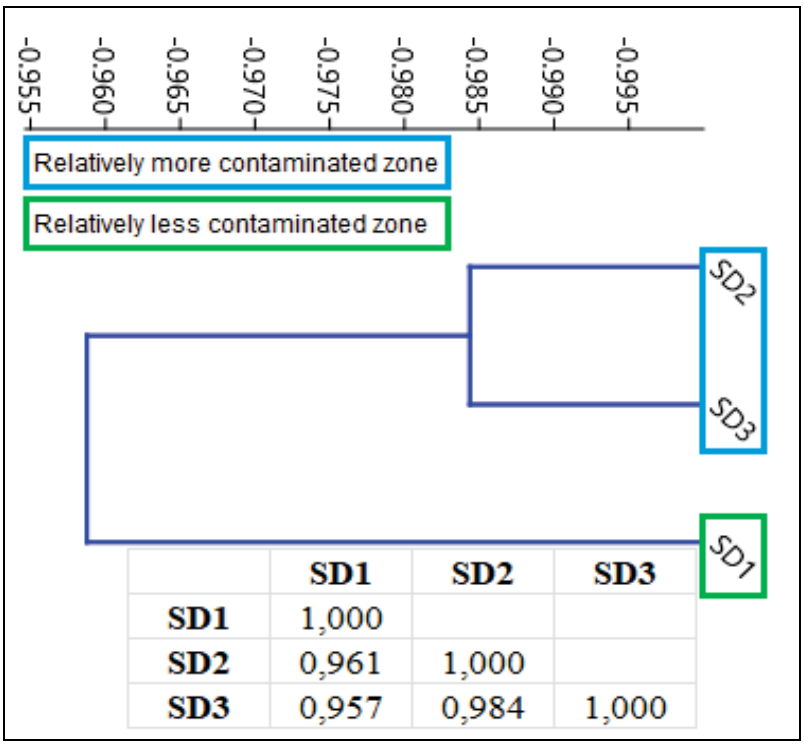
**RESULTS AND DISCUSSIONS**

Cluster Analysis (CA) is one of the most widely used statistical techniques to assess the surface water quality. It enables to classify the objects according to their similar characteristics [12 – 15]. CA was used to obtain the similarity groups among the investigated stations selected on the Sazlıdere Dam Lake according to similar water quality characteristics.

The diagram of CA calculated by using all the investigated metal(loid)s in water of Sazlıdere Dam Lake is given in Figure 2.

As a result of applied CA, 2 statistically significant clusters were formed. Cluster 1, which was named as "Relatively more contaminated zone", corresponded to the stations of SD2 and SD3 that were the input locations of the reservoir; and Cluster 2, which was named as "Relatively less contaminated zone", corresponded to the station of SD1 that was the output location of the reservoir.

According to the results of a similar investigation conducted in the Central Anatolian Region, as similar to the present research, Köse at al reported that [16] Porsuk Dam Lake (Porsuk Stream Basin) has an important cleaning capacity and water quality of the dam lake were significantly rising at the stations, which were close to the output of the reservoir.




| | SD1 | SD2 | SD3 |
|---|---|---|---|
| **SD1** | 1,000 | | |
| **SD2** | 0,961 | 1,000 | |
| **SD3** | 0,957 | 0,984 | 1,000 |

***Fig. 2.*** *CA diagram of Sazlıdere Dam Lake*

Levels of investigated macro and micro elements in water of Sazlıdere Dam Lake are given in Figure 3 as GIS based distribution maps.

The order of investigated metal(loid)s in water of Sazlıdere Dam Lake in terms of average concentrations were as follows: Na (257.73076 ppm) > K (88.75135 ppm) > Mg (45.27275 ppm) > B (4.10467 ppm) > Cu (0.13871 ppm) > Ni (0.09675 ppm) > Cr (0.09403 ppm) > As (0.01129 ppm) > Mn (0.00731 ppm) > Zn (0.00606 ppm) > Pb (0.00142 ppm) >) > Cd (0.00117 ppm).

According to the Water Pollution Control Regulation criteria in Türkiye [17], all the investigated locations in the Sazlıdere Dam Lake have 1. Class water quality in terms of all the investigated trace and toxic element accumulations in water.

According to the data obtained in the present research, it was also determined that the macro and micro element concentration levels in the waters of Sazlıdere Dam Lake did not exceed the limit values reported for drinking water by World Health Organization [18], European Communities [19] and Turkish Standards Institute [20].

## CONCLUSION

In the present investigation, macro and micro element accumulations in water of Sazlıdere Dam Lake were investigated and the results were compared with the drinking water standards. Also, Cluster Analysis (CA) was used to classify the investigated stations in terms of their similar water quality characteristics.

As a result of this research, water of the Sazlıdere Dam Lake has recorded as 1. Class water quality in terms of all the investigated elements and the macro – micro element concentration levels in the waters of Sazlıdere Dam Lake did not exceed the limit values reported for drinking water.

As a result of applied CA, 2 statistically significant clusters were formed. Cluster 1 was named as "Relatively more contaminated zone" and it was corresponded to the input locations of the reservoir; and Cluster 2 was named as "Relatively less contaminated zone" and it corresponded to the station of output location of the reservoir.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The present study was funded by the Trakya University, Commission of Scientific Research Projects (Project No. 2022/63).

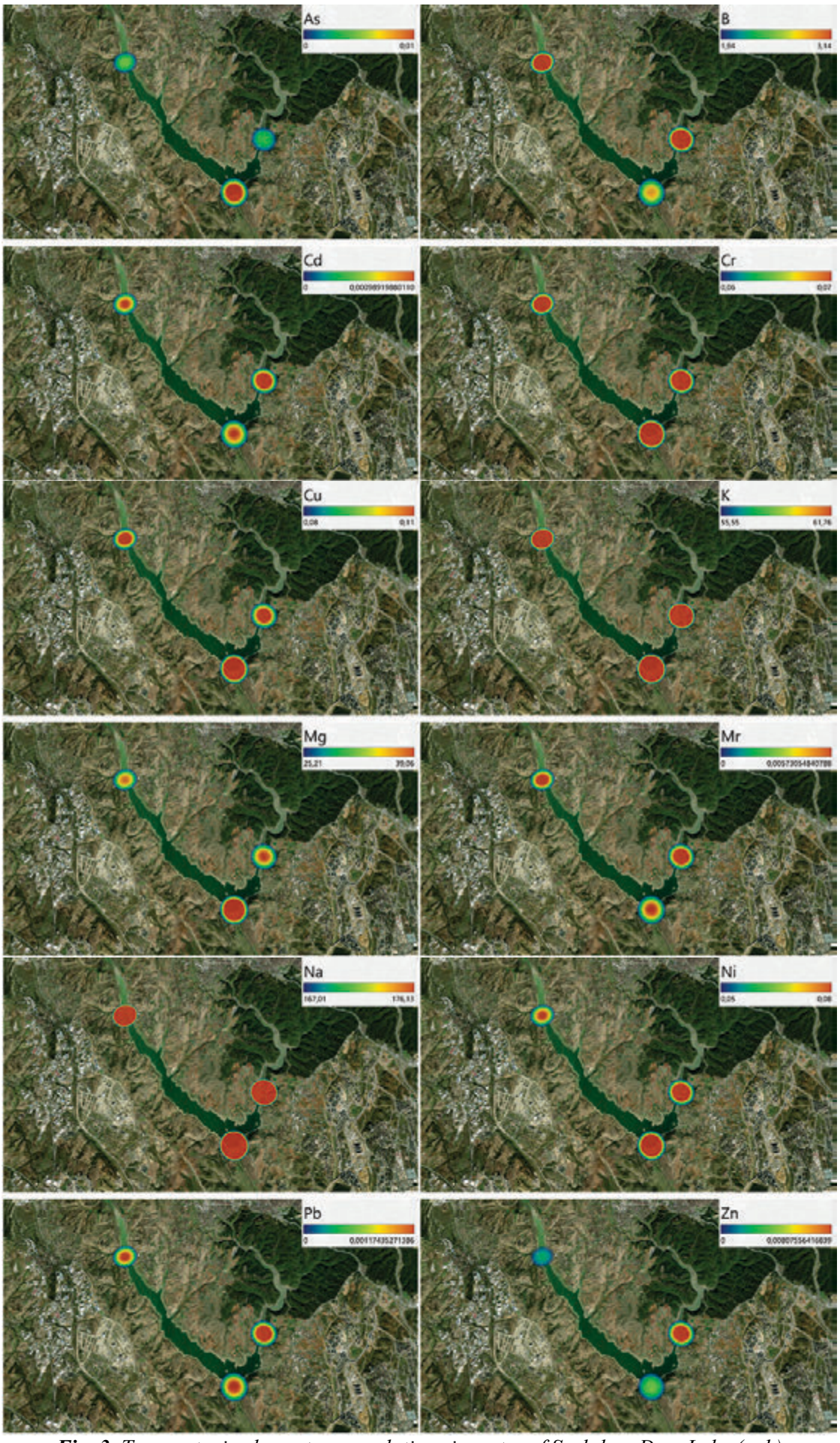



***Fig. 3.*** *Trace – toxic element accumulations in water of Sazlıdere Dam Lake (ppb)*

## REFERENCE


[1] Isiuku, B. O. & Enyoh, C. E. (2019). Water pollution by heavy metal and organic pollutants: Brief review of sources, effects and progress on remediation with aquatic plants. Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal, 2, 5–38.

[2] Tokatlı, C. & Ustaoğlu, F. (2020). Health risk assessment of toxicants in Meriç River Delta Wetland, Thrace Region, Turkey. Environmental Earth Science, 79: 426.

[3] Varol, M. & Tokatlı, C. (2021). Impact of paddy fields on water quality of Gala Lake (Turkey): An important migratory bird stopover habitat. Environmental Pollution, 287: 117640.

[4] Varol, M., Ustaoğlu, F. & Tokatlı, C. (2022). Ecological risks and controlling factors of trace elements in sediments of dam lakes in the Black Sea Region (Turkey). Environmental Research, 205: 112478.

[5] Yüksel, B., Ustaoğlu, F., Tokatlı, C. & İslam, S. (2022). Ecotoxicological risk assessment for sediments of Çavuşlu Stream in Giresun, Turkey: association between garbage disposal facility and metallic accumulation. Environmental Science and Pollution Research, 29: 17223–17240.

[6] Tokatlı, C., Titiz, A. M., Uğurluoğlu, A., İslam, S., Ustaoğlu, F. & Islam, A. R. T. (2022). Assessment of the effects of Covid-19 lockdown period on groundwater quality of a significant rice land in an urban area of Türkiye. Environmental Science and Pollution Research, https://doi.org/10.1007/s11356-022-20959-8.

[7] Anonymous (2020). 2020 Environmental status report of Çanakkale Province. Republic of Türkiye, Çanakkale Governorship, Provincial Directorate of Environment and Urban Management.

[8] http://suyonetimiormansu.gov.tr.

[9] http://tr.wikipedia.org/wiki/Sazlıdere_Barajı.

[10] Environmental Protection Agency (EPA) METHOD 200.7. (2001). Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry.

[11] APHA (1999). Standard methods for examination of water and wastewater. American Public Health Association.

[12] Tokatlı, C., Köse, E. & Çiçek, A. (2014). Assessment of the effects of large borate deposits on surface water quality by multi statistical approaches: A case study of the Seydisuyu Stream (Turkey). Polish Journal of Environmental Studies, 23 (5): 1741-1751.

[13] Tokatlı, C., Köse, E., Arslan, N., Çiçek, A., Emiroğlu, Ö. & Dayıoğlu, H. (2016). Ecosystem quality assessment of an aquatic habitat in a globally important boron reserve: Emet Stream Basin (Turkey). International Journal of Environment and Pollution, 59 (2/3/4): 116-141.

[14] Tokatlı, C., Mutlu, E. & Arslan, N. (2021). Assessment of the potentially toxic element contamination in water of Şehriban Stream (Black Sea Region, Turkey) by using statistical and ecological indicators. Water Environmnet Research, 93: 2060–2071.

[15] Köse, E., Emiroğlu, Ö., Çiçek, A., Tokatlı, C., Başkurt, S. & Aksu, S. (2018). Sediment quality assessment in Porsuk Stream Basin (Turkey) from a multi-statistical perspective. Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 27, No. 2, 747-752.

[16] Köse, E., Çiçek, A., Uysal, K., Tokatlı, C., Emiroğlu, Ö. & Arslan, N. (2015). Heavy metal accumulations in water, sediment and some cyprinidae fish species from Porsuk Stream (Turkey). Water Environment Research, 87 (3): 195-204.

[17] Turkish Regulations (2015). Regulation on Surface Water Quality Management. Official Gazette Dated April 15, 2015. Number: 29327,

[18] WHO (World Health Organization) (2011). Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization Library Cataloguing-in Publication Data. NLM classification: WA 675.

[19] EC (European Communities) (2007). European Communities (drinking water) (no. 2), Regulations 2007, S.I. No. 278 of 2007.

[20] TS 266 (Turkish Standards) (2005). Waters – Waters Intended for Human Consumption. Turkish Standardization Institute. ICS 13.060.20.

# APPLICATION OF SONOCHEMISTRY FOR THE SYNTHESIS OF CAPRIC ALIPHATIC ESTERS

**Dragomir Vasilev[1], Nadezhda Petkova[2], Panteley Denev[2]**

*[1] Technical University of Gabrovo*
*[2] University of Food Technologies, Plovdiv*

**Abstract**
*The aim of this study is to demonstrate a simple and rapid "green" method for the ultrasound assisted synthesis of aliphatic esters of capric acid. The spectral characterization of esters was performed by IR and NMR spectroscopies. The impact of ultrasonic irradiation on the reaction in a comparison with the conventional method was analyzed based on the reaction time and the yield of the resulting esters.*

**Keywords:** keywords, keywords, keywords, keywords, keywords, keywords, keywords.

## INTRODUCTION

The increased use of resources and the requirements for environmental protection require finding more efficient, environmentally friendly synthesis methods, as well as reducing the waste generated. [1-3]

After the formulation of the 12 principles of "green chemistry", this concept began to be supplemented with new content. Sonochemistry is a modern branch of green chemistry related to the application of ultrasonic waves to chemical processes. [4-6]

The main advantages of sonochemistry are the use of less dangerous chemicals and solvents, reducing energy consumption and increasing the selectivity of the reaction. In this regard, the ultrasonic impact in many cases facilitates the management of chemical reactions, stimulating higher efficiency and effectiveness. [7-9]

Ultrasound affects the reaction mixture not only with the high energy of cavitation, but also induces new reactivity, intensifies diffusion, improves stirring, which ultimately leads to the acceleration of the reaction and sometimes to the formation of unexpected organic compounds. [1, 9]

## EXPERIMENTAL PART

*Conventional synthesis*

In a 300 $cm^3$ Erlenmeyer flask, place 0.5 mol of alcohol, add 2 mmol of conc. $H_2SO_4$ as a catalyst, after which the weighed amount of 4 mmol fatty acid is added. The flask was connected to a water-cooled reflux condenser and heated to boiling.

After 120 min, the reaction is stopped and the reaction mixture is cooled intensively, with the addition of 100 $cm^3$ of ice-cold dec of water and neutralized with 10% $Na_2CO_3$. Carry out three extractions with 20 $cm^3$ of diethyl ether each. The extracts are combined and dried with anhydrous $Na_2SO_4$.

After filtering, the ether and alcohol are distilled under vacuum. The residue is separated and the yield of the ester is determined.

*Ultrasonic synthesis*

In a 300 $cm^3$ Erlenmeyer flask, place the amount of 0.5 mol alcohol, add 2 mmol conc. $H_2SO_4$ as a catalyst, after which the weighed amount of 4 mmol fatty acid is added.

The flask was connected to a water-cooled reflux condenser and placed in a Dimoff A-2/2 ultrasonic bath (100 W, 44 kHz). It is treated with ultrasound for 15 min at room temperature.

After completion of the reaction, the reaction mixture was cooled intensively, with the addition of 100 $cm^3$ of ice-cold distilled water and neutralization with 10% $Na_2CO_3$ was carried out. A triple extraction with 20 $cm^3$ of diethyl ether is carried out. The extracts were combined and dried with anhydrous $Na_2SO_4$.

After filtration, the ether and the alcohol are distilled off under vacuum. The residue is separated and the yield of the ester is determined.

*Identification and characterization methods*

IR spectra of the investigated substances were recorded on an IR-FT spectrophotometer Nicolet Avatar (Termo Scientific, USA) in a KBr tablet. When recording the spectrum, thirty-two scans were performed in the interval between 4000 and 500 $cm^{-1}$.

$^{1}H$ and $^{13}C$ NMR spectra were recorded on a Bruker Advance II+ 600 MHz instrument. All chemical references are presented in ppm and referenced to the TMS standard.

## RESULTS AND DISCUSSION

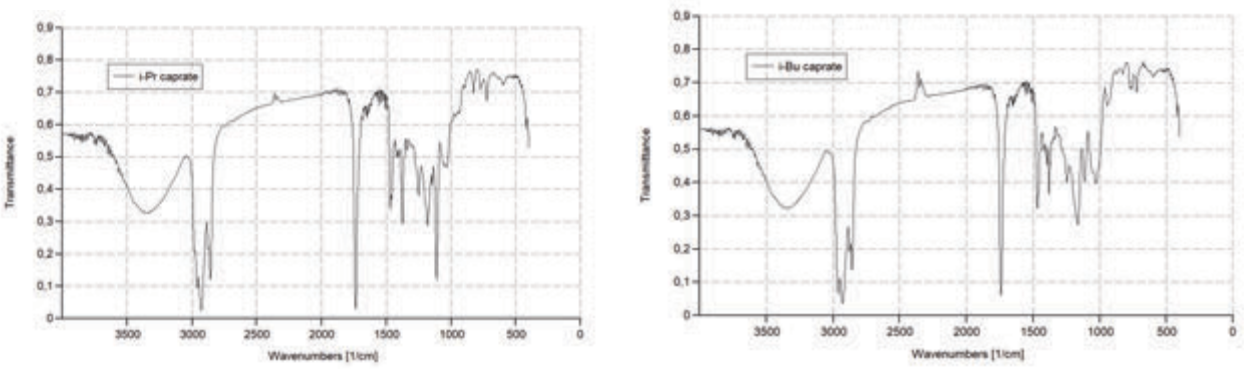
The synthesis of aliphatic esters of capric acid was carried out by both methods - conventional and by ultrasound. The results of the yield of esters show its increase by 5 to 16 percentage points when applying the US method compared to the conventional one. The largest increase was for i-propanol and the smallest for t-butanol. Summary data are shown in Table 1.

***Table 1.*** *Reaction time and yield in the synthesis of aliphatic esters of capric acid*

| Ester | Conventional synthesis | | US synthesis | |
|---|---|---|---|---|
| | Reaction time, min | Yield, % | Reaction time, min | Yield, % |
| i-Pr caprate | 120 | 60 | 15 | 76 |
| n-Bu caprate | 120 | 70 | 15 | 82 |
| i-Bu caprate | 120 | 75 | 15 | 80 |
| t-Bu caprate | 120 | 80 | 15 | 87 |

Those obtained by US esterification aliphatic esters of capric acid a were characterized by IR-FT spectroscopy. Several areas characteristic of esters stand out in the spectra. In the region 600-1500 cm $^{-1}$ are the absorption bands of hydrocarbon chains.

The intense and narrow band in the spectrum at 1743 $cm^{-1}$ due to valence vibrations (νC=O) of the carbonyl group in the ester is very clearly visible. The valence vibrations of the C–H bond are manifested in a band of medium intensity, which is observed in the region of 2930 $cm^{-1}$. In the case of esters, a band appears at about 2850 $cm^{-1}$ corresponding to $\nu C\text{-}H_{as}(CH_2)$. In addition to them, bands characteristic for C-O-C from the ester group appear - 1270, 1223 $cm^{-1}$.




*a.* *b.*

***Fig. 1.*** *IR-FT spectra of synthesized i-Pr caprate (a) and i-Bu caprate (b)*

In the $^{1}$**H** NMR spectra of the *i*-propyl caprate, resonance signals in the interval 4.83-4.90 ppm characteristic of methine protons CH of the *i*-propyl group are observed. Methyl protons from the *i*-propyl group are observed at 1.35-1.39 ppm, and methylene protons from the aliphatic acid chain – at 0.97-1.0 ppm. Methylene protons are registered in the spectrum at 1.29-2.31 ppm, and the resonance signals for $CH_2$ protons associated with the C=O group are observed at 2.28-2.31 ppm.

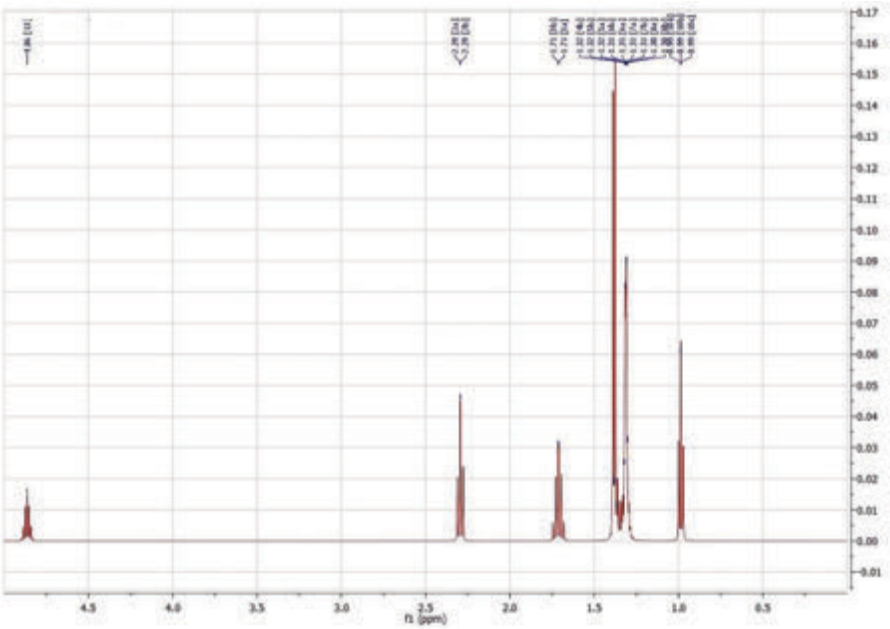


***Fig. 2.*** [1]H NMR *spectra of synthesized i-Pr caprate*

A number of characteristic resonance signals are observed in the [1]H NMR spectra of the - synthesized *t*-butyl esters. The shift for the methyl protons from the aliphatic chain appears at 0.99 ppm and those from the *t*-butyl residue at 1.49 ppm. The methylene protons clearly stand out as multiplets in the region from 1.30 to 4.06 ppm. The methylene protons adjacent to the carbonyl carbon atom are observed at 2.29 ppm, respectively for those connected to the C–O group in the spectrum of *n*-butyl esters at 4.06 ppm, for *t*-butyl esters at 2.36 ppm, and for The *i*-butyl esters at 2.29 and 3.98 ppm.

In the [13]C NMR spectra, the signal for the carbonyl carbon atom is observed at 174.35 ppm and that for the secondary carbon atom of the *i*-propyl group at 70.04 ppm. The signals for the methylene groups are observed in the interval 22.93-31.64 ppm, and those for the carbon from the methyl group of the acid - at 14.01 ppm, respectively for the carbon from the *i*-propyl group at 22.51 ppm.

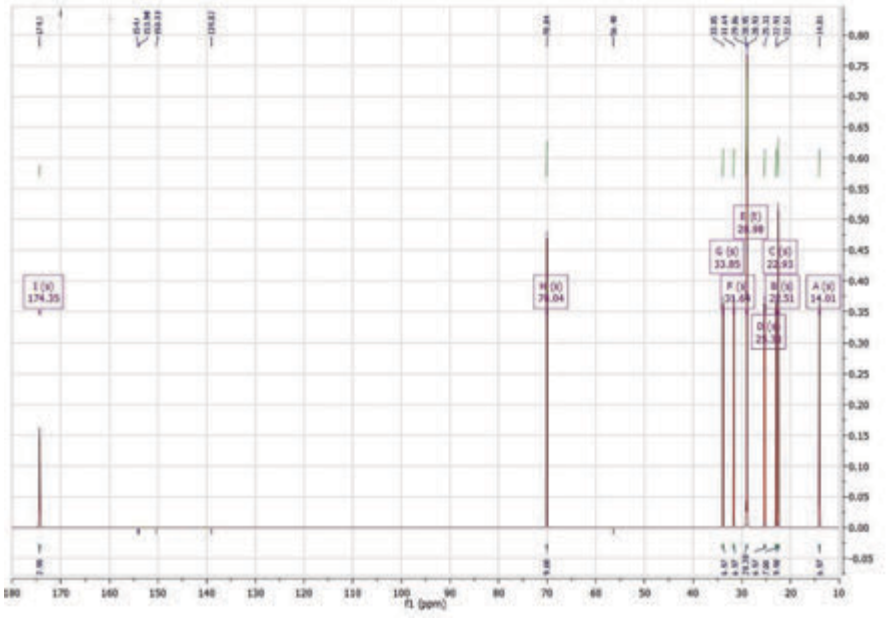


***Fig. 3.*** [13]C NMR *spectra of synthesized i-Pr caprate*

Resonance signals for carbonyl carbon atom at 172.83-174.36 ppm. The signals for the **C** atom of the *t*-butyl group were recorded at 81.62 ppm, and for the carbon atom of the *i*-butyl group at 19.69 ppm. The signals for the carbon atoms from the three methyl groups in *t*-butanol are observed at 28.3 ppm, and those from the fatty acid and *n*-butanol – at 14.02 ppm.

## CONCLUSION

Ultrasonic energy was found to accelerate the esterification process of capric acid with aliphatic alcohols. As a result, the reaction time is significantly reduced, and the process is carried out at a low reaction temperature.

With the help of the used spectral methods, it was established that the aliphatic esters of capric acid were obtained, and that, under the selected synthesis conditions, no changes were observed in the molecules of the compounds.

***Acknowledgement:*** *This research was financially supported by Fund Science Contract No 2202C, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

## REFERENCE

[1]. Mason, T., D. Peters Practical sonochemistry, Horwood Publishing Limited, 2011.
[2]. Farris, R.D., J. Am. Oil Chem. Soc., 56, 1979, 770A-773A.
[3]. Piccicuto, S., Blecker, C., Brohee, J.C., Mbampara, A., Lognay, G., Deroanne, C., Paquot, M., Marlier, M. Biotechnol., Agron. Soc. Environ, 5, 2001, 209-219.
[4]. Vaze, S., Chem. Eng. World, 31, 1996, 115–116.
[5]. Deshmane, V.G., P.R. Gogate, A.B. Pandit, Ultrasonics Sonochem., 16, 2009, 345.
[6]. Hanh, H.D., N.T. Dong, K. Okitsu, R. Nishimura, Y. Maeda, Renew., Energy 34, 2009, 766, 780.
[7]. Pacheco, B., C. Nunes, C. Rockembach, P. Bertelli, M. Mesko, M. Roesch-Ely, S. Moura, Cl. Pereira, Eco-friendly synthesis of esters under ultrasound with p-toluenesulfonic acid as catalyst, Green Chemistry Letters and Reviews, Vol. 7, No. 3, 2014, 265–270
[8]. Wen, B., Wumanjiang Eli, Qunji Xue, Xin Dong, Weimin Liu, Ultrasound accelerated esterification of palmitic acid with vitamin C, Ultrasonics Sonochemistry 14 (2007) 213-218
[9]. Hobuss, C., D. Venzke, B.. Pacheco, A. Souza, M. Santos, S. Moura, F. Quina, K. Fiametti, J. Oliveira, C. Pereira, Ultrasound-assisted synthesis of aliphatic acid esters at room temperature, Ultrasonics Sonochemistry, 19, 2012, 387-389.

# APPLICATION OF CAPRATE ALIPHATIC ESTER AS BIO-PLASTICIZER AND BIO-ADDITIVE IN PLASTICS

**Dragomir Vasilev[1], Nadezhda Petkova[2], Milka Atanasova[1], Panteley Denev[2]**

[1] *Technical University of Gabrovo*
[2] *University of Food Technologies, Plovdiv*

**Abstract**

*The aim of the present study is to investigate the application of caprate aliphatic esters as co-plasticizers and biodegradable additives in polyvinyl chloride. i-Bu caprate was used in different proportions. The applicability of a mixture of esters as bio-plasticizers and bio-additives in polyvinyl chloride was studied. The influence of the ester on the glass transition temperature Tg of polyvinyl chloride at the selected ratios was determined by the method of differential-scanning calorimetry. It was found that with increasing its amount Tg of the polymer decreases, ie. the flexibility of macromolecules increases which is a prerequisite for higher deformability. This supports the conclusion that the ester mixture has a plasticizing effect.*

**Keywords:** keywords, keywords, keywords, keywords, keywords, keywords, keywords.

## INTRODUCTION

During plasticization, the ability of the polymer to large highly elastic deformations is improved [1]. The addition of plasticizers in polymer composite materials leads to a reduction in energy costs during their processing, the duration of preparation of the mixtures. The participation of plasticizers facilitates the dispersion of the components of the polymer compositions and the formation of the products.

There are major theories explaining the changes in the polymer during plasticization, all of which explain the effect of the plasticizer on the interaction of its molecules with the polymer at the molecular and supramolecular level, which is determined by the compatibility between the polymer and the plasticizer. An indicator of this is the lowering of the glass transition temperature of the polymer $T_g$, which is largely determined by the chemical composition, the structure of the molecule and the amount of plasticizer [2].

Of the esters of aliphatic acids, stearates and oleates are the most widely used, especially for compositions with plasticity at low temperatures. The search for possibilities to replace the classic plasticizers with non-toxic and biodegradable products leads to researching the possibilities of using aliphatic esters of higher fatty acids or esters of mono-, di- and polysaccharides. [3, 4]

Glycerol, sorbitol and urea have been found to be used as hydrophilic plasticizers in biodegradable starch films. [5, 6]

A similar study was conducted to determine the influence of sucrose and invert sugar on the mechanical properties, hydrophilicity of starch films. The mechanical properties of sucrose, oleic acid, sorbitol and mannitol as plasticizers for gelatin films were investigated. [7-10]

*Yin* and co-authors investigated the application of three glucose esters, in comparison with glucose pentaacetate and sucrooctaacetate, as bioplasticizers for polyvinyl chloride. [9]

The purpose of the study is to investigate the influence of *i*-Bu caprate when incorporated into polyvinyl chloride polymers to evaluate the possibilities of its application as a plasticizer.

## MATERIALS AND METHODS

### *Preparing the samples*

For the purposes of the experiment, commercial polyvinyl chloride was used, without dyes, stabilizers and fillers. *i*-Bu caprate obtained by the method described by Vasilev and co-authors [11] was used as a polyvinyl chloride plasticizer. The experimental studies were carried out with samples in the form of

polymer films prepared by solution casting in tetrahydrofuran. The weighed amount of polyvinyl chloride is placed in a beaker and 100 $cm^3$ of tetrahydrofuran is added to it. The mixture is heated in a water bath at 40ºC until the complete dissolution of the polyvinyl chloride, after which the selected plasticizer is added . The resulting solution was homogenized for 2 h, then poured into a Petri dish and left at room temperature until the solvent completely evaporated. The film was dried at room temperature in a vacuum dryer. [9]

***Investigation of the plasticizing effect - differential scanning calorimetry***

The thermal properties of the obtained films were investigated by differential scanning calorimetry (DSC). The measurements were carried out on a scanning calorimeter DSC 204 F1 Phoenix (NETZSCH Gerätebau gmbh) in an argon environment, with a heat flow rate of 20 $cm^3$ /min at the following temperature regimes:

- Heating from 20°C to 200°C at a rate of 10 K/min (first scan);
- Isothermal mode at 200°C for 3 min;
- Cooling in liquid nitrogen from 200°C to –50°C, with a cooling rate of 10 K/min;
- Isothermal mode at –50°C for 5 min;
- Heating from –50°C to 200°C at a rate of 10 K/min (second scan);

The weight of a single sample of each sample is 2.5-4.2 g.

The glass transition temperature *Tg* was determined in the second scan as the inflection point of the thermogram. The processing was done with PROTEUS specialized software for DSC 204 F1

## RESULTS AND DISCUSSION

The plasticization of polymers is based on increasing the flexibility of macromolecules and supramolecular structures, under the action of the plasticizer, which depends on its compatibility with the polymer. The parameter related to the change in flexibility of the structural elements that can be used to evaluate the compatibility and the plasticizing effect is the glass transition temperature.

The glass transition temperature was determined in the second scan as the inflection point of the thermogram. The processing was done with PROTEUS specialized software for DSC 204 F1.

The results of the DSC analysis of the studied samples are presented in *Table 1 and Fig. 1.*

***Table 1****. Tg data depending on the content of i-Bu caprate*

| Content of *i*-Bu caprate in the studied sample, % | The glass transition temperature (*Tg*), ºC |
|---|---|
| 0 | 80.5 |
| 10 | 75.8 |
| 20 | 68.1 |
| 40 | 56.7 |
| 60 | 53.5 |

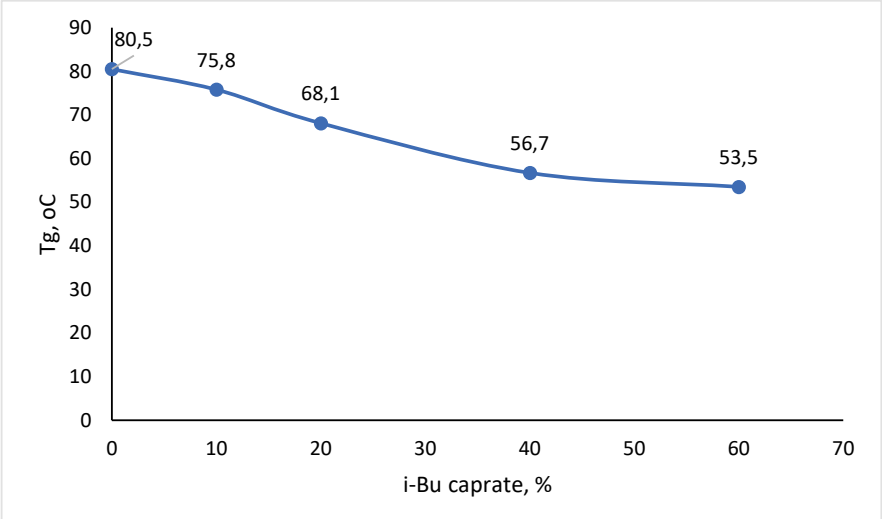



***Fig. IV.13.*** *Variation of Tg depending on the content of i-Bu caprate in the sample*

The obtained results show the presence of only one inflection point (one glass transition temperature) in the thermograms of the studied - films, which indicates good miscibility between *i*-Bu caprate and PVC. The glass transition temperatures of the studied samples depending on the content of *i*-Bu caprate are presented in *Fig. 1.* There is a significant decrease in *Tg* with increasing content of *i*-Bu caprate, which is a confirmation of its plasticizing effect on PVC. As the content of *i*-Bu caprate increases, a sharp decrease in the glass transition temperature is observed, and at 40 and 60% the difference in *Tg* is minimal.

## CONCLUSION

The applicability of sonochemistry synthesized *i*-Bu caprate as a bio-plasticizer and/or biodegradable filler in polyvinyl chloride mixtures was investigated. Using the DSC method, the effect of ester on the glass transition temperature of PVC at contents of 0-60% was determined. It was found that as its amount increases, the *Tg* of the polymer decreases, i.e. the flexibility of macromolecules increases, which is a prerequisite for higher deformability.

The results obtained at this stage of the research show that sonochemistry synthesized *i*-Bu caprate is applicable as a bio-plasticizer and/or biodegradable filler in polyvinyl chloride mixtures in contents up to 40%. Further research is needed to establish the mechanism of action of the ester at higher concentrations, with a view to expanding its application.

***Acknowledgement:*** *This research was financially supported by Fund Science Contract No 2202C, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

## REFERENCE

[1]. George Wypych, Handbook of plasticizers, ChemTec Publishing, 2004

[2]. Wilkes, Ch., Ch. Daniels, J. Summers, PVC Handbook, ISBN 3-446-22714-8

[3]. Tishkova, J., V. Ch.-Bagdassarian, T. Georgieva, Migration of primary aromatic amines from polyamide kitchenware, Bulgarian journal of public health, Vol.7 (1), 2015, 87-98

[4]. Baker, I., R. Willing, D. Furlong, F. Grieser, C. Drummond, Sugar Fatty Acid Ester Surfactants: Biodegradation Pathways, Journal of Surfactants and Detergents, Vol. 3, No. 1, 2000, 13-27

[5]. Galdeano MC, Grossmann MVE, Mali S, Bello-Perez LA, Garcia MA, Zamudio-Flores PB. Effects of production process and plasticizers on stability of films and sheets of oat starch. Mater Sci Eng C 2009, 29 (2), 492-8.

[6]. Galdeano MC, Mali S, G. MVE, Yamashita F, García MA. Effects of plasticizers on the properties of oat starch films. Mater Sci Eng C 2009, 29 (2) 532-8

[7]. Veiga-Santos P, Oliveira LM, Cereda MP, Scamparini ARP. Sucrose and inverted sugar as plasticizer. Effect on cassava starch–gelatin film mechanical properties, hydrophilicity and water activity. Food Chem 2007, 103(2):255–62.

[8]. Yang X Cao N, Fu Y. Effects of various plasticizers on mechanical and water vapor barrier properties of gelatin films. Food Hydrocol 2009;23(3):729–35.

[9]. Yin, B., N. Atsenggari, Xi Yang, M. Hakkarainen, Glucose esters as biobased PVC plasticizers, European Polymer Journal 58 (2014) 34–40.

[10]. Jia P., et al. al. Properties of polyvinyl chloride incorporated with a novel soybean oil based secondary plasticizer containing a flame retardant group, Journal of Applied Polymer Science, 2015.

[11]. Vassilev, D., N. Petkova, P. Denev, Application of sonochemistry for the synthesis of capric

# ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEMS' EFFECTIVENESS OF ENTERPRISES IN DEVNYA MUNICIPALITY

**Elena Valkova**
*Technical University - Varna*

**Abstract**

*Environmental performance of organizations is a key indicator for environmental management systems' efficiency. Present research focuses on Solvay Sodi AD, TPP Deven AD, Devnya cement AD and Agropolychim AD - risk potential enterprises in Devnya Municipality. Environmental management systems are applied in these enterprises. Conducted analyses for a ten-year period (from 2011 to 2020 year) proves that the implementation of environmental management systems at the listed enterprises leads to a significant improvement in their environmental performance.*

**Keywords:** environmental management system, environmental performance, risk potential.

## INTRODUCTION

Industrial areas' plurality with a high concentration of enterprises of chemical industry, processing industry and the processing of fuels are carriers of a significant environmental risk. This requires in terms of industrial zones, especially when they involving risk potential enterprises to take proactive measures to prevent and minimize environmental risks. Environmental management systems implementation stands out from all organizational-management measures with a high potential positive effect on environmental protection.

Devnya's industrial zone is an important industrial complex, involving enterprises from chemical industry, electrical engineering, limestone mining and processing enterprises, electricity production. Taking into account the increasing standards and requirements for environmental protection and ensuring healthy working conditions, for technological capacities renewal and improving the performance of enterprises in terms of environmental performance significant investments are needed. [7, 8]

Current study focuses on ambient air quality, although the enterprises' impact affects all environmental components.

## MAIN FEATURES AND ECOLOGICAL PERFORMANCE OF ENTERPRISES IN DEVNYA INDUSTRIAL COMPLEX

In a previous study [7], justified are selected for analysis the applied environmental management systems of Solvay Sodi AD, TPP Deven AD, Devnya cement AD and Agropolychim AD. Because of this, current study monitors the effectiveness of environmental management systems, exactly of these enterprises. Solvay Sodi AD is classified as a low risk potential enterprise. [2] Currently TPP Deven AD is merged with Solvay Sodi AD, since 2017. Devnya cement AD is the largest cement producer in Bulgaria, up to present time. According to the Programs for planned inspections for industrial pollution prevention and under the Complex permits conditions of Regional Inspectorate of the Environment and Waters (RIEW) - Varna for 2020 Devnya cement AD is classified as a high risk site, still. Agropolychim AD is classified as a high risk potential enterprise. The listed enterprises are main pollution sources for Devnya Municipality, which is the Northeastern planning region of Bulgaria. [7]

Study focuses on enterprises' ecological performance. The air quality at Devnya muni-

cipality is most severe affected by the above-mentioned enterprises and their manufacturing activity. Thus, emissions of: CO, $CO_2$, $NH_3$, $NO_X/NO_2$, $SO_X/SO_2$, Fine Particulate Matter< 10μm ($PM_{10}$) (major air pollutants) are observed by emitting enterprises. [5, 6, 9, 11, 12] Data for ten-year period, from 2011 to 2020, is collected and analyzed (from company's own environmental monitoring and from Annual Environmental Reports). The environmental performance effectiveness is assessed and efficiency of introduced EMS is accordingly determined.

The terrain of Devnya municipality is mainly flat with an average altitude of 16 meters; the prevailing winds are from North and North-West direction. The relative share of windlessness in the year is relatively high. Ground inversions and fogs are typical for Devnya Industrial Complex. [10, 11] An adverse impact on atmospheric air quality is caused by frequent droughts implying long retention of pollutants. [12]

Enterprises that are object of the study have different objects of activity. Table I presents their activity and industry type. Table II presents their production capacity by production plants and installations.

TABLE I. RISK POTENTIAL ENTERPRISES IN DEVNYA INDUSTRIAL COMPLEX

| Company name | Activity | Industry type |
|---|---|---|
| Solvay Sodi AD | Production of soda ash, including production of quicklime | chemical |
| TPP Deven AD | Production of electric energy and thermal energy<br>Biomass volume reduction mill | supply of electricity and thermal energy, gaseous fuels and water |
| Devnya cement AD | Production of cement clinker<br>Production of cement | construction industry |
| Agropolychim AD | Production of nitrogen fertilizers – "Stabilized ammonium nitrate" and "Liquid nitrogen fertilizer"<br>Production of phosphorus fertilizers | chemical |

TABLE II. ENTERPRISES' PRODUCTION CAPACITY BY PRODUCTION PLANTS AND INSTALLATIONS

| RPE | Production plant / installation | Capacity |
|---|---|---|
| **Solvay Sodi AD** | light soda | 1550 thousand t/y |
| | heavy soda | 1300 thousand t/y |
| | sodium bicarbonate | 30 thousand t/y |
| | quicklime | 3850 t/24h |
| **TPP Deven AD** | Combustion plant for thermal energy production, including:<br>- SG CFB* №7; - SG № 3 (reserve);<br>- SG CFB № 8; - SG № 6 (reserve)<br>- SG № 2 (reserve); | 485 MWh |
| | Combustion plant for thermal energy production - SG CFB № 7 | 6,25 t/h |
| | Biomass volume reduction mill | 150 t/24h |
| **Devnya Cement AD** | Installation for the production of cement clinker - furnace 5, 6, 7 | furnace № 5 – 70 t/h<br>furnace № 6 – 70 t/h<br>furnace № 7 – 192 t/h |
| | Installation for the production of cement - four horizontal ball mills 1-4 | mill № 1 – 100 t/h<br>mill № 2 – 100 t/h<br>mill № 3 – 100 t/h<br>mill № 4 – 100 t/h |
| **Agropolychim AD** | Ammonia 100% | 207 900 t/y |
| | Nitric acid 100% | 363 000 t/y |
| | Ammonia water 24% | 64 000 t/y |
| | Stabilized ammonium nitrate | 412 500 t/y |
| | Liquid nitrogen fertilizer | 792 000 t/y |
| | Phosphoric acid (100% $P_2O_5$) | 205 000 t/y |
| | TSP (100% $P_2O_5$) | 164 000 t/y |
| | MAP (54% $P_2O_5$) | 270 600 t/y |
| | DAP (54% $P_2O_5$) | 293 700 t/y |
| | NPK (54% $P_2O_5$) | 363 000 t/y |

Enterprises, in which there are implemented certified systems for ecological management (ISO 14001:2004) are Solvay Sodi (since 2006), TPP Deven (since 2006) and Devnya cement (since 2004). [1, 2, 3] Agropolychim performs systematic environmental management in accordance with requirements of its Complex Permit and meets requirements

according to ISO 14001. In 2017 Solvay Sodi is recertified in accordance with ISO 14001:2015 requirements. [2] Policies developed by the enterprises make smooth operation of management systems continuously reviewed and updated to ensure their effectiveness.

Devnya Municipality is an ecological "hot point" in ecological terms. Enterprises' emissions are determining for the deteriorated air quality, so enterprises are the subject of the study. As well as emissions from domestic solid fuel heating during the winter months and the intensive transport for contribute the deteriorated air quality. [5, 10, 11, 12] Devnya Municipality is included in region for assessment and management of ambient air quality (AAQ) "Agglomeration Varna" during 2010. In 2015 Municipality is exempted from obligation to develop a program for AAQ improvement, the analysis done to estimate fine particulate levels at 90.4% indicates that the norm is observed. [5, 10, 11, 12] But in 2016, Ministry of Environment and Water announced a procedure "Development / Update of municipal programs for ambient air quality", which lists specific beneficiaries of the procedure. Devnya is again on the list of municipalities with impaired air quality in terms of fine particulate matter (PM10), nitrogen oxides (NOx) and others. This aims planning of measures to improve air quality, which will lead to the lasting achievement of the set air quality standard norms.

According to the Republic of Bulgaria legislation regarding the environmental monitoring [6], the following indicators are obligatory for the purpose of the atmospheric air quality assessing: CO, $CO_2$, $NH_3$, $NO_X/NO_2$, $SO_X/SO_2$, Fine particulate matter <10μm ($PM_{10}$). Enterprises in Devnya - subject of the study, reports emissions of atmospheric pollutants as part of their environmental performance. Specific air pollutants issued by enterprises are not subject of this analysis.

Efficiency assessment of the implemented certified EMS is carried out through the enterprises' environmental performance. To determine its performance, quantitative and qualitative measures are required (the indicators listed). In addition, they need to be scrutinized over a long-time period.

Concerning ambient air, emissions of CO, $CO_2$, $NH_3$, $NO_X/NO_2$, $SO_X/SO_2$, Fine particulate matter <10μm ($PM_{10}$) are analyzed on an annual basis for enterprises that are considered to be major. Ammonia indicator ($NH_3$) is not applicable to TPP Deven AD and Devnya cement AD, and for Solvay Sodi AD - Fine particulate matter <10μm ($PM_{10}$). The collected data from enterprises' Annual Reports about environment for the period are presented in Figures 1 - 22 by indicators and enterprises. Threshold value is presented by legislative regulations for each indicator. Thresholds for the observed indicators coincide. For the period 2011 - 2020 the situation in the studied objects is the following:

- Solvay Sodi AD (Fig. 1 - 5) [2]: Regarding to main ambient air pollutants CO (threshold = 500 t/y), $CO_2$ (threshold = 100 000 t/y), $NH_3$ (threshold = 10 t/y), $NO_X/NO_2$ (threshold = 100 t/y) shows significant exceedance of granted by International Plant Protection Convention (IPPC) permits, although in different years there are lower and higher measured values. The recorded maximum of 18 504 t/y CO is in 2011. It accounts 37 times the annual limits of all production installations. From 2012 to 2013 the amount of CO reduces to 13 087 t/y or 26-fold exceed of threshold. In the next three years emitted CO increase to around 16 000 t/y, after that in the next two years this indicator again decreased to 12 449 t/y and in 2019 there is a peak - 15 977 t/y. In the last year of the analyzed period (2020), CO quantity is decreased to 11 t/y, which is 22 times higher than the norm. For the observed period $CO_2$ stays above the limits of 100 000 t/y. Moreover from 2011 to 2014 the trajectory is increasing from 499 402 t/y in 2011 to 558 406 t/y in 2014, followed by decreasing trend to the end of the period (2020 - 428 265 t/y). During the first six years of the analyzed period, $NO_X/NO_2$ emissions increased to 164 t/y at a norm of 100 t/y, then gradually decreased to 124 t/y, and in 2020 they increased by about 3,5 t/y. For the analyzed period indicator $SO_X/SO_2$ with threshold 150 t/y does not exceed the values set in the legislative regulations, but is sustainably increasing. This results in drastic increase and measured value of the 285 t/y (about 1,5-fold exceedance) in

2015 and 2016 - 242 t/y. In 2017 emissions sharply decreased to 39 t/y, but by 2020 the values of this indicator have an increasing trend. However, data analyzing shows that values in recent years vary so much that supra-threshold values can be expected again, if no more serious measures and actions are taken.

Regarding specific for Solvay Sodi AD air pollutant $NH_3$ recorded data are causing serious concern too. According to IPPC permits the limit is set to 10 t/y. The minimal recorded value $NH_3$ is 509 t/y in 2013. The extreme of 2 117 t/y is measured in 2017. The overall trend with respect to NH3 for the analyzed period is decreasing, although emissions are over 120 times the threshold.

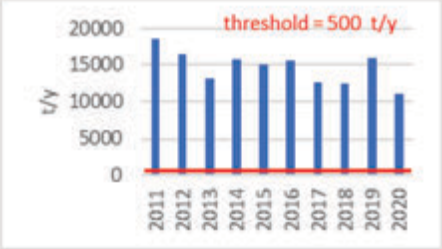



***Fig. 1.*** *Solvay Sodi AD - CO emissions*




***Fig. 2.*** *Solvay Sodi AD - $CO_2$ emissions*

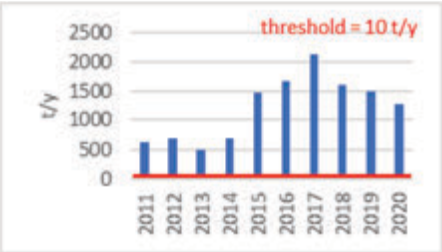



***Fig. 3.*** *Solvay Sodi AD – $NH_3$ emissions*




***Fig. 4.*** *Solvay Sodi AD - $NO_X/NO_2$ emissions*

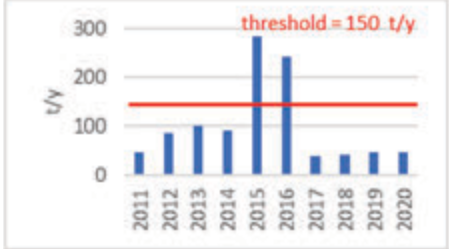



***Fig. 5.*** *Solvay Sodi AD – $SOx/SO_2$ emissions*




***Fig. 6.*** *TPP Deven AD - CO emissions*




***Fig. 7.*** *TPP Deven AD - $CO_2$ emissions*

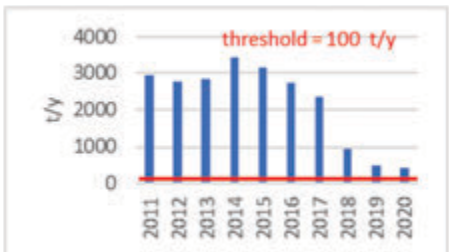



***Fig. 8.*** *TPP Deven AD – $NOx/NO_2$ emissions*

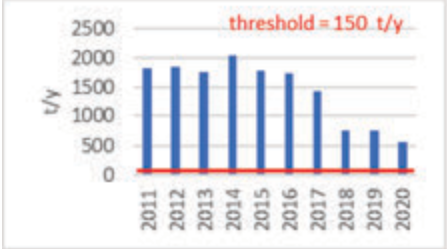



***Fig. 9.*** *TPP Deven AD - $SO_X/SO_2$ emissions*

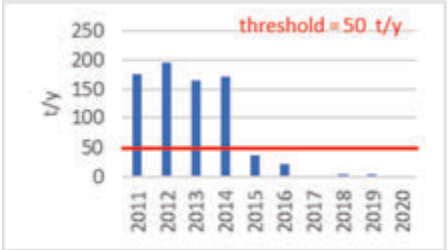



***Fig. 10.*** *TPP Deven AD - Fine particulate matter <μm ($PM_{10}$)*

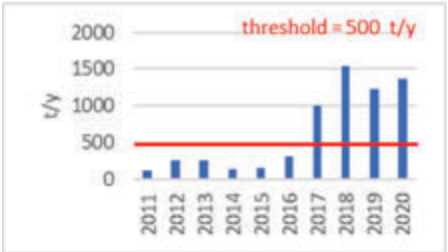



***Fig. 11.*** *Devnya cement AD - CO emissions*

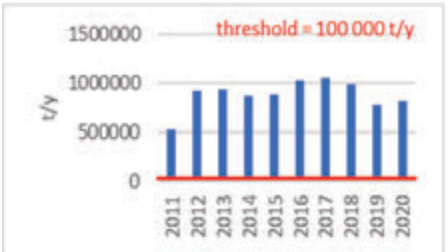



***Fig. 12.*** *Devnya cement AD - $CO_2$ emissions*

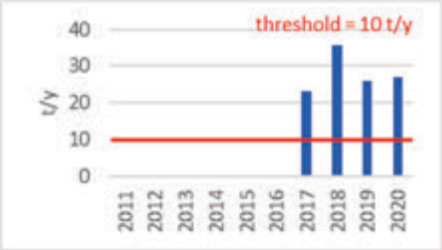



***Fig. 13.*** *Devnya cement AD - $NH_3$ emissions*

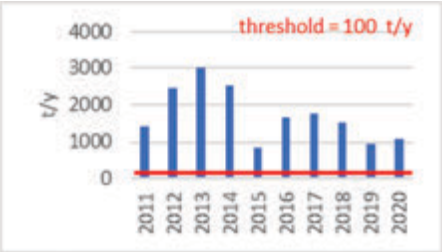



***Fig. 14.*** *Devnya cement AD - $NO_X/NO_2$ emissions*

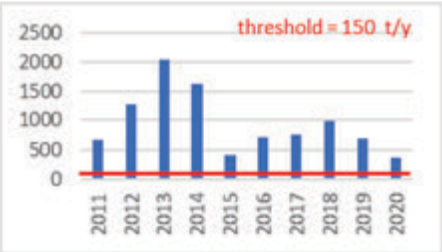



***Fig. 15.*** *Devnya cement AD - $SO_X/SO_2$ emissions*

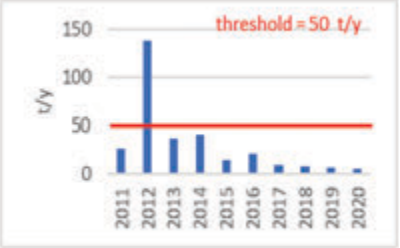



***Fig. 16.*** *Devnya cement AD - Fine particulate matter <10μm ($PM_{10}$)*

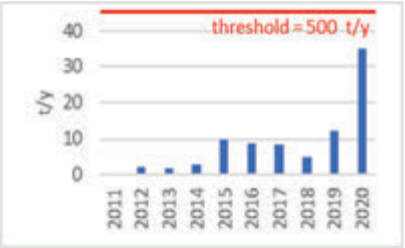



***Fig. 17.*** *Agropolychim AD – CO emissions*




***Fig. 18.*** *Agropolychim AD – $CO_2$ emissions*

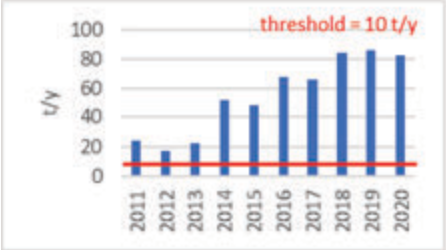



***Fig. 19.*** *Agropolychim AD – $NH_3$ emissions*

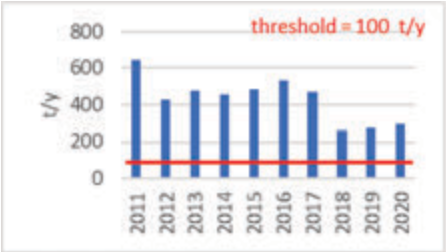



***Fig. 20.*** *Agropolychim AD - $NO_X/NO_2$ emissions*

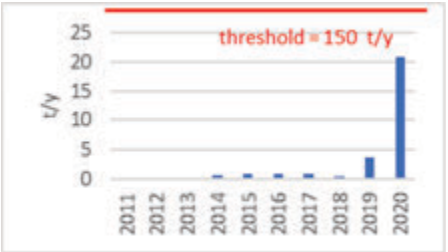



***Fig. 21.*** *Agropolychim AD - $SO_X/SO_2$ emissions*

- The situation in TPP Deven AD (Fig. 6 - 10) [1] is almost identical to that in Solvay Sodi AD: At TPP the $CO_2$, $NO_X/NO_2$, $SO_X/SO_2$ and $PM_{10}$ indicators shows a downward trend, although the first three of them are times above the threshold amounts defined in the complex permit. Only $PM_{10}$ values fall below the specified norm (50 t/y) in 2015 and remain so until the end of the analyzed period (2020 - 1,9 t/y). CO does not exceed the threshold, but the quantities issued vary greatly over the years and there is no concrete trend.
- Devnya cement AD (Fig. 11 - 16) [3]: In the first six observed years the average level of CO accounts nearly 323 t/y, which is below the threshold value (500 t/y). But after that from 2017 to 2020 there is an increasing with maximum of 1 548 t/y in 2018 or more than threefold exceedance. For $CO_2$ emissions the situation is almost identical to that in Solvay Sodi AD - for the whole analyzed period values are several times over the permit level with maximum in 2017 - 1 054 807 t/y, which is 10,5 times over the threshold. By 2020 there is a slight decrease in the reported amounts - 818 694 t/y. During the first six years of the study period, the operator is not emitted $NH_3$ emissions. During the next part of the period 2017 - 2020, the emissions of this indicator have an upward trend, being about three times above the norm. The maximum is reported in 2018 - 36 t/y or almost fourfold exceedance. The situation about $NO_X/NO_2$ and $SO_X/SO_2$ emissions is almost identical to that in TPP Deven AD - these indicators are several times over the thresholds. Their amounts vary greatly, respectively: in regard to $NO_X/NO_2$ emissions (2013) 3 018 t/y (peak) and 2019 - 942 t/y, and in regard to $SO_X/SO_2$ emissions - 2013 - 2042 t/y (peak) and 2020 - 384 t/y. Presented data regarding $PM_{10}$ shows that the threshold is not exceeded excluding the reported value 137 t/y during 2012 (almost threefold exceedance of the limitations granted). The downward trend is determined by the presented low values until the end of

the analyzed period, reaching only 4,9 t/y in 2020 at a 50 t/y threshold.

- Agropolychim AD (Fig. 17 - 22) [4]: For the entire ten-year studied period by the main atmospheric pollutants group, only CO and $SO_X/SO_2$ are below the thresholds. But they are sharply growing (2020: CO emissions are 35 t/y and $SO_X/SO_2$ emissions are 21 t/y), so permitted values exceeded can be expected soon. With regard to $CO_2$ and $NO_X/NO_2$ the trend is towards a decrease in reported values, despite exceeding the threshold norms: from 2013 to 2018 $CO_2$ emissions are average two to five times over the complex permission values; the maximum of $NO_X/NO_2$ emissions is during 2011 - 643 t/y or more than sixfold exceedance, during the next six-year period reported values are little under the peak, while in 2018-2020 there is a decrease again (259 t/y - 2018), but only average four times under the maximum from 2011. However, about these indicators a downward trend is reported. Regarding specific for Agropolychim AD air pollutant $NH_3$ (like Solay Sodi AD) recorded data are causing serious concern too. According to IPPC permits the threshold is 10 t/y. The minimal recorded value is 18 t/y in 2012. The extreme of 86 t/y is measured in 2019. The overall trend is increasing and emissions of this pollutant are exceeded by more than 8,5 times. About $PM_{10}$ reported levels vary greatly, and it is impossible to determine their trend. Exceedances ranged from 0,5 to over 1,5 times the threshold - 50 t/y.

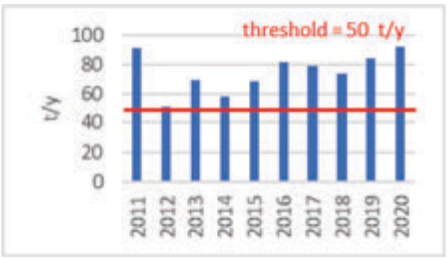



**Fig. 22.** Agropolychim AD - Fine particulate matter <10μm ($PM_{10}$)

During the analyzed period most of the enterprises' installations worked with incomplete loading of production capacities.

The Environmental policies of Solvay Sodi AD, TPP Deven AD, Devnya cement AD and Agropolychim AD have set targets for ambient air quality improvement insofar as it depends on the particular plant and its exhaust emissions. Efficiency of purification facilities is increase through planned specific measures and actions and/or through facilities' modernize. There is periodically electric filters current repair of Solvay Sodi AD, TPP Deven AD, Devnya cement AD. Charcoal production in an open way is discontinued.

## CONCLUSION

Environmental performance is improving regarding management of natural resources and notably specific air pollutants reduction throught ISO 14001 introduction in studied enterprises in Devnya Municipality. The studied enterprises have proven commitments to environmental protection goals, so RIEW is refraining of further restrictive actions against them. Furthermore, these enterprises are of great municipality economic importance. ISO 14001 implementation reassures the society and responsible institutions that organizations' environmental performance is proper management object and internal control object. The enterprises' environmental performance regarding to the main pollutants of air is unsatisfactorily, despite of EMS, which are introduced in the enterprises, despite of the availability of proclaimed environmental policy and of programs for environmental risk management and supporting procedures. Solvay Sodi AD, TPP Deven AD, Devnya cement AD and Agropolychim AD systemically allow excess of IPPC limits regarding major air pollutants. Obvious is the need of further actions to reduce main pollutants of air and thus to improve its quality. Environmental management systems introduction to large scale industrial enterprises creates economy greening preconditions, but gives no guarantees for this.

## REFERENCE

[1] Annual environmental report on the activities of CP, Deven AD, 2011 – 2017.

[2] Annual environmental report on the activities of CP, Solvay Sodi AD, 2011 – 2020.

[3] Annual environmental report for the implementation of the activities for which a Complex Permit is issued, Devnya Cement AD, 2011 – 2020.

[4] Annual report on the implementation of the activities for which a Complex Permit is granted, Agropolychim AD, 2011 – 2020.
[5] Annual report on the monitoring of the implementation of the Municipal Development Plan of Devnya Municipality for the period 2014-2020 as 31.12.2018, Devnya Municipality, 2019.
[6] Environmental Protection Act (Promulgated SG No. 91 of 25.09.2002, amended and supplemented by SG No. 42 of June 7, 2022).
[7] Kindzhakova E., Toneva D. Environmental performance of High Risk Potential enterprises in Devnya Municipality. Proceedings of the 1st International Conference "Applied Computer Technologies" ACT 2018, ISBN: 978-608-66225-0-3, p. 30-38, 2018.
[8] Kindzhakova E., Toneva D. Integrated environmental management system in High Risk Potential enterprises. Proceedings of the 1st International Conference "Applied Computer Technologies" ACT 2018, ISBN: 978-608-66225-0-3, p. 39-46, 2018.
[9] Methodology for the order and method of control of the complex permit and Sample of the annual report on the implementation of the activities for which a complex permit is granted, Ministry of Education, Sofia, 2006.
[10] Municipal Development Plan of Devnya Municipality for 2005-2013, Devnya, 2004.
[11] Municipal Development Plan of Devnya Municipality for 2014-2020, Devnya, 2013.
[12] Program for reducing the pollutants levels in the atmospheric air and reaching the established norms for harmful substances (Update). Devnya, 2011.

# ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF PADINA SETTLING BASIN

**Elena Valkova**
*Technical University - Varna*

**Abstract**

*There is a wide variety of production processes that require large amounts of water. Some of them generate large amounts of wastewater. If these waters are heavily loaded with undissolved substances, they need to be fed to a sedimentation facility before discharging into a surface water intake. The study analyzes the condition and ecological performance of the Padina settling basin, which has been in operation since 1974. For many years, global producers of soda ash, nitrogen and phosphorus fertilizers have been discharged waste water into it, but in addition them, settling basin accepts cinder, slag, ash and waste from water treatment from heat energy production. Cleared water flow from the facility is discharged into Provadiyska river.*

**Keywords:** settling basin, ecological performance.

## INTRODUCTION

Each production requires the appropriate raw materials, auxiliary materials and fuels. The obligatory raw materials used in each production process are water and electricity. Global producers with a capacity of millions tons of production per an year use large water amounts. Depending on the applied production processes, one part of water is used in the production, another part is used in a closed water cycle, but a third part - the industrial wastewater is discharged by the enterprises in the surface water bodies. In chemical production, wastewater is more or less loaded with pollutants that can be harmful to aquatic ecosystems. In order not to pollute water bodies, more and more enterprises are building their own wastewater treatment plants. However, this is not enough in some industries, such as soda production, which saturates used water with undissolved substances. In order to remove these substances from the effluent, facilities (stations, basins, artificial lakes, dams) are built, in which a sedimentation process takes place as a subsequent water treatment and only then these waters are discharged into the surface water intakes.

For unimpeded implementation of production processes in Devnya industrial complex, an installation for storage and warehousing of waste from the soda ash production plant Solvay Sodi AD is built. In 1974 the Padina settling basin, located near Padina village, Devnya Municipality (North-eastern planning region of Bulgaria) is put into operation [1, 2, 4, 7].

Therefore, paper presents an overview and analytical review of the existing Padina settling basin (PSB). Study is aimed at analyzing and determining the advantages of Padina settling basin for industrial sites, human health and environment, as due to the large industrial production, Devnya Municipality is defined as an ecological “hot point” in ecological terms [1, 2, 4, 5].

For territories with a large concentration of production enterprises, which have great economic importance, it is especially convenient to create a settling basin so that surface water bodies, which are water intakes of wastewater, to not be affected by enterprises production activity.

Nowadays, for each company, its environmental performance is extremely important, as good environmental performance further expands the markets in which it can operate. In this regard, a facility such as Padina settling basin is of key importance. Maintenance and enlargement of Padina settling basin is of key importance for Northeastern

Bulgaria economic development, as it ensures wastewater subsequent purification of the largest soda ash plant in Bulgaria and Europe (Solvay Sodi AD), in compliance with all modern norms and requirements regarding to environmental protection.

## MAIN FEATURES AND ECOLOGICAL PERFORMANCE OF PADINA SETTLING BASIN

The study presents an overview and analytical review of the condition of Padina settling basin of Solvay Sodi AD, which is the study object. Installation is located on the territory of RIEW-Varna and Basin Directorate „Black Sea Region“. In addition, its environmental performance is assessed, as since the facility's inception, it receives industrial wastewater loaded with undissolved substances (total nitrogen, total phosphorus, total organic carbon) from several large enterprises.

Installation (including its maintenance and enlargement) is considered. In addition, ways in which it affects environmental components are studied. Collected and analyzed data is from own environmental monitoring of Landfill for non-hazardous waste - Slag-slurry dump “Padina” and Solvay Sodi AD and from their Annual Environmental Reports for the period from 2010 to 2019. [1,2, 3]

Padina settling basin is established (1974) as Slag-slurry dump “Padina” of Solvay Sodi AD. It is a single-section facility of dam type I class. Facility is used for on-site disposal of sludge formed as a result of reactions and gravity sedimentation of wastewater from productions of Solvay Sodi AD and Agropolychim AD, and of waste (cinder, slag, ash and waste from water treatment) transported by hydro transport from termal power plant (TPP) Deven AD. The clarified mixed wastewater stream in Slag-slurry dump is discharged into Provadiyska river. Facility operates in continuous mode throughout the year. Since 2000 TPP is part from Solvay AD.

As a result of the facility use by three industrial enterprises (Solvay Sodi, Agropolychim and TPP Deven) the site is received the status of a landfill for non-hazardous waste – Slag-slurry dump. Agropolychim AD terminated the facility use from 01.12.2011. From 01.01.2015 Solvay Sodi AD is allowed to use wastewater from the thermal power plant - wastewater from Chemical Water Treatment Sector, railway unloading for reagents and reagent farm, only for neutralization and cooling of wastewater from electrostatic precipitators to lime kilns. As a result, since 2015 facility is renamed Settling basin Padina, as it receives industrial waste liquids from water demineralization process from sludge pumping section of Solvay Sodi and wastewater from hydrotransport of cinder and ash and from water treatment from TPP Deven. Since 2017 the TPP is merged into Solvay Sodi.

Currently, Padina settling basin receives industrial wastewater from Solvay Sodi AD and receives in transit wastewater, which transports waste from solid fuel combustion from the thermal power plant. Facility is used for mechanical treatment of wastewater and for on-site disposal of the sludge thus formed. The total surface of settling basin is 2,033 6 dka, and of the waste body - 1,750 dka. Settling basin enclosing dam is a rock-embankment with a crest length approximately 3 300 m, which is built-up and filled-up gradually, in stages: I, II, III, IV and V stage (up to elevation 47,0 m); VI stage from elevation + 47,00 m to elevation + 51,5 m (medium elevations). After the construction of the Fifth Stage dam (37 m total height and 38 million $m^3$ volume of disposed sllime) in 2011, stability analyses are made to identify opportunities for further dam height increase. It's concluded that it is possible to be done at two stages by consecutively building of two new enclosing dams (each 5 m high). They will provide additional 17 million $m^3$ volume for wastes disposal. The Sixth stage upgrading dam construction (up to elevation 52) is started in 2008. As of the end of 2015, facility has 42 m height and 38,106 $m^3$ deposited slime volume. Rock fill of the VI stage dam is placed directly on the disposed slime, with an offset towards the lake (from the main dam) varying from 0 to 50 m, as it is laid on geomeshes in combination with geotextile and a layer of graded rock. [3, 8]

Padina settling basin maintenance and enlargement are of key importance for Northeastern Bulgaria sustainable development, observing all modern norms and require-

ments regarding the environment protection.

**Atmospheric air:** Only ammonia is emitted into the atmosphere from Padina settling basin ($NH_3$). The data for the period from 2010 to 2014 is presented in Figure 1.

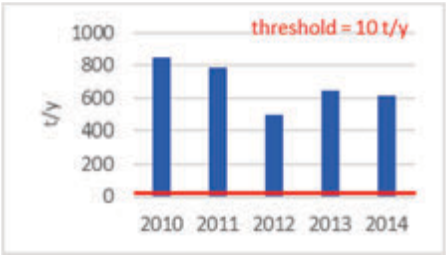



***Fig. 1.*** *$NH_3$ emissions*

For the period 2010-2011, part of these emissions is also due to Agropolychim, whose wastewater from nitrogen and phosphate production lines is accepted into the facility. For period from 2015 to 2019 there is no data for ammonia indicator, because the emitted quantities from Padina settling basin are part of the total reported amount of ammonia emissions, which is calculated according to the internal company methodology of Solvay Sodi to perform balance of ammonia. The methodology takes into account: ammonia emissions from point sources; the amount of ammonia emitted as fugitive emissions; ammonia losses with the product; ammonia fumes from Padina settling basin.

Regarding to ambient air pollutant ammonia ($NH_3$) emitted by the installation (threshold = 10 t/y) [6] shows significant exceedance of granted by the International Plant Protection Convention (IPPC) permits, although in different years there are lower and higher measured values. For the study period, the recorded maximum of 851,54 t/y $NH_3$ is in 2010. This is due to the intake of Agropolychim wastewater from, which continues also in 2011, for that year values of $NH_3$ 788,29 t/y are reported. As soon as Agropolychim stopped operating the settling basin (2012), $NH_3$ emissions decreased significantly to 499,54 t/y, but nevertheless values exceeded the norm (threshold = 10 t/y) by almost 50 times. Over the next two years, the reported values rise again. Despite the enormously exceeding of admissible norm throughout studied period, the graph registers a downward trend by reporting values of 611,86 t/y for 2014.

**Wastewater and protection of surface water intakes:** Until 2011 Agropolychim discharged wastewater from nitrogen and phosphate production lines in Padina settling basin. To 2015, TPP discharges wastewater from the hydro transport of cinder and ash and from the water treatment again in this facility. Since 2015, Solvay Sodi (already receiving wastewater from the thermal power plant) as an owner of the installation performs its own monitoring of wastewater mixed flow (industrial, cooling and rainwater from soda ash and sodium bicarbonate productions) discharged into Provadiyska river. Sources of the three wastewater types are: industrial - from distillation, brine cleaning, lime kilns, lime quenching; cooling - from cooling the gas from lime kilns; rain - from the territory of the production site. Treatment plant for part of a mixed wastewater stream is Padina settling basin. Provadiyska river is the water intake of the clarified water discharged from the installation. Monitoring of industrial wastewater monitors harmful substances emissions in them. Table I presents indicators, emission limits and monitoring frequency for sampling point № 2, which refers to Provadiyska river.

TABLE I. Indicators, individual emission limits and sampling frequency for sampling point № 2, Provadiyska river

| Indicators | Individual emission limits | Sampling frequency |
|---|---|---|
| pH | 8,5 – 11,5 | Daily |
| Undissolved substances | 100 mg/l | Weekly |
| Ammonium nitrogen | 20 mg/l | Weekly |

For sampling point № 1 (1002) Drainage channel from Padina settling basin, according to the Complex Permit (CP), in addition to indicators mentioned in Table I wastewater flow is continuously monitored (Table II).

Clarified wastewater quantities discharged from the facility into the river are measured through installed flow meters. The settling basin operator monitors the parameter "Content of undissolved substances in effluents" and ensures that the optimum value is less than 100 mg/l per week. Results of own monitoring of the indicators are documented and keep records. Data from the measurements of Padina settling basin outlet with respect to emissions of harmful substances into the water (total nitrogen, total phosphorus and total or-

ganic carbon) according to EPRTR and PRTR together with the respective threshold quantities are presented in Figures II, III and IV. The total nitrogen amount is determined on the basis of measurements on indicators of ammonium nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen. The total phosphorus amount is determined on the basis of orthophosphate concentration measurements. The "total organic carbon" concentration is calculated on the basis of measurements taken every two months.

TABLE II. Emission limit values (ELV) for different wastewater flow rates per sampling point № 1 (1002) drainage channel from PSB

| Wastewater flow rate | Measure | ELV, according to CP |
|---|---|---|
| - Q average per day | $m^3$/24h | 108,02 x $10^3$ $m^3$/24h |
| - Q maximum per hour | $m^3$/h | 5978 $m^3$/h |
| - Q average per year | $m^3$/y | 38,860 x $10^6$ $m^3$/y |

The situation regarding the indicator Total nitrogen discharged with the clarified wastewater flow in the Provadiyska river is not good (Figure 2). Throughout the studied period from 2010 to 2019, the reported quantities exceed many times the limit value, which is 50 t/y. In 2010 and 2011, when Agropolychim AD still exploits the facility, the readings are 611,38 t/y and 542,77 t/y, respectively, which is more than 12 times increasing the permissible amount of emissions. For the next eight-year period, the readings decreased significantly, with the lowest reported value being in 2014 - 253,76 t/y, which is five times again above the permissible quantity. Trend for the indicator Total nitrogen discharged with the wastewater from Padina settling basin is for excessive quantities, which vary from 294,81 t/y (2016) to 371,60 t/y (2018). This is due to the fact that the operator (world producer of soda ash and sodium bicarbonate) uses almost entirely the annual production capacity, according to CP.

With the indicator Total phosphorus the situation is very good, because by ceasing the use of settling basin by the fertilizer plant, the values of this pollutant in the discharged wastewater get into the set norm (5 t/y). For the analyzed ten-year period, there are exceedances for Total Phosphorus in 2010, when the maximum for the period is reported (6,25 t/y) and in 2011 - 5,63 t/y. In 2012, the readings decreased to 3,69 t/y, and from 2013 to 2019 the reported quantities are around 1,5 t/y. The minimum value is reported in 2016 - 0,81 t/y. After the drastic reduction of the water load with total phosphorus, the tendency of its quantities not to exceed 2 t/y is preserved.

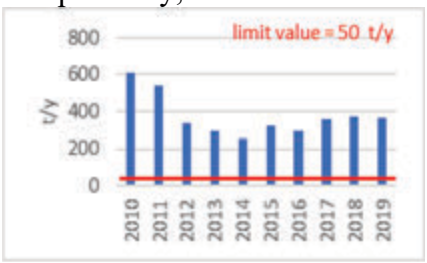



***Fig. 2.*** *Total nitrogen discharges*

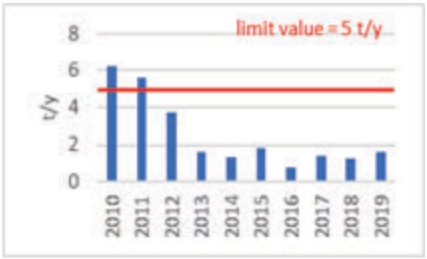



***Fig. 3.*** *Total phosphorus discharges*




***Fig. 4.*** *Total organic carbon (TOC) discharges*

About indicator Total organic carbon for 2010 there are no data reported in the Annual Report on the Environment of Landfill for non-hazardous waste - Slag-slurry dump "Padina". Maximum for the period is reported in 2011 - 788,3 t/y, which is almost 16 times above the norm. Over the next two years, the reported values gradually decreased: 2012 - 688,1 t/y and 2013 - 593,84 t/y. This downward trend is confirmed in 2014, when quantities of Total Organic Carbon of 64,13 t/y are registered in the discharged wastewater in Provadiyska river. This is 14,13 t/y above the permitted limit value (50 t/y). In the rest of the studied period, the readings range from 8 to 23 t/y above normal. The minimum (58,38 t/y) is reported in 2019, which gives reason to believe that soon this indicator will fall within the statutory limits.

**Soil and groundwater monitoring:** Solvay Sodi is developed a comprehensive plan for monitoring soils and groundwater. In 2009 Solvay Sodi performs an analysis of the condition of the soils (ie determines the base condition) of the territory on which its facilities are located, in the permanent monitoring points according to the required indicators. The analyzed soil samples are

selected from the surface layer 0-20 cm, which is most exposed to meteorological and other external factors (anthropogenic impact through fertilization of autumn and spring crops; the presence of high groundwater, helping the transfer of salts from saline areas close). The points that are directly related to PSB, object of the study, are:

- point № 1 - opposite the exit of PSB (point 1017);
- point № 2 – to the drainage channel (point 1016);
- point № 3 – to the Padina village (point 1018);
- point № 4 – in the eastern part of Trastikovo field (point 1019);
- point № 5 – 100 m from drainage channel gratings of "Padina" in a westerly direction (point 1020).

The indicators that are monitored are: pH, specific electrical conductivity (SEC), dry residue, $CO_3^{2-}$ (carbonates), $HCO_3^-$ (bicarbonates), chlorides, sulfates, calcium, magnesium, phosphates, nitrates.

Monitoring analyzes show a significant improvement of soils condition compared to the determined baseline condition. This is also the case for groundwater. Own groundwater monitoring is performed at the following sampling points for PSB: Piezometer № 10, Piezometer № 16 and Piezometer № 17. The indicators that are monitored are: water level, active reaction pH, total hardness, ammonium ion, chlorides, phosphates, iron, copper, chromium, zinc, arsenic, cadmium, mercury, nickel, lead, sulfates, nitrate ions, nitrite ions, electrical conductivity, sodium, magnesium. Monitoring frequency is once a year, except for heavy metals for which the monitoring is performed once every five years. From the conducted monitoring it is established that there are no deviations of the observed indicators from the baseline condition. The good results in terms of soil and groundwater status are result of periodic inspections for leaks from pipelines and equipment located outdoors. The sludge pipes are checked daily. In the presence of leaks, the causes are identified and eliminated as soon as possible.

**Waste recovery and disposal:** Until 2014 Padina settling basin, until then the so-called Landfill for non-hazardous waste - Slag-slurry dump "Padina", acceptes for disposal the waste groups listed in Table III:

TABLE III. Disposed waste groups

| Waste name and enterprise that submits it for disposal | Code |
|---|---|
| Sludges from on-site effluent treatment, other than those mentioned in code 06 05 02 – Solvay Sodi | 06 05 03 |
| Cinder, slag and bottom ash from boilers (excluding boiler ash referred to in 10 01 04) – Deven | 10 01 01 |
| Entrained fly ash from burning coal – Deven | 10 01 02 |
| Solid wastes from calcium-based reactions from desulphurisation of waste gases (a waste from low-sulfur coal and limestone using) - Deven | 10 01 05 |
| Sands of combustion in a fluidized bed - Deven | 10 01 24 |
| Solid wastes from initial filtration and from sieves and screens - Deven | 19 09 01 |
| Sludges from decarbonation - Deven | 19 09 03 |
| Solutions and sludges from regeneration of ion-exchangers - Deven | 19 09 06 |

Until 2011 it also accepts waste with code 06 05 03 from Agropolychim. With the cessation of activities for the disposal of all these wastes, with the exception of those classified in group 06 05 03, the status of the facility has been changed from a Slag-slurry dump "Padina" in a settling basin. Since 2015, PSB accepts for disposal only waste with code 06 05 03, which enters the facility through sludge pipelines of Solvay Sodi. For this waste, activities marked with code D9 - Physico-chemical treatment leading to formation of final compounds or mixtures, which are disposed by one of activities with codes D1 to D12 and a disposal operation marked with code D12 - permanent storage in Padina settling basin are permitted.

Waste groups with codes 10 01 01, 10 01 02, 10 01 05 - Solid wastes from calciumbased reactions resulting from desulphurisation of waste gases (waste from the sharing of low-sulfur coal and limestone) and 10 01 24, which are generated from the production activity of Solvay Sodi are utilized for technical reclamation of the retreat between the 5th and 6th stages of upgrading of Padina settling basin. There is a project for partial technical and biological reclamation of the retreat between the dikes of the 5th and 6th stages of upgrading the facility. The recovery activity is marked with code R10 - Tillage, leading to improvements for agriculture or the environment.

In addition to monitoring by components and environmental factors, the body condition of settling basin is also monitored. Geodetic measurements are performed. The shrinkage of the base of dams is measured by a system of

devices for measuring the shrinkage degree. Devices for shrinkage degree measuring monitor the vertical deformations at the base of the 5th stage dam. Based on the measurements, the facility operator knows what is the development trend of the process and, accordingly, what life remains on the facility, which operates for almost half a century.

Pipelines to Padina settling basin are being replaced and a new type of compensator is being used. With the implementation of this activity the need for drainage is eliminated and the agricultural lands pollution along the route of the sludge pipelines is minimized. Research and design works are carried out to maintain the dam stability and its upgrade, through which reliable information about the dam is obtained. Facility dam is upgraded, which is necessary for its further use, which provides an opportunity for long-term facility operation until its full capacity is exhausted. Implementation of such activities by the settling basin operator has a positive effect on the life of the facility itself. The company Sweko Energoproject AD, which provides all necessary services related to the design and operation since the facility commissioning, is developed a Preliminary Design for the Seventh Stage of Upgrading; Detailed design for the control and measuring system (CMS) of the dam from the Sixth stage of upgrading; Technical project for construction of a new cell for storage of waste from TPP Deven on the territory of PSB. Through these measures Solvay Sodi ensures the future facility operation until the full depletion of its capacity. In addition, Solvay Sodi proves to the authorities that it undertakes and implements the possible measures and activities in order to comply with the environmental requirements. This is proved in 2017, when Solvay Sodi was recertified in accordance with ISO 14001:2015 requirements, Padina settling basin also, be-cause it is a treatment plant, which is an ex-tremely important part of the entire production process of soda ash from Solvay Sodi.

## CONCLUSION

Presented overview and analytical review of Padina settling basin shows that the operator takes all necessary measures to ensure optimal facility operation. In addition to installation maintaining and upgrading in order to use its full capacity, the operator is constantly striving to improve the applied production processes, as they determine the degree of loading of waste-water with undissolved substances. This is evi-denced by the analysis and trends determination. But in study support also are recertification in accordance with ISO 14001:2015 requirements, as well as the presence of a certified IEMS, according to ISO 14001, ISO 9000, OHSAS 18000 and ISO 45001:2018. Regarding to harmful substances discharges, the general trend is to reduce the surface water intakes load. But there is also soil condition improvement as well as of the groundwater. The most significant problem is reported with regard to ambient air pollution with ammonia, although the trend is downward. Emitted quantities of this pollutant are 10-times above the norm, still. Considering the importance for good economic development of Devnya municipality and respectively entire Northeastern planning region of Bulgaria, responsible institutions refrain from imposing drastic measures against the operator, which demonstrates that will continue to work towards better environmental performance.

## REFERENCE


[1] Annual environmental report on the activities of CP, Deven AD, 2011 – 2017.

[2] Annual environmental report on the activities of CP, Solvay Sodi AD, 2011 – 2020.

[3] Annual environmental report on the activities under CP № 361-H0/2008 of the Non-hazardous Waste Landfill - Sludge dump "Padina", 2008 - 2014.

[4] E. Kindzhakova, D. Toneva, "Environmental performance of High Risk Potential enterprises in Devnya Municipality", Proceedings of the 1st International Conference "Applied Computer Technologies" ACT 2018, p. 30-38, 2018. ISBN: 978-608-66225-0-3.

[5] E. Kindzhakova, D. Toneva, "Integrated environmental management system in High Risk Potential enterprises", Proceedings of the 1st International Conference "Applied Computer Technologies" ACT 2018, p. 39-46, 2018. ISBN: 978-608-66225-0-3.

[6] Environmental Protection Act (publ. SN issue 91 of 25 September 2002, ch. SN issue 21 of 12 March 2021).

[7] Municipal Development Plan of Devnya Municipality for 2014-2020, Devnya, 2013.

[8] Official website of "Sweko Energoproject" AD: www.sweco.bg.

# THE EFFECT ON INCOMPRESSIBLE STRIPS OF THE DISTANCE BETWEEN THE METALLIC GATES AND THE TWO-DIMENSIONAL ELECTRON SYSTEM

**Deniz Eksi**

*Vacational School of Health, Yeni Yuzyil University, Istanbul, 34010, Turkey*

**Abstract**

*In this study, the effect of the distance of metallic gates to the two-dimensional electron system on incompressible strips in the quantum Hall regime was investigated. In the calculations, the two-dimensional spatial distributions of the electron density and potential profile were determined by solving the three-dimensional Poisson equation for all charges defined in the three-dimensional heterostructure with a self-consistent method. In the presence of a perpendicular magnetic field, two different regimes occur on the electron distribution. These are incompressible strips and compressible regions. The thickness of the incompressible strip and the velocity of the electron in this region vary for various magnetic field values. It has been demonstrated that the thickness of the incompressible strips and the velocity of the electron in these regions change when the distance of the metallic gates defined on the three-dimensional heterostructure to the two-dimensional electron system changes. The results of the calculations carried out are consistent with the previous studies.*

**Keywords:** quantum Hall effect, metallic gate, incompressible strip

## INTRODUCTION

Experiments with a scanning force microscope [1,2] in narrow Hall samples and subsequent theoretical studies [3,4] made significant contributions to the understanding of Incompressible Strips [5,6] formed at low temperature and high magnetic field values. It is possible to create a two-dimensional electron system (2DES) with materials with different energy band gaps in three-dimensional (3D) heterostructure [7-13] Hall Bar geometry can be defined by the potential difference or chemical etching method to be applied to the metallic gates placed on this structure [14-16]. The spatial distribution of electrons created by these two methods is locally different. Concurrent, the electron distribution generated by the chemical etching method will show a different distribution according to the amount of etching to be made from the surface to the 2DES. Likewise, this applies to metallic gates. The spatial distribution of electrons will vary as the distance of the metallic gates to 2DES changes.

Chklovskii et al. [5] have shown that when a steep magnetic field is applied to an electron distribution confined by the edges, two different regimes form on the density profile. These are incompressible strip (IS) and compressible regions (CS). Including the screening property, electrons are placed locally up to the Fermi energy level. ISs occur in regions where Fermi energy coincides between two Landau energy levels, which are formed by the effect of the magnetic field. CSs occur in other regions. Therefore, there is no accessible state in ISs, the electron distribution in these regions does not change according to the position. Concurrent, since screening is weak in these regions, the potential profile changes according to position. On the other hand, since accessible states already exist in CSs, the electron distribution in these regions changes with position. In contrast to IS, CS has a higher degree of screening, so the potential profile does not change depending on the position. They demonstrated that one of the most crucial factors determining how thick the ISs would be is the change in electron distribution at the margins according to location.

With Landau quantization [17], the electron density in two dimensions in the presence of a perpendicular magnetic field is defined by the filling factor ($\nu$). When Zeeman splitting, that

is, spin effects are not taken into account, the positions corresponding to ν=2,4,6,.. locally are the regions of ISs.

In this study, 2DES was created in a 3D heterostructure defined by $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ semiconductor materials. Hall Bar geometry was defined in 2DES with the negative voltage applied to the metallic gates placed on the 3D structure. In the presence of a perpendicular magnetic field, the thickness of the ISs and the electron velocity in these regions were calculated as a function of both the magnetic field and the distance of the metallic gates to the 2DES.

## THEORY AND MODEL

The main purpose of this study is to determine the effect of the distance ($\Delta Z_G$) between metallic gates and 2DES on ISs. For this, the thickness of the ISs and the electron velocities in these regions were calculated for perpendicular and different magnetic field magnitudes and $\Delta Z_G$ values. First, with an initial condition in which donors and boundary conditions in the 3D heterostructure were defined, the 3D Poisson equation was solved in the absence of magnetic field and at zero temperature by a self-consistent method [18]. The magnification parameters of the 3D heterostructure used for this study are given in Fig.1. The spatial distribution of the electron density and the potential profile were determined from the solution of the Poisson equation. At zero temperature, the electron charge density locally positioned up to the Fermi energy is $n_{el}(r)$,

$$\nabla^2 V(r) = -\frac{\rho(r)}{\varepsilon} \tag{1}$$

it is obtained by the Poisson equation. Here, $\rho(r) = -e[n_{el}(r) - n_0]$ is the screening charge density, $n_0$ is the donor charge density, $\varepsilon$ is the dielectric constant, $V(r)$ is the potential energy for electrons, and $e$ is the electron charge. Using Landau quantization [17], when a magnetic field is applied perpendicular to the spatial distribution of the resulting electron density,

$$\nu(x,y) = 2\pi l_B^2 n_{el}(x,y) \tag{2}$$

the local fill factor with 2D is determined [6]. Here $l_B = \sqrt{\hbar/eB}$ is the magnetic length, $2\pi\hbar$ Planck's constant and the magnitude of the magnetic field in the $B$ (z) direction. Chklovskii et al. [5], with Thomas Fermi approximation (TFA) [19], defined the thickness of ISs with the expression

$$w_v^2 = \frac{2\varepsilon\hbar\omega_c}{\pi^2 e^2 \frac{dn_{el}(x)}{dx}\Big|_{x=x_v}} \tag{3}$$

when the filling factor is an integer. Here, $\varepsilon$(= 12.4 for $GaAs$) is the dielectric constant of the material, $\omega_c(= eB/m^*)$ is the cyclotron frequency, $m^*$ (= $0.067m_0$ for $GaAs$) is the effective mass of the electron, $m_0$ is the free electron mass. $x_v$ is the position of the electron density when the filling factor is an integer With this equation, only the thickness of the ν=2 ISs and the electron velocity in these regions are calculated according to both the magnetic field and the distance of the metallic gate to the 2DES. The drift velocity of the electron in ISs is determined by [20]

$$\vec{V}_D = \frac{\vec{E}x\vec{B}}{B^2} \tag{4}$$

In Fig.1, the magnification parameters of the 3D heterostructure with 128x128x100 mesh, the positions of the metallic gates, the positions-amounts of the donors and the position of the 2DES are given. Here $\Delta Z_G$ is the distance between the metallic gates and 2DES. The distance between the two metallic gates placed on the structure is approximately 1.06$\mu m$. In the calculations, the value of the aluminum concentration in the 3D heterostructure was taken as x=0.3 in accordance with the experiments. The donors identified in the structure are in a single grid in the (x-y) plane, known as delta doping in the literature [7,8].

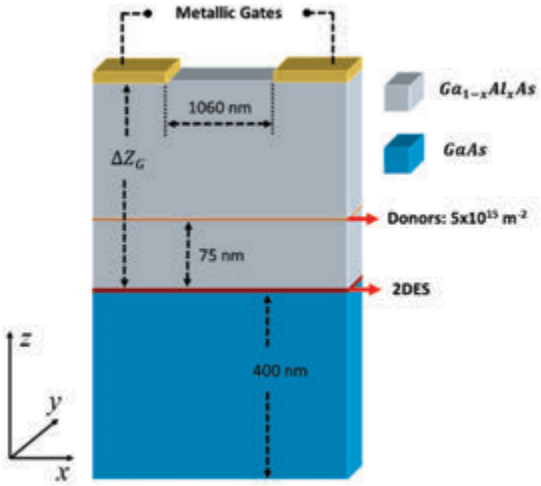



**Fig. 1.** *Schematic representation of the amplification parameters of the 3D heterostructure.*

The metallic gate voltage is taken as $V_g = -1.0\,Volt$ for all calculations. In the light of these definitions, the spatial distribution of the electron density obtained from the solution of the Poisson equation for $\Delta Z_G = 165nm$ is shown in Fig.2a and the potential profile in Fig.2b. For the magnetic field applied homogeneously and perpendicular to the obtained electron density, a local 2D filling factor is determined by Landau quantization. The variation of the filling factor for B=1.5 Tesla taken from the $y = 0.75\mu m$ position in Fig.2a according to the one-dimensional position at different $\Delta Z_G$ values is shown in Fig.3. As the metallic gates move away from the 2DES, the electron distribution moves towards the edges and the amount of density in the center increases. This situation changes the variation of the electron distribution according to the position in the positions where the filling factor is ν=2. The thicknesses of the ISs calculated as a function of the magnetic field for the $\Delta Z_G$ values in Fig.3 are shown in Fig.4a and the velocities of the electrons in these regions are shown in Fig.4b.

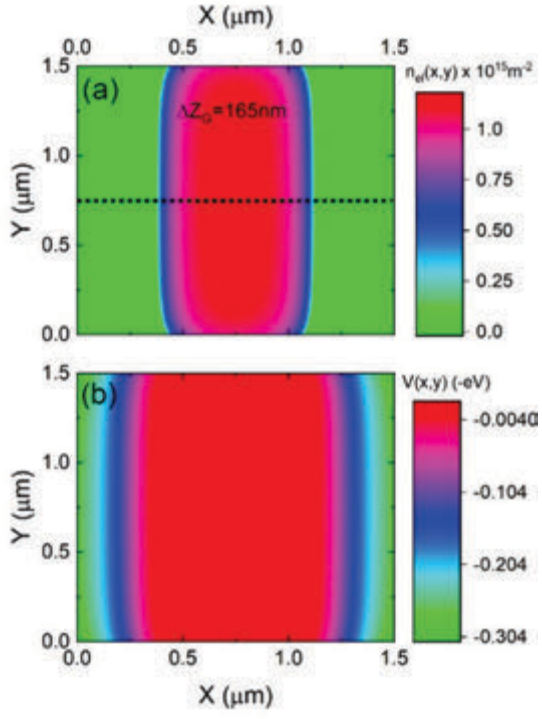



**Fig. 2.** *For values of $\Delta Z_G = 165nm$ and $V_g = -1.0\,Volt$ (a) spatial distribution of electron density, (b) potential profile.*

As the magnetic field increases, the thickness of the ISs increases, and the speed of the electron in these regions decreases. As the metallic gates move away from 2DES, ν=2 protects its existence at larger magnetic field values.

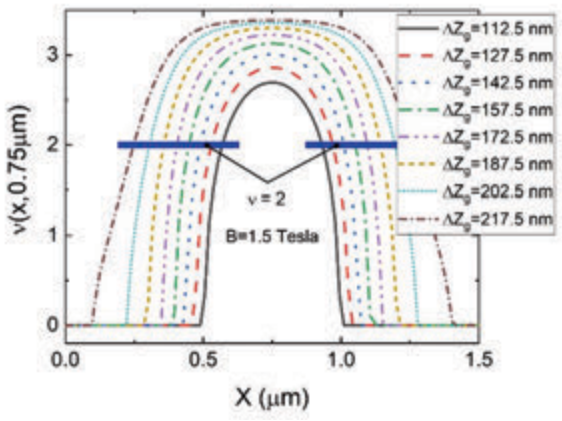



**Fig. 3.** *Variation of filling factor with position for different $\Delta Z_G$ distances at $V_g = -1.0\,Volt$, B=1.5 Tesla.*

The thickness of the IS formed at different magnetic field values for ν=2 at the $y = 0.75\mu m$ position is shown in Fig.5a as a function of the distance between the metallic gates and the 2DES. Likewise, the velocity of the electron in ISs is shown in Fig.5b. In Fig.5a, the thickness of the ISs decreases up to approximately $\Delta Z_G = 180nm$ and increases again after this value. In response to this situation, the electron velocity in ISs shows the opposite feature. In Fig.5a, both the edge effects of the 3D heterostructure and the negative voltage applied to the metallic gates are effective together as the main reason for the decrease in thickness in ISs between $\Delta Z_G = 112{,}5nm$ and $\Delta Z_G = 180nm$. After the value of $\Delta Z_G = 180nm$, the thickness of the ISs increases as the contribution from the metallic gates decreases due to the increase in the distance between the metallic gate and the 2DES. In this case, it is reflected in the velocity of the electron in ISs, as seen in Fig.5b.

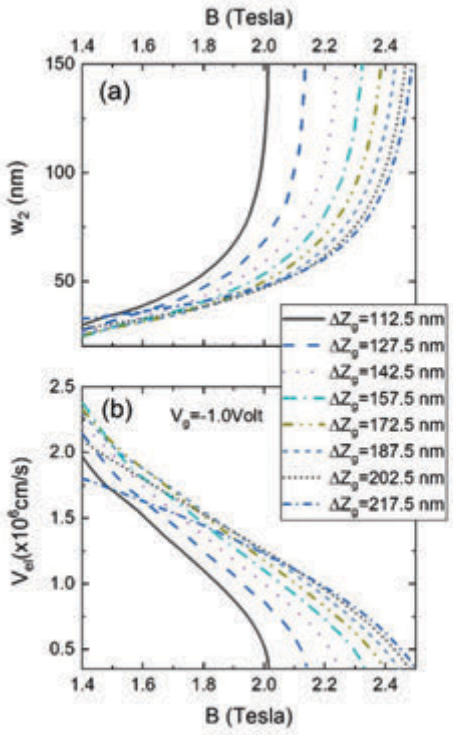



**Fig. 4.** *Variations of (a) thickness of ISs, (b) drift velocity of electrons in ISs according to magnetic field for different* $\Delta Z_G$ *values at* $V_g = -1.0\ Volt$.

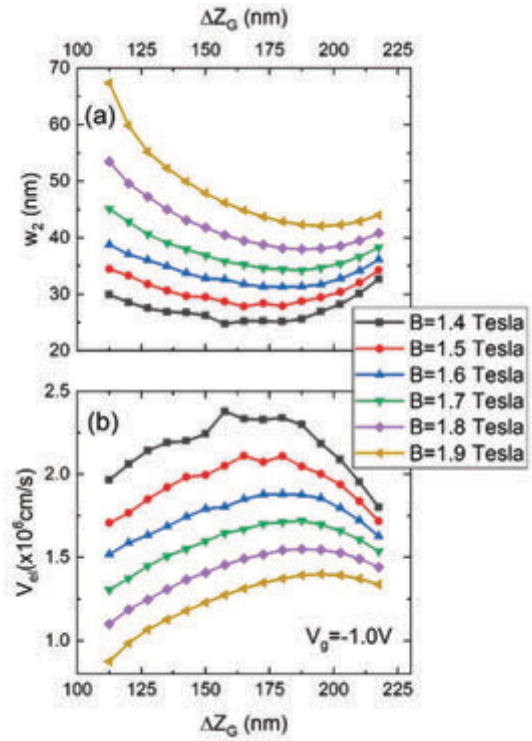



**Fig. 5.** *Variations of (a) thickness of ISs, (b) drift velocity of electron in ISs according to* $\Delta Z_G$ *distance for different magnetic field value at* $V_g = -1.0\ Volt$.

## RESULTS AND CONCLUSION

When a magnetic field perpendicular to the Hall Bar geometry formed by the metallic gates defined on 2DES is applied, the thickness of the ISs was calculated according to both the magnitude of the magnetic field and the distance of the metallic gates to the 2DES. According to the calculation results, the thickness of ISs increases with the magnitude of the magnetic field and the velocity of electrons in these regions decreases with the magnitude of the magnetic field. At constant magnetic field value, the thickness of ISs decreases when metallic gates are close to 2DES up to a certain distance. After this distance, the thickness of the ISs increases. In response to this situation, the electron velocity in ISs shows the opposite feature. By changing the distance between the 2DES and the metal gate for a constant magnetic field value, it is possible to change the IS thickness and electron velocity in these regions. By varying the distance between the 2DES and the metal gate, the IS thickness and electron velocities in these regions were calculated for the first time in this work.

## REFERENCE

[1] E. Ahlswede, et al., Physica B, **298**, 562, (2001)
[2] E. Ahlswede, et al., Physica E, **12**, 165, (2002)
[3] K. Güven and Rolf R. Gerhardts, Physical Review B, **67**, 115327, (2003)
[4] A. Siddiki and Rolf R. Gerhardts, Physical Review B, **70**, 195335, (2004)
[5] D.B. Chklovskii et al., Physical Review B, **46**, 4026, (1992)
[6] A. Siddiki and Rolf R. Gerhardts, Physical Review B, **68**, 125315, (2003)
[7] F.E. Camino, et al., Physical Review B, **72**, 155313, (2005)
[8] V. Lin Ping, et al., Physical Review B, **80**, 125310, (2009)
[9] Y. Zhang, et al., Physical Review B, **79**, 241304(R), (2009)
[10] D. T. McClure, et al., Physical Review B, **103**, 206806, (2009)
[11] I. Neder, et al. Physical Review Letters, **96**, 016804, (2006)
[12] L. V. Litvin, et al., Physical Review B, **78**, 075303, (2008)
[13] P. Roulleau, et al., Physical Review Letters, **101**, 186803, (2008)
[14] S. Arslan, et al., Physical Review B, **78**, 125423, (2008)
[15] D. Eksi, et al., Physical Review B, **82**, 165308, (2010)

[16] D. Eksi and A. Siddiki, Journal of Computational Electronics, **21**, 1-9, (2022)
[17] U. Wulf, et al., Physical Review B, **38**, 4218, (1988)
[18] A. Weichselbaum and S. E. Ulloa, Physical Review B, **74**, 085318, (2006)
[19] J. H. Oh and Rolf R. Gerhardts, Physical Review B, **56**, 13519, (1997)
[20] J.H. Davies, in The Physics of Low Dimensional Semiconductors (Cambridge University Press), New York, 1998

# A RESONANT TUNNELLING STRUCTURE OF GaAs ALLOYS

**Sevket Erol OKAN[1], Abdullah BILEKKAYA[2], Saban AKTAS[1]**

*[1] Department of Physics, Trakya University, Edirne-Turkey*
*[2] Department of Electronics, Edirne Vocational College of Technical Sciences, Trakya University, Edirne-Turkey*

**Abstract**

*The resonant tunneling concept in multiple quantum well structures is exhibited through transmission and current-voltage characteristics. The triangular quantum well is chosen in the device, because its response to an external electric field is at ease in comparison with that of rectangular-shaped wells. Also, a laser field is theoretically applied to the structure to show that it improves the control of the performance of the device*

**Keywords:** Resonant tunneling, dwell time, current-voltage characteristics

## INTRODUCTION

Resonant tunneling phenomena form the way of the design of quantum diodes [1] and quantum transistors [2]. The observation of the current-voltage (I-V) characteristic of a resonance tunneling diode (RTD) is actually the use of the device. It is useful the calculate the I-V properties beforehand. The formation of resonant states depending on the structural parameters such as the widths of wells and barriers, the depths of wells, and the heights of barriers formed by their semiconducting composition and their responses to the external probing fields is the mainstream of the calculations [3-5].

An external magnetic field application is employed to provide a control mechanism for the device [6]. A high-frequency laser field can also be applied to influence the transition coefficients. This is called resonance tuning and provides optical control of the current-voltage characteristics [7-9]. The geometric parameters of an RTD may not be ideal for tunneling in practice. A laser field has a restorative effect on this problem [10].

It has been found that the tunneling time is shortened and the resonance transition becomes more effective if a potential well is placed just after the emitter. This quantum well is thus named as “accelerating well” [11,12].

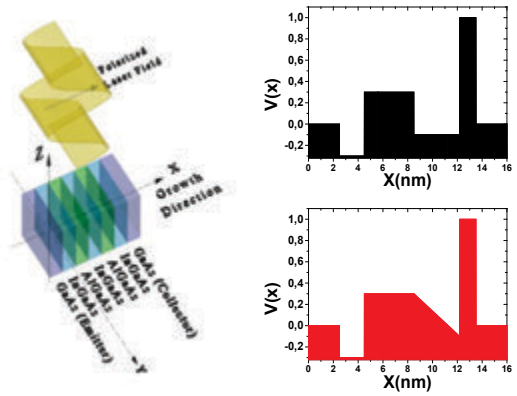



***Fig. 1.*** *Potential profiles of the resonance tunneling diodes.*

The resonance tunneling structure in question includes a triangular potential well between the two barriers after the accelerating well, the absence of which is also taken into account in the I-V characteristic of the diode. Also, the laser field effect on that RTD is discussed by its appearance on the current-voltage characteristics.

## THEORY

Resonance tunneling diodes can be designed as combinations of quantum wells and barriers. The two diodes shown in Fig. 1 both consist of two potential wells separated by a potential barrier, and their

structures end with a sharp potential barrier before the exit to the collector. The only difference between the diodes is the shape of the well between the two barriers. The first one with a square-shaped has been studied earlier [13].

In the high-frequency limit [14], the Hamiltonian in part $j$ for the structure is divided into $N$ part, for an electron under an intense laser field polarized along the crystal growth direction-$x$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_j^*}\nabla^2 + V_j(x,\alpha_0)\right]\Phi_j(x) = E\Phi_j(x) \quad , \quad 1$$

where $V_j(x,\alpha_0)$ is the laser-dressed potential given by

$$V_j(x,\alpha_0) = \frac{w}{2\pi}\int_0^{2\pi/w} V(x+\alpha(t))dt \quad , \quad 2$$

In Eqs. 1 and 2, $j = 1,2,\dots,N$ and $\alpha(t)$ in Eq.2 is the laser dressing parameter describing the effect of the laser field. It is given by $\alpha(t) = \alpha_0 \cos\omega t$ with an amplitude $\alpha_0 = \frac{eA_0}{m_1^*\omega}$. It is noted that the number $N$ has to be extended up to ten thousand for an acceptable precision when the laser field is considered.

The electronic wave function $\Phi_j(x)$ is given by

$$\Phi_j(x) = A_j \exp(k_j x) + B_j \exp(-k_j x) \quad , \quad 3$$

where $k_j$ is the wave number expressed as

$$k_j = \begin{cases} i\dfrac{\sqrt{2m_j^*(E-V_j)}}{\hbar}, & (E > V_j) \\ \dfrac{\sqrt{2m_j^*(V_j-E)}}{\hbar}, & (E < V_j) \end{cases} \quad . 4$$

Using the standard boundary conditions and the transfer matrix method given elsewhere in more detail [15], the transmission coefficient $T(E)$ and the dwell time $\tau$ are given by

$$T(E) = \frac{|A_N|^2\hbar k_N/m_N^*}{|A_1|^2\hbar k_1/m_1^*} \quad 5$$

and

$$\tau = \frac{m_1^*}{\hbar k_1}\int_{x_1}^{x_N}|\psi(x)|^2 dx \quad 6$$

where $\hbar k_1/m_1^*$ is probability density flow [16].

Finally, the current density $J$ as a function of the applied voltage $V$ is

$$J = A\int_0^\infty T \ln\left(\frac{1+\exp\left\{\frac{(E_F-E)}{k_B T_K}\right\}}{1+\exp\left\{\frac{(E_F-E-eV)}{k_B T_K}\right\}}\right)dE \quad .7$$

where $A = \frac{em_1^* k_B T_K}{2\pi^2\hbar^3}$ and the Fermi energy was taken to be $E_F \approx 0.004\ eV$ [17].

The method described above was tested on the earlier experimental resonant tunneling diode study [18]. In the latter study, the current/current peak unity value is measured for 0.2 V and the same result is obtained by our calculations.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

An RTD requires a system consisting of two quantum wells separated by a quantum barrier, or vice versa. They can be grown to desired electronic characteristics.

In Fig.2 the transmissions of electrons from the RTD with and without potential $V_2$ are given as functions of electron energies. The resonance transmissions occur at the same energy found as $E_{rez} = 0{,}222\ eV$ for both structures. However, the transmission intensity and the dwell times exhibit differences between them. The first resonance transmission intensity and dwell time without $V_2$ structure are $T = 0{,}99$ and $t_d = 282\ fs$ against those quantities $T = 0{,}76$ and $t_d = 216\ fs$ for the structure with $V_2$ structure. The dwell time shortens by 23% if $V_2$ exists in the RTD in comparison with that of $V_2$ does not exist case. For this reason, the $V_2$ potential can be called "accelerating well". Also, the second and third resonances with the accelerating well are sharper than the structure without it.

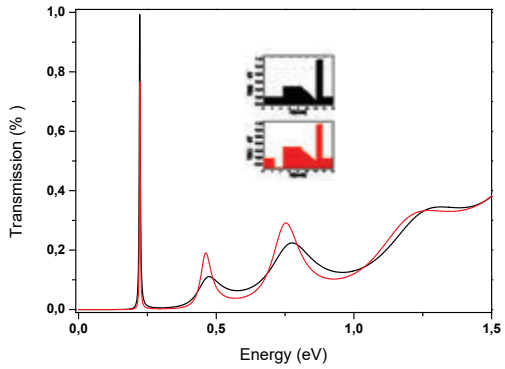



***Fig. 2.*** *Transmission without (black lines) and with accelerating well (red lines). Inset shows the potential profiles of the considered TRTDs.*

The resonance transmission calculations are in the means of varying electron energy and calculate the transmission probability for constant local potentials as obtained $T = 0{,}76$ for the RTD with the accelerating well. As not concerned here, one must point out that the transmission can be set to unity minimizing the local potentials which are to vary indium or aluminum concentrations in the barriers and wells.

The transmission coefficients of the two RTDs with the triangular-shaped $V_4$ potential (TRTD) and the square $V_4$ potential (SRTD) without electric field application and under $0.5\ V$ forward bias are shown in Fig.3. The transmission properties of the SRTD have been previously presented [13]. The two RTDs present different transmission characteristics. When there is no electric field application, the first transmission peaks are sharp having the shape of Dirac-delta functions for both RTDs. The first (or resonance) transmission occurs at quite low energies at $\sim 0.05\ eV$ for the SRTD. This energy for the TRTD is $\sim 0.20\ eV$ which is fourfold higher than that of the SRTD. For the no electric field case in both structures, the intensities of both resonances are almost the same at $\sim 75\%$. The second and third transmissions are broad and at close energies with each other.

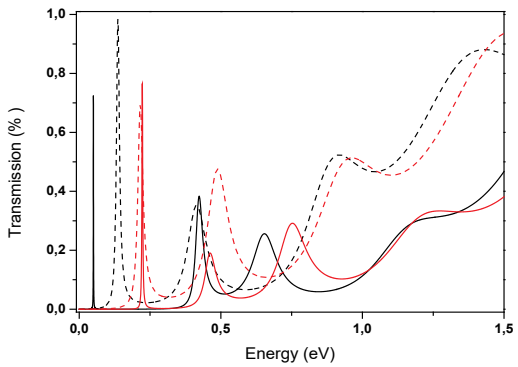



***Fig. 3.*** *Comparison of the transmission coefficients of the RTDs with the triangular shaped $V_4$ potential (red lines) with that of previously studied RTD with square $V_4$ potential (black lines) under zero (solid lines) and $0.5\ V$ forward bias (dashed lines). Inset shows both potential profiles as $0.5\ V$ external fields applied.*

When $0.5\ V$ forward bias is on, the resonance transmission energy of the SRTD is $\sim 0.15\ eV$ shifted from $\sim 0.05\ eV$ in a no-bias case. Meantime, the transmission probability is raised to almost unity by the field application. For TRTD, the first resonance appeared at the same resonance energy as before the electric field, but the line shapes are slightly different. Most interestingly, the transmission probability also remains the same whether the field is applied or not.

As I-V characteristics are the most constitutive properties for device applications, the current densities of TRTDs with and without an accelerating well are calculated as functions of the external electric field strength. They are shown in Fig. 4. As the reverse bias gives no current for both TRTDs, the characteristic differences between these two are remarkable in the $0 - 2\ V$ range. In the absence of the accelerator well, the second resonance transition disappears with a very broad peak and the third resonance transition is also broadened carrying a very large current.

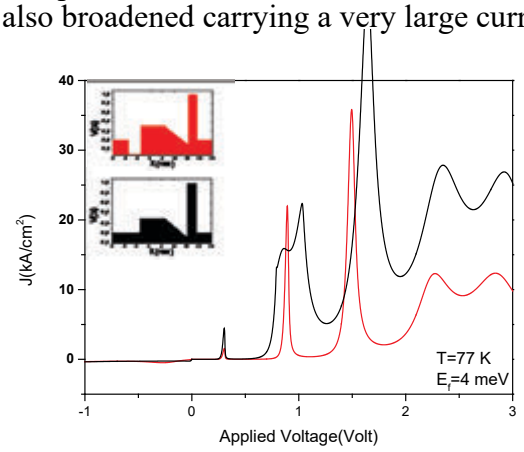



***Fig. 4.*** *Forward and reverse bias current density-voltage characteristics of the RTD involving the triangular quantum well with (red lines) and without (black lines) the accelerating well. Inset shows the two potential profiles.*

On the other hand, the TRTD with the accelerating well, as seen in Fig.4 as well, has three sharp signal-like currents which might become very useful diode properties.

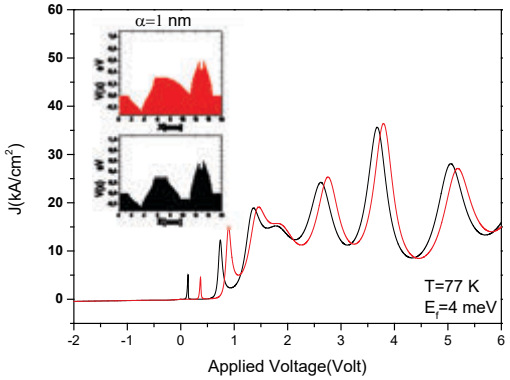



***Fig. 5.*** *Laser field effect on forward and reverse bias current-voltage characteristics of the RTDs with the accelerating wells with the triangular (red lines) and the square (black lines) V4 potentials. Inset shows the potential energy profiles tailored by laser field application on the potential profiles of the two structures as no voltage is applied.*

Applying a laser field to a working RTD can change its properties positively. In Fig.5, the changes in current-voltage characteristics as a result of applying a laser field to a TRTD and an SRTD are shown. Both diodes are considered to have an accelerator well. Apparently, the laser field changes the potential shapes of the structures as seen in the insets of Fig.5. Also, the current-voltage relations are quite diversified in both samples compared with those given in the absence of the field. With the TRTD, the intensity of the first resonant current is $\sim 2\ kA/cm^2$ when the laser field is not applied (Fig.4). It is increased to $\sim 5\ kA/cm^2$ without any shift in its position at $\sim 0{,}4\ V$. Against that, the intensity of the first resonance current intensity shows no change whether a laser field is applied or not with SRTD (Fig.4 and Fig.5). However, the transition localized at $\sim 0.4\ V$ in the absence of the laser field shifts backward to $\sim 0.2\ V$ if the laser field is applied.

## CONCLUSION

The two resonance tunneling diodes, so-called TRTD and STRD were investigated in terms of whether they have accelerating quantum wells or not. Their abbreviated names come from their triangular and square-shaped potential wells beyond the accelerating well in their structure. It is once more established that the existence of the accelerating well shortens the dwell times leading to the realization of the "fast electronic" concept.

The widths of the well and barriers and the depth of the wells and the height of the barriers were taken to be constant in the TRTD and STRD to be able to compare the effects of two geometrically different wells on the transmission and the current-voltage characteristics. The transmission probabilities of the resonances, their energies, and the current density-voltage characteristics can be differed owing to having different well shapes in the TRTD and STRD structures.

Once an RTD was grown, its member wells and barriers cannot be changed geometrically and energetically. However, a laser field application manages these by modifying the overall potential profile, as shown on the suggested TRTD. Thus, the laser field effect on the current-voltage characteristics is assessable in the applications.

## REFERENCE


[**1**] S. Muto, T. Inata, H. Ohnishi, N. Yokoyama, S. Hiyamizu, Jpn. J. Appl. Phys., **25**, L577-L579 (1986).

[**2**] H-J. Pan, S-C. Feng, W-C. Wang, K-W. Lin, K-h. Yu, C-Z. Wu, L-W. Laih, W-C. Liu, Solid State Electron., **45**, 489-494 (2001).

[**3**] L. Britnell, R.V. Gorbachev, A. K. Geim, L. A. Ponomarenko, A. Mishchenko, M. T Greenaway, T. M. Fromhold, K. S. Novoselov, L. Eaves, Nat. Commun., **4**, 1794 (2013).

[**4**] H. Wang, H. Xu, Y. Zhang, Phys. Lett. A **355**, 481-488 (2006).

[*5*] M. M. Singh, M. J. Siddiqui, A. Saxena, Procedia Com. Sci. **85**, 581-587 (2016).

[**6**] S. T: Pérez-Merchancano, H. Paredes Gutiérrez, G. E. Marques, Microelectron. J. **39**, 1339-1340 (2008).

[**7**] S. Sakiroglu, D. G. Kilic, U. Yesilgul, F. Ungan, E. Kasapoglu, H. Sari, I. Sokmen, Physica B 521, 215-220 (2017).

[**8**] D. A. Ospina, V. Akimov, M.E. Mora-Ramos, A. L. Morales, V. Tulupenko, C. A. Duque, **87**, 109-114 (2015).

[**9**] L. Zs. Szabó, M. G. Benedict, P. Földi, Phys. Rev. A **96**, 063419 (2017).

[**10**] S. Aktas, H. Kes, F. K. Boz, S.E. Okan, **98**, 220-227 (2016).

[**11**] H. Hamaguchi, H. Yamamoto, N. Yamada, Electron. Comm. Jpn. **87**, 934-943 (2004).

[**12**] H. Hamaguchi, H.Yamamoto, N. Yamada, Jpn. J. Appl. Phys. **43**, 5157-5165 (2004).

[**13**] S.E.Okan, F.K.Boz, S.Aktas, Superlattice. Microst. **133**, Article No 106207 (2019).

[**14**] E. C. Valadares, Phys. Rev. B **41**, 1282-1284 (1990).

[**15**] S. Aktas, A. Bilekkaya, F.K. Boz, S. E. Okan, Superlattice. Microst. **85**, 266-273 (2015).

[**16**] H. Takura, H. Yamamoto, Electron. Comm. Jpn. **90**,113-123 (2007).

[**17**] N. Arakawa, Y. Otaka, K. Shiiki, Thin Solid Films, **505**, 67-70 (2006).

[**18**] R. Jackiv, T. Trebicky, J. Voves, Z. Vyborny, M. Cukr, V. Jurka, IEEE 24th MIEL, Proceedings 1, 359-362 (2004).

# SIZE EFFECT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF BCC TANTALUM NANOWIRES BY MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS

**Vildan GUDER**

*Department of Physics, Faculty of Science, Trakya University, 22030 Edirne, Turkey*

**Abstract**

*The size effect on the mechanical properties of body-centered cubic tantalum nanowires has been investigated by molecular dynamics simulations in which the interactions are expressed by the embedded atom method potential. The mechanical response of the nanowires with eight different thicknesses in the range of 2.3 nm and 9 nm with the same length has been examined by discussing the Elastic Modulus, yield stress, and neck strain. Radical differences have been observed in the mechanical properties of the nanosystem compared to its bulk counterpart. It is observed that the yield stress of tantalum nanowires decreases and approaches the bulk limit as the size increases while the Elastic Modulus increases to reach the bulk's value within the same size scale. The neck strain increases from 0.065 at 2.3 nm to 0.095 at 5 nm and oscillates around 0.09 for larger sizes than 5 nm.*

**Keywords:** tantalum nanowires, mechanical properties, size effects, molecular dynamics simulation.

## INTRODUCTION

With a chemical resistance comparable to noble metals, tantalum (Ta) is one of the metals with the highest corrosion resistance in natüre [1]. It is a tough, ductile metal, which can be formed into almost any shape. This feature allows it to be used as a coating material in the production of electronic components [2]. The extremely high cost of Ta-based materials restricts its industrial applications and causes studies to develop cost-effective systems. Therefore, there is a potential for increased use of Ta in the future [1]. Ta is a model element for the body-centered cubic (bcc) lattice due to its high phase stability even under external factors such as high pressure and temperature [3]. This feature has led researchers to examine the plastic and elastic properties of Ta and Ta based alloys [4]. Haskins et al. [5] examine the mechanical and relative thermodynamic stability of different phases at high temperatures and pressures in Ta using density functional theory-based model generalized pseudopotential theory. In the systematic study of Shang et al. [6], they discussed the phase stability of pure single crystal elements including Ta and observed a face-centered cubic (fcc) - hexagonal close-package (hcp) transition at 67.5 and 285 GPa by using the projector-augmented wave method and the generalized gradient approximation. Pan et al. [7] studied the tensile deformation of nanocrystalline Ta by using molecular dynamics (MD) simulations and showed that stress-induced phase transformation from bcc to fcc and hcp structures occurs locally, and high strain rate delays the transition. On the experimental side, it was reported a transformation of the physical phase from bcc to hexagonal-ω at high temperature is due to internal stress [8]. Recently, Florando et al. [9] investigated the effect of the conditions of uniaxial stress and laser-induced shock loading on twinning in Ta. They concluded that once twinning begins, it can grow as a function of stretching.

The aim of this work is to investigate the mechanical properties of single bcc crystalline Ta nanowires (NW) from a local perspective. For this purpose, the MD simulation method is used to understand the elastic and plastic responce of bcc Ta. The obtained results showed that the interatomic potential used in

the study is sufficient and reliable to understand the mechanical properties of Ta element. It is planned to extend this study to perform MD simulations of the uniaxial tensile deformation of nanocrystalline and polycrystalline Ta.

## EXPOSITION

Large – Scale Atomic-Molecular Massively Parallel Simulator (LAMMPS) [10] was used to understand the deformation mechanism of bcc Ta NWs. MD simulations of Ta NWs were performed by using an interatomic potential of embedded atom method (EAM) [11].

It is well-known that the success of MD simulations is highly dependent on the correct description of the interactions between atoms. The reliability of the EAM potential used in the study was tested by comparing the known physical properties of cohesive energy and lattice constant for bulk Ta. For this purpose, the initial configuration of simulations was composed of the ideal bcc lattice with 16000 Ta atoms. The bulk system was subjected to energy-minimization procedure by the conjugate gradient algorithm. Table 1 lists the results of this test simulation for bcc Ta along with the available experimental and ab initio MD data. The reliability of EAM potentials used in MD simulations can be observed from the agreement of results between simulated and experimental/ab initio MD data.

***Table 1.*** *The calculated lattice constant and cohesive energy values for Ta.*

| | **This work** | **Exp.** |
|---|---|---|
| a (Å) | 3.29 | 3.30[a,b] |
| E (eV/atom) | -8.10 | -8.10[b] |

[3][a], [13][b]

***Table 2.*** *Supercell for bulk and NW systems and atomic numbers corresponding to this supercell.*

| **System** | **Supercell ($xa_o^3$)** | **Atomic Number** |
|---|---|---|
| Bulk | 20x20x20 | 16000 |
| 2.3 nm | 7x7x50 | 4900 |
| 3.3 nm | 10x10x50 | 10000 |
| 4 nm | 12x12x50 | 14400 |
| 5 nm | 15x15x50 | 22500 |
| 6 nm | 18x18x50 | 32400 |
| 7 nm | 21x21x50 | 44100 |
| 8 nm | 24x24x50 | 57600 |
| 9 nm | 27x27x50 | 72900 |

Prior to loading, all systems were relaxed using a constant number of the atom, volume, and energy (NVE) ensemble constraints for 10000 MD steps with a 0.001 ps time interval. While the constant number of atoms, volume and temperature (NVT) ensemble was used for the simulations of tensile loading of Ta NWs, the constant atomic number, pressure, and temperature (NPT) ensemble was used for the bulk case. To experience the effect of size, NWs of eight different thicknesses ranging from 2.3 nm to 9 nm were used, where the length of all NW is 16.5 nm. Table 2 lists the dimensions and atomic numbers of bulk and nano systems.

The NW model used in the tensile process is as follows. The NW was divided into two parts consisting of rigid (green spheres) and free atoms (red spheres). At both ends, which corresponds to 20% of the entire length of the NW, the rigid atoms were not allowed to interact with each other. The free atoms in the middle part could interact and could freely shrink or expand under the interatomic force. Periodic boundary conditions were used along the z axial direction while free boundary conditions were applied along the other two directions (x and y) during tensile deformation. The top and side view of model system studied in this work is shown in Fig. 1. All systems were subjected to a 25% tensile load along the z-axis using a strain rate of 0.001 $ps^{-1}$ at 300 K.

Stress-strain curves obtained during tensile deformation are used to get information about the mechanical properties of the material. Fig. 2 shows that stress-strain curve for bulk and NW systems. For the early stage of tensile load, all curves in a region known as elastic increase linearly up to a certain strain value. After the elastic deformation, the stress reaches the maximum value with a different slope and drops sharply in the plastic region. Then the stress exhibits a zigzag behavior with increasing dislocations. It is observed from Fig.2 that the initial stress of the bulk system without any surface is very close to zero reflecting that it is fully relaxed. For NWs, the value of initial stress increases with decreasing size. This indicates that initial surface stress becomes an important factor for systems with a large surface-to-volume ratio. In addition,

the tensile value, where a sharp decrease is observed, also shifts towards larger values as the size increases. This result indicates that Ta NWs will withstand wider plastic deformation with increasing size.

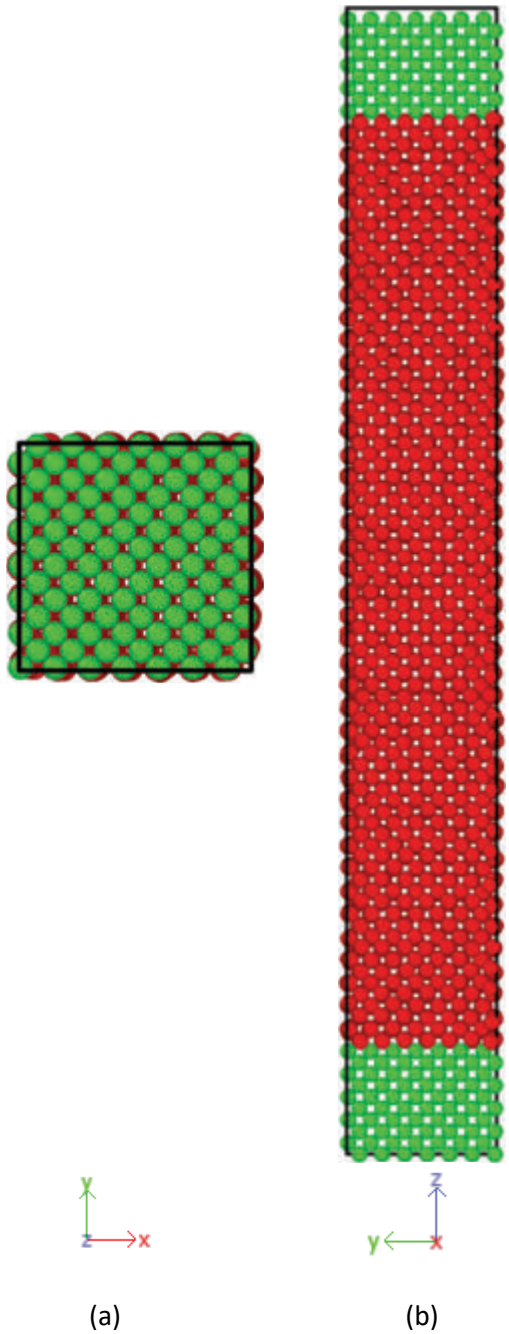



***Fig. 1.*** *Atomistic model for Ta NWs. The top view of (a) all (b) The green and red spheres represent rigid and free atoms.*

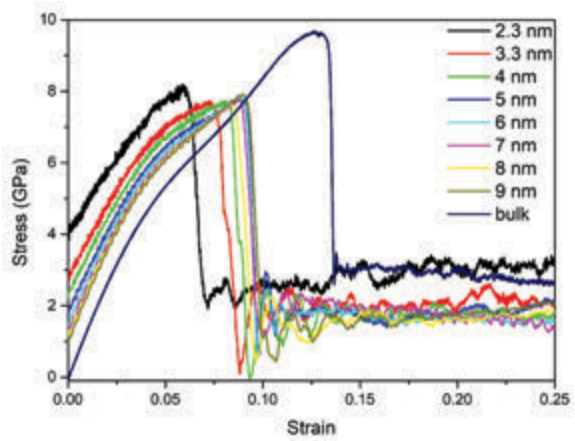



***Fig. 2.*** *Dimension dependence of stress – strain relation in the tension process at strain rate of 0.001 $ps^{-1}$ and 300 K.*

The mechanical properties such as yield stress, Elastic Modulus and neck strain as a function of strain extracted from curves plotted in Fig. 2 were displayed in Fig 3-5, respectively. In this study, the yield stress shown in Fig.3 was taken as the value of stress corresponding to the 0.05 strain. The yield stress determined for the bulk system is 5.3 GPa. It is observed that the yield stress of Ta NWs decreases with increasing size, starting from 7.66 GPa and approaching the bulk limit.

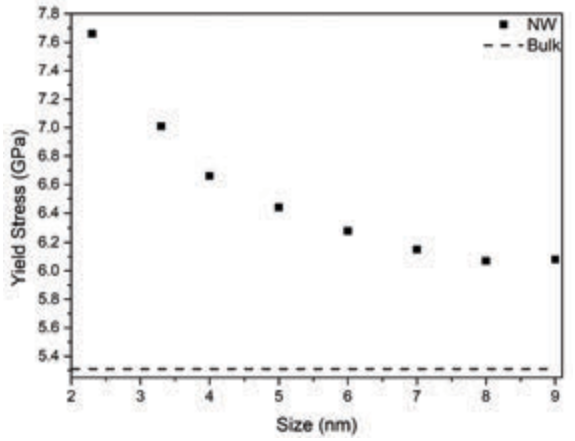



***Fig. 3.*** *Size dependent relation of yield stress at strain rate of 0.001 $ps^{-1}$ and 300 K.*

The Elastic Moduli for Ta NWs depicted in Fig. 4 were calculated from the tangent of the stress-strain curves within the strain value up to 0.01. The value of it for the bulk Ta is calculated as 143 GPa and this value is in agreement with the experimental data (186 GPa [7]). It is observed that the Elastic Modulus of Ta NWs increases and approaches the bulk limit as the size increases.

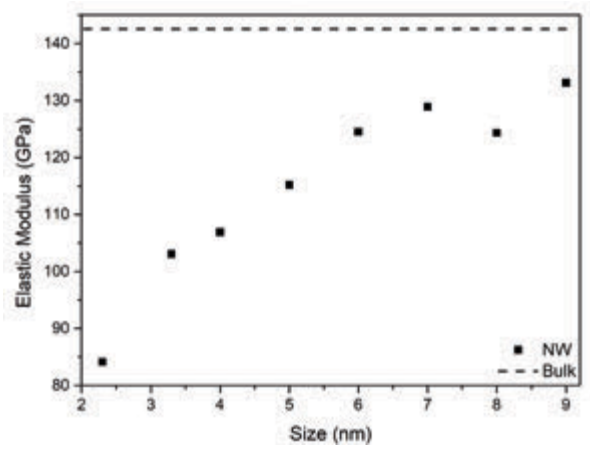



***Fig. 4.*** *Size dependent relation of Elastic Modulus at strain rate of 0.001 $ps^{-1}$ and 300 K.*

Fig. 5 shows that size dependent relation of neck strain at strain rate of 0.001 $ps^{-1}$ and 300 K. The transition from elastic deformation to plastic one is observed in the system with the onset of the first dislocations. As a result of this situation, the atoms move out of their positions, the planes slip on each other and a neck is formed. The strain value at which a sharp decrease in stress is observed is called neck strain. The neck strain increases from 0.065 at 2.3 nm to 0.095 at 5 nm and oscillates around 0.09 for larger sizes than 5 nm.

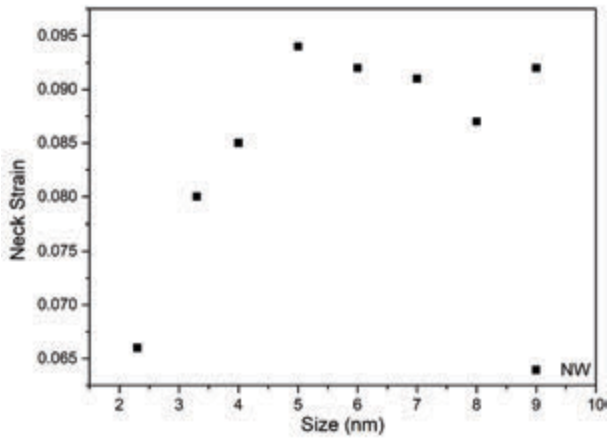



***Fig. 5.*** *Size dependent relation of neck strain at strain rate of 0.001 $ps^{-1}$ and 300 K.*

Simulation images taken during loading can be a guide for a clear view of yielding and neck formation during tensile simulation. From these images, visual information about the progress and spread of the deformation can be obtained. Fig. 6 (a–d) show snapshots from MD simulations corresponding to strains of initial, yield limit, neck and after the neck for 2.3 nm and 7 nm NW NWs at 300 K and strain rate 0.001 $ps^{-1}$, respectively, during tensile deformation. Fig. 6 (a) displays that the system has almost no stress after equilibration (before loading) and atoms are located at regular lattice points. In the Fig. 6 (b), the tensile load propagates and yields homogeneously in the system with increasing strain and this corresponds to the elastic deformation limit. The neck formation with increasing intensity of dislocations has been observed in Fig. 6 (c). The cross-sectional area of the NW decreases as the stress required for the elongation of the system is reduced. Then, the neck is formed. In Figure 6 (d), it is seen that this neck becomes more prominent with increasing strain as the dislocations move out free surface and multiple splits appear.

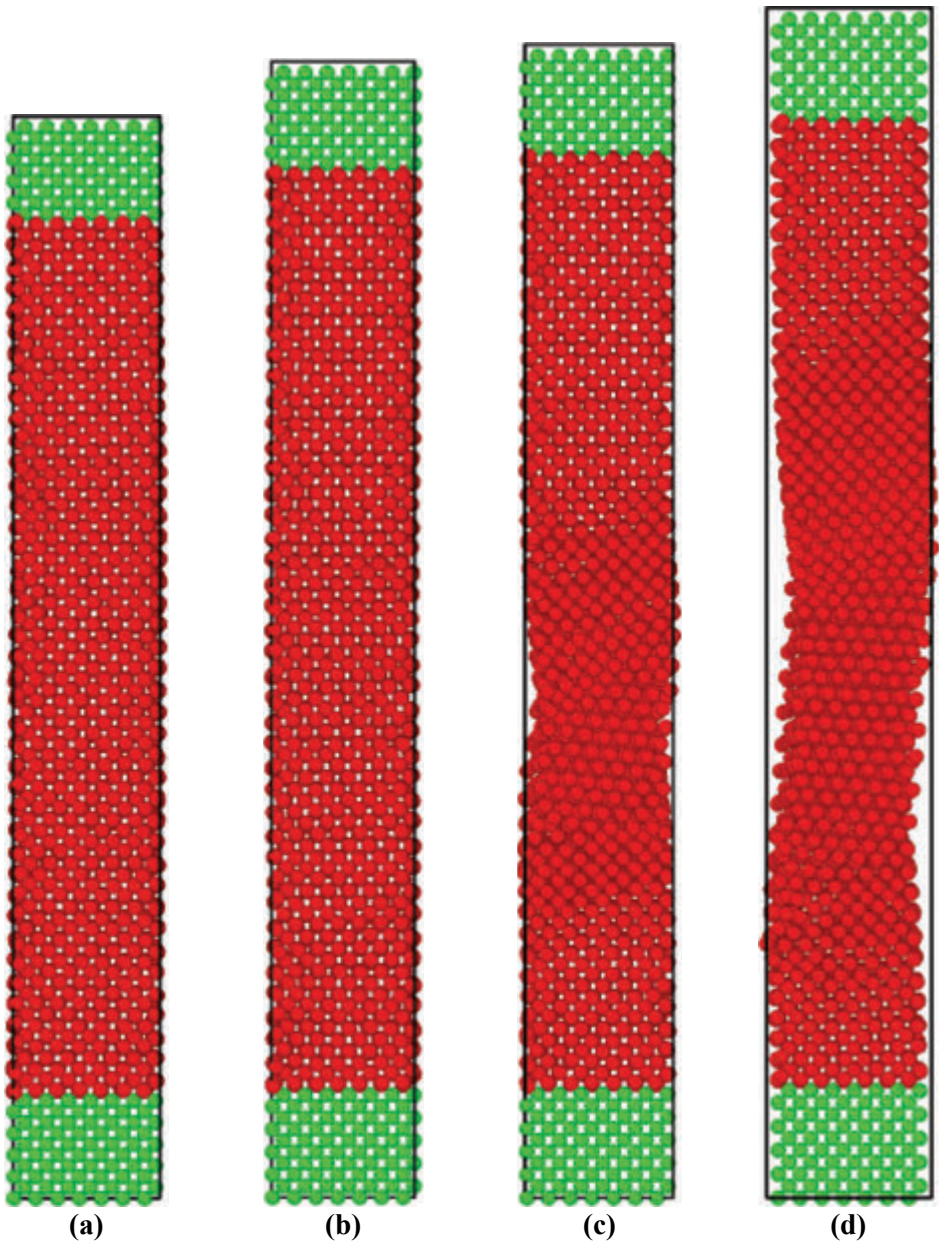



***Fig. 6.*** *MD simulation snapshots at the strains of (a) 0, (b) 0.05, (c) 0.066, (d) 0.10 for 2.3 nm Ta NW.*

## CONCLUSION

The uniaxial tensile deformation of Ta NWs with eight different thicknesses in the range of 2.3 nm and 9 nm has been investigated by the MD simulations. It is observed that the EAM potential used to describe interactions between Ta atoms is successful and reliable to predict ground state properties of Ta. The mechanical response of Ta NWs to tensile load under up to 25% deformation was investigated by with stress-strain curves. It is observed that Ta NWs shows great ductility up to 25% elongation. The yield stress of the thinnest NW considered here is 7.66 GPa, and it decreases with increasing size towards the value of bulk system (5.3 GPa). The Elastic Modulus for the bulk Ta is extracted from the stress-strain curves as 143 GPa. It has been observed that the Elastic Modulus is size dependent and increases with increasing size.

It is planned to extend this study to the investigate of twinning and/or phase transition that may occur in single and/or polycrystalline Ta NWs using different strain rates.

## REFERENCES

[1] S.D. Cramer, B.S.J. Covino, eds., Corrosion of Tantalum and Tantalum Alloys, in: ASM Handb., ASM International, 2005: pp. 337–353.

https://doi.org/10.31399/asm.hb.v13b.a0003825.
[2] M. Alishahi, F. Mahboubi, S.M. Mousavi Khoie, M. Aparicio, E. Lopez-Elvira, J. Méndez, R. Gago, Structural properties and corrosion resistance of tantalum nitride coatings produced by reactive DC magnetron sputtering, RSC Adv. 6 (2016) 89061–89072. https://doi.org/10.1039/C6RA17869C.
[3] S.R. Chen, G.T. Gray, Constitutive behavior of tantalum and tantalum-tungsten alloys, Metall. Mater. Trans. A. 27 (1996) 2994–3006. https://doi.org/10.1007/BF02663849.
[4] C.-H. Lu, E.N. Hahn, B.A. Remington, B.R. Maddox, E.M. Bringa, M.A. Meyers, Phase Transformation in Tantalum under Extreme Laser Deformation, Sci. Rep. 5 (2015) 15064. https://doi.org/10.1038/srep15064.
[5] J.B. Haskins, J.A. Moriarty, R.Q. Hood, Polymorphism and melt in high-pressure tantalum, Phys. Rev. B. 86 (2012) 224104. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.224104.
[6] S.L. Shang, A. Saengdeejing, Z.G. Mei, D.E. Kim, H. Zhang, S. Ganeshan, Y. Wang, Z.K. Liu, First-principles calculations of pure elements: Equations of state and elastic stiffness constants, Comput. Mater. Sci. 48 (2010) 813–826. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.03.041.
[7] Z. Pan, Y. Li, Q. Wei, Tensile properties of nanocrystalline tantalum from molecular dynamics simulations, Acta Mater. 56 (2008) 3470–3480. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.03.025.
[8] L. Burakovsky, S.P. Chen, D.L. Preston, A.B. Belonoshko, A. Rosengren, A.S. Mikhaylushkin, S.I. Simak, J.A. Moriarty, High-Pressure—High-Temperature Polymorphism in Ta: Resolving an Ongoing Experimental Controversy, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 255702. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.255702.
[9] J.N. Florando, B.S. El-Dasher, C. Chen, D.C. Swift, N.R. Barton, J.M. McNaney, K.T. Ramesh, K.J. Hemker, M. Kumar, Effect of strain rate and dislocation density on the twinning behavior in tantalum, AIP Adv. 6 (2016) 045120. https://doi.org/10.1063/1.4948528.
[10] S. Plimpton, Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics, J. Comput. Phys. 117 (1995) 1–19. https://doi.org/10.1006/jcph.1995.1039.
[11] A. Agrawal, R. Mishra, L. Ward, K.M. Flores, W. Windl, An embedded atom method potential of beryllium, Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 21 (2013) 085001. https://doi.org/10.1088/0965-0393/21/8/085001.
[12] http://www.webelements.com/tantalum/crystal_structure.html, (n.d.).
[13] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, New York: John Wiley & Sons Inc., 1986.
[14] Y. Pan, W.M. Guan, K.H. Zhang, First-principles calculation of the phase stability and elastic properties of ZrPt compounds at ground state, Phys. B Condens. Matter. 427 (2013) 17–21. https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.05.039.

# THE OPTICAL ABSORPTION CHANGES IN TWO-STEP INFINITE SPHERICAL QUANTUM DOT

**Sevket Erol Okan[1,2], Hande Temel[2], Abdullah Bilekkaya[2,3], Figen Karaca Boz[1,2]**

*[1] Trakya University, Faculty of Science, Department of Physics, 22030 Edirne, Turkey*
*[2] Trakya University, Institute of Science, 22030 Edirne, Turkey*
*[3] Trakya University, Edirne Vocational College of Technical Sciences,22100 Edirne, Turkey*

**Abstract**

*Total absorption coefficients of $GaAs$ / $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As$ / $Al_{x_2}Ga_{1-x_2}As/AlAs$ infinite spherical quantum dots, which can be defined as a two-step potential profile, were calculated. Containing or not containing impurity atoms in the aforementioned structures were also taken into account. First, energies and wave functions were calculated with the effective mass approach using the Runge Kutta numerical method. For different layer (or step) thicknesses, 1s-1p, 1p-1d, and 1d-1f transition energies and total absorption coefficients were found. The results show that the presence of impurity atoms in the structure together with the structural geometry leads to interesting changes in the total absorption coefficients associated with the transitions of 1s-1p, 1p-1d, and 1d-1f.*

**Keywords:** Spherical quantum dots, energies, optical absorption coefficient

## INTRODUCTION

Semiconductor technology started with the invention of the transistor quite a few decades ago. Since then, too many successful research has been devoted to production of smaller and faster electronic and optoelectronic devices. Along these lines, nanotechnological research on low dimensional semiconducting structures cover an extensive field in the searches of new electronic devices [1]. One of these low-dimensional devices is quantum dots, also called zero-dimensional structure. The growth technology allows to obtain them in different geometric shapes such as rectangles, spheres, triangles, disks, etc. [2-6]. Therefore, the shape effect study on the optical and electronic properties of quantum dots has become a branch of research [2-6]. Same is also valid for the size effects [7,9]. In addition to these studies, many authors have considered the electronic properties of the ground and excited states in the view of their binding energies and radial probability distributions [8-18]. There are also different aspects with which the properties of quantum dots have been handled. These may be lined up as the hydrostatic pressure effects, the impurity and its location in the structure, magnetic and electric field effects, the linear and non-linear absorption, and the refractive index [19-24].

Jafari calculated the linear, non-linear total absorption coefficient of an impurity atom in an inhomogeneous spherical quantum dot, corresponding to 1s-2p, 2p-3d transitions. It has been observed that the optical properties are affected by the variation of inner radius and shell thickness of a two-layered quantum dot [8] . Tas and Sahin investigated the inter-level optical properties of spherical quantum dots and quantum wells with and without impurities depending on the core radius, well widths, and layer thicknesses [21]. Kavruk et al. have presented the optical transitions due to aluminum concentration x in the core and shell regions of $\mathbf{Al_xGa_{1-x}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As/Al_yGa_{1-y}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As}$ multilayered quantum dot [23].

In this study, the energy states and wave functions in $\mathbf{GaAs\ /\ Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As\ /\ Al_{x_2}Ga_{1-x_2}As/AlAs}$ infinite spherical quantum dots are calculated considering both the presence and lack of an impurity atom.

Then, the total absorption coefficients of 1s-1p, 1p-1d, and 1d-1f with transition energies are reported using these aforementioned results.

## THEORY

Let us consider two-step infinite spherical quantum dots as designed in Fig. 1. Taking the radius of the $GaAs$ sphere as $R_1$, the $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As$ layer thickness was defined as $R_2 = 2R_1 - R_1 = R_1$ and the $Al_{x_2}Ga_{1-x_2}As$ layer thickness as $R_3 = 3R_1 - 2R_1 = R_1$.




***Fig 1.*** *The schematic representation of a two-step infinite spherical quantum dot.*

The three-dimensional time-independent Hamiltonian of an electron bound to an on-center impurity, in the units of effective Bohr radius $a^* = \varepsilon\hbar^2/me^2$ and Rydberg energy $R^* = me^4/2\hbar^2\varepsilon^2$ is given

$$H = -\nabla^2 + V(r) - \mathrm{Z}\frac{2}{r} \qquad (1)$$

where $V(r)$ the potential energy of a two-step infinite spherical quantum dot;

$$V(r) = \begin{cases} 0, & 0 < r \le R_1 \\ V_0, & R_1 < r \le 2R_1 \\ 2V_0, & 2R_1 < r \le 3R_1 \\ \infty, & r > 3R_1 \end{cases} \qquad (2)$$

is defined. In Eq.1, $Z = 0$ and $Z = 1$ correspond to the case without and with an impurity of structure, respectively. The eigenfunction of the Hamiltonian in Eq.1 is given by $\Psi_{nlm} = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta,\varphi)$, where $R_{nl}(r)$ is the radial wave function and $Y_{lm}(\theta,\varphi)$ is the spherical harmonics. Using these eigenfunctions, the following radial Schrödinger equation is obtained as

$$\frac{d^2R_{nl}(r)}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{dR_{nl}(r)}{dr} + \left[E_{nl} + \mathrm{Z}\frac{2}{r} - V(r) - \frac{l(l+1)}{r^2}\right]R_{nl}(r) = 0 \quad . \quad (3)$$

The energy levels $E_{nl}$ and wavefunctions $R_{nl}(r)$ can be found from the solution of Eq.3 by using Runge-Kutta method [16].

By using the density matrix formalism, the optical properties may be defined as photo absorption occurring in initial state $i$ ($\Psi_i$) to a final state $f$ ($\Psi_f$). For the intersubband transitions, applying the Fermi golden rule, the total absorption coefficient is given by [20,24-27].

$$\alpha(\omega, I) = \alpha^1(\omega) + \alpha^3(\omega, I) \quad . \quad (4)$$

The first and second terms on the right-hand side of Eq.4 are

$$\alpha^1(\omega) = \frac{\sigma}{\epsilon_0 n_r c}\frac{\left|M_{ij}\right|^2\hbar\omega\Gamma}{\left(E_{fi} - \hbar\omega\right)^2 + (\hbar\Gamma)^2}$$

and (5)

$$\alpha^3(\omega, I) = -\left(\frac{2I\sigma}{[\epsilon_0 n_r c]^2}\right)\mathrm{x}\frac{\left|M_{ij}\right|^4\hbar\omega\Gamma}{[\left(E_{fi} - \hbar\omega\right)^2 + (\hbar\Gamma)^2]^2}$$

where $n_r$ is the refractive index, $\Gamma$ is the relaxation, $I$ is the optical intensity of the incident wave. The transition energy

$$E_{fi} = E_f - E_i \qquad (6)$$

is the energy difference between the final and initial states. Assuming that the electromagnetic radiation is polarized throughout the $z$-axis, $M_{if}$ is the dipole transition matrix element corresponding to $i$ and $f$ states that is given by

$$M_{if} = \left|e\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{\infty}\Psi_f r\cos\theta\Psi_i\ xr^2dr\sin\theta d\theta d\varphi\right| . \quad (7)$$

## RESULTS

We examine the electronic and optical properties in the presence and lack of the electron-bound impurity atom in the quantum dot shown in Fig. 1. The constants used in the calculations are $R^* = 5.25\mathrm{meV}$, $a^* = 104\text{Å}$, $V_0 = 148meV$, electron density $\sigma$=3x10$^{22}$m$^{-3}$, $n_r$=3.5, $\Gamma$=7.14x10$^{12}$s$^{-1}$, I=400MW/m$^2$. [17,28].

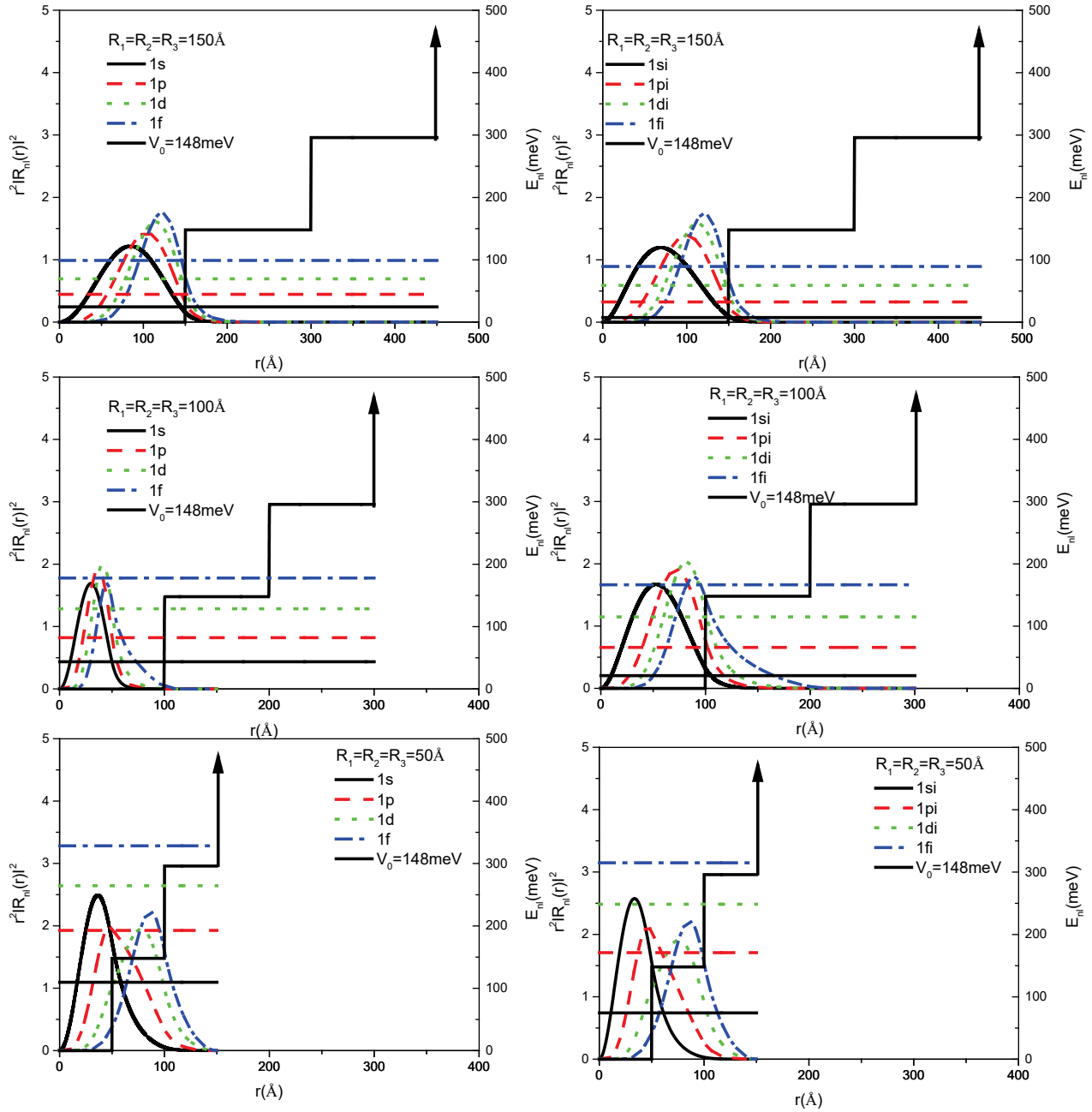



***Fig. 2.*** *The energies and probability distributions of the states for different step thicknesses when the left column does not contain impurity atom in the structure, while the right column contains impurity atom in the structure.*

In the left column of Fig. 2, the energy states and probability densities of the quantum dot without impurity atoms were calculated for different step thicknesses. In the right column of the figure, the same calculations were performed for the same step thicknesses in the presence of impurity. It was observed that the energies decreased in both cases as the step thicknesses were increased. It has been observed that the probability densities are distributed over the entire structure for small values of step thickness, while they were mostly localized to the GaAs region with increasing step thickness. It was determined that the energy states with impurity atom decreased when compared to the energy states in the absence of impurity atom.

To find the optical absorption coefficients, the transition energies defined in Eq.5 are shown as the functions of step thicknesses in Fig. 3. It was observed that the energy differences were large at small step thicknesses.

The difference between 1s-1p energies was the largest for step thickness 50 Å. As the step thickness increased, the mentioned energy difference decreased. It was observed that the differences between the transition energies at the critical step thicknesses were close to each other. In a structure without impurity atom, the difference between 1s-1p and 1p-1d energies around 70 Å is almost the same. The 1d-1f energy difference remained constant over the 70 Å to 110 Å step thickness range. It was observed that the 1d-1f energy differences were larger than the other energy differences for thicknesses above 110 Å. Similar behavior was observed in the quantum dot containing impurity atom. However, it was determined that the energy differences were close to each other for large step thicknesses.

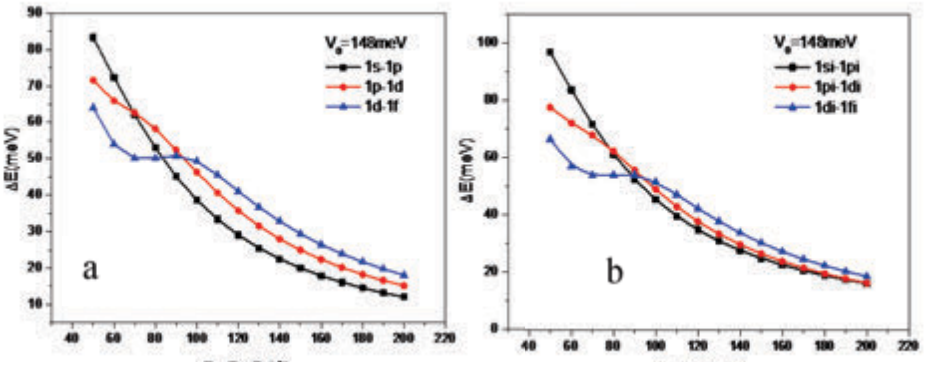



***Fig. 3.*** *Transition energies depending on step thicknesses a) in the absence of an impurity atom and b) in the presence of an impurity atom.*

In Fig. 4, the change in the total optical absorption coefficient associated with 1s-1p, 1p-1d, and 1d-1f transitions in the absence of impurity atom is plotted as a function of incident photon energy, for different step thicknesses. The photon energy values at which the absorption coefficient is maximum show the same behavior in all three transitions with the increase in step thickness. If the step thickness increased from 50 Å to 100 Å, the absorption coefficients reach their maximum values at smaller photon energies. The reason for this behavior can be explained by the probability density shown on the left side of Fig.2 in the narrow structure and the energy differences in Fig.3. Note that the wavefunction probability density spans the entire quantum dot at small step thicknesses. The wave functions of all states with step thicknesses of 100 Å are in the GaAs region. At 150 Å step thickness, the probability densities slightly extend beyond the GaAs region. When we look at the energy differences in Fig. 3a, we see that the 1s-1p energy difference for 50 Å is larger

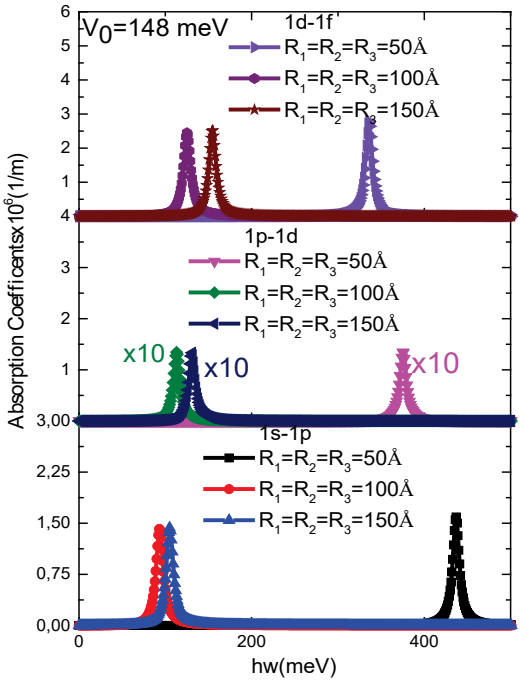



***Fig. 4.*** *Total absorption coefficients as a function of incident photon energy for the 1s-1p, 1p-1d, and 1d-1f transition without impurity.*

than the 1p-1d and d-1f energy differences. The energy differences for 100 Å appear to be the same for all cases. We think that the probability density of the wavefunctions may be effective for this step's thickness. When we look at the energy differences for the 150 Å step thickness, it is seen that the 1d-1f, 1p-1d, and 1s-1p transitions are, ordered from the largest to the smallest. The photon energies giving the maximum absorption coefficient show the same trend. Concerning graph shows that the step thickness affects the total optical absorption coefficients in two-stepped infinite spherical quantum dots.

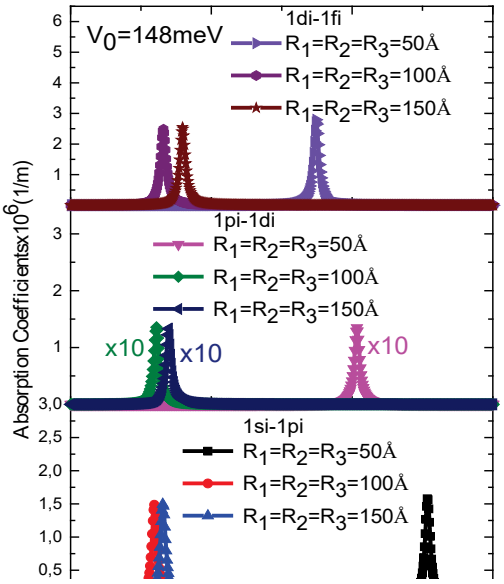



***Fig. 5.*** *Total absorption coefficients as a function of incident photon energy for the 1s-1p, 1p-1d, and 1d-1f transition with impurity.*

To examine the effect of impurity atom in the structure, the variation total absorption coefficients of 1s-1p, 1p-1d, and 1d-1f transitions depending on the incident photon energy are plotted in Fig. 5 by considering different step thicknesses. The behavior of the resulting functions is similar to their counterparts in the impurity-free state given in Fig. 4. In addition, in the presence of the impurity atom, the probability density does not change much compared to the absence of the impurity atom. When the same comparison is made for the photon energy values that make the absorption coefficients the largest, differences are observed between the impurity-present and impurity-absent states due to the difference in energy changes. For 50 Å step thickness, the transition energies between energy states shift to small photon energies, while 100 Å step thickness it shows the maximum absorption coefficient at almost the same photon energy value. Because the energy differences between the transitions are almost equal to each other. It was observed that the transition energies between energy states shifted toward larger values for the 150 Å step thickness. This is because the probability distribution of the impurity electron is localized to the GaAs region.

## CONCLUSION

As summary, some interesting behaviors were observed when the energies and wave functions for the states with and without foreign atoms in $GaAs\ /\ Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As\ /\ Al_{x_2}Ga_{1-x_2}As/AlAs$ infinite spherical quantum dots were examined depending on the step thickness. According to these results, the total absorption coefficients were calculated depending on the photon energy. It was observed that both presence and absence of impurities and step thickness were effective on the total absorption coefficients.

## REFERENCES


[1] Ünlü, H., & Horing, N. J. Low Dimensional Semiconductor Structures Characterization, Modeling and Applications. Springer 2013.

[2] Harrison, P. Quantum Wells, Wires and Dots (3. b.). England: WILEY 2009.

[3] Khordad, R., & Bahramiyan, H. Impurity position effect on optical properties of various quantum dots. Physica E (2015); (66): 107-115.

[4] Barseghyan, M. G., Restrepo, R. L., Mora-Ramos, M. E., & Kirakosyan, A. A. Donor impurity-related linear and nonlinear intraband optical absorption coefficients in the quantum ring: effect of applied electric field and hydrostatic pressure. Nanoscale Research Letters. (2012); 7(1):538.

[5] Restrepo, R. L., Barseghyan, M. G., Mora-Ramos, M. E., & Duque, C. A. Effects of hydrostatic pressure on the nonlinear optical properties of a donor impurity in a GaAs quantum ring. Physica E (2013); (51): 48-54.

[6] Rani, P., Dalal, R., & Srivastava, S. Study of electronic and optical properties of quantum dots. Applied Nanoscience, (2022); 12; 2127–2138.
[7] Ledentsov, N. N., Ustinov, V. M., Shchukin, V. A., Kop'ev, P. S., & Alferov, Z. I. Quantum dot heterostructures: fabrication, properties, lasers. Semiconductors, (1998); 32(4): 385–410.
[8] Jafari, A. R. Optical properties of hydrogenic impurity in an inhomogeneous infinite spherical quantum dot. Physica B, (2015); 456: 72-77.
[9] Yılmazer, F., Yakar, Y., Çakır , B., & Özmen, A.. Küresel Kuantum Nokta Yapının Elektronik Yapısı ve Bağlanma Enerjisi. DergiPark (2017); (1): 41-52.
[10] ZHU, J., XIONG, J., & GU, B. Confined Electron and the Hydrogenic Donor States in a Spherical Quantum Dot of GaAs-Ga1-xAlxAs. Physical Review B, (1990); 41(9): 6001-6007.
[11] Bose, C., & Sarkar, C. K. Perturbation Calculation Of Donor States in a Spherical Quantum Dot. Pergamon (1998); (42): 1661-1663.
[12] Aktas, S., & Karaca Boz, F. The Binding Energy of hydrogenic impurity in multilayered spherical quantum dot. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures (2008); (40): 753-758.
[13] Çakır, B., Sezer, M. Ö., Yakar, Y., Özmen, A., & Yüksel, H. Hidrojen Tipi Kuantum Nokta Yapının Taban Durumunun Kuantum Genetik Algoritma Yöntemiyle İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi (2009); 33: 45-49.
[14] Sadeghi, E. Impurity binding energy of excited states in spherical quantum dot. Physica E (2009); 41: 1319-1322.
[15] De Souza, G. V., & Bruno-Alfonso, A. Finite-difference calculation of donor energy levels in a spherical quantum dot subject to a magnetic field. Physica E (2015); 66:, 128-132.
[16] Karaca Boz, F., Nisancı, B., Aktas, S., & Okan, S. O. Energy levels of GaAs/AlxGa1-xAs/AlAs spherical quantum dot with an impurity. Applied Surface Science (2016);. 387: 76-81.
[17] Al, E. B., Kasapoglu, E., Sakiroglu, S., Sari, H., Sökmen, I., & Duque, C. A. Binding energies and optical absorption of donor impurities in spherical quantum dot under applied magnetic field. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures (2020); 119:.1-8.
[18] Rabanian, A., Neghabi, M., Zadsar, M., & Jafari, M. Theoretical studies of energy states of CdSe/ZnS/CdSe and ZnS/CdSe/ZnS quantum dots with an impurity. Materials Science & Engineering B (2021); 274;1-7.
[19] Özmen, A., Yakar, Y., Çakır, B., & Atav, Ü. Computation of the oscillator strength and absorption coefficients for the intersubband transitions of the spherical quantum dot. Optics Communications (2009); 282: 3999-4004.
[20] Çakır, B., Yakar, Y., Özmen, A., & Sezer, M. Ö. Linear and nonlinear optical absorption coefficients and binding energy of a spherical quantum dot. Superlattices and Microstructures (2010); 47: 556–566.
[21] Taş, H., & Şahin, M .The inter-sublevel optical properties of a spherical quantum dot- quantum well with and without a donor impurity. Journal of Applied Physics, (2012); 112(5): 053717
[22] Kirak, M., Altinok, Y., & Yilmaz, S. The effects of the hydrostatic pressure and temperature on binding energy and optical properties of a donor impurity in a spherical quantum dot under external electric field. Journal of Luminescence (2013); 136: 415-421.
[23] Kavruk, A. E., Sahin, M., & Atav, U. A detailed investigation of electronic and intersubband optical properties of AlxGa1−xAs/Al0.3Ga0.7As/AlyGa1−yAs/ Al0.3Ga0.7As multi-shell quantum dots. Journal of Physics D Applied Physics (2014); 47(29):295302.
[24] Liu, W. H., Qu, Y., & Ban, S. L. Intersubband optical absorption between multi energy levels of electrons in InGaN/GaN spherical core-shell quantum dots. Superlattices and Microstructures (2017); 102: 373-381.
[25] Bekar, B., Boz, F. K., Aktas, S., & Okan, S. E. The Effect on the Optical Absorption Coefficients due to the Positions in the Plane of Square GaAs / Al(GaAs) Quantum Well Wire under the Laser Field. ACTA PHYSICA POLONICA A (2019); 136(6):882-888
[26] Al, E. B. Effect of the magnetic field, size and donor position on the absorption coefficients related to a donor within the core/shell/shell quantum dot. Optical and Quantum Electronics, (2021); 53(676):1-15.
[27] En-nadir, R., El Ghazi, H., Belaid, W., Abboudi, H., Jabouti, F., Jorio, A., & Zokani, I. The Confinement Profile Effect on the Optical Properties in Different Inverseshaped Single InGaN/GaN Quantum Wells. Iraqi Journal of Physics, (2022). 20(1): 1-13.
[28] Kavruk A. E., Sahin M., Atav Ü. A detailed investigation of electronic and intersubband optical properties of AlxGa1-xAs/Al0.Ga0.7As/AlyGa1-yAs/Al0.3Ga0.7As multi-shell quantum dots. J. Phys. D: Appl. Phys. (2014); 47(295302):1-8.

# STRONTIUM UNDER HIGH PRESSURE AND DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS: A MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION STUDY

**Murat Celtek[1], Unal Domekeli[2], Sedat Sengul[2]**

[1]*Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*
[2]*Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*

**Abstract**

*To investigate the effect of pressure applied during the heating process on the melting point and atomic structure of fcc strontium, we applied it by varying the pressure from 0 GPa to 8 GPa. Interactions between strontium atoms are described by the embedded atom method potential, which is widely used for metallic systems and shared by Sheng. Molecular dynamics simulations were performed with DLPOLY 2.0 open-source package program. For the results obtained under 0 GPa, the melting point, pair distribution function, and structure factor show good agreement with the experimental results. On the other hand, it was observed that fcc strontium made a first-order solid-liquid phase transition at higher temperatures with increasing pressure. Interestingly, with the effect of increasing pressure, abnormal behavior was observed in the volume-temperature curves. From the results of the pair distribution function and the pair analysis technique, it was observed that a solid-solid phase transition occurred in the system during the heating process. We hope that the results will add to the literature in understanding the structure of fcc strontium under high-pressure and high-temperature conditions.*

**Keywords:** Strontium, High-pressure, Melting point, Atomic simulations, *embedded atom method*

## INTRODUCTION

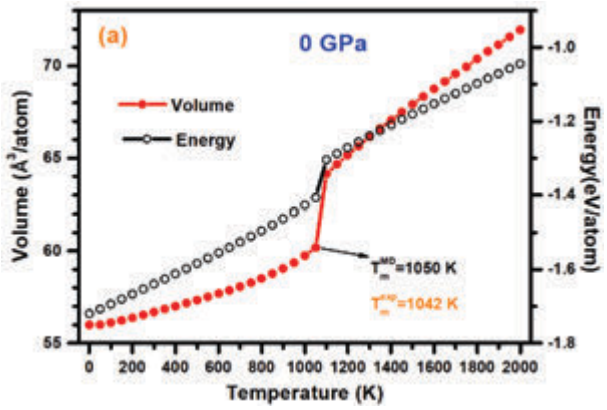
Molecular dynamics (MD) simulations have become a powerful tool to study many physical and mechanical properties of systems under conditions such as high pressure (HP) and high temperature in fields such as physics, biophysics, chemistry, and materials science due to increased computational power and software availability. MD simulations are often used in conjunction with a wide variety of experimental techniques such as X-ray crystallography, neutron diffraction, cryoelectron microscopy, nuclear magnetic resonance, electron paramagnetic resonance, and Forster resonance energy transfer. MD simulations have great advantages over experimental conditions and are an effective method for studying the physical motions of atoms and molecules. As it is known, a good understanding of the physical properties of metals and their alloys is of great importance in the advancement of technology and new developments in many fields. One of the most important studies on metals and their alloys is the examination of the physical behavior of the material during the heat treatment under different conditions [1–3]. This study was carried out on the element strontium (Sr), which we have heard very little about, but which is widely used in medicine and fireworks and is abundant in the earth's crust, and has a face-centered cubic (fcc) structure. Throughout all MD simulations performed here, the atomic interactions between Sr atoms have been described by the embedded atom method (EAM) potentials, which are widely used in the literature for metals and their alloys. The melting points of the systems heated under different pressures were determined by using curves such as volume-temperature and energy-temperature. Apart from these, solid-liquid and solid-solid phase transitions are discussed over the results of the pair distribution function (PDF or g(r)) and the pair analysis (PA) technique [4]. In the following sections, theoretical information about these methods and the results obtained from them will be presented in detail.

## EXPOSITION

The analytical form of the EAM potential is defined as:

$$E_i = F_\alpha\left[\sum_{j\neq i}\rho_{\alpha\beta}(r_{ij})\right] + \frac{1}{2}\sum_{j\neq i}\phi_{\alpha\beta}(r_{ij}) \qquad (1)$$

where $\phi_{\alpha\beta}(r_{ij})$ denotes the pair interaction energy between atoms i and j. α and β are the element types of i and j atoms. $F_\alpha$ is the embedding energy and it depends on the atomic electron density (ρ). In our study, the data produced by Sheng and shared on his own web page were used as EAM potential. All MD simulations were carried out with DLPOLY 2.0 open source code [5], which is popular among simulation packages. The experimental lattice parameter (a=6.08 Å) [6] of Sr was used to construct the simulation box and the dispersion of atoms was structured in accordance with the fcc structure. The cubic cell contains 13500 Sr atoms (15x15x15x4). A canonical ensemble with a Berendsen thermostat and barostat was used to control temperature and pressure. Periodic boundary conditions were applied along all three directions of the box in the simulations. The time step was set to 1 fs. Newton's equations of motion were integrated numerically using the leapfrog Verlet algorithm. To remove the accumulated stress on the system, we first heated the system to 100 K under 0 GPa and then cooled it back to 0 K. Thus, using these initial conditions for all pressures, the system was heated under different pressures, starting from 0 K up to 2000 K with 50 K temperature steps. The total energy per atom (E-T) and volume curves (V-T) obtained from the EAM-MD simulations during heat treatment under different pressures (0, 2, 4, 6 and 8 GPa) are shown in Figure 1 (a-e) as a function of temperature. As seen in Figure 1(a), the behavior of the E-T and V-T curves obtained for 0 GPa is similar. While a linear increase in V-T (or E-T) is observed from low temperatures, a sudden jump appears between 1050-1100 K, which is an indication that the system has made a first-order phase transition (Solid-Liquid). In addition, values such as lattice parameter ($a_{latt.}^{MD} = 6.08$ Å and $a_{latt.}^{exp} = 6.08$ Å), cohesive energy ($E_{Coh.}^{MD} = -1.72$ eV/atom and $E_{Coh.}^{exp} = -1.72$ eV/atom) and melting point ($T_m^{MD} = 1050$ K and $T_m^{exp} = 1042$ K) [7] determined from the EAM potential for Sr under 0 GPa are in excellent agreement with the experimental results in the literature [6]. Consistent with the basic thermodynamic theory, the average energy of the atoms increases and the average atomic volume decreases under the influence of the residual pressure (see Figure 1(a-e)). However, different (or abnormal) behaviors were observed in V-T values with increasing pressure. Moreover, in contrast to the volume increase during the heating process under pressures of 2-8 GPa, volume contraction is observed, which is observed at different temperature values for different pressures. Various research groups have previously reported results similar to those we observed for metallic systems cooled under different pressures [3, 8, 9]. This particular observation for V-T values can be well explained by the Clausius-Clapeyron relationship [10]. Interestingly, this behavior observed in V-T curves is somewhat different in E-T curves. Contrary to V-T, in the E-T curves obtained for 2 and 4 GPa pressures, no sudden changes are observed until the melting point, while in the E-T curves obtained for 6 and 8 GPa pressures, sudden changes are observed at the same temperature points as in the V-T curves. Well, is it possible to explain the contraction observed in the volume with the local structure based on the current findings? Or did another phase transition such as solid-solid occur in the system during heat treatment? In order to give appropriate answers to these questions, we will focus on the structural evolution that occurs in the system during the heating process under different pressures in the following sections.



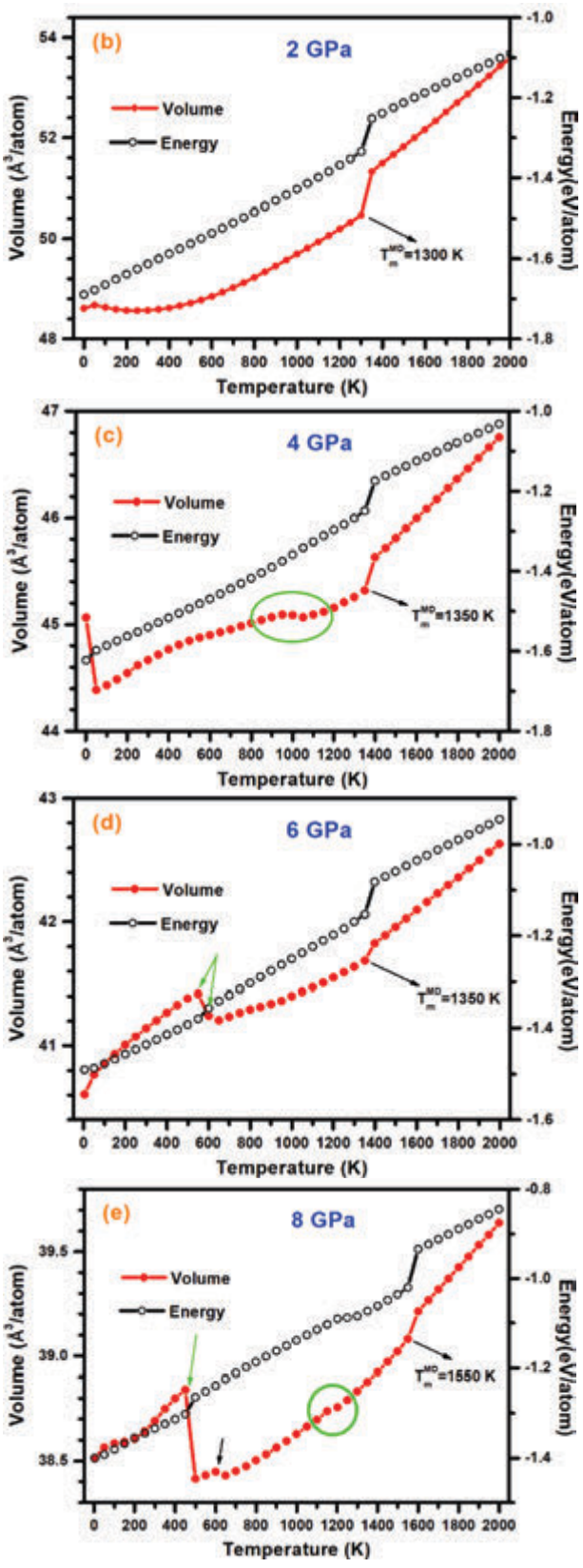



***Fig. 1.*** *Temperature-dependent evolution of volume and energy curves obtained under (a) 0 GPa, (b) 2 GPa, (c) 4 Gpa, (d) 6 Gpa and (e) 8 GPa pressure.*

The g(r) function, which is of great importance in determining the structural properties of substances, provides very useful information about the structural evolution of the system under different conditions, as it depends on the phases of matter, the arrangement of atoms in space and the distance relations between atoms. The g(r) function used in MD simulations is defined as follows [11]:

$$g(r) = \frac{V}{N^2}\left\langle \sum_{i}^{N}\sum_{j\neq i}^{N} \delta\left(r - r_{ij}\right)\right\rangle \qquad (2)$$

where N represents the number of atoms placed in the simulation box, and V represents the volume of the simulation box formed by these atoms.

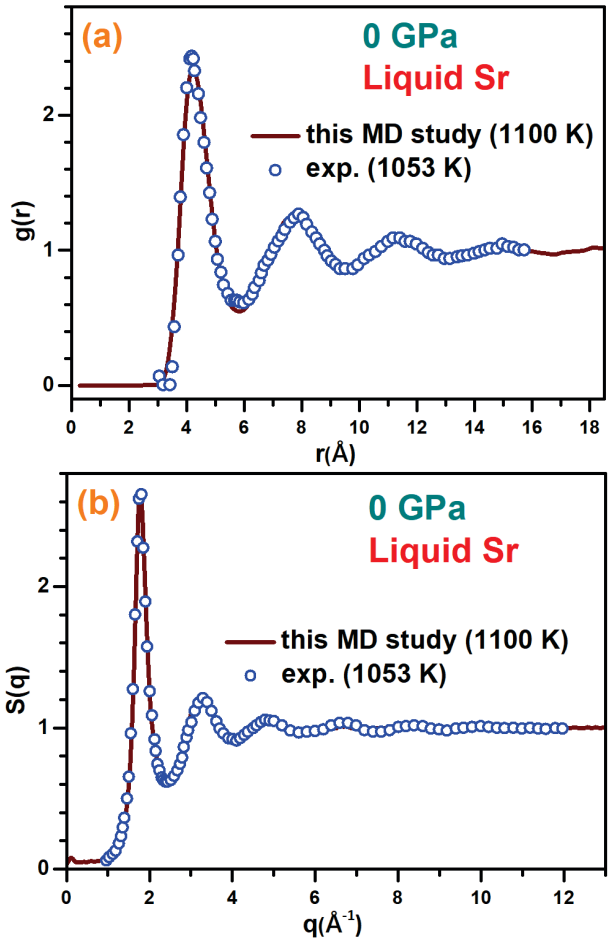



***Fig. 2.*** *Comparison of (a) g(r) and (b) S(q) calculated for liquid Sr with experimental results* [12].

The g(r) and S(q) curves calculated from the EAM-MD simulations for liquid Sr under 0 GPa pressure are presented comparatively in Figure 2 (a-b), together with the experimental results [12]. Both curves show excellent agreement with their experimental curves. All these findings indicate that the selected EAM potential data are successful in explaining the physical parameters and structural properties of Sr at both low and high temperatures. All this is of great importance for the reliability of the

results obtained under different pressures. Moreover, in order to see the effect of the pressure more clearly, the g(r)'s calculated at 2000 K for all pressure values are plotted together in Figure 3. As expected, with increasing pressure, the main peaks of the g(r) curves shift towards smaller r values, while the peak heights increase slightly.

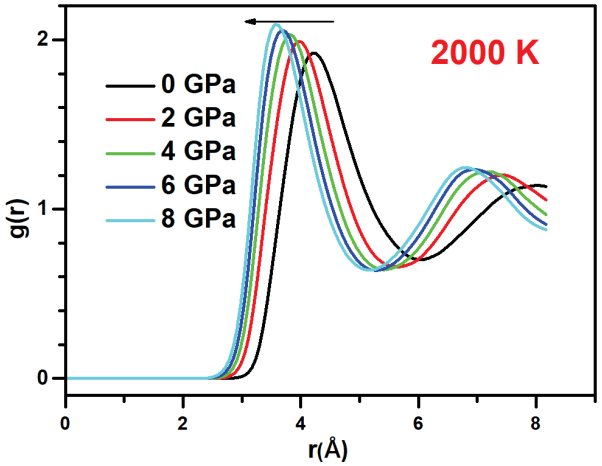



***Fig. 3.*** *g(r) curves calculated for different pressures at 2000 K.*

In order to answer the above questions and avoid repetition, the sudden change points observed in the V-T curves of 4 GPa and 8 Gpa and the g(r) curves around melting points are shown together in Figure 4. It is seen from the characteristic features of the peaks of the g(r) curves around the melting points for both pressures that the system makes a solid-liquid phase transition. There is a sudden decrease in volume around 1000 K in the V-T curve obtained for 4 GPa, and when the g(r) curves calculated for these points are examined, no evidence of solid-solid phase transition was found. However, when the g(r)'s calculated for 450 K and 500 K under 8 GPa are compared, it is clear that there is a significant difference between them, which shows us that solid-solid phase transition occurs in the system between these points. From the available g(r)-curves it is unlikely to tell what kind of crystal-like structure the fcc-like crystal structure is transformed into. In order to make a more detailed comment, it is necessary to get support from different analysis methods. In our study, we chose the PA technique to explain this process and included the results about it. In this technique (or the Honeycutt-Andersen method), the local structure (ijkl) in the atomic cluster is defined by four basic indices. Please see Ref [13–15]s for more detailed information.

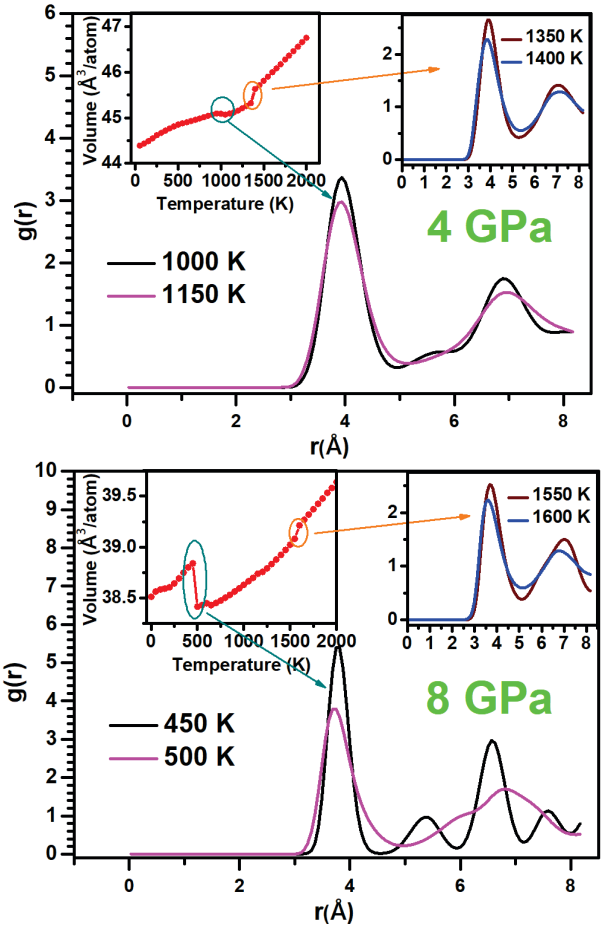



***Fig. 4.*** *Calculated g(r)'s for different temperature under 4 GPa and 8 GPa pressure.*

The temperature-dependent evolution of those most commonly found in the system among the bonded pairs obtained from the PA analysis technique under three different pressures (0, 4 and 8 GPa) is shown in Figure 5. As seen in Figure 5(a), the fraction of 1421 bonded pairs representing the fcc crystalline structure gradually decreases in the system heated under 0 GPa pressure, while the fraction of 1541 and 1431 bonded pairs, which are more common in liquid and amorphous structures, gradually increases. Finally, a sharp change in these curves is observed at the melting point. For the system heated under a pressure of 4 GPa, the fraction of 1421 bonded pairs is around 100% at 0 K, but interestingly, their fraction drops sharply by around 30% when the temperature is increased to 50 K. From 100 K their fraction increases and reaches its maximum value at around 500 K, and finally their fraction gradually decreases again until around the

melting point. The results in Figure 5(b) show that the applied pressure and increasing temperature affect the crystalline order of the system and as a result, some of the 1421 bonded pairs transform into other clusters. However, despite all this, the dominance of 1421 bonded pairs continues until around the melting point, which is proof that the solid-solid phase transition does not occur in the system. These findings support the other results discussed above. Finally, we obtained findings showing significant changes in the microstructure of fcc Sr heated under 8 GPa pressure and plotted them in Figure 5(c). When the temperature is increased from 0 K to 100 K, the fraction of 1421 bonded pairs decreases from 100% to around 80%, and then increases to around 95% of their fraction. A sudden decrease is observed in the fraction of 1421 bonded pairs in the region between 450 K-500 K, while an increase is observed in the fraction of 1441 and 1661 bonded pairs representing bcc crystal structures and 1541 and 1431 bonded pairs representing distorted icosahedra structures. To provide a better overview of the solid-solid phase transition observed here, we have classified the bonded pairs as bcc (1441+1661), hcp+fcc (1421+1422), icos (1431+1541+1551), and other types and presented in the inset of Figure 5(c). Between 450K and 500K, the fraction of bcc type clusters increases to ~52% and the fraction of icos types to ~27%, while the fraction of fcc+hcp types decreases to around ~19%. The results show that fcc Sr undergoes a solid-solid phase transition in this range, but a polycrystalline structure is formed rather than a transition from fcc structure to single bcc crystal order. The results of the present study show that the microstructure and many structural properties of fcc Sr change significantly under conditions such as HP and high temperature during heat treatment. We believe that the results will guide further studies to understand the structural properties of Sr nanoparticles and their mechanical properties under tension conditions. Figure 6 depicts the distribution of fcc, bcc and other types in the solid-solid phase transition occurring between 450-500 K under 8 GPa. At 450 K, the atoms that make up the system appear to have a distribution specific to fcc structures, while bcc and other types crystal structures are very rare. Moreover, when the temperature is increased by 500 K, a significant decrease is observed in the number of fcc clusters, while a significant increase is observed in the number of bcc and other clusters. This supports the results obtained with different analyzes above and gives us a visual view.

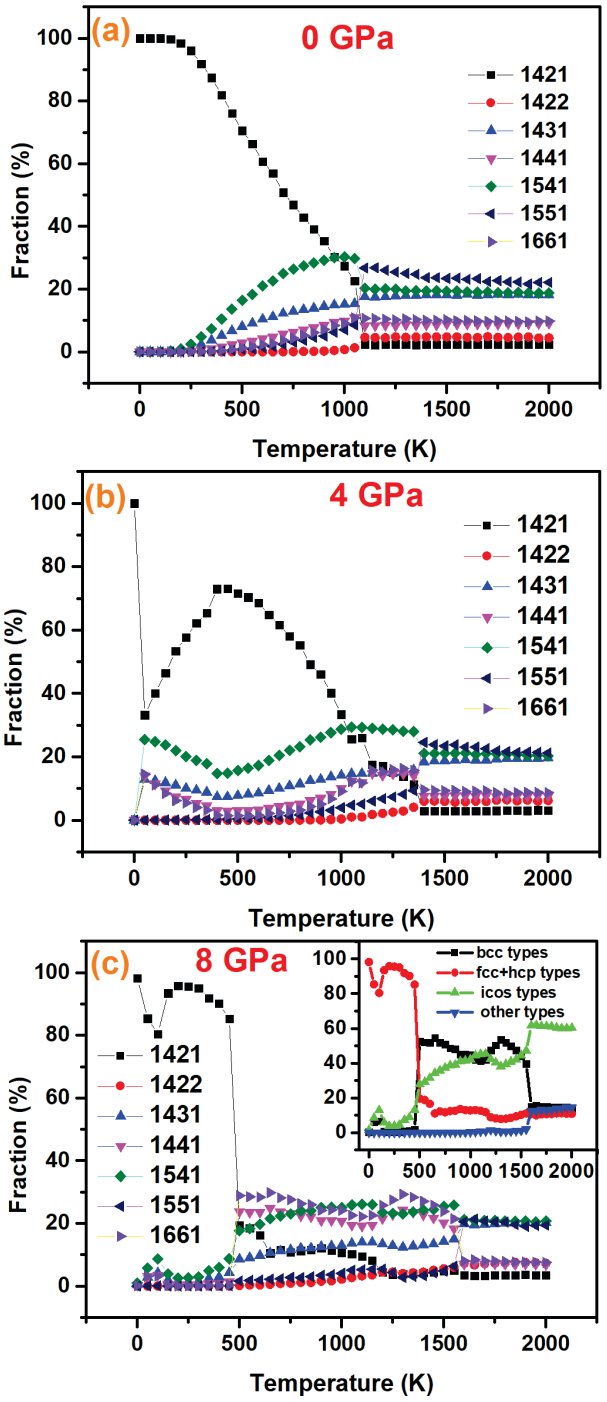



***Fig. 5.*** *Temperature-dependent fractions of the most common PA bonded pairs obtained under pressures of (a) 0 GPa, (b) 4 GPa and (c) 8 GPa..*

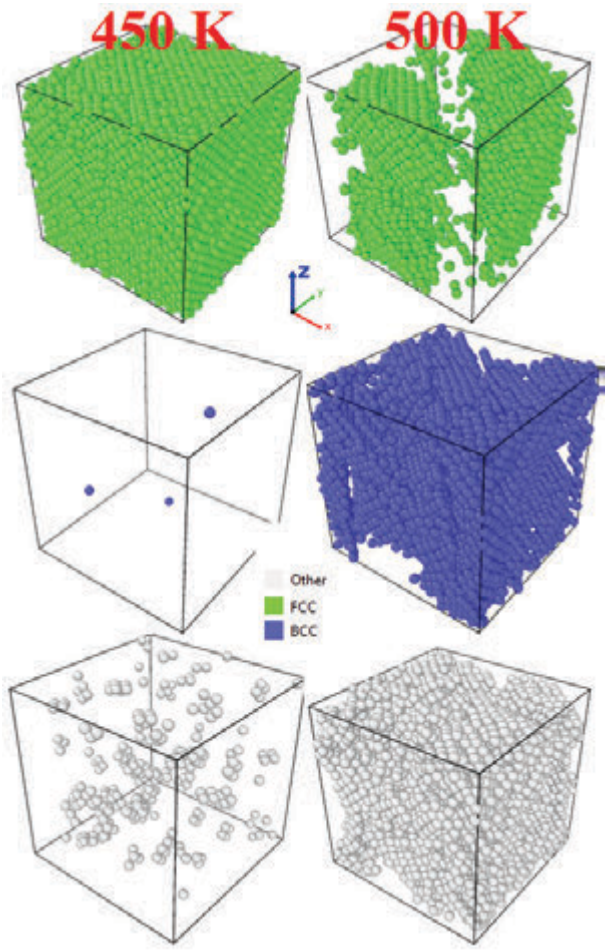



***Fig. 6.*** *Distribution of fcc, bcc and other types at 450 K and 500 K under 8 GPa.*

## CONCLUSION

The melting process and microstructure evolution of fcc Sr under different pressures have been investigated by MD simulations using EAM potentials. We observed that the EAM potential predicted the lattice parameter, cohesive energy and melting temperature of the element Sr with high accuracy. Also, g(r) and S(q) calculated for liquid Sr showed excellent agreement with the experimental results. The melting point increased with increasing pressure and significant changes were observed in the microstructure of the system. Solid-solid phase transition occurred between 450-500 K (500-550 K) under 8 GPa (6 GPa). The results of the PA analysis technique showed that most of the atoms with the fcc crystal arrangement in the phase transition have been oriented towards the bcc crystal arrangement.

## REFERENCE

[1] Guder V, Sengul S, Celtek M, et al. Pressure dependent evolution of microstructures in Pd80Si20 bulk metallic glass. J Non Cryst Solids 2022; 576: 121290.

[2] Celtek M. Atomic structure of Cu60Ti20Zr20 metallic glass under high pressures. Intermetallics 2022; 143: 107493.

[3] Li C, Luo Z, Tian Z, et al. The concealed solid-solid structural phase transition of Fe70Ni10Cr20 under high pressure. Mater Today Commun 2022; 104499.

[4] Celik FA. Pressure and cooling rate effect on polyhedron clusters in Cu–Al alloy by using molecular dynamics simulation. Phys B Condens Matter 2014; 450: 71–76.

[5] Smith W, Forester TR. DL_POLY_2.0: A general-purpose parallel molecular dynamics simulation package. J Mol Graph 1996; 14: 136–141.

[6] Kittel C. Introduction to Solid State Physics. New York: John Wiley & Sons Inc., 1986.

[7] Celtek M, Domekeli U, Sengul S. Investigation of first order phase transition process of strontium during heating with molecular dynamics simulations using different potentials. In: International Scientific Conference. Bulgaria/Gabrovo, 2021, pp. 259–264.

[8] Sengul S, Celtek M, Domekeli U. The structural evolution and abnormal bonding ways of the Zr80Pt20 metallic liquid during rapid solidification under high pressure. Comput Mater Sci 2020; 172: 109327.

[9] Kang H, Ye X, Wang J, et al. Abnormal bonding ways in Zr50Cu50 metallic glass under high pressures. J Alloys Compd 2019; 780: 512–517.

[10]Kenneth W. Generalized Thermodynamic Relationships. New York, 1988.

[11] Yildiz AK, Celik FA. Atomic concentration effect on thermal properties during solidification of Pt-Rh alloy: A molecular dynamics simulation. J Cryst Growth 2017; 463: 194–200.

[12]Waseda Y. The Structure of Non-Crystalline Materials-Liquids and Amorphous Solids. New York: London: McGraw-Hill, 1981.

[13]Celtek M, Sengul S, Domekeli U, et al. Dynamical and structural properties of metallic liquid and glass Zr48Cu36Ag8Al8 alloy studied by molecular dynamics simulation. J Non Cryst Solids 2021; 566: 120890.

[14] Honeycutt JD, Andersen HC. Molecular Dynamics Study of Melting and Freezing of Small Lennard- Jones Clusters. J Phys Chem 1987; 91: 4950–4963.

[15] Celtek M, Domekeli U, Sengul S, et al. Effects of Ag or Al addition to CuZr-based metallic alloys on glass formation and structural evolution: a molecular dynamics simulation study. Intermetallics 2021; 128: 107023.

# INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COOLING RATE ON ATOMIC STRUCTURE OF LIQUID CALCIUM: A MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION STUDY

**Murat Celtek[1], Sedat Sengul[2], Unal Domekeli[2]**

[1]*Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*
[2]*Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*

**Abstract**

*In this study, the evolution of the atomic structure of liquid calcium (Ca) cooled with different cooling rates (10-0.02 K/ps) was investigated using the classical molecular dynamics simulation method. The embedded atom method many body potentials, which are widely preferred in molecular dynamics simulations, were used to describe the interactions between Ca atoms in the system. Volume temperature curves, pair distribution functions, structure factor and Honeycutt-Andersen method were used to examine the changes in the atomic structure of liquid Ca during the cooling process. A good agreement was observed between the pair distribution functions and structure factors curves calculated from molecular dynamics simulations for liquid Ca and the experimental and other molecular dynamics simulation results in the literature. Current findings have shown that liquid Ca, which is cooled faster, exhibits properties unique to amorphous structures at lower temperatures. On the other hand, it has been found that when the system is given more time to cool (or is cooled more slowly), crystal nucleation begins and the size of this nucleation increases, eventually making the system transition from a liquid to a crystalline structure. According to the results of Honeycutt-Andersen pair analysis method, 1551, 1431 and 1541 bonded pairs are more common in amorphous systems, while 1441 and 1661 bonded pairs are more popular in crystalline structures. It is believed that the results of the study will provide useful information to the literature about the development of the atomic structure of Ca, which has a wide range of uses in our lives.*

**Keywords:** Calcium, Molecular Dynamics Simulations, Honeycutt-Andersen Method, Embedded atom method.

## INTRODUCTION

With the developing technology and increasing demand, many materials are needed today and feverish work is carried out to produce them. However, producing new materials and conducting research and development studies on them can be both laborious and expensive. As such, it is of great importance to be able to explain the physical properties of that material at the atomic scale in accurate, fast, reliable and inexpensive ways [1]. Today, with the spread of supercomputers and the parallel development of the software industry, the adverse effects of experimental studies such as time, manpower, and cost can be alleviated to some extent [2–4]. The most commonly used methods in the literature to investigate the physical properties of materials; quantum-based molecular dynamics (MD) simulation methods and classical MD simulation methods based on the solution of Newtonian equations of motion [5]. Although quantum MD simulations produce reliable results close to experimental results, they have some disadvantages such as slow computation and working with very few atoms. Because of these disadvantages, classical MD simulation methods are preferred because they are cheaper, can work with millions of atoms, require less computing power, have a more easily understandable theoretical background, can produce reliable results with accurate modeling. Thus, in our study, we focused on the effect of cooling rate on the evolution of the atomic structure of liquid calcium (Ca) during the cooling process by taking these advantages of classical MD simulations. We used the embedded atom method (EAM) potential to express the interactions between Ca atoms in the system. It has been reported in previous studies that the EAM potential produces successful results in explaining the structural properties of Ca under different conditions [1, 6].

## EXPOSITION

According to the EAM model, the total energy rising from the interactions between atoms in a system with N atoms is defined as,

$$E_i = F_\alpha\left[\sum_{j\neq i}\rho_{\alpha\beta}(r_{ij})\right]+\frac{1}{2}\sum_{j\neq i}\phi_{\alpha\beta}(r_{ij}), \qquad (1)$$

where $\phi_{\alpha\beta}(r_{ij})$ is the pair-interaction energy representing the repulsive interactions between two atoms. The second term $F_\alpha$ is the embedding energy, which depends on the charge density $\rho_i$, which includes attractive interactions. All simulations throughout the cooling process were performed using the DL_POLY_2.0 open-source simulation program [7]. During the simulations, NPT isothermal isobaric ensemble was used under 0 GPa pressure. Pressure and temperature were controlled with a Berendsen barostat and thermostat. Periodic boundary conditions were applied to all directions of the cell, which consists of a total of 13,500 Ca atoms. Velocity form of the Verlet algorithm was used to solve the equations of motion, and the time step was taken as 1 fs. In order to guarantee the liquid structure, the system was equilibrated by holding it at 500 ps at 1700 K, which is high enough than the experimental melting point ($T_m^{exp}$ = 1113 K [8]) of Ca. Then, the liquid system was cooled with different cooling rates ($\gamma_1$=10, $\gamma_2$=5, $\gamma_3$=1, $\gamma_4$=0.1 and $\gamma_5$=0.02 Kps$^{-1}$) from 1700 K to 200 K with ΔT= 50 K intervals. The temperature-dependent variation of the volume of the system per atom (V-T) obtained by the five cooling rates is shown in Figure 1. In the high-temperature region (900 K-1700 K) for the five cooling rates, the volume of the system changes linearly and their curves almost overlap each other. This indicates that the atoms have enough mobility in this region and move fast enough that they can easily adapt to the current temperature. At low temperatures, the volume behaves in different slopes and shapes depending on the cooling rate of the system. The volume change is continuous under fast cooling rates of $\gamma_1$=10 Kps$^{-1}$ and $\gamma_2$=5 Kps$^{-1}$ and shows no indication of liquid-solid phase transition. The mobile atoms in the liquid system tend to move more slowly under these cooling rates because the viscosity of the liquid constantly increases as the temperature drops [9]. However, in V-T curves obtained for slower cooling rates of $\gamma_3$=1 Kps$^{-1}$, $\gamma_4$=0.1 Kps$^{-1}$ and $\gamma_5$=0.02 Kps$^{-1}$, an evident discontinuity is observed at 600 K, 700 K and 750 K, respectively, this indicates that a first-order phase transition has occurred in the system. These results show that the slower a system is cooled, the higher its transition temperature (crystallization temperature). This phenomenon has also been observed in many other studies. Unlike the others, at a cooling rate of $\gamma_4$=0.1 Kps$^{-1}$, two different changes are observed in the V-T curve between 600 K and 750 K, which will be discussed later with different analysis methods.

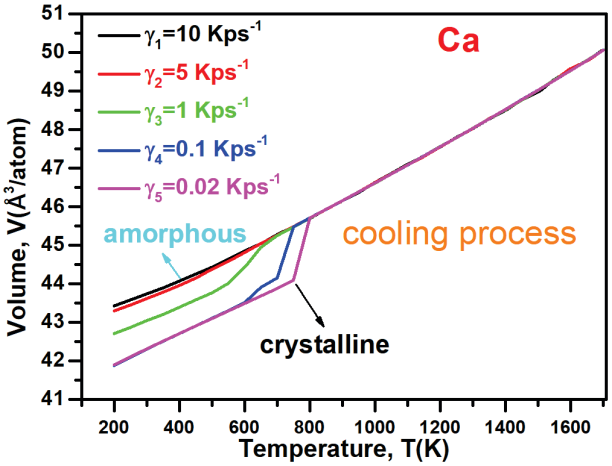



***Fig. 1.*** *Temperature-dependent evolution of volume for five cooling rates.*

In MD simulations, the pair distribution function (PDF or g(r)) is one of the most preferred methods to characterize the local structure of the system and to obtain information about the distribution of atoms. It is also the probability to find another atom at a distance r from a central one. It can be expressed as [10, 11]:

$$g(r)=\frac{V}{N^2}\left\langle\sum_i\frac{n_i(r)}{4\pi r^2\Delta r}\right\rangle. \qquad (2)$$

The liquid structure factor (S(q)), calculated from the Fourier transform of g(r), is shown in Figure 2 along with orbital-free ab-initio MD (OF-AIMD) simulation [12] and experimental [13] results. The liquid g(r) obtained from the EAM-MD simulations is in excellent agreement with both the experimental (excluding first peak height difference) and OF-AIMD simulation results. This is one of the

indications that the chosen potential accurately and reliably describes the interactions between Ca atoms.

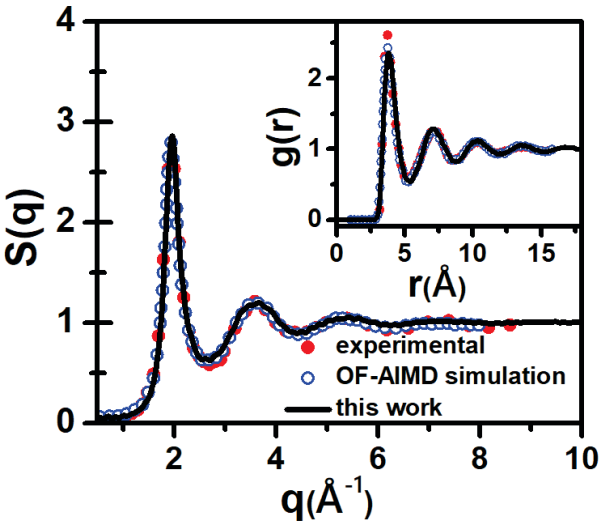



***Fig. 2.*** *Comparison of S(q) (1100 K) calculated for liquid Ca with experimental and OF-AIMD simulation results (1113 K). The inset depicts liquid g(r)'s.*

Figure 3 presents a comparison of g(r)'s calculated at different temperatures for various cooling rates ($\gamma_1$=10 Kps$^{-1}$, $\gamma_3$=1 Kps$^{-1}$, and $\gamma_5$=0.02 Kps$^{-1}$). We did not include the results of other cooling rates in this graph, because it may cause visual pollution. The g(r)'s of the system cooled using the three cooling rates at 1000 K and 1500 K are very similar and they produce wider and lower peaks as in the g(r) of the liquid systems. This supports the fact that the atoms in the system can move fast enough at these temperatures, as discussed above. When the temperature is reduced to 600 K, g(r)'s calculated for the cooling rates of $\gamma_1$=10 Kps$^{-1}$ and $\gamma_3$=1 Kps$^{-1}$ are similar to each other and exhibit specific behavior to liquid structures, while g(r) obtained from $\gamma_5$=0.02 Kps$^{-1}$ shows sharp and distinct peaks specific to crystalline structures. It is seen from the figure that the g(r)'s at 300 K exhibits different behavior for the three cooling rates. The first peak height of g(r), calculated from the cooling rate of $\gamma_1$=10 Kps$^{-1}$, increases and the widths of the main peaks decrease, while splitting is observed at the second maximum of the g(r) curve. These findings show that the short-range and medium-range order develops in the faster cooled system and there is a transition from liquid to the amorphous structure during cooling. Moreover, the main peaks of g(r) calculated for $\gamma_3$=1 Kps$^{-1}$ cooling rate produce peaks with the same positions as the main peaks of g(r) calculated for $\gamma_5$=0.02 Kps$^{-1}$, but they have softer peaks. The g(r)'s obtained by the $\gamma_5$=0.02 Kps$^{-1}$ shows peaks specific to the bcc crystalline structures, thus the results of slower cooling with the $\gamma_3$=1 Kps$^{-1}$ suggest that apart from the presence of bcc clusters in the system, other clusters develop in the system.

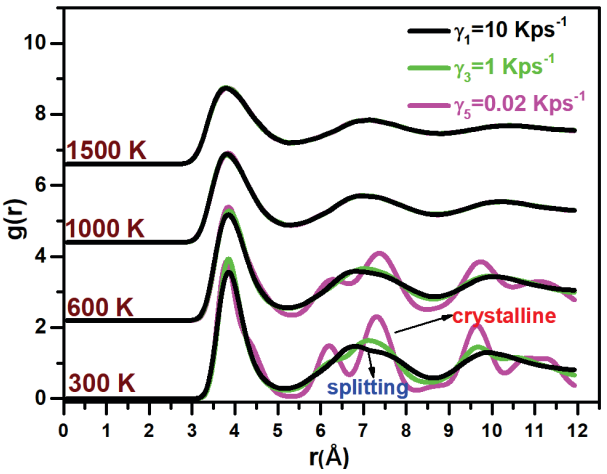



***Fig. 3.*** *Comparison of g(r)'s calculated at different temperatures for cooling rates of* $\gamma_1$=10 Kps$^{-1}$, $\gamma_3$=1 Kps$^{-1}$, and $\gamma_5$=0.02 Kps$^{-1}$.

Although g(r) gives useful information about the atomic structure development of the system, it does not provide information about the microstructure of the system. Honeycutt-Andersen (HA) bond index [14–17] and Voronoi tessellation (VT) [18, 19] analysis are generally used to obtain detailed information about the local structure of the system. In the HA method, pairs of atoms and their local surroundings are characterized by integers *ijkl*. According to this technique, 1551 bonded pairs represent ideal icosahedra, 1541 and 1431 bonded pairs defective icosahedra. 1421 bonded pairs represent face-centered cubic (fcc) crystal structures, 1422+1421 bonded pairs represent the hexagonal closed-packed (hcp), 1661 and 1441 bonded pairs represent body-centered cubic (bcc) crystal structures. The diagrammatic nomenclature and configurations of the different HA bonded pairs most commonly seen in our study are shown in Figure 4.

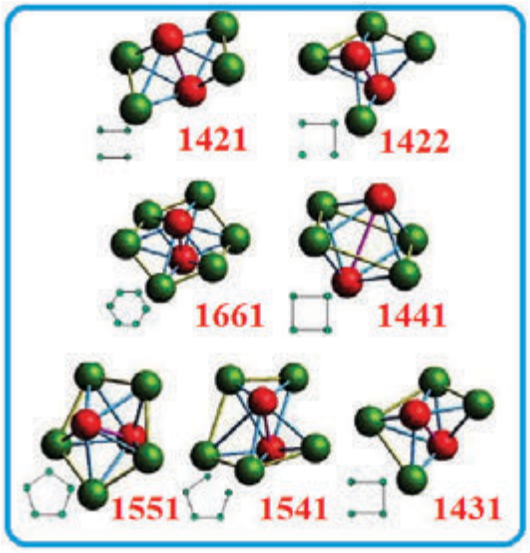



***Fig. 4.*** *Schematic representation of the most common HA bonded pairs indices. The red and green balls represent the root pair atoms and their common neighbors.*

The fractions of the most common bonded pairs according to the HA analysis results of the data obtained for the three cooling rates during the cooling process are shown in Figure 5 as a function of temperature. It can be seen from the figures that the bonded pairs 1551, 1431 and 1541 are the most dominant in the high-temperature regions. These bonded pairs continue to dominate even at low temperatures for a cooling rate of $\gamma_1$=10 Kps$^{-1}$. This is an indication that the system transitions from liquid to the amorphous structure at low temperatures during the rapid cooling process. Another important observation is that while 1551 bonded pairs tend to increase from 1700 K to 700 K, they tend to decrease below 700 K, and a slight increase is observed in the fraction of bonded pairs representing crystal structures in this process. This shows that during the rapid cooling process, crystal nucleation started to occur at low temperatures, but these nuclei did not have the opportunity to grow because there was not enough time. Looking at the results shown in Figure 4(b) for the $\gamma_3$=1 Kps$^{-1}$ cooling rate, it can be seen that the results are quite similar to the results for $\gamma_1$=10 Kps$^{-1}$ at high (600 K and above) temperatures. However, a sudden decrease is observed in the fraction of popular bonded pairs around 600 K, while a sudden increase is observed in 1421 bonded pairs representing fcc crystal structures as well as 1441 and 1661 bonded pairs representing bcc crystal structures. It shows that this system has transitioned from a liquid structure to a polycrystalline one dominated by atoms in bcc crystal order. In order to provide a visual overview of this explanation, we show the atoms in bcc, hcp and fcc crystal order at 300 K in the inset of the figure.

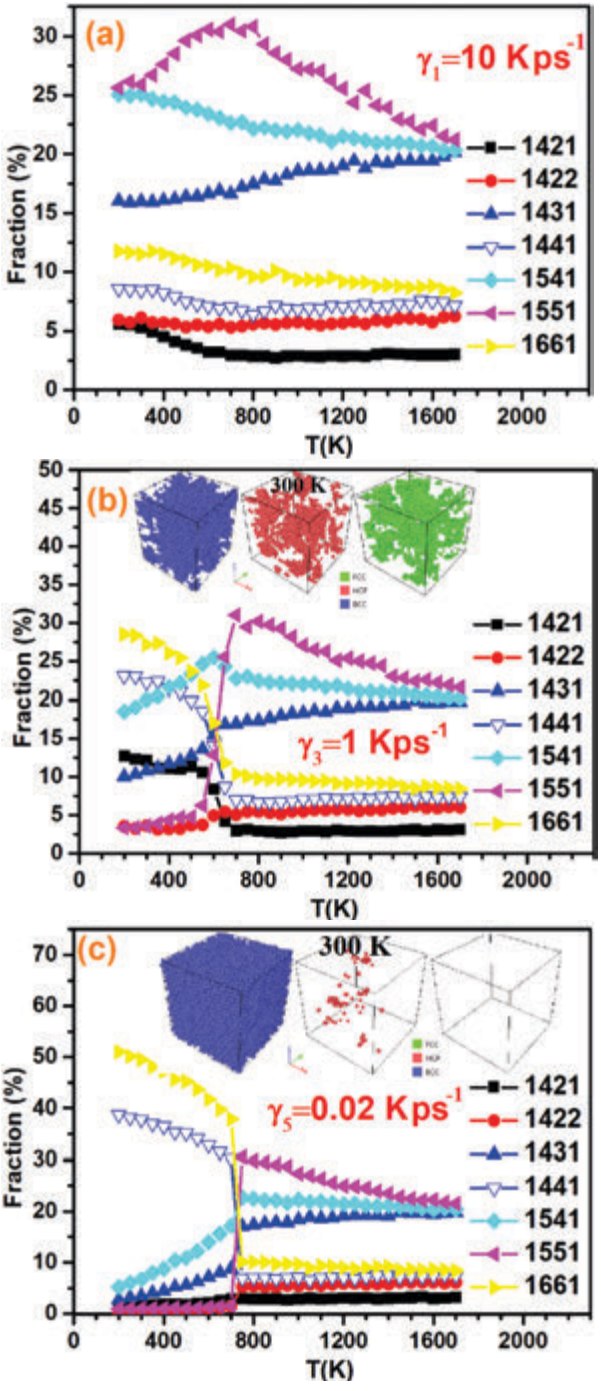



***Fig. 5.*** *Temperature-dependent evolutions of fractions of some HA bonded pairs obtained for (a) $\gamma_1$=10 Kps$^{-1}$, (b) $\gamma_3$=1 Kps$^{-1}$, and (c) $\gamma_5$=0.02 Kps$^{-1}$ cooling rate during the cooling process.*

The fractions of HA bonded pairs at high temperatures of the system cooled with a

cooling rate of $\gamma_5$=0.02 Kps$^{-1}$ are similar to that of other cooling rates, but around 750 K a sharp decrease is observed in all popular pairs, while a sharp increase is observed in the fraction of 1661 and 1441 bonded pairs. This shows that, unlike the others, the liquid system transitions to the solid phase with a bcc crystal order of around 750 K. It is possible to confirm this from the snapshots of the simulation boxes at 300 K given in the inset of the figure. In addition, these observations and findings are consistent with the results presented and discussed in Figure 3. All these results show that the selected cooling rate has an important role in the evolution of the atomic structure during the rapid solidification process. In order to clarify the abnormal behavior observed between 750K and 600K in the V-T curve obtained for the $\gamma_4$=0.1 Kps$^{-1}$ cooling rate in Figure 1, the snapshots of crystal and other ordered atoms at these temperatures and the calculated g(r)'s of them are shown together in Figure 6. From the snapshots, it is seen that the number of atoms with bcc, hcp and fcc order in the system at 750 K is almost non-existent. The g(r) curves on the side supports this results. It is understood from the figure that the other bonded pairs, which are mostly in liquid and amorphous structures in the system at this temperature, are in the majority because the total g(r) curve of the system and the g(r) curve of the other pairs overlap.

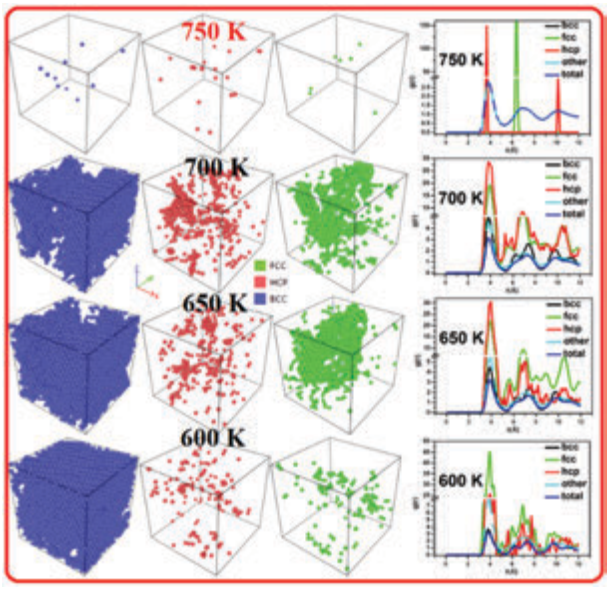



***Fig. 6.*** *Snapshots of bcc, hcp and fcc atoms at different temperatures for a cooling rate of $\gamma_4$=0.1 Kps$^{-1}$, and the g(r) curves calculated for them.*

When the temperature is reduced to 700 K, it can be seen from the snapshots that atoms in bcc order fill most of the system, but also exist the atoms in hcp and fcc order at a non-negligible portion. A similar scene is observed at 650 K, except for the increase in the number of atoms in fcc crystal order. Current findings indicate that the system stabilizes in a polycrystalline order in this temperature range. It is possible to observe this from the relationship between the g(r) curves. The total g(r) curves reflect the characteristics of all other atoms, mostly bcc atoms, in their respective proportions. Finally, when the temperature is reduced by 600 K, it is seen that the bcc order is dominant in the system and there is a noticeable decrease in the number of atoms with hcp and fcc order. In addition, it is seen that the total g(r) curve and the g(r) curves calculated only for bcc atoms almost overlap. These findings show that the system transitions from the polycrystalline order to the bcc crystalline order at 600 K and explain the reason for the abnormal behavior observed in the V-T curves of $\gamma_4$=0.1 Kps$^{-1}$ at these temperatures.

## CONCLUSION

In the present study, the evolution of the atomic structure of liquid Ca during the rapid solidification process was investigated by the MD simulation method using five different cooling rates and EAM potential. The g(r) and S(q) curves calculated from the EAM-MD simulations show excellent agreement with the experimental and OF-AIMD simulation results previously reported in the literature. It has been observed that the time given for the cooling of the system during the cooling process has an important role in the evolution of the atomic structure of the system. For faster cooling rates ($\gamma_1$=10 Kps$^{-1}$ and $\gamma_2$=5 Kps$^{-1}$), no phase transition was observed in the system and the liquid system cooled at these rates evolved into an amorphous structure. In the second maximum of the g(r)'s, a splitting, typical for amorphous structures, is observed. According to HA analysis results, 1551, 1541 and 1431 bonded pairs were found to be popular, showing the presence of icosahedral and defective icosahedral order in the system at these cooling rates. When the system was cooled with slower

cooling rates ($\gamma_3$=1, $\gamma_4$=0.1 and $\gamma_5$=0.02 $Kps^{-1}$), a liquid-solid first-order phase transition occurred in the system at temperatures below the melting point. HA analysis shows that the system cooled with $\gamma_3$=1 $Kps^{-1}$cooling rate is balanced in polycrystalline order, while at cooling rates of $\gamma_4$=0.1 and $\gamma_5$=0.02 $Kps^{-1}$, bcc crystal order dominates at low temperatures. We believe that the results will contribute to a better understanding of the evolution of the atomic structure of liquid Ca during the rapid solidification process.

## REFERENCE


[1] Celtek M. Investigation of Heating Process of Pure Calcium Element by Molecular Dynamics Simulation Method. BEU J Sci 2021; 10: 803–815.

[2] Celik FA, Yildiz A. Pressure effect on the icosahedral order of Pd50Si50 alloy: A molecular dynamics study. Mater Today Commun 2020; 25: 101454.

[3] Celtek M. An in-depth investigation of the microstructural evolution and dynamic properties of Zr77Rh23 metallic liquids and glasses: A molecular dynamics simulation study. J Appl Phys 2022; 132: 035902.

[4] Atila A, Kbirou M, Ouaskit S, et al. On the presence of nanoscale heterogeneity in Al70Ni15Co15 metallic glass under pressure. J Non Cryst Solids 2020; 550: 120381.

[5] Çeltek M, Güder V. Sıvı Vanadyumun Kristalizasyon Sürecine Soğutma Oranı Etkisinin Moleküler Dinamik Benzetim Metodu ile İncelenmesi. Erzincan Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Derg 2020; 13: 730–745.

[6] Celtek M, Sengul S, Domekeli U. A molecular dynamics simulation study on the structural evolution of liquid calcium under high pressure. In: *International Scientific Conference*. 2021, pp. 265–270.

[7] Smith W, Forester TR. DL_POLY_2.0: A general-purpose parallel molecular dynamics simulation package. J Mol Graph 1996; 14: 136–141.

[8] Kittel C. *Introduction to Solid State Physics*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1986.

[9] Ozdemir Kart S, Tomak M, Uludogan M, et al. Structural, thermodynamical, and transport properties of undercooled binary Pd-Ni alloys. Mater Sci Eng A 2006; 435–436: 736–744.

[10] Kbirou M, Trady S, Hasnaoui A, et al. Cooling rate dependence and local structure in aluminum monatomic metallic glass. Philos Mag 2017; 97: 2753–2771.

[11] Celtek M, Sengul S, Domekeli U, et al. Dynamical and structural properties of metallic liquid and glass Zr48Cu36Ag8Al8 alloy studied by molecular dynamics simulation. J Non Cryst Solids 2021; 566: 120890.

[12] Rio BG del, González LE. Orbital free ab initio simulations of liquid alkaline earth metals: from pseudopotential construction to structural and dynamic properties. J Phys Condens Matter 2014; 26: 465102.

[13] Waseda Y. *The Structure of Non-Crystalline Materials-Liquids and Amorphous Solids*. New York: London: McGraw-Hill, 1981.

[14] Celtek M. Atomic structure of Cu60Ti20Zr20 metallic glass under high pressures. Intermetallics 2022; 143: 107493.

[15] Honeycutt JD, Andersen HC. Molecular Dynamics Study of Melting and Freezing of Small Lennard- Jones Clusters. J Phys Chem 1987; 91: 4950–4963.

[16] Guder V, Sengul S, Celtek M, et al. Pressure dependent evolution of microstructures in Pd80Si20 bulk metallic glass. J Non Cryst Solids 2022; 576: 121290.

[17] Sengul S, Domekeli U, Celtek M. Effect of Cooling Rate on the Atomic Structure Of Al75Co255 Metallic Glass. J Tech Univ Gabrovo 2021; 63: 76–80.

[18] Voronoi G. New Parametric Applications Concerning the Theory of Quadratic Forms - Second Announcement. J Reine Angew Math 1908; 134: 198–287.

[19] Celtek M, Domekeli U, Sengul S, et al. Effects of Ag or Al addition to CuZr-based metallic alloys on glass formation and structural evolution: a molecular dynamics simulation study. Intermetallics 2021; 128: 107023.

# THERMAL PROPERTIES OF ZINC NANOCRYSTALS: A COMPARISON STUDY USING THEORETICAL MODELS

**Unal Domekeli[1], Murat Celtek[2], Sedat Sengul[1]**

[1]*Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*
[2]*Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*

**Abstract**

*In this study, thermal properties of zinc (Zn) nanocrystals such as melting temperature and cohesive energy depending on size were investigated with theoretical models based on thermodynamic principles. Three different nanostructures were studied as nanocrystals: 0-dimensional (nanoparticle), 1-dimensional (nanowire) and 2-dimensional (nanofilm). Two different theoretical models were used to compare the results. The obtained results show that the melting temperature and cohesive energy change depending on the size and dimension of the nanocrystal. While this change is observed radically up to ~10 nm, the rate of change decreases after ~10 nm. In addition, the variation of the melting temperature of Zn nanowire with respect to size shows that the theoretical model results are consistent when compared with the experimental results.*

**Keywords:** Zinc, Nanocrystal, Melting point, Cohesive energy, Size effect, Dimension effect.

## INTRODUCTION

Due to the unique properties of nanocrystals depending on their size, shape and dimension, they have recently been the basis of groundbreaking developments in many fields [1,2]. They have the potential to create new materials and therefore their properties and interactions are a very popular research topic. In particular, the melting mechanism of nanocrystals is quite complex phenomena. There is still an important knowledge gap when it comes to understanding this complex mechanism, which is difficult to investigate with experimental methods. Since the first report on the size-dependent melting temperature of small particles via transmission electron microscopy [3], many melting theories based on thermodynamics have been developed on the melting process of nanocrystals [4-14]. For example, Nanda et al. [9] reported model parameters for many elements using the liquid drop model that they developed for size-dependent melting for low-dimensional systems. Although the liquid drop model has a simple form, when compared with the experimental results, it gives good results for some elements, but fails to explain the size-dependent change of melting for many elements. In addition, the liquid drop model has not been developed for one-component systems. Lu et al. [12] developed a new model based on thermodynamic quantities and investigated the size-dependent thermodynamic properties of pure gold, silver, nickel, argon, silicon, lead and indium nanocrystals. They reported that their model produces results consistent with existing experimental and molecular dynamics (MD) simulation results. Li et al. [13] estimated the melting temperature depending on size of one-component indium, tin, nickel, lead, palladium, gold and zinc and two-component Pd-Cu, Pd-Rh, and Pd-Pt nanowires by using the theoretical model that they developed based on surface area, packing factor and cross-sectional shape of the wire. The results obtained with this model showed that the melting temperatures for both one-component and two-component nanowires are consistent with the existing experimental and MD results.

In this study, we calculated the cohesive energy and melting points of Zn nanocrystals using these size-dependent melting models developed for low structure systems. Three different nanostructures were studied as

nanocrystals: 0-dimensional (nanoparticle), 1-dimensional (nanowire) and 2-dimensional (nanofilm).

## EXPOSITION

In this study, the theoretical models developed by Lu et al. [12] and Li et al. [13] are called as MODEL-1 and MODEL-2, respectively. MODEL-1 and MODEL-2 are models that predict a linear relationship between melting temperature and bonding energy based on the Lindemann melting criterion. In these models, when the structures of the nanocrystal and the bulk system are the same, this relationship can be expressed as follows [12,13];

$$\frac{T_m(D)}{T_{mb}} = \frac{E_c(D)}{E_{cb}} \tag{1}$$

where $T_m(D)$ and $T_{mb}$ are the melting temperatures of the nanocrystal and bulk system, respectively. $E_c(D)$ and $E_{cb}$ are the cohesive energies of the nanocrystal and bulk system, respectively.

According to MODEL-1, size, shape and dimension effects on the ratio of surface atoms to all atoms are combined and the melting temperature and cohesive energy of the nanocrystal are given as follows [12], respectively;

$$T_m(D) = T_{mb}\left[\left(1 - \frac{1}{12D_o - 1}\right) \times exp\left(-\frac{2\lambda S_{bo}}{3R}\frac{1}{12D_o - 1}\right)\right] \tag{2}$$

$$E_c(D) = E_{cb}\left[\left(1 - \frac{1}{12D_o - 1}\right) \times exp\left(-\frac{2\lambda S_{bo}}{3R}\frac{1}{12D_o - 1}\right)\right] \tag{3}$$

where $D$ is the size of the nanocrystal, representing the diameter for the spherical nanoparticle (NP) and the cylindrical nanowire (NW), and the film thickness for the nanofilm (NF). $R$ is the ideal gas constant and $D_o$ is a critical size where all atoms of the crystal are located on its surface and can be determined as [12]:

$$D_o = 2(3 - d)h \tag{3}$$

*i)* for $d$=0 spherical NPs $D_o = 6h$,
*ii)* for $d$=1 cylindrical NWs $D_o = 4h$,
*iii)* for $d$=2 NFs $D_o = 2h$

where $h$ is the distance between atoms. $S_{bo} = \Delta H_{bo}/T_{bo}$ is the bulk solid-vapor transition entropy. $H_{bo}$ and $T_{bo}$ are the bulk enthalpy of vaporization and the bulk boiling point, respectively. λ is the shape factor of the nanocrystal and is determined from the ratio of the number of the surface atoms to the total number of atoms (λ = 1 for spherical NP, cylindrical NW and NF [12]). The parameters used in MODEL-1 calculations for Zn are given in Table 1.

***Table 1.*** *MODEL-1 parameters for Zn*

| metal | parameters | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $T_{mb}$(K) | $T_{bo}$(K) | $E_{cb}$(eV) | $\Delta H_{bo}$(kJ/mol) | h(nm) |
| Zn | 692.7[a] | 1180[b] | -1.35[a] | 119[b] | 0.267[b] |

[a] Ref. [15]
[b] Ref. [16]

According to MODEL-2 based on surface area, packing factor and cross-sectional shape of nanocrystal, the melting temperature and cohesive energies for spherical NP, cylindrical NW and NF can be calculated from the expressions given below, respectively [13];

$$T_{mnp}(D) = T_{mb}\left[1 - \frac{2P_S}{\frac{fD}{d} + 2P_S}\right] \tag{4}$$

$$E_{cnp}(D) = E_{cb}\left[1 - \frac{2P_S}{\frac{fD}{d} + 2P_S}\right] \tag{5}$$

$$T_{mnw}(D) = T_{mb}\left[1 - \frac{2P_S}{\frac{3fD}{2d} + 2P_S}\right] \tag{6}$$

$$E_{cnw}(D) = E_{cb}\left[1 - \frac{2P_S}{\frac{3fD}{2d} + 2P_S}\right] \tag{7}$$

$$T_{mnf}(D) = T_{mb}\left[1 - \frac{P_S}{\frac{3fD}{d2} + P_S}\right] \tag{8}$$

$$E_{cnf}(D) = E_{cb}\left[1 - \frac{P_S}{\frac{3fD}{d2} + P_S}\right] \tag{9}$$

where $P_s$ and $f$ are the packing fraction of the surface crystal plane and packing factor, respectively. The parameters used in MODEL-2 calculations for Zn are given in Table 2.

***Table 2.*** *MODEL-2 parameters for Zn*

| metal | parameters | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $T_{mb}(K)$ | $E_{cb}(eV)$ | $d(nm)$ | $P_s$ | $f$ |
| Zn | 692.7[a] | -1.35[a] | 0.282[a] | 0.91[b] | 0.74[b] |

[a] Ref. [15]
[b] Ref. [13]

For Zn nanocrystals, the size-dependent variations of the melting temperature and cohesive energy calculated using MODEL-1 and MODEL-2 are given in Figures 1 and 2, respectively. As can be seen from Figure 1a-c, the melting temperatures obtained from both MODEL-1 and MODEL-2 for spherical NP, cylindrical NW and NF are smaller than that of the bulk Zn. For both models, the melting temperature increases as the size of the nanocrystal increases. While the rate of increase observed in the melting temperature occurs dramatically up to about $D$ = ~10 nm, after $D$ = ~10 nm the rate of increase gradually decreases with increasing size. As the size of the NP decreases, the surface/volume atomic ratio increases. For example, for a NP with the diameter of $D$ = ~10 nm, the surface atoms occupy 25% of the total atomic number, whereas for a ~100 and ~1000 nm diameter NP this ratio is only 2.5% and 0.25%, respectively [13]. Therefore, the smaller the size of the NP, the more dominant the influence of the surface atoms in the system. This explains their influence on the physical and chemical properties of NP. As the size of the NP decreases, the surface effects become more pronounced on the thermodynamic properties. As the size increases, this effect gradually

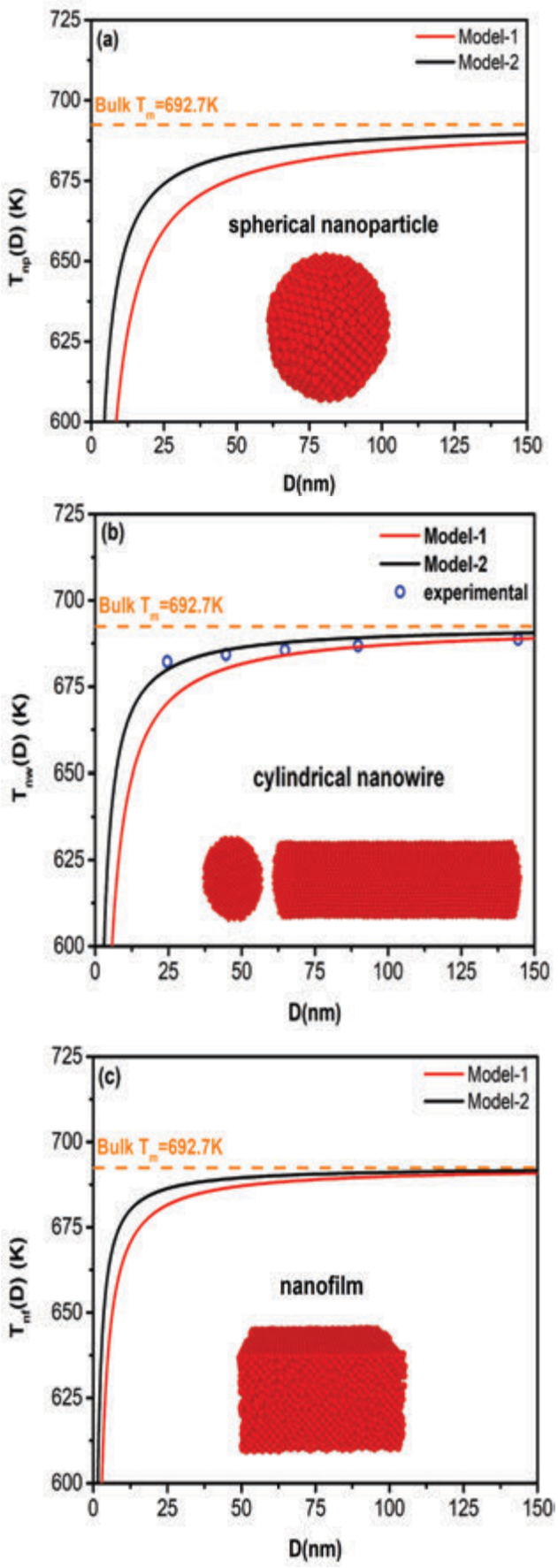



***Fig. 1.*** *Variation of the melting temperatures of Zn (a) NP, (b) NW and (c) NF depending on the size.*

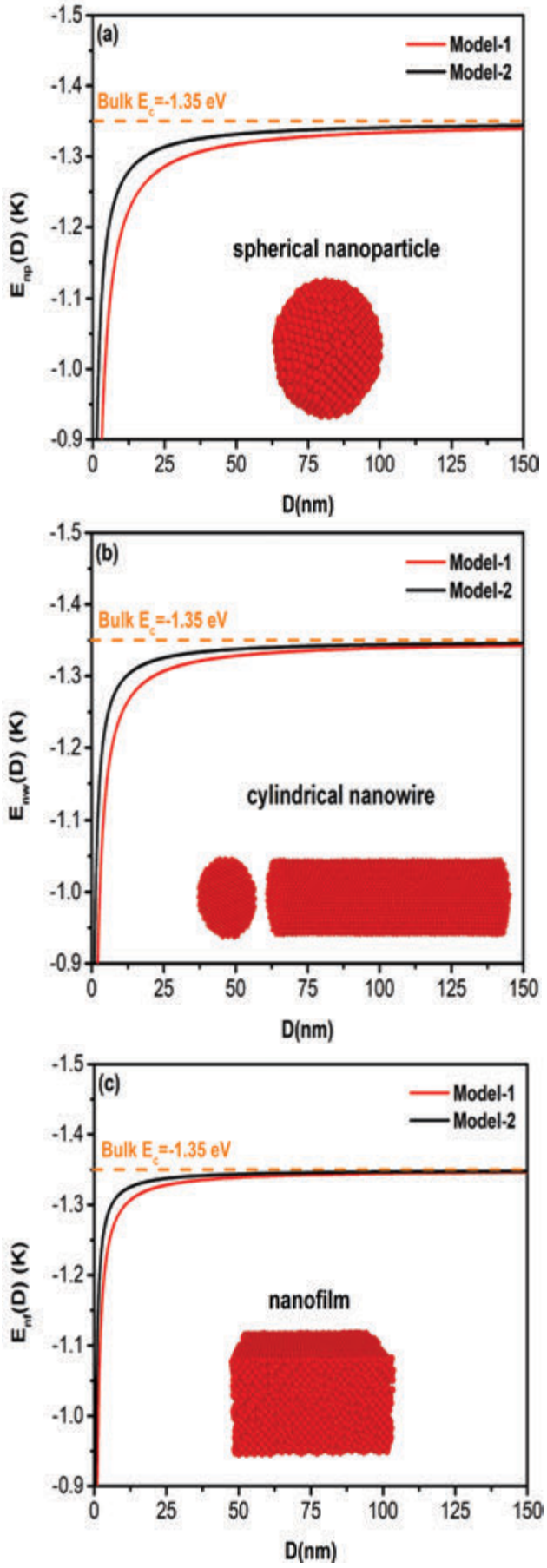



***Fig. 2.*** *Variation of the cohesive energies of Zn (a) NP, (b) NW and (c) NF depending on the size.*

decreases. This is also valid for the cases in NW and NF. As can be seen from Figure 1b, the melting temperatures obtained from both models for NW are consistent with the experimental results. Especially when the diameter of the cylindrical wire is smaller than $D$ = ~50 nm, the MODEL-2 results show a better agreement with the experimental results, while the MODEL-1 results are in better agreement with the experimental results for the diameter values larger than $D$ = ~50 nm. In addition, the melting temperatures obtained from MODEL-2 for each nanocrystal structure are larger compared to MODEL-1. For example, for NP with a diameter of ~10 nm, the melting temperatures obtained from MODEL-1 and MODEL-2 are 612 K and 648 K, respectively. As can be seen from Figure 2 a-c, the cohesive energies calculated from both models decrease with increasing the size of the nanocrystal. At large size values, the cohesive energy of nanocrystals converges to the value of the bulk Zn. At small size values, the cohesive energy of nanocrystals is greater than that of the bulk. Nanocrystals with low coordination number of atoms on the surface have high surface energy and therefore higher cohesive energy than the bulk materials. This indicates that the nanocrystal is more unstable compared to the bulk material. As the size of the nanocrystal increases, the surface/volume atoms ratio decreases, so the surface effects begin to weaken, and the cohesive energy of the nanocrystal converges towards the bulk value. Also, the cohesive energies obtained from MODEL-2 for NP are smaller than those calculated from MODEL-1. For example, for NP with a diameter of ~10 nm, the cohesive energies obtained from MODEL-1 and MODEL-2 are -1.19 eV and -1.26 eV, respectively. The behaviors of the size-dependent variation of melting and cohesive energies of NW and NF are similar to that of NP.

Figure 3 shows the variation of melting temperatures and cohesive energies calculated from MODEL-1 depending on the dimension of the nanocrystal. The melting temperature changes depending on the dimension of nanocrystal. It is seen that the melting temperatures calculated from MODEL-1 for NP, NW and NF increase with increasing size.

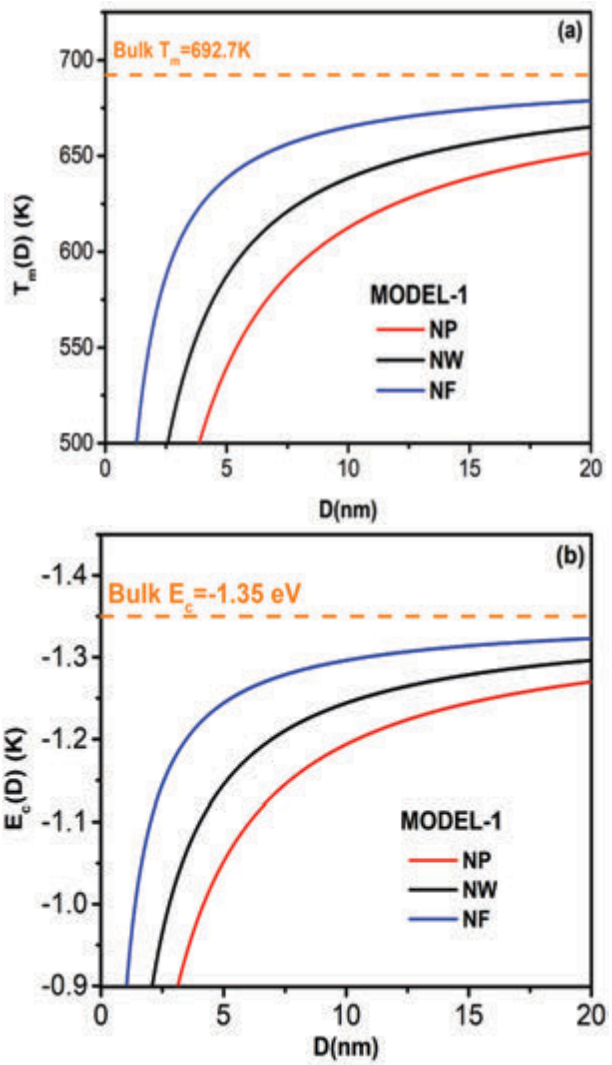



***Fig. 3.*** *Variation of (a) the melting temperatures and (b) the cohesive energies of Zn nanocrystal depending on the dimension for MODEL-1.*

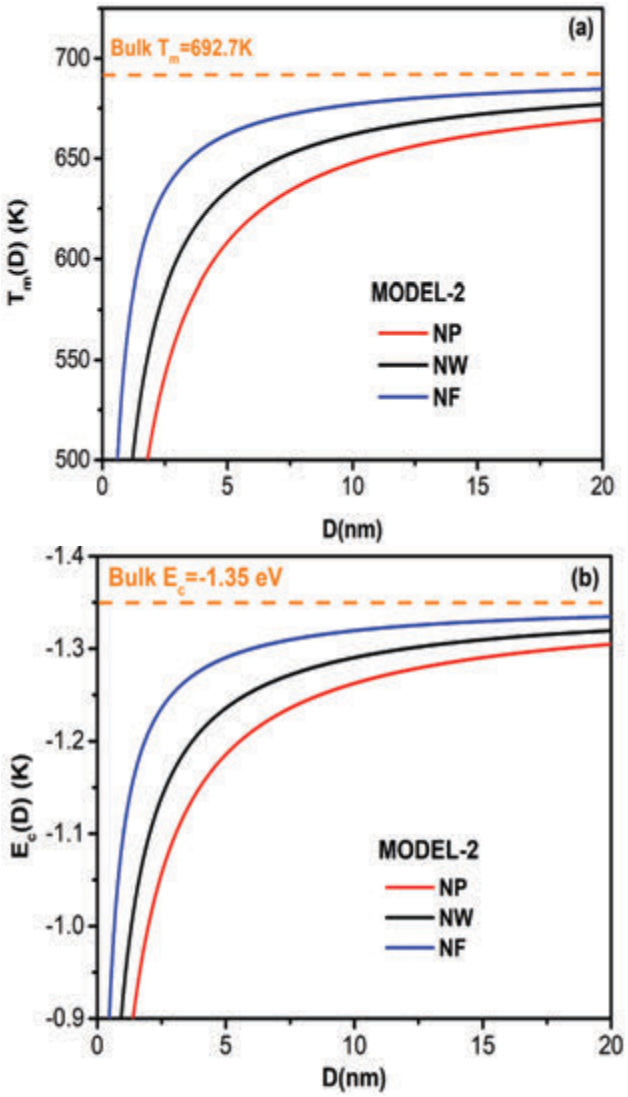



***Fig. 4.*** *Variation of (a) the melting temperatures and (b) the cohesive energies of Zn nanocrystal depending on the dimension for MODEL-2.*

For example, for the $D$ = ~10 nm, the melting temperatures of NP, NW, and NF are 612 K, 638 K, and 667 K, respectively. The melting temperature is greatest for NF and smallest for NP. When the cohesive energies calculated from MODEL-1 for NP, NW and NF are compared with each other, NP has the largest cohesive energy, while NF has the smallest cohesive energy. For example, for $D$ = ~10 nm, the cohesive energies of NP, NW and NF are -1.19 eV, -1.24 eV and -1.30 eV, respectively.

The behavior of the melting temperature and cohesive energy calculated from MODEL-2 depending on the size of nanocrystal is given in Figure 4. The results obtained from MODEL-2 exhibit similar characteristic behaviors with the results of MODEL-1. These results show that the melting temperature and cohesive energy depend dramatically on the dimensionalas well as the size of the nanocrystal.

## CONCLUSION

In this study, we performed a comparison of MODEL-1 and MODEL-2, which are used to describe the size, shape and dimensionality dependencies of cohesive energy and melting temperature of Zn nanocrystals. The obtained results show that the cohesive energy and melting temperature vary depending on the size and dimensionality of the nanocrystal. For both models, as the size of the nanocrystal increases, the melting temperature increases and the cohesive energy decreases. As the size of nanocrystal gets smaller, the surface/volume atom ratio increases and surface effects become dominant in the system. This increases the surface energy of the nanocrystal, resulting in an increase in the cohesive energy. Due to these surface

effects, the nanocrystal melts at a lower temperature than the melting temperature of the bulk, performing a surface melting. The melting temperatures calculated from both models for Zn NW are consistent with the experimental values. The results of the MODEL-1 in large sizes and the results of the MODEL-2 in small sizes show a good agreement with the experimental results. These models can also be applied to investigate the melting temperature and cohesive energy of different low-dimensional systems, as their predictions for the melting temperature are consistent with the experimental results.

## REFERENCE


[1] D. Pullini, G. Innocenti, D. Busquets, A. Ruotolo, Appl. Phys. Lett., 90, 133106 (2007).
[2] J. Zhang, K. Sasaki, E. Sutter, R.R. Adzic, Science 315, 220 (2007).
[3] M. Takagi, J. Phys. Soc. Jpn. 9, 359 (1954).
[4] J. Shanker, M. Kumar, Phys. Stat. Solidi B 158, 11 (1990).
[5] R. R. Couchman, Philos. Mag. A 40, 637 (1979).
[6] R. R. Vanfleet and J. M. Mochel, Surf. Sci. 341, 40 (1995).
[7] Q. Jiang, L. H. Liang and J. C. Li, J. Phys.: Condens. Matt. 13, 565 (2001).
[8] C. Q. Sun, Y. Wang, B. K. Tay, S. Li, H. Huang and Y. B. Zhang, J. Phys. Chem. B 106, 10701 (2002).
[9] K. K. Nanda, S. N. Sahu and S. N. Behera, Phys. Rev. A 66, 013208 (2002).
[9] W. H. Qi, M. P. Wang, M. Zhou and W. Y. Hu, J. Phys. D: Appl. Phys. 38, 1429 (2005).
[10] W. H. Qi, M. P. Wang, M. Zhou, X. Q. Shen and X. F. Zhang, J. Phys. Chem. Sol. 67, 851 (2006).
[11] A. Safaei, M. A. Shandiz, S. Sanjabi and Z. H. Barber, J. Phys.: Condens. Matter 19, 216216 (2007).
[12] H. M. Lu, P. Y. Li, Z. H. Cao and X. K. Meng, J. Phys. Chem. C 113, 7598 (2009).
[13] Y. J. Li, W. H. Qi, B. Y. Huang, M. P. Wang and S. Y. Xiong, Modern Phys. Lett. B, 24 (22), 2345–2356 (2010).
[14] S. Bhatt, M. Kumar, J. Phys. and Chem. Solid. 106, 112–117 (2017).
[15] Kittel C. Introduction to Solid State Physics. New York: John Wiley & Sons Inc., 1986.
[16] http://www.webelements.com/.

# A MOLECULAR DYNAMICS STUDY OF STRUCTURAL AND DYNAMIC PROPERTIES OF GOLD NANOPARTICLES WITH PALLADIUM COATING

**Unal Domekeli[1], Sedat Sengul[1], Murat Celtek[2]**

[1]*Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*

[2]*Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*

**Abstract**

*In this work, we presented an investigation on the melting process of gold (Au) nanoparticles with palladium (Pd)-coating by using molecular dynamics (MD) simulations at the nanoscale. Interatomic interactions in MD simulations were described using the embedded atom method (EAM)-based Sutton - Chen (SC) potentials. In order to monitor the melting process of nanoparticles, we examined the temperature-dependent changes of physical properties such as potential energy, pair distribution functions and diffusion coefficients. In addition, the dynamics in the structure of the nanoparticle was investigated by visualizing the atomic configurations obtained from the MD simulations. The results show that the melting point of Au nanoparticle with Pd-coating is smaller than that of bulk Au but higher than that of uncoated Au nanoparticle. The reason why the Au nanoparticle with Pd-coating has a higher melting point than the uncoated Au particle is that the epitaxial Au/Pd interface causes overheating of the nanoparticle by suppressing the melt nucleation and growth.*

**Keywords:** Molecular dynamics simulations, core/shell metallic nanoparticle, melting temperature.

## INTRODUCTION

Bi-metallic nanoparticles are nano-materials with a core/shell structure consisting of different types of atoms. These nano-materials have been the focus of many researchers due to their unique physical and chemical properties that are not observed in mono-metallic and bulk materials [1-3]. This new material family is needed in the micro-electronics industry due to the increasing use of low-size materials and the thermal stability of bi-metallic nanoparticles against melting. In particular, these materials are used in many application areas of nanotechnology such as sensors, semiconductors, bio-markers, nano-catalysis and optoelectronics [4-9]. Therefore, understanding the thermal stability, melting mechanism and structural properties of bi-metallic materials plays an important role in miniaturization of these materials.

Real-time observation and analysis of the physical mechanisms underlying many special characteristics of the dynamic, structural and thermodynamic properties of bi-metallic nanoparticles (NP) are not readily available experimentally. Due to the rapid development of computational algorithms and available computational resources for small-sized nanocrystals, MD simulations, along with other computational methods, occupies an increasingly important place in this rapidly developing and expanding field [10]. Therefore, MD simulations are a suitable tool for investigating the structural evolution of metallic nanocrystals under the influence of temperature at the atomic scale [11]. Recently, many researchers have reported studies on the melting mechanism of bi-metallic nano-materials using MD simulations [11-17]. For example, Zhang et al. [14] reported superheating of lead nanofilm (NF) in an aluminum matrix using MD simulation. Shvets et al. [16] studied the thermal stability of metallic NPs with a core-shell structure. Shi et al. [17] investigated the melting process of silver nanowire (NW) with nickel coating by using MD simulation. They reported that silver NWs with nickel coating overheats like NPs

and NFs. In this study, we present a MD simulation study on the thermal, structural and dynamic properties of Au NPs with Pd-coating.

## EXPOSITION

In this study, all MD simulations for Au NPs with Pd-coating were performed using the parallel code of DL_POLY 2.0 [18] MD simulation package. The success of classical MD simulations depends to a large extent on the pair potential that define the interaction between atoms in the system. SC potential was used to describe interactions between atoms in MD simulations. Based on the SC potential, the total potential energy of a finite system with $N$ atoms is written as [19]

$$U_{tot} = \sum_i U_i \,, \tag{1}$$

$$U_i = \sum_i \varepsilon \left[ \sum_{j \neq i} \frac{1}{2} V(r_{ij}) - c\, \rho_i^{1/2} \right], \tag{2}$$

$$V(r_{ij}) = \left( \frac{a}{r_{ij}} \right)^n, \tag{3}$$

$$\rho_i = \sum_{j \neq i} \varphi(r_{ij}) = \sum_{j \neq i} \left( \frac{a}{r_{ij}} \right)^m \tag{4}$$

where $r_{ij}$ is the distance between the atoms $i$ and $j$, and $V(r_{ij})$ is the pair potential between the atoms representing repulsive interactions in total energy. $\rho_i$ is the energy density function of the atom $i$, representing the attractive term in total energy. To construct the potential for the binary alloy state, Au-Pd from the corresponding SC potentials for the elemental state, we used the following combination rule [20,21].

$$a_{ij} = \frac{a_i + a_j}{2}, \tag{5}$$

$$\varepsilon_{ij} = \sqrt{\varepsilon_i \varepsilon_j}\,, \tag{6}$$

$$n_{ij} = \frac{n_i + n_j}{2}, \tag{7}$$

$$m_{ij} = \frac{m_i + m_j}{2}. \tag{8}$$

In this study, the parameters of the quantum SC (QSC) potential, which were the re-parameterized form of SC potential by Cagin et al. [20], were used. The QSC potential parameters $\varepsilon$, $c$, $a$, $n$ and $m$ for Au and Pd are listed in Table 1 [20].

***Table 1.*** *The QSC potential parameters for Pd and Au [20].*

| Metal | $n$ | $m$ | $\varepsilon$ (eV) | $c$ | $a$ (Å) |
|---|---|---|---|---|---|
| Pd | 12 | 6 | $3.2864 \times 10^{-3}$ | 148.205 | 3.8813 |
| Au | 11 | 8 | $7.8052 \times 10^{-3}$ | 53.581 | 4.0651 |

A model NP with core (Au)/shell (Pd) structure used in MD simulations were obtained by cutting from a large face-centered cubic (fcc) structure. The Au NPs was coated by Pd in a "cube on cube" orientation, that is Au[100]//Pd[100], Au[110]//Pd[110], and so on. In this study, two different configurations of NPs with core/shell structure were used to investigate the shell effect. A sample of the initial atomic configuration of Au NP with Pd-coating is displayed in Figure 1. We also simulated Au NP without coating to perform a comparison. The numbers of atom of the NPs used in the simulations are listed in Table 2. In addition, simulations of the bulk system were performed with 5324 Au atoms.

***Table 2.*** *The number of atoms of NPs used in MD simulations.*

| Number of atoms | Coated NP-1 | Coated NP-2 | Uncoated NP |
|---|---|---|---|
| Total | 5769 | 5769 | 5769 |
| Core (Au) | 3511 | 1433 | |
| Shell (Pd) | 2258 | 4336 | |

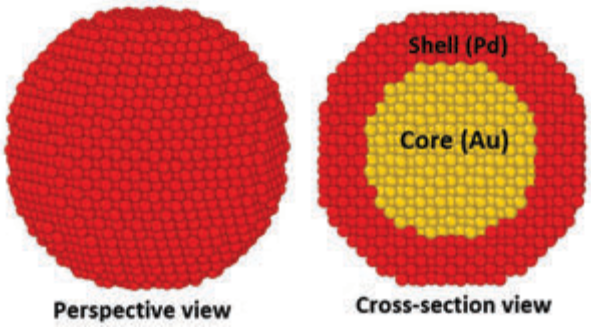



***Fig. 1.*** *Perspective and cross-sectional image representation of the atomic configuration of the model Au NP with Pd-coating.*

To account for the surface effects of the NPs, the periodic boundary conditions in the MD

simulations were not applied in any direction. The samples with atoms in ideal fcc positions were relaxed with the following annealing period: first, the system was heated to 300 K with a heating rate of 0.05 K/ps, and then cooled to 0 K using the same rate. NPs were simulated under the constant volume and constant temperature (NVT) canonical ensemble. For the bulk system, MD simulations were performed under isothermal-isobaric (NPT) ensemble with periodic boundary conditions. From 100 to 1800 K for NPs and bulk, each system was subjected to a heating treatment consisting of a series of MD simulations with a temperature increase of ΔT = 100 K. Around the melting point, the temperature increment was reduced to ΔT =10 K, taking into account large temperature fluctuations. For each simulation, 50 ps was employed for equilibration followed by 50 ps production time to produce time-based properties at each temperature. The classical equations of motion were integrated using the Leapfrog Verlet method with a time step of 1 fs. The desired temperature and ambient pressure were controlled by the Nose-Hoover thermostat and Berendsen [22,23] approach, respectively.

The phase of the system can be determined by examining the characteristic behavior of the pair distribution function (PDF). The expression of the PDF, $g(r)$, is as follows [21]:

$$g(r) = \frac{\Omega}{N^2} \langle \sum_i^N \sum_{i \neq j}^N \delta(r - r_{ij}) \rangle \qquad (9)$$

where $N$ and $\Omega$ represent the number of atoms, and volume of the simulations cell, respectively. In order to test the accuracy of the potential functions used to describe the interactions between atoms in MD simulations, the PDF obtained from the MD for bulk Au in Figure 2 was compared with the experimental data [24]. As can be seen from Figure 2, the MD result is in very good agreement with the experimental one. This result shows that the QSC potential accurately describes Au-Au interactions in MD simulations. Also, both MD and experimental PDFs show the characteristic behavior of liquid phase. The best-known way for observing the first-order phase transition during the heating process in NPs and the bulk system is to monitor the variation of the energetic curve with temperature.

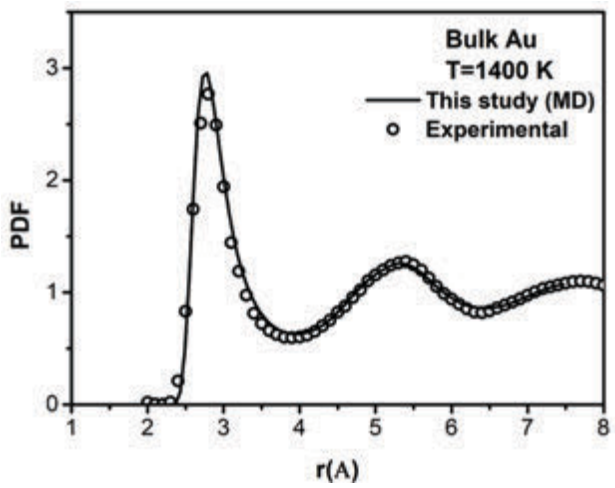



***Fig. 2.*** *The PDFs of liquid bulk Au simulated under 0 GPa pressure at 1400 K (experimental data under 0 GPa pressure at 1423 K[24]).*

Generally, the temperature at which the sudden change in this curve occurs is defined as the melting point of the system. In this study, the melting temperature of the NPs and the bulk system was determined following this method. In this context, the temperature-dependent changes of the potential energies of the uncoated NP, coated NP-1 and NP-2, and the bulk system are shown in Figure 3.

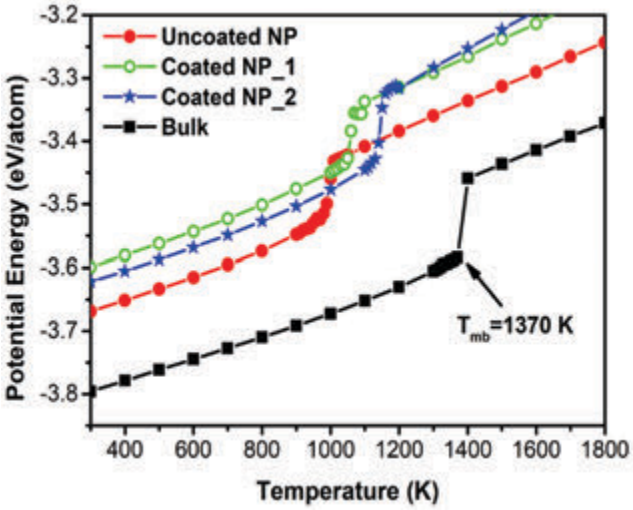



***Fig. 3.*** *Temperature-dependence of the potential energy for Au NPs and bulk system.*

The potential energy curve for each system changes almost linearly with temperature up to their melting point. A sudden increase around melting point is observed in all curves. After the melting point, the potential energy increases linearly with temperature for all systems. For uncoated NP, coated NP-1 and NP-2, and the bulk system, the melting temperatures

predicted from the sudden change in potential energy are 990 K, 1050 K, 1140 K, and 1370 K (experimental melting point, $T_{expt.}$=1330 K for bulk Au [25]), respectively. The melting temperature obtained from the MD simulations is in good agreement with the experimental value. This demonstrates the accuracy of the MD results. All NPs have lower melting temperatures than that of bulk. Uncoated NP has the lowest melting temperature while coated NP-2 has the highest one. Also, the potential energy of the bulk is lower than that of NPs at all temperatures. The potential energies of uncoated NP, coated NP-1 and NP-2 at 300 K are -3.66 eV, -3.59 eV and -3.62 eV, respectively. Uncoated NP has the lowest potential energy, while uncoated NP-1 has the largest.

To observe the structural changes of NPs during the melting process, PDFs of uncoated NP, coated NP-1 and NP-2 are given in Figure 4 (a-c), respectively. At 300 K and 900 K, all nanoparticles exhibit narrow and sharp peaks, which are the characteristic behavior of the crystalline phase. With the increase in temperature, the peak heights of the PDFs decrease, while the widths of the peaks increase. As can be seen from Figure 4, the characteristic behavior of PDFs at the melting point of each NPs reflects neither crystalline nor liquid phase. This can be explained by the knowledge that a system has two phases together at its melting point. After the melting point, the PDFs for uncoated NP, coated NP-1 and NP-2 show the characteristic behavior of the liquid phase at 1000 K, 1060 K and 1150 K, respectively.

Diffusion coefficient ($D$), a measure of atomic mobility, can be obtained from positions and velocities containing atomic trace information in MD simulations. The $D$ is expected to be related to the path taken by the particle over time $t$. This suggests that the square displacement for large $t$ values is linearly linked. The $D$ can be calculated from the Einstein correlation given as:

$$D = \frac{1}{6t} lim\langle r^2(t)\rangle \,. \qquad (10)$$

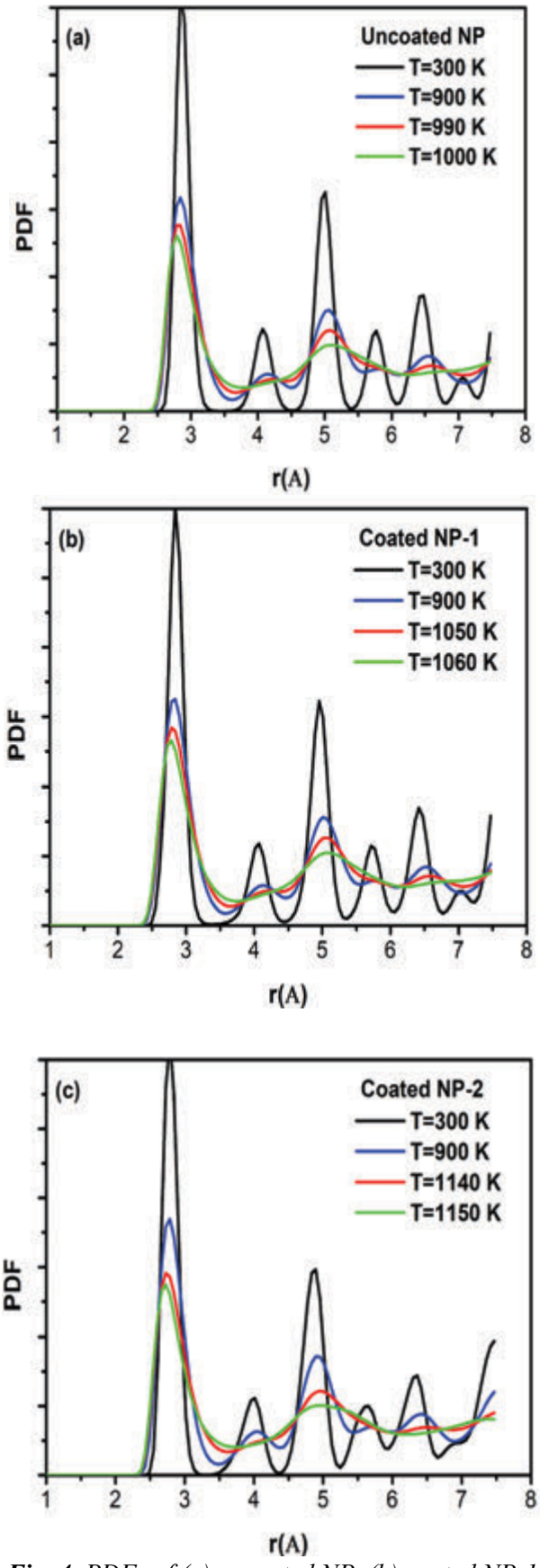



***Fig. 4.*** *PDFs of (a) uncoated NP, (b) coated NP-1 and (c) NP-2 at different temperatures.*

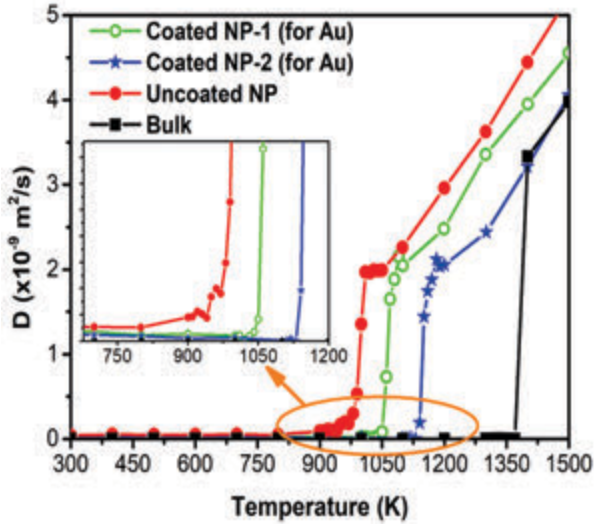



***Fig. 5.*** *Diffusion coefficients of uncoated NP, coated NP-1 and NP-2 as a function of temperature.*

Figure 5 shows the temperature dependent variation of the diffusion coefficients of Au atoms for uncoated NP, coated NP-1 and NP-2. While the Ds of Au atoms are approximately zero at low temperatures for all NPs, a sudden increase in their values is observed at melting points. This increase indicates that the metallic bonds of the Au atoms that make up the NP are broken and they get rid of their lattice and gain mobility. For uncoated NP, Au atoms diffuse at lower temperature, while coated NPs diffuse at higher temperature. As can be seen from the inset of Figure 5, there is an increase in the Ds of Au atoms in the uncoated NP, albeit in a small scale, before the melting point. This increase in the D observed before the melting is an indication that a surface melting has occurred in the NP. However, the D of the coated NPs is around zero before the melting point as in the bulk system, indicating that they melt homogeneously without performing surface melting. These results show that the epitaxial Au/Pd interfaces formed in NP-1 and NP-2 with the core (Au)/shell (Pd) structure suppress the surface melting and delay the liquid nucleation, causing the NP to overheat. This effect becomes even more effective as the thickness of the shell (ie, as the number of Pd atoms increases). Because the melting point of NP-2, which has a larger shell thickness, is 1140 K, while the melting point of NP-1 is 1050 K.

The simplest way to examine the dynamic behavior of NPs during the heating process is to analyze snapshots of the atomic order at different temperatures. Snapshots of the atomic configuration taken at different temperatures for each NP are shown in Figure 6.

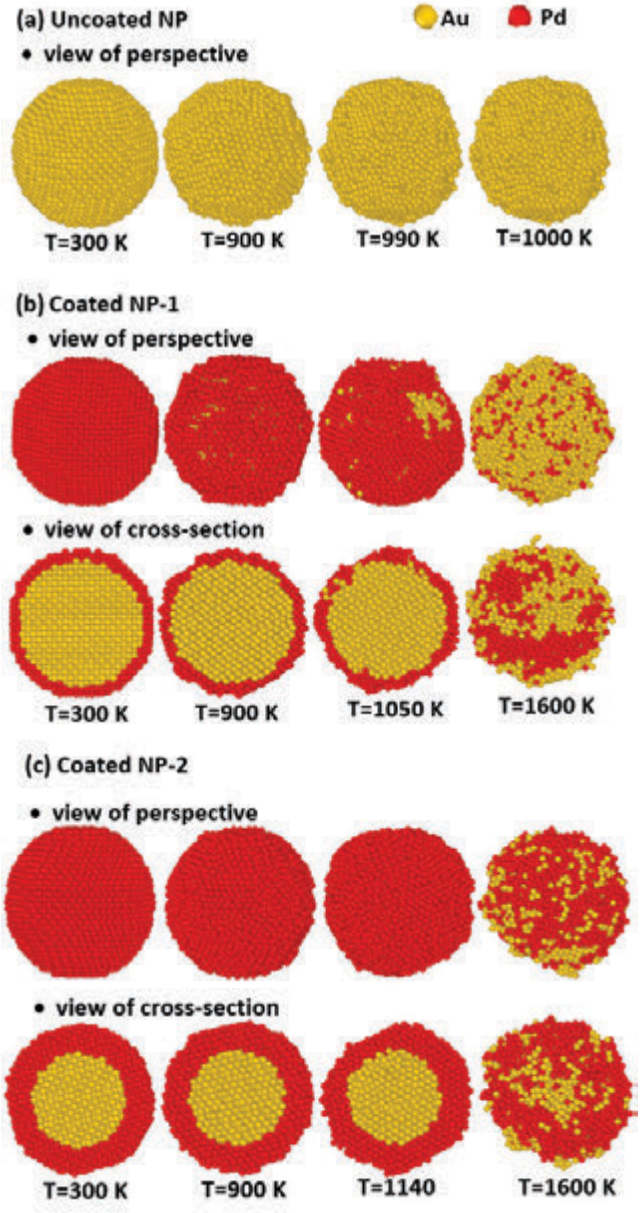



***Fig. 6.*** *Snapshots of atomic configurations of (a) uncoated NP, (b) coated NP-1 (c) coated NP-2 at different temperatures.*

As can be seen from the images, all NPs retain their crystalline form at 300 K. With increasing temperature, the distance between atoms increases and metallic-bonds are broken. This causes the atomic order to be disrupted. In addition, the cross-section views show that the core/shell structure of NP-1 and NP-2 is disrupted at temperatures above the melting point due to the increased diffusive motion.

## CONCLUSION

In this study, the structural and dynamic properties of Au NPs with Pd-coating were investigated during the melting process using classical MD simulation with QSC potentials. The results show that the uncoated Au NP melts at a lower temperature than the coated Au NPs. This can be explained by the fact that the epitaxial Au/Pd interfaces formed in the NP with the core/shell structure suppress the surface melting, leading to overheating of the coated NP. In addition, this effect becomes more effective depending on the thickness of the shell (ie, as the number of Pd atoms increases) and plays an important role on the thermal stability of the NP. While the coated NPs maintain their initial core/shell structures up to their melting temperatures, the volume of the NP increases with the increase of the interatomic distance after the melting. This causes the crystal structure to deteriorate and the core/shell diffusion to take place more intensely.

## REFERENCE


[1] S. Alayoglu, F. Tao, V. Altoe, Catal. Lett., 141 (5), 633-640 (2011).

[2] Chaudhuri R. Gh., Chem. Rev., 112 (4), 2373–2433 (2012).

[3] W. Y. Yu, G. M. Mullen, D. W. Flaherty, J. Am. Chem. Soc., 136 (31), 110070-11078 (2014).

[4] H. Gleiter, Acta Mater., 48, 1 (2000).

[5] M. Alcoutlabi and G.. B. McKenna, J. Phys.: Condens. Matter., 17, 461 (2005).

[6] H. Jiang, K. Moon, H. Dong, F. Hua, and C. P. Wong, Chem. Phys. Lett., 429, 492 (2006).

[7] S. J. M. Rosales, C. F. Navarro, E. P. Tijerina, Phys. Chem. B., 110 (26), 12884–12889 (2006).

[8] M. Tsuji, N. Miyamae, S. Lim, Cryst. Growth Des., 6 (8), 1801–1807 (2006).

[9] S. W. Baek, G. Park, J. Noh Nano., 8 (4), 3302–3312 (2014).

[10] I. A. Lyashenko, V. N. Borysiuk, N. N. Manko, Cond. Matt. Phys., 17, 23003: 1– 11 (2014).

[11] Z. Yang, X. Yang, Z. Xu, J. Phys. Chem. C., 112 (13), 4937–4947 (2008).

[12] J. Broughton, Phys. Rev. Lett., 67, 2990 (1991).

[13] Z. H. Jin, H. W. Sheng, and K. Lu, Phys. Rev. B, 60, 141 (1999).

[14] L. Zhang, Z. H. Jin, L. H. Zhang, M. L. Sui, and K. Lu, Phys. Rev. Lett., 85, 1484 (2000).

[15] J. Broughton, Phys. Rev. B, 46, 2523 (1992).

[16] U. Shvets, V. Borysiuk, B. Natalich, Int. Sc. J. Math. Model., III (2), 66-69 (2019).

[17] D. W. Shi., L. M. He, L. G. Kong, H. Lin and L. Hong, Chin. J. Phys., 47 (4) 502-510 (2009).

[18] W. Smith, T.R. Forester, J. Mol. Graph. 14, 136–141 (1996).

[19] A.P. Sutton, J. Chen, Philos. Mag. Lett. 61, 139–146 (1990).

[20] T. Çagın, Y. Qi, H. Li, Y. Kimura, H. Ikeda, W. L. Jonhson, and W. A. Goddard III, MRS Symp. Ser. 554, 43 (1999).

[21] U. Domekeli, S. Sengul, M. Celtek, C. Canan., Philos. Mag. 98, 371–387 (2018).

[22] S. Nose, J. Chem. Phys. 81, 511–519 (1984).

[23] H. J. C. Berendsen, J. P. M. Postma, W.F. van Gunsteren, A. Di Nola, J. R. Haak, J. Chem. Phys. 81, 3684–3690 (1984).

[24] Y. Waseda, The Structure of Non-Crystalline Materials-Liquids and Amorphous Solids. New York: London: McGraw-Hill, (1981).

[25] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics. New York: John Wiley & Sons Inc., (1986).

# INVESTIGATION OF THE MELTING PROCESS OF BCC IRON USING DIFFERENT INTERATOMIC POTENTIALS

**Sedat Sengul[1], Unal Domekeli[1], Murat Celtek[2]**

[1]*Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*
[2]*Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*

**Abstract**

*In our study, we focused on the melting process of bcc iron element. In order to follow this process, Finnis Sinclair (FS), embedded atom method (EAM) and tight-binding (TB) many-body potentials, which were widely used in the literature, was preferred. Classical molecular dynamics (MD) simulations were performed with DLPOLY 2.0 open-source code. Volume-temperature, energy-temperature, pair distribution function (g(r)) and pair analysis method were used to explain the changes in the structure of bcc iron during the heating process. It was observed that all three potentials correctly predicted their physical properties such as lattice parameter and cohesive energy. Compared to others, there appears to be a good agreement between the liquid g(r) curve obtained from the TB potential and the experimental result reported in the literature. However, during the heating process, it was observed that while the EAM and Tersoff potentials yield the properties of bcc iron reliably, the TB potential could not predict the structure of bcc iron at low temperatures and the system was subjected to a solid-solid phase transition at higher temperatures. We believe that the results of this study will provide helpful information on which potential can more accurately explain the interactions between iron atoms in MD simulations.*

**Keywords:** Iron, Finnis Sinclair potential, Tight-binding potential, Embedded atom method, Pair analysis.

## INTRODUCTION

Today, as a result of scientific and technological developments, there have been great advances in the field of computational science, both in terms of software and source and hardware. Thanks to these positive developments, many theoretical kinds of research that have been difficult to experimentally and not fully understood for several decades have been opened to work with simulations in a computer environment, and calculation methods based on computer simulations have been developed [1–3]. One of the most important points of computer simulation techniques is to describe the interactions of each particle with another at the atomic level. A good representation of the behavior of the system in terms of interaction potential ensures that the data obtained from the molecular dynamics (MD) simulations are in agreement with the experimental results [4]. Many simulation methods, from quasi-experimental to quantum mechanical computation, have been developed to mimic the behavior of atoms in the scientific world. Among them, especially the MD simulations leading experimental studies in examining the thermodynamic and structural properties of a material are one of the most used methods. We used DLPOLY 2.0 open source software as the classic MD simulation package [5]. In our study, we focused on MD simulations of the element iron (Fe), which is widely used in all areas of technology. Some of the reasons why Fe is preferred are as follows; It has a lower price compared to other metals and has high strength. In addition, the automotive industry, ship hull construction, and building construction are among the areas where Fe is used the most. Since it is of great importance to understand the mechanism and kinetics of the solid-solid phase transition observed in the heating process in Fe, scientists have conducted many experimental and atomic simulation studies on it [6–9]. The melting process of bcc Fe has been studied in detail by using FS [10], EAM [11] and TB [12]

potentials, which are popular in the literature, since it is of great importance to accurately describe the interactions between atoms in the system in MD simulations.

## EXPOSITION

Since the theoretical knowledge and parameters of the three different potentials we used will take up a lot of space, they are not included here. Readers can find detailed information about these potentials from the relevant sources for FS [10], EAM [2, 11, 13, 14] and TB [12, 15–18]. The cubic simulation box contains 6750 Fe atoms conforming to the bcc crystal lattice and periodic boundary conditions are applied to the x-, y- and z-directions of the box. Temperature and pressure were kept under control with the Berendsen thermostat and barostat and the MD simulation timestep was set to 1 fs. The heating rate is chosen as 10 K/ps. The system was heated at 50 K intervals from 0 K to 2500 K to obtain the liquid phase under an NPT ensemble. The EAM, FS and TB potentials estimate the lattice parameter ($a^{exp} = 2.870$ Å) and cohesive energy ($E_{coh}^{exp} = -4.280$ eV/atom) values of bcc Fe as $a^{EAM} = 2.875$ Å, $a^{FS} = 2.872$ Å and $a^{TB} = 2.859$ Å, $E_{coh}^{EAM} = -4.290$ eV/atom, $E_{coh}^{FS} = -4.280$ eV/atom and $E_{coh}^{TB} = -4.228$ eV/atom, respectively. Although the results seem close to each other, the results of the EAM and FS potentials show better agreement with the experimental results compared to the TB potential results. Volume-temperature (V-T) and energy-temperature (E-T) curves obtained using all three potentials during the heating process are shown in Figure 1(a) and (b), respectively. The first thing that stands out here is that all three potentials predict the melting point of bcc Fe at different temperatures. The melting points determined from the EAM-, FS-, and TB-MD simulations are 2300 K, 1950 K, and 1750 K, respectively, which deviate from the experimental value ($T_m^{exp} = 1811$ K) by 27.00%, 7.68%, and -3.37%, respectively. These results indicate that the TB and FS potentials predict the melting point of Fe more closely to the experiment than the EAM potential. The second striking thing is that while the V-T (for low temperatures only) and E-T (up to near melting points) values obtained from the EAM and FS potentials are very close to each other, the results of TB potential differ from them. Another interesting observation is that there is a slight deviation around the melting point in both curves obtained from the TB potential. It is difficult to get information from these graphs as to whether this is a statistical error or a sign of a solid-solid phase transition, but this point will be addressed later by interpreting the different analysis results.

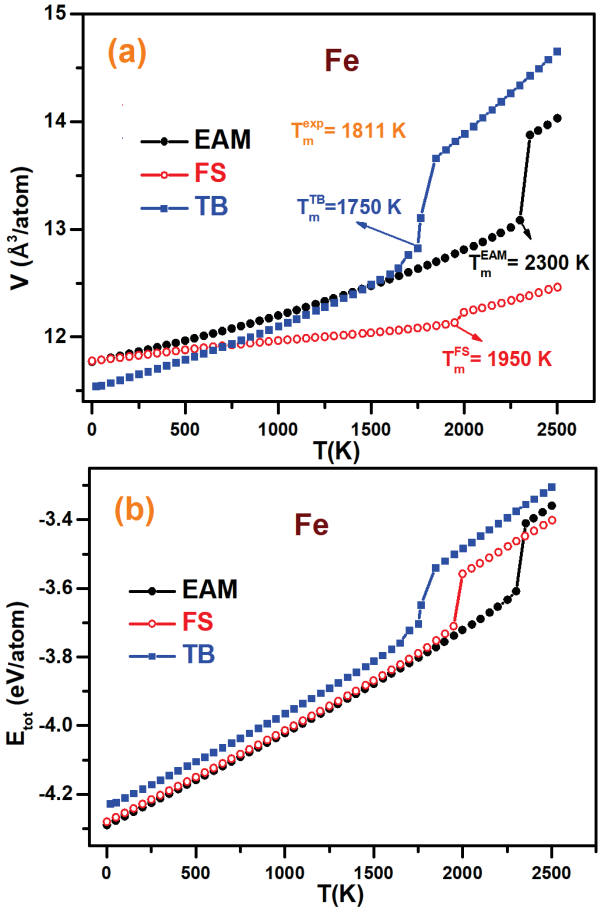



***Fig. 1.*** *Variation of (a)V and (b) E values obtained from EAM, FS and TB potentials as a function of temperature during the heating process.*

How atoms are arranged in space, that is, their atomic-scale structure, is characteristic of the fundamental material. The analysis of pair distribution functions (PDF or g(r) is one of the most widely used analysis methods to characterize the atomic scale structure of materials with limited structural coherence. The form of the g(r) function used in MD simulations is given as follows [19–21].

$$g(r) = \frac{\Omega}{N^2}\left\langle \frac{\sum_i n_i(r)}{4\pi r^2 \Delta r} \right\rangle, \qquad (1)$$

where Ω represents the volume of the system and N represents the total number of atoms in the system. n(r) indicates the number of particles in a spherical volume element of thickness Δr. Figure 2 depicts the comparison of liquid g(r) calculated from the TB potential (1850 K) with the experimental g(r) curve (1833 K). EAM and FS potential results are not included here because they have melting point at temperatures higher than the experimental value. It can be seen from the figure that there is a good agreement between the TB-MD simulation results and the experimental g(r). This indicates that the TB potential can successfully explain the structural properties of liquid Fe.

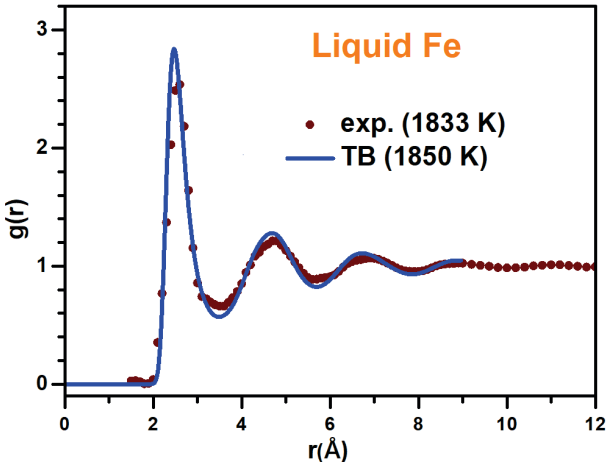



***Fig. 2.*** *Comparison of g(r) calculated from TB-MD simulations at 1850 K with experimental g(r) (1833 K).*

The g(r) calculated using three potentials at different temperatures (500, 1000, 1500, 2000 and 2500 K) are shown in Figure 3. At 500, 1000 and 1500 K, the g(r) calculated from the EAM- and FS-MD simulation are very similar to each other and produce characteristic peaks special to bcc structures. On the other hand, g(r) calculated from the TB-MD simulation produces peaks that are completely different from the others and specific to the hcp/fcc crystal structures. This is an interesting situation and is thought to be due to the TB potential parameters being fitted to the physical properties of γFe at high temperatures [12]. Another reason may be due to the instability of Fe during the heating process, such as bcc-fcc and fcc-bcc phase transitions. In addition, the g(r)'s calculated from the EAM- and TB-MD simulation at 2500 K are similar, but the first peak of g(r) calculated from the FS has a greater width than the others.

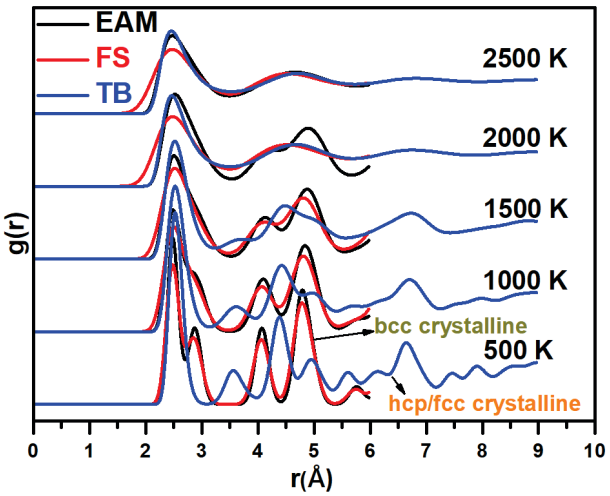



***Fig. 3.*** *g(r) curves calculated at different temperatures from the EAM-, FS- and TB-MD simulations.*

It is of great importance to know what kind of changes occur in the microstructure of the sample examined during the heating or cooling processes [4]. However, g(r) analyzes are insufficient to obtain information about small clusters of atoms in the system. Thus, in our study, Honeycutt-Andersen (HA) bond type index analysis [22, 23], which explains the relationship between bonded pairs and their neighboring atoms, was used in order to analyze the changes in the microstructure of the system in a more detailed and reliable way. In this method, 1421 bonded pairs represent fcc crystal, 1421+1422 bonded pairs hcp crystal, 1441+1661 bonded pairs bcc crystal, 1551 bonded pairs icosahedral and 1431+1541 bonded pairs represent defective icosahedral order, and other uncommon bonded pairs are not given here. The fraction of HA bonded pairs most prevalent in the system during the EAM-MD, FS-MD, and TB-MD simulations is shown in Figure 4 as a function of temperature. The temperature-dependent fraction of HA bonded pairs obtained from the EAM-MD and FS-MD simulation is almost the same. A noticeable change in the fraction of all bonded pairs is observed at the melting point. At this point, while the fraction of 1431 and 1551 bonded pairs, which are more common in liquid and amorphous systems, increase sharply, a significant decrease is observed in the fraction of all other pairs.

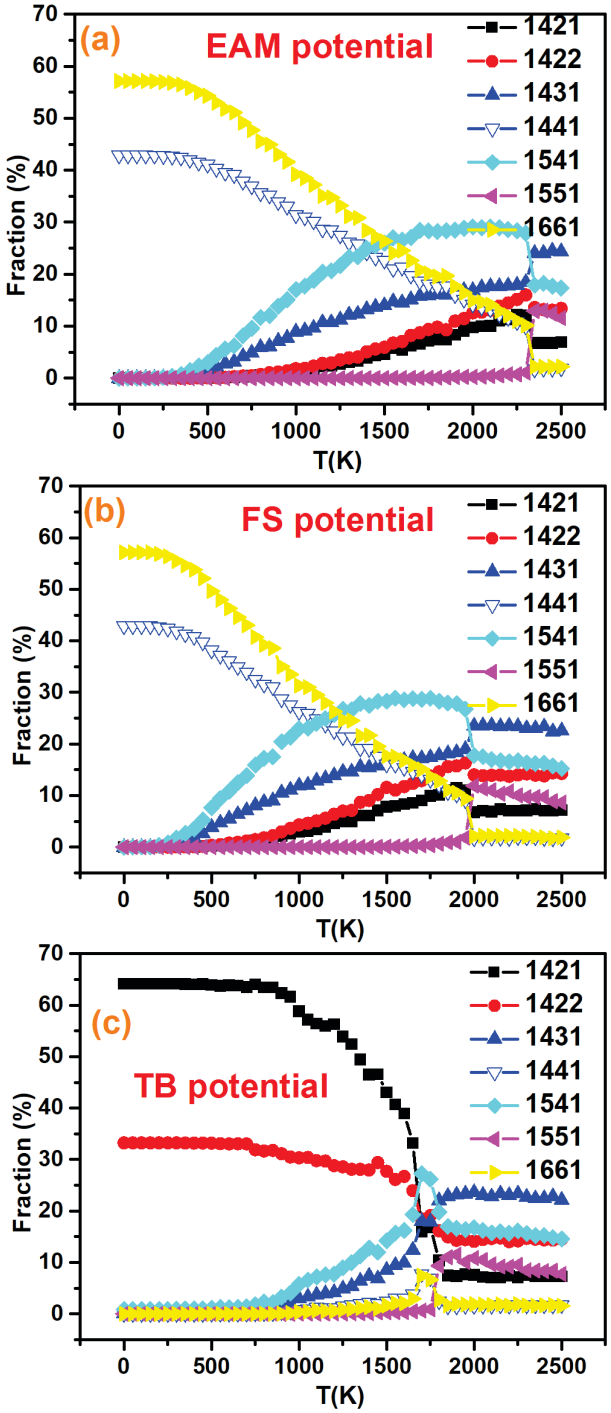



***Fig. 4.*** *Fraction of HA indices most commonly found in the system throughout the (a) EAM-MD, (b) FS-MD, and (c) TB-MD simulations.*

This is a clear indication of the first-order solid-liquid phase transition at these points of the system. Another point is that both potentials preserve the structure of bcc Fe up to its melting point, and in fact, the solid-solid phase transitions observed experimentally during the heating process of Fe are not observed. The situation is much different in the TB-MD simulation results shown in Figure 4(c).

Although the initial system was formed according to the bcc crystal lattice, it is seen that the fraction of 1421 and 1422 bonded pairs around 0 K is around 100% and the fraction of 1441+1611 bonded pairs is around 0%. While there is almost no change in the difference of bonded pairs in the system until around 700 K with increasing temperature, a decrease begins in the fractions of 1421 and 1422 bonded pairs, while an increase in the fraction of 1431 and 1541 bonded pairs begins at the same rate. There is no noticeable increase in the number of 1441 and 1661 bonded pairs representing the bcc structure, but interestingly, a marked jump between 1500 K and 1750 K is observed in the fraction of these pairs and 1541 bonded pairs. This abnormal behavior is also consistent with the V-T and E-T results discussed above. The results for all three potentials at different temperatures (500 K, 1500K and melting temperature) are visualized using the OVITO software [24], and the distributions of bcc, fcc and hcp crystalline atoms in the system are shown in Figure 5, 6 and 7. Supporting the results given in Figure 4, the snapshots obtained from the EAM-MD and FS-M simulation are quite similar to each other. The distribution of atoms with bcc order is always dominant up to the melting point, while the distribution of atoms with the other hcp and fcc crystal order increases slightly with increasing temperature. This is an indication that the EAM and FS potentials maintain the structure of bcc Fe throughout the melting process. Considering the snapshots taken from the TB-MD simulation, it is seen that the atoms in the hcp and fcc crystal arrangement are more at low temperatures, while the distribution of atoms in bcc crystal order is sparse. Interestingly, with increasing temperature, the number of atoms in hcp and fcc crystal order decreases, while the number of atoms in bcc order increases significantly. Especially the visible increase in the number of bcc atoms at 1750 K sheds light on the reason for the abnormal change observed in this temperature range in the other analysis results discussed above. In the light of these findings, in our next study, we will focus on investigating the bcc-hcp/fcc phase transition of Fe under different pressures using the TB potential.

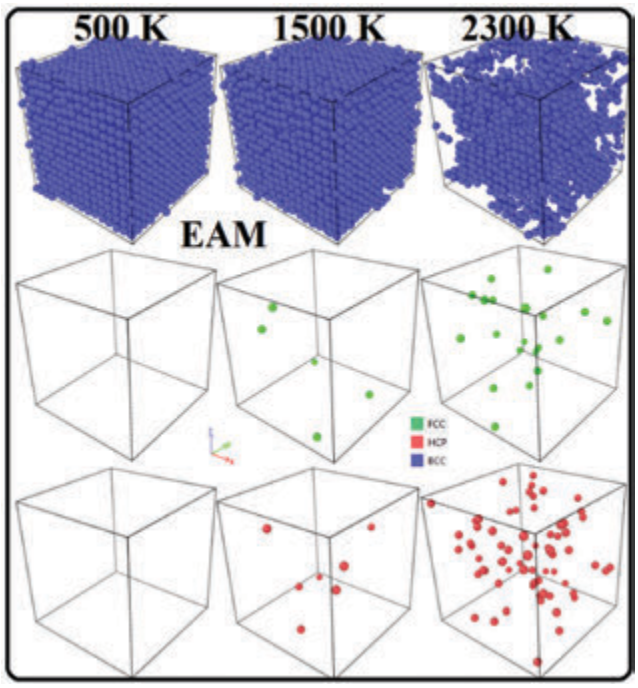



***Fig. 5.*** *Snapshots showing the distribution of atoms arrayed in bcc, hcp, and fcc crystalline patterns at 500 K, 1500 K and 2300 K throughout the EAM-MD simulations.*

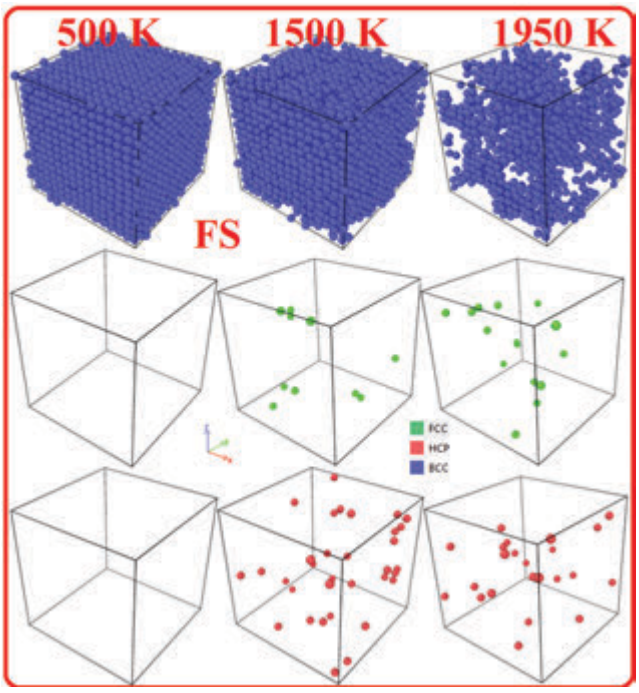



***Fig. 6.*** *Snapshots showing the distribution of atoms arrayed in bcc, hcp, and fcc crystalline patterns at 500 K, 1500 K and 1950 K throughout the FS-MD simulations.*

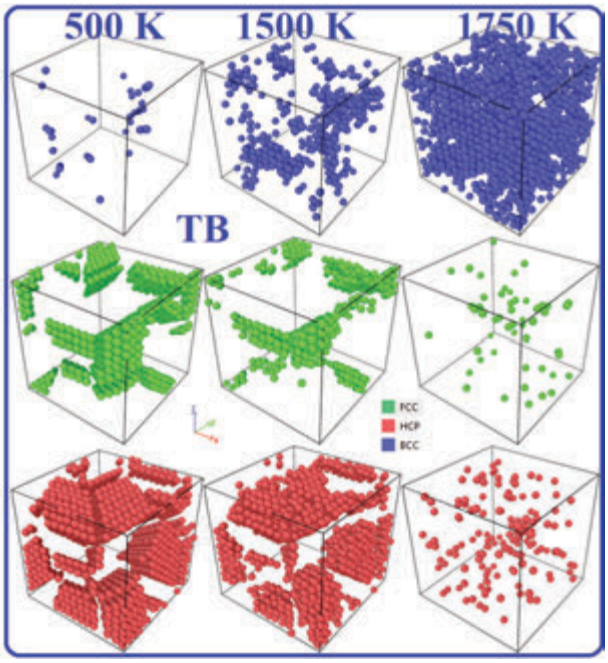



***Fig.7.*** *Snapshots showing the distribution of atoms arrayed in bcc, hcp, and fcc crystalline patterns at 500 K, 1500 K and 1750 K throughout the TB-MD simulations.*

## CONCLUSION

In this study, the melting process of Fe has been investigated by MD simulations using EAM, FS and TB many-body potentials. At low temperatures, it has been observed that the EAM and FS potentials predicted the physical properties of Fe element such as lattice parameter and cohesive energy better than the TB potential. On the other hand, the TB potential predicts the melting point of Fe more accurately than other potentials. The g(r) of liquid Fe calculated from the TB-MD simulations shows good agreement with the experimental g(r) reported in the literature. The EAM and FS potentials maintain the structure of bcc Fe throughout the heating process, while the TB potential predicts the structure of Fe to be stable in the hcp/fcc crystal order even at low temperatures. The results from the EAM-MD and FS-MD simulations are very similar, and their HA analysis results show that 1441 and 1661 bonded pairs are the most dominant pairs during the heating process. In TB-MD simulations, 1421 and 1422 bonded pairs were the most dominant pairs, while a significant increase was observed in 1441, 1661 and 1541 bonded pairs with increasing temperature, especially around the melting point. We believe that our results will provide useful information to

the literature in MD simulation studies of Fe under different conditions.

## REFERENCE


[1] Sheng HW, Luo WK, Alamgir FM, et al. Atomic packing and short-to-medium-range order in metallic glasses. Nature 2006; 439: 419–425.

[2] Celtek M, Sengul S. Effects of cooling rate on the atomic structure and glass formation process of Co90Zr10 metallic glass investigated by molecular dynamics simulations. Turkish J Phys 2019; 43: 11–25.

[3] Celtek M. Saf Kalsiyum Elementinin Isıtma Sürecinin Moleküler Dinamik Benzetim Yöntemi ile İncelenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilim Derg 2021; 10: 803–815.

[4]Çeltek M, Güder V. Sıvı Vanadyumun Kristalizasyon Sürecine Soğutma Oranı Etkisinin Moleküler Dinamik Benzetim Metodu ile İncelenmesi. Erzincan Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Derg 2020; 13: 730–745.

[5] Smith W, Forester TR. DL_POLY_2.0: A general-purpose parallel molecular dynamics simulation package. J Mol Graph 1996; 14: 136–141.

[6] Liu C-M, Cheng H-C, Chao C-Y, et al. Phase transformation of high temperature on Fe–Al–Mn–Cr–C alloy. J Alloys Compd 2009; 488: 52–56.

[7] Ou X. Molecular dynamics simulations of fcc-to-bcc transformation in pure iron: a review. Mater Sci Technol 2017; 33: 822–835.

[8] Tateyama S, Shibuta Y, Suzuki T. A molecular dynamics study of the fcc–bcc phase transformation kinetics of iron. Scr Mater 2008; 59: 971–974.

[9] Jeon JB, Lee B-J, Chang YW. Molecular dynamics simulation study of the effect of grain size on the deformation behavior of nanocrystalline body-centered cubic iron. Scr Mater 2011; 64: 494–497.

[10] Finnis MW, Sinclair JE. A simple empirical N -body potential for transition metals. Philos Mag A 1984; 50: 45–55.

[11] Zhou XW, Johnson RA, Wadley HNG. Misfit-energy-increasing dislocations in vapor-deposited CoFe/NiFe multilayers. Phys Rev B 2004; 69: 144113.

[12] Kojima R, Susa M. Second moment approximation of tight-binding potential for γFe applicable up to 1700 K. Sci Technol Adv Mater 2004; 5: 497–502.

[13] Celtek M, Sengul S, Domekeli U, et al. Dynamical and structural properties of metallic liquid and glass Zr48Cu36Ag8Al8 alloy studied by molecular dynamics simulation. J Non Cryst Solids 2021; 566: 120890.

[14] Celtek M. The effect of atomic concentration on the structural evolution of Zr100-xCox alloys during rapid solidification process. J Non Cryst Solids 2019; 513: 84–96.

[15] Cleri F, Rosato V. Tight-binding potentials. Comput Simul Mater Sci 1991; 205: 233–253.

[16] Senturk Dalgic S, Celtek M. Liquid -to-glass transition in bulk glass-forming Cu55-xZr45Agx alloys using molecular dynamic simulations. EPJ Web Conf 2011; 15: 03009.

[17] Celtek M, Sengul S, Domekeli U. Glass formation and structural properties of Zr50Cu50-xAlx bulk metallic glasses investigated by molecular dynamics simulations. Intermetallics 2017; 84: 62–73.

[18] Sengul S, Celtek M, Domekeli U. Molecular dynamics simulations of glass formation and atomic structures in Zr60Cu20Fe20 ternary bulk metallic alloy. Vacuum 2017; 136: 20–27.

[19] Celtek M, Domekeli U, Sengul S, et al. Effects of Ag or Al addition to CuZr-based metallic alloys on glass formation and structural evolution: a molecular dynamics simulation study. Intermetallics 2021; 128: 107023.

[20] Kazanc S, Ahmet Celik F, Ozgen S. The investigation of solid–solid phase transformation at CuAlNi alloy using molecular dynamics simulation. J Phys Chem Solids 2013; 74: 1836–1841.

[21] Sengul S, Guder V. Key factors of deformation mechanism of Cu-Ag alloy. J Non Cryst Solids 2022; 576: 121270.

[22] Honeycutt JD, Andersen HC. Molecular Dynamics Study of Melting and Freezing of Small Lennard- Jones Clusters. J Phys Chem 1987; 91: 4950–4963.

[23] Celik FA, Korkmaz ET. Molecular dynamic investigation of the effect of atomic polyhedrons on crystallization mechanism for Cu-based Cu-Pd and Cu-Pt alloys. J Mol Liq 2020; 314: 113636.

[24] Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO-the Open Visualization Tool. Model Simul Mater Sci Eng 2010; 18: 015012.

# EVOLUTION OF THE ATOMIC STRUCTURE OF CADMIUM IN THE HEATING AND COOLING PROCESS

**Sedat Sengul[1], Murat Celtek[2], Unal Domekeli[1]**

[1]*Dept. of Physics, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*
[2]*Faculty of Education, Trakya University, 22030, Edirne – TURKEY*

**Abstract**

*The atomic structure of solid and liquid cadmium was investigated by molecular dynamics simulations using the tight-binding many-body potentials. Four different cooling rates (10, 2, 0.2 and 0.02 K/ps) were chosen to investigate the effect of cooling rate in the rapid solidification process. In order to monitor the structural evolution of the system during the cooling processes, methods such as pair distribution function, structure factor, Honeycutt-Andersen bond type index analysis etc. were used. The melting point of hcp cadmium was found to be 560±10 K, which is in agreement with the experimental melting point of 594.3 K. It was observed that there is a good agreement between the experimental results reported in the literature for liquid cadmium and the total pair distribution function and structure factors we calculated. A first-order phase transition is not observed for rapidly cooled (10 and 2 K/ps) liquid cadmium, whereas a liquid-solid phase transition is observed for slower cooling rates (0.2 and 0.02 K/ps). According to the results of the Honeycutt-Andersen analysis, 1431, 1541 and 1551 bonded pairs, which indicate the existence and development of icosahedral order, are dominant in rapidly cooled systems, while 1421 bonded pairs, which represent fcc-like crystalline structures, dominate in slower cooling systems. It has been observed that the tight-binding many-body potential accurately predicts the physical properties of cadmium at both low and high temperatures.*

**Keywords:** Cadmium, Molecular Dynamics Simulations, Tight-binding potential, Structure factor, Honeycutt-Andersen analysis

## INTRODUCTION

A hexagonal closed packed (hcp) cadmium (Cd) element with a low melting point (594.3 K [1]) has great importance due to its use in many fields. It is found in nature mostly in the form of cadmium sulfide (CdS) or among zinc ores. Cd is almost the only substance that gives the yellow color to paint, soap, textile, and paper. Cadmium sulfate is used as a mild antiseptic in medicine. Moreover, accumulators with Cd electrodes have a longer life than lead batteries. Cadmium bromide and cadmium iodide give silver nitrate collodion plates in photography the iodide necessary for the formation of silver iodide. Moreover, as a pure metal, Cd is an essential material for the construction of control rods in nuclear reactors. It is used as a coating on steel, iron, copper and zinc as it provides resistance to corrosion. Since Cd crystallizes in the hcp structure with an unusually large c/a axial ratio, there are many theoretical and experimental studies on it in the literature [2–4]. This anomaly is observed in solid zinc, where an electronic topological transition usually occurs at high pressures, and this is still a matter of open debate [2]. These unique properties of the element Cd motivated us to further research it. Thus, we focused on the heating and cooling process of Cd. To investigate the effect of cooling rate on Cd microstructure, the system has been cooled with four different cooling rates ($\gamma_1$=10, $\gamma_2$=2, $\gamma_3$=0.2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps). In these processes, the structural evolution of Cd has been followed by the classical molecular dynamics (MD) simulation method. In simulations, the tight binding (TB) many-body potential which is widely preferred for metallic systems in the literature, is employed to express interactions between Cd atoms [5]. We used the OVITO program to monitor and analyze atomic simulation results [6].

## EXPOSITION

In the TB second-moment approximation (SMA), the band energy of the system is

proportional to the square root of the second moment of the state density. The assumptions underlying this approach have been reviewed by Cleri and Rosato [5]. The form of the potential energy ($U_s$) is given as [7–9]:

$$U_s = \sum_i \left(E_i^R + E_i^B\right), \quad (1)$$

where $E_i^R$ and $E_i^B$ represent a repulsive potential and cohesive band energy term, respectively.

$$E_i^R = \sum_{j \neq i} U_{ij}(r_{ij}), \quad (2)$$

$$U_{ij}(r_{ij}) = A \exp\left[-p\left(\frac{r_{ij}}{r_0} - 1\right)\right] \quad (3)$$

$$E_i^B = \left(\sum_{j \neq i} \phi_{ij}(r_{ij}),\right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\phi_{ij}(r_{ij}) = \xi^2 \exp\left[-2q\left(\frac{r_{ij}}{r_0} - 1\right)\right] \quad (5)$$

The values of TB potential parameters for Cd are listed in Table 1.

**Table 1.** TB potential parameters for the Cd [5].

| | ξ (eV) | A (eV) | q | p | $r_0$ (Å) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Cd** | 0.4720 | 0.0416 | 3.9080 | 13.6390 | 2.9800 |

All MD simulations were performed with the DLPOLY software, general-purpose atomic simulation package developed by Smith and his work group [10]. The simulations were performed in a box with 12960 Cd atoms under three-dimensional periodic boundary conditions. The Berendsen thermostat and barostat were used to control temperature and pressure, respectively. The leapfrog Verlet algorithm with a time step of 1 fs (or 0.001 ps) was used to solve the equations of motion. The initial configuration was created by placing the positions of the Cd atoms in the unit cell in accordance with the hcp crystalline arrangement. The isothermal-isobaric (NPT) ensemble (constant number of atoms, pressure, and temperature) was used throughout the heating and cooling process. First, the system was heated with an interval of 50 K from 0 K to 700 K. Then, the liquid system, which was equilibrated by annealing at 700 K, was cooled down to 50 K with four different cooling rates ($\gamma_1$=10, $\gamma_2$=2, $\gamma_3$=0.2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps). In order to determine the melting point more precisely, the region where the first-order phase transition was observed was studied at 10 K intervals. The volume-temperature (V-T) curves obtained during the heating and cooling processes are shown in Figure 1. As expected, the volume of the heated system increases, and there is a sharp increase in the V-T curve around 560 K, representing the solid-liquid phase transition. The calculated melting temperature $T_m^{MD}$ = 560 K shows good agreement with the experimental melting temperature $T_m^{exp}$ = 594.3 K [1], considering the differences between MD simulations and experimental conditions. Interestingly, at lower temperatures (around 200-250 K), there is an unexpected decrease in volume, but it is difficult to conclude whether it is a solid-solid phase transition. This observation will be discussed in the following sections with different analysis methods. We will consider the cooling process under two main headings; the first is the liquid-amorphous transformation, and the second is the liquid-crystal phase transition. The volume decreases almost linearly up to around 350 K for all cooling rates and they are each close to each other. For cooling rates of $\gamma_1$=10 and $\gamma_2$=2 K/ps, the V-T curve changes smoothly after vitrification, whereas for cooling rates of $\gamma_3$=0.2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps, a sudden change in V-T over a narrow temperature range indicates a crystallization event. From these findings, it can be seen that the phase formation during the cooling process is highly dependent on the cooling rates.

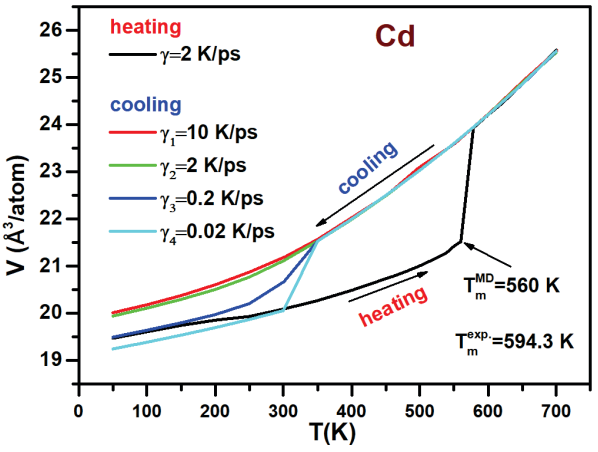



***Fig. 1.*** *Change of volume as a function of temperature during heating and cooling processes.*

The pair distribution function (PDF or g(r)) has been used to characterize the atomic structure through both processes. It also provides useful information for us to follow and interpret phase transitions. Thus, the total g(r) is defined as [11]

$$g(r) = \frac{\Omega}{N^2}\left\langle \sum_{i}^{N}\sum_{i\neq j}^{N} \delta(r - r_{ij}) \right\rangle, \qquad (6)$$

where N and Ω represent the total number of atoms in the simulation box and its volume, respectively. The calculated g(r) and structure factor (SF or S(q)) for liquid Cd at 620 K are shown in Figure 2 together with the experimental results (623 K) [12]. As can be seen from the figure, there is a perfect agreement between the g(r) and S(q) curves we calculated from the TB-MD simulations and their experimental data. This is proof that the TB potential we selected can successfully explain the structural properties of liquid Cd.

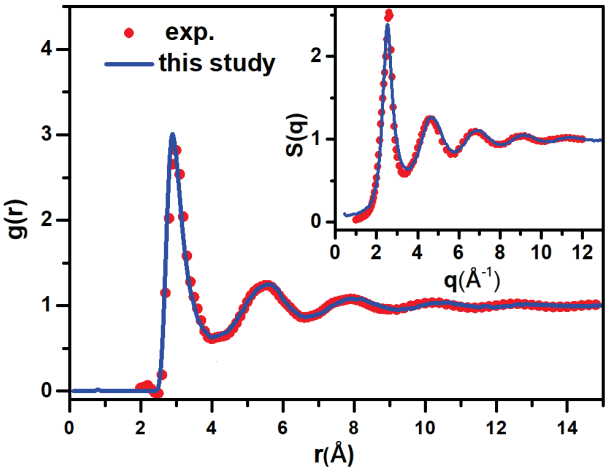



***Fig. 2.*** *Comparison of calculated (620 K) and experimental (623 K) g(r) and S(q) curves for liquid Cd.*

Figure 3 presents a comparison of the g(r)'s calculated at different temperatures with the cooling rates of $\gamma_2$=2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps, and the g(r)'s calculated during the heating process. In order to avoid repetition and visual pollution, the results obtained for other cooling rates are not included in this figure. The main peaks of the g(r) curves calculated during the heating process exhibit peak behavior specific to crystalline structures. These are narrow and high peaks. With increasing temperature, the heights of these peaks decrease and their widths increase. And finally, when the temperature is increased by 600 K, some of these peaks disappear and the visible peaks exhibit a behavior specific to liquid structures, that is, they now have much wider and lower heights. This is also a sign that the system is melting. The g(r) curves calculated for the heating and cooling processes at 600 K and 700 K overlap, indicating that there is enough free space in the system for the atoms to move. At 400 K and 500 K, the g(r) curves calculated for both cooling rates overlap, while the curves obtained from heating produce peaks specific to crystal-like structures. When the temperature is lowered further, the g(r) curves obtained from two different cooling rates at 300 K and 200 K exhibit very different behavior from each other. The g(r)'s calculated for the cooling rate of $\gamma_2$=2 K/ps are similar to those of liquid systems, but unlike them, a splitting occurs at the second maximum peaks, which indicates the development of medium-range order and is characteristic of amorphous structures. However, there are differences in the positions and heights of the peaks of g(r) obtained in the heating and cooling processes towards larger r values, which may be due to the proportionality of atoms with different hcp and fcc orders in both processes.

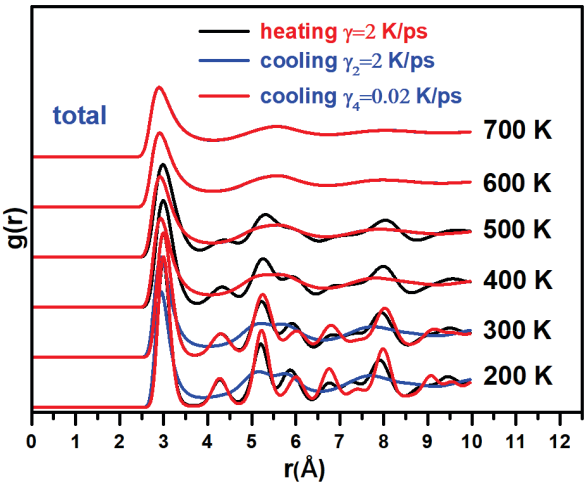



***Fig. 3.*** *g(r) curves calculated at different temperatures during heating (γ=2 K/ps) and cooling ($\gamma_2$=2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps) processes.*

There are many methods in the literature to determine the glass transition temperature ($T_g$) and crystallization temperature ($T_c$). Among them, one of the analysis methods that gives the simplest and most accurate results is the Wendt-Abraham parameter ($R^{WA}=g_{min}/g_{max}$) [13]. Recently, Celtek et al. performed a minor modification on the $R^{WA}$ correlation and defined the new correlation as ($R^{MWA}=(g_{min}/g_{max})^2$) [8, 14]. Here $g_{min}$ and $g_{max}$ are the first minimum and maximum of g(r), respectively. As an example, the temperature-

dependent evolution of the $R^{MWA}$ parameter calculated for a cooling rate of $\gamma_2$=2 K/ps is shown in Figure 4. We determined the intersection point of the fit curves drawn separately for the low and high-temperature regions as $T_g$. The results of the fit procedure are given embedded in the inset of the figure for both regions. According to the $R^{MWA}$ parameter, $T_g$'s for $\gamma_1$=10 and $\gamma_2$=2 K/ps have been determined as ~360 K and ~340 K, respectively, and $T_c$'s for $\gamma_3$=0.2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps have been determined as ~250 K and ~300 K, respectively.

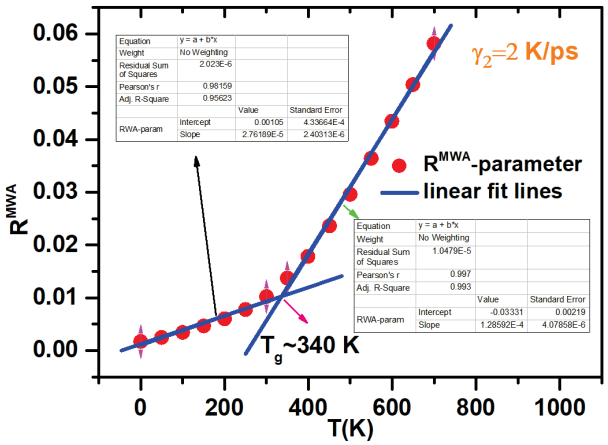



***Fig. 4.*** *Evolution of the $R^{MWA}$ parameter as a function of temperature for a cooling rate of $\gamma_2$=2 K/ps.*

The evolution of the topological arrangement of the system during the cooling or heating processes is analyzed using the Honeycutt-Andersen (HA) bond type index, which provides analysis based on the atomic pairs and the atomic arrangement around them [15, 16]. In the HA method, a sequence of four indices such as *ijkl* is used to characterize the local environment of the pair. For example, the only bonded pair in the fcc crystal is 1421, while the hcp crystal has the numbers 1422 and 1421. The 1661 and 1441 bonded pairs are related to a bcc crystal. The 1551 bonded pair is characteristic of the icosahedral order, while the 1431 and 1541 are characteristic of the defective icosahedral structure [17, 18].

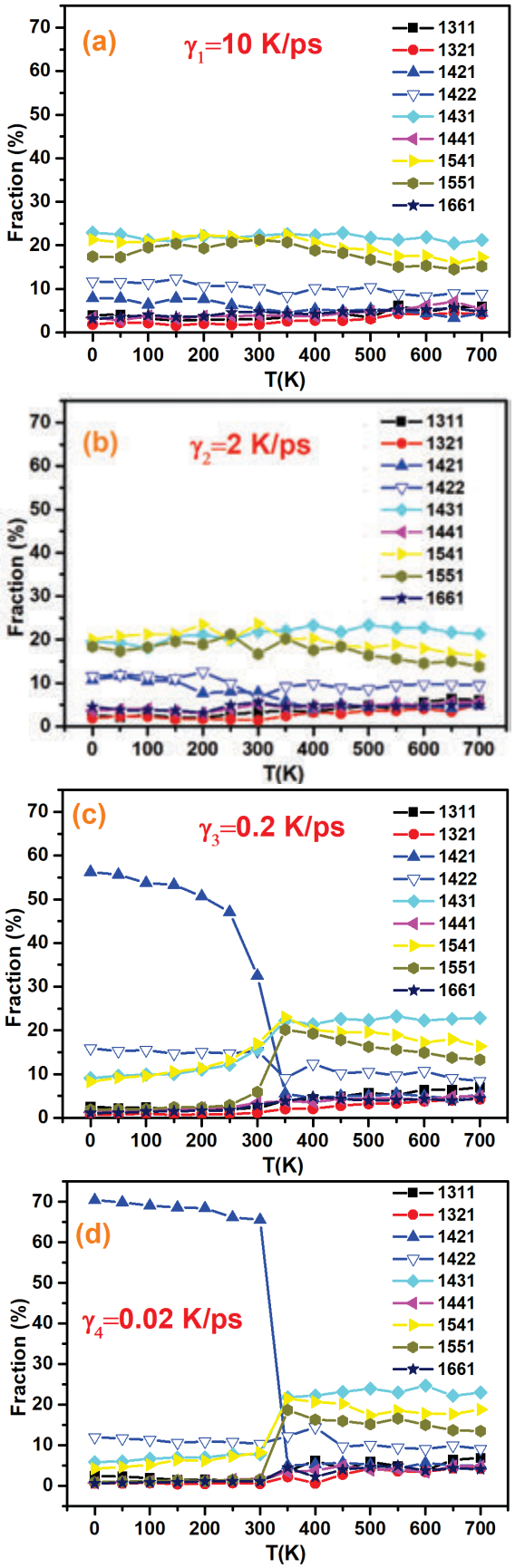



***Fig. 5.*** *Fraction of the most popular HA bonded pairs calculated for cooling rates of (a) $\gamma_1$=10 K/ps, (b) $\gamma_2$=2 K/ps, (c) $\gamma_3$=0.2 K/ps and (d) $\gamma_4$=0.02 K/ps.*

The temperature-dependent evolution of the nine most common bonded pairs for the four cooling rates is shown in Figure 5 (a-d). The results for cooling rates of $\gamma_1$=10 and $\gamma_2$=2 K/ps show that the majority of pairs at all temperatures are 1551, 1541 and 1431 bonded pairs, indicating that icosahedral packing dominates due to more favorable energy [19]. This indicates that the short-range order has developed in the system and that the system has changed from a liquid to an amorphous state. For lower temperatures, they are followed by 1422 and 1421 bonded pairs representing the hcp/fcc crystal. Consistent with the above results for these cooling rates, no change is observed to indicate a first-order phase transition. As can be seen in Figures 5(c) and 5(d), the results of cooling rates of $\gamma_3$=0.2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps show different behavior compared to the results of other cooling rates. At high temperatures, while the fraction of pairs representing ideal icosahedral and defective icosahedral order is high, a sudden decrease in their fraction and a very sharp increase in 1421 bonded pairs representing fcc crystal order are observed around 350 K. This abrupt change in the bonded pairs indicates that the more slowly cooled system makes a liquid-crystalline phase transition at these temperature points. 1421 bonded pairs are followed by 1422 bonded pairs. For a cooling rate of $\gamma_3$=0.2 K/ps, the fraction of 1421 (or 1422) bonded pairs increases to around ~55% (or ~17%) at 50 K, while this ratio rises to around ~70% (or ~12%) for $\gamma_4$=0.02 K/ps. This shows us that in the formation of the crystal order of the system in the slow cooling process, the hcp and fcc crystal structures are in a race, and in the system that is cooled more slowly, the pairs representing the fcc structure dominate compared to the other pairs. To support these results with visual data, we have shown the fcc and hcp atom distributions in the simulation boxes in the heating and cooling (only for cooling rates of $\gamma_3$=0.2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps) processes at 300K together in Figure 6. While the number of atoms with hcp crystal order is high during the heating process, it is seen that atoms with a certain amount of fcc order begin to form between them. Findings from the cooling rate of $\gamma_3$=0.2 K/ps show that the atomic distributions with hcp and fcc crystalline order are in a random manner and the number of atoms with fcc crystalline order is higher. The snapshots taken for the system cooled with $\gamma_4$=0.02 K/ps cooling rate are quite different and interesting from the others. From the snapshots, it is seen that the hcp and fcc atoms in the upper and lower regions of the simulation box are separated into layers, while interestingly, the middle region of the box is completely filled by atoms with fcc crystalline order. All these findings are consistent with the results discussed above.

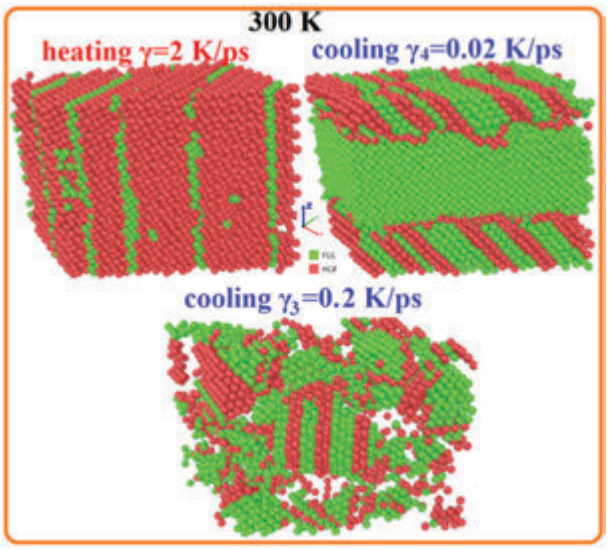



***Fig. 6.*** *Snapshots of the simulation box obtained for the heating and cooling ($\gamma_3$=0.2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps) processes at 300K.*

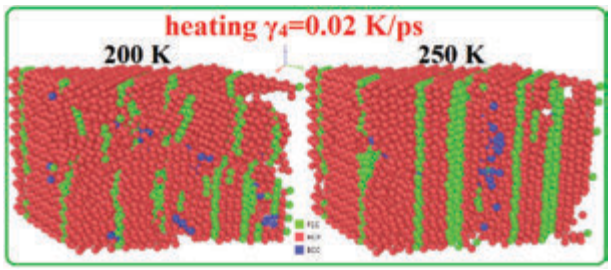



***Fig. 7.*** *Snapshots showing the crystalline order in the simulation box during the heating process at 200 K and 250 K.*

There is no evidence that the small change observed in the 200-250 K regions of the V-T curve obtained for the heating process in Figure 1 is a solid-solid phase transition. However, to present a different perspective, we present the maternity images showing the crystal arrangement at 200 K and 250 K in Figure 7. As can be seen from the snapshots, a noticeable increase is observed in the number of atoms with fcc crystalline order when the temperature

is increased to 250K. The increase in the number of atoms with fcc order may be the reason for the small volume change that has been mentioned.

## CONCLUSION

The evolution of the microstructure of the hcp crystalline Cd during the heating and cooling processes was investigated by MD simulations using the TB-SMA potential. The results show that the TB-SMA potential accurately predicts the melting point of solid Cd and the calculated g(r) and S(q) for liquid Cd are in excellent agreement with the experimental results. While no evidence of first-order phase transition has been observed for the rapidly cooled ($\gamma_1$=10 and $\gamma_2$=2 K/ps) liquid Cd, the liquid-solid phase transition has been observed for the more slowly cooled ($\gamma_3$=0.2 and $\gamma_4$=0.02 K/ps) system. For cooling rates of $\gamma_1$=10 and $\gamma_2$=2 K/ps, 1551, 1541 and 1431 bonded pairs representing icosahedral and defective icosahedral order were dominant at all temperatures, while for other cooling rates, 1421 and 1422 bonded pairs were dominant at lower temperatures. For the systems cooled slowly, $T_g$ values decreased while Tc values increased. Interestingly, Cd with hcp crystalline order exhibited a distribution suitable for fcc crystalline order when cooled with a cooling rate of $\gamma_4$=0.02 K/ps. We believe that the results will contribute to the understanding of the behavior of Cd during the cooling and heating process.

## REFERENCE


[1] Kittel C. Introduction to Solid State Physics. New York: John Wiley & Sons Inc., 1986.

[2] Minicucci M, Trapananti A, Cicco A Di, et al. Cadmium under High Pressure and High Temperature Conditions. Phys Scr 2005; 1056.

[3] Lai SK, Li W, Tosi MP. Evaluation of liquid structure for potassium, zinc, and cadmium. Phys Rev A 1990; 42: 7289–7303.

[4] Kenichi T. Structural study of Zn and Cd to ultrahigh pressures. Phys Rev B 1997; 56: 5170–5179.

[5] Cleri F, Rosato V. Tight-binding potentials for transition metals and alloys. Phys Rev B 1993; 48: 22–33.

[6] Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO-the Open Visualization Tool. Model Simul Mater Sci Eng 2010; 18: 015012.

[7] Senturk Dalgic S, Celtek M. Liquid -to-glass transition in bulk glass-forming Cu55-xZr45Agx alloys using molecular dynamic simulations. EPJ Web Conf 2011; 15: 03009.

[8] Celtek M, Sengul S, Domekeli U, et al. Dynamical and structural properties of metallic liquid and glass Zr48Cu36Ag8Al8 alloy studied by molecular dynamics simulation. J Non Cryst Solids 2021; 566: 120890.

[9] Sengul S, Celtek M, Domekeli U. Molecular dynamics simulations of glass formation and atomic structures in Zr60Cu20Fe20 ternary bulk metallic alloy. Vacuum 2017; 136: 20–27.

[10] Smith W, Forester TR. DL_POLY_2.0: A general-purpose parallel molecular dynamics simulation package. J Mol Graph 1996; 14: 136–141.

[11] Celik FA. Molecular dynamics simulation of polyhedron analysis of Cu–Ag alloy under rapid quenching conditions. Phys Lett A 2014; 378: 2151–2156.

[12] Waseda Y. The Structure of Non-Crystalline Materials-Liquids and Amorphous Solids. New York: London: McGraw-Hill, 1981.

[13] Wendt HR, Abraham FF. Empirical Criterion for the Glass Transition Region Based on Monte Carlo Simulations. Phys Rev Lett 1978; 41: 1244–1246.

[14] Celtek M. Atomic structure of Cu60Ti20Zr20 metallic glass under high pressures. Intermetallics 2022; 143: 107493.

[15] Celtek M, Domekeli U, Sengul S, et al. Effects of Ag or Al addition to CuZr-based metallic alloys on glass formation and structural evolution: a molecular dynamics simulation study. Intermetallics 2021; 128: 107023.

[16] Honeycutt JD, Andersen HC. Molecular Dynamics Study of Melting and Freezing of Small Lennard- Jones Clusters. J Phys Chem 1987; 91: 4950–4963.

[17] Guder V, Sengul S, Celtek M, et al. Pressure dependent evolution of microstructures in Pd80Si20 bulk metallic glass. J Non Cryst Solids 2022; 576: 121290.

[18] Celtek M. An in-depth investigation of the microstructural evolution and dynamic properties of Zr77Rh23 metallic liquids and glasses: A molecular dynamics simulation study. J Appl Phys 2022; 132: 035902.

[19] Sun YL, Shen J, Valladares AA. Atomic structure and diffusion in Cu60Zr40 metallic liquid and glass: molecular dynamics simulations. J Appl Phys 2009; 106: 073520.

# ПРОВЕРКА НА ПОВТОРЯЕМОСТТА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ПРИ АВТОМАТИЧНО СЪВПАДЕНИЕ НА XVI СИСТЕМА

**Николай Муткуров [1], Станимир Радушев[1], Виргиния Паякова[2]**

*[1]Комплексен онкологичен център – Бургас, Отделение по радиационна онкология*
*[2] УМБАЛ "Д-р Георги Странски" ЕАД, Отделение по радиационна онкология*

# VERIFYING THE REPEATABILITY OF AUTO MACH RESULTS WITH THE XVI SYSTEM

**Nikolay Mutkurov [1], Stanimir Radushev [1], Virginia Payakova [2]**

*[1] Complex Oncology Center – Burgas, Radiation oncology department*
*[2] UMHAT" Dr.Georgi Stranski", Radiation oncology department*

**Abstract**

*The aim of the present study is to establish the accuracy and repeatability of the results of the comparison of the XVI workstation images using the automatic function of the software and to evaluate whether the obtained values need to be entered into the safety zone when determining the PTV. Verification of patient position during Volumetric modulated arc therapy (VMAT), Intensity-modulated radiation therapy (IMRT) is performed with a 3D kV system (XVI) Cone beam CT (CBCT). The images obtained with the kV system are compared with the baseline computed tomography images performed when planning the patient for radiation therapy. CATFAN 500 phantom and accompanying operating instructions are used. The offset results are reported directly to the workstation of the XVI system. The results obtained are within 0,1 mm. This value is negligibly small and does not contribute when determining the margin between GTV and PTV.*

**Keywords:** IGRT, CBCT, VMAT, XVI, IMRT

## ВЪВЕДЕНИЕ

При планиране на обемите за лъчетерапия се задава зона за сигурност около туморният обем. Новият обем GTV (Gross Tumor Volume) заедно със зоната на сигурност представлява PTV (Planning Target Volume). Тази зона се определя от много фактори, по-важни от които са:

- клинични – хистологичен резултат, анатомична зона, в която е разположен туморния обем и други;
- техническите възможности на използваната лъчетерапевтична апаратура;
- средствата за имобилизация и позиционирането на пациента.

Техническите възможности на използваната лъчетерапевтична апаратура включват редица параметри, като изоцентър на линейния ускорител, точност на позициониране на ъглите на гентрито и пациентната маса и др.

Проверката на позицията на пациента при провеждане на обемно модулирана лъчетапия (VMAT – Volumetric Modulated Arc Therapy) и модулирана по интензитет лъчетерапия (IMRT – Intensity Modulated Radiotherapy) се провежда с 3D образи получавани от киловолтна система – CBCT (coom beam computed tomography). При провеждането на образно ориентирано лъчелечение IGRT (Image-guided radiation therapy) се изисква образите получени с киловолтна система да се сравняват ежедневно с базовите образи от компютърна томография, проведена при планиране на пациента за лъчетерапия [1].

Това сравняване при ускорителите на Електа се провежда с автоматична функция

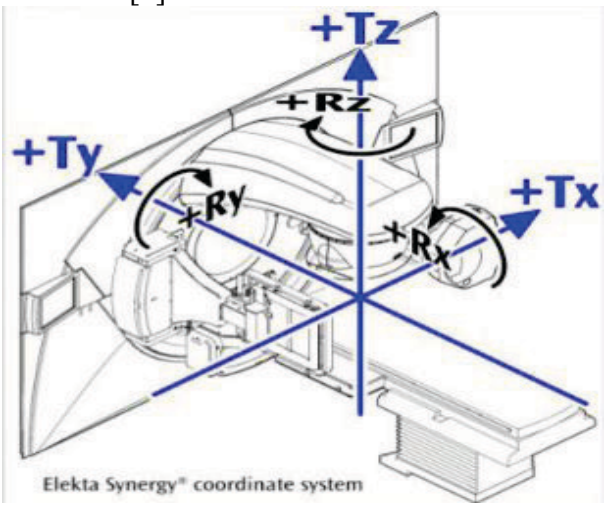
в софтуера на киловолтната система (XVI) към линейният ускорител.

Целта на настоящото проучване е:

- да се установи, дали се наблюдава съвпадение на резултатите при измерване на възпроизводимостта и повторяемостта при сравняването на образите. Резултатите са получени на работната станция на киловолтна система при използване на автоматичната функция на софтуера;
- да се оцени, дали получените стойности е необходимо да бъдат взети под внимание при определяне зоната на сигурност на PTV.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

При всички измервания беше използвана координатна система на линейният ускорител IEC 61217, схематично представена на Фиг.1 [2].




***Фиг.1*** *Координатна система на линейния ускорител [3]*

**Повторяемостта** (на резултати от измервания) е степента на съвпадане на резултати от последователни измервания на една и съща измервана величина, извършени при едни и същи условия на измерване [4].

Измерванията на повторяемостта бяха проведени с фантом CATPHAN 500 [5] и данни от стандартен протокол за сканиране на глава и шия – Head & Neck S20 F0 [3].

За целта фантомът беше позициониран на пациентната маса и сканиран с киловолтната система към ускорителя. Центрирането беше извършено използвайки софтуера за автоматично съвпадение.

Бяха направени 20 повторения на центриране, без промяна на положението на фантома. При всяко от тях бяха записани резултатите, отчетени по трите оси $T_x$, $T_y$ и $T_z$, както и тези получени за ротацията около тях – $R_x$, $R_y$, $R_z$ отчетени на работната станция на киловолтната система (XVI). Пресметнати са средната стойност и стандартното отклонение от получените данни. Резултатите са представени в Таблици 1 и 2.

***Таблица.1*** *Резултати от анализа на данните за повторяемост по осите $T_x$, $T_y$ и $T_z$*

| | | mm |
|---|---|---|
| $T_x$ | Mean | 0,053 |
| | Standard Deviation | 0,025 |
| | Confidence Level (95,0%) | 0,027 |
| $T_y$ | Mean | 0,038 |
| | Standard Deviation | 0,020 |
| | Confidence Level (95,0%) | 0,021 |
| $T_z$ | Mean | -0,032 |
| | Standard Deviation | 0,035 |
| | Confidence Level (95,0%) | 0,037 |

***Таблица 2*** *Резултати от анализа на данните за повторяемост на ротация по осите $R_x$, $R_Y$ и $R_Z$.*

| | | mm |
|---|---|---|
| $R_x$ | Mean | 0,053 |
| | Standard Deviation | 0,025 |
| | Confidence Level (95,0%) | 0,027 |
| $R_y$ | Mean | 0,038 |
| | Standard Deviation | 0,020 |
| | Confidence Level (95,0%) | 0,021 |
| $R_z$ | Mean | -0,032 |
| | Standard Deviation | 0,035 |
| | Confidence Level (95,0%) | 0,037 |

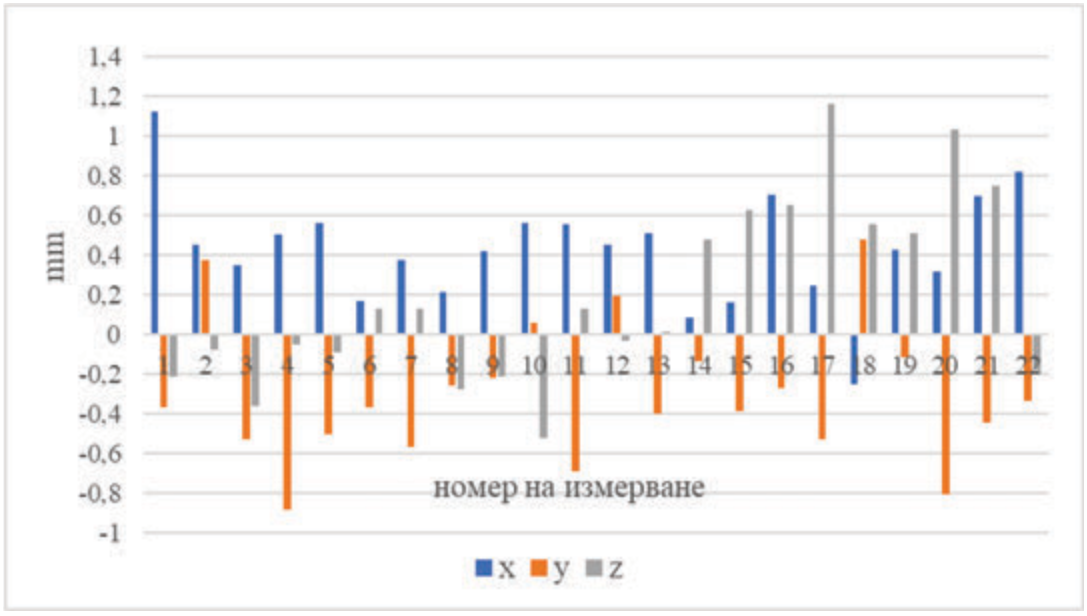
**Възпроизводимостта** (на резултати от измервания) е степента на съвпадение на резултати от измервания на една и съща величина, извършени при промяна в условията на измерване т.е. представлява променливостта на измервателната система причинена от поведението на оператора [4].

При измерване на възпроизводимостта за положението на фантома Penta - Guide се използват данни получени при позициони-

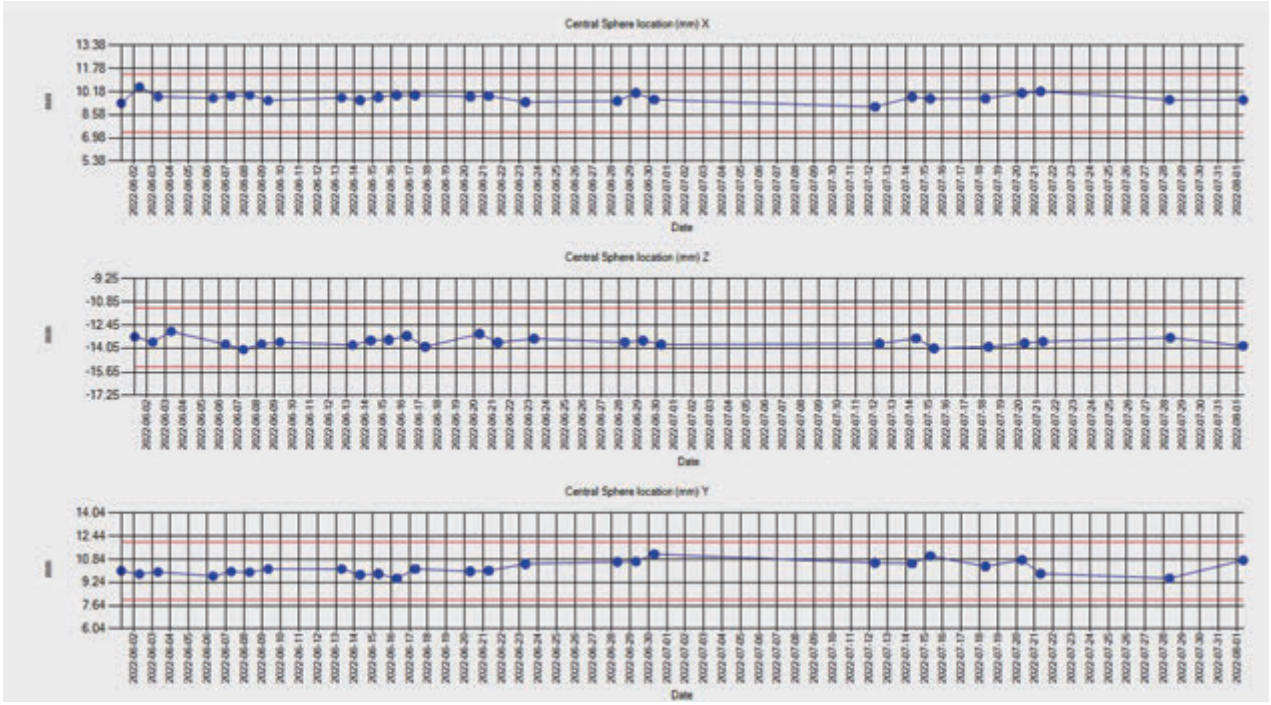
рането му от различни членове на персонала в рамките на един календарен месец.

За получаване на образи от CBCT бяха създадени протоколи за експонация препоръчани от фирмата производител на фантома.

След анализа на данните беше оценена максималната допускана от операторите грешка при позициониране на фантома. За анализиране на резултатите беше използван специализиран софтуера към фантом Penta-Guide [6]. Получените данни за местоположението на централната сфера на фантома в mm са представени на Фигури 2 и 3 и таблица 3.




***Фиг.2*** *Възпроизводимост на резултатите*




***Фиг.3*** *Разпределение на отместването при центриране на фантома – графика от софтуера.*

***Таблица 3*** *Резултати от анализа на получените данни за възпроизводимост при позиционирането*

| | | mm |
|---|---|---|
| $T_X$ | Mean | 0,503 |
| | Standard Error | 0,113 |
| | Median | 0,45 |
| | Standard Deviation | 0,300 |
| | Minimum | 0,168 |
| | Maximum | 1,121 |
| | Confidence Level(99,0%) | 0,421 |
| $T_Y$ | Mean | -0,407 |
| | Standard Error | 0,145 |
| | Median | -0,504 |
| | Standard Deviation | 0,384 |
| | Minimum | -0,881 |
| | Maximum | 0,372 |
| | Confidence Level(99,0%) | 0,538 |
| $T_Z$ | Mean | -0,078 |
| | Standard Error | 0,066 |
| | Median | -0,077 |
| | Standard Deviation | 0,175 |
| | Minimum | -0,361 |
| | Maximum | 0,127 |
| | Confidence Level(99,0%) | 0,245 |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите за повторяемостта на данните при използване на функцията за автоматично центриране на пациента при CBCT показват, че получените стойности са под 0,05 mm. Тази стойност е пренебрежимо малка и може да се пренебрегне при рутинната практика.

Резултатите получени при изследване на възпроизводимостта при позициониране на фантома от различни членове на персонала показва, че грешката в позиционирането е в рамките на 1 mm.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Резултатите се публикуват с финансовата подкрепа на проект РД-08-80/09.02.2022 г., на ШУ ”Епископ Константин Преславски”.

Статията е изготвена под ръководството на доц. д-р Нина Архангелова.

## ЛЕТЕРАТУРА

[1] Image Guidance in Radiation Therapy: Techniques and Applications Shikha Goyal and Tejinder Kataria.

[2] IEC 61217:2011 Radiotherapy equipment - Coordinates, movements, and scales.

[3] Elekta Medical Linear Accelerator Instructions for Use Volume 3 - XVI for: Elekta Synergy®, Elekta Infinity™, Versa HD™

[4] Repeatability and reproducibility measurement systems Ilia Gelezov.

[5] ThePhantom Laboratory Catphan® 500 and 600 Manual Copyright © 2006.

[6] Penta – Guide QUASAR by MODUS QA User’g Guide version 2.2.0.

# ELECTRON BEAM WELDING OF DISSIMILAR METALS AND ALLOYS

**Darina Kaisheva[1,2], Georgi Kotlarski[1], Borislav Stoyanov[3], Vladimir Dunchev[3], Maria Ormanova[1], Stefan Valkov[1,3]**

*[1]Academician Emil Djakov Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 72 Tzarigradsko Chausse Blvd, 1784 Sofia, Bulgaria*
*[2] South-West University „Neofit Rilski", 66 Ivan Michailov Str., 2700 Blagoevgrad, Bulgaria*
*[3] Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar Str., 5300 Gabrovo, Bulgaria*

**Abstract**

*In this work, we present results on the investigation of the structure and mechanical properties of electron beam welded specimens of copper and stainless steel, copper and aluminum alloy, and titanium and titanium Ti6Al4V alloy. The structure of the fusion zone of all samples was studied by scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analysis, and its phase composition – by X-ray diffraction (XRD) analysis. The mechanical properties were investigated by tensile tests and microhardness measurements. The results for the mechanical properties were discussed concerning the applied technological conditions and the structure of the welded joints.*

**Keywords:** electron beam welding, dissimilar materials, stainless steel, copper, aluminum alloy, titanium, titanium alloy.

## INTRODUCTION

Different technologies are used to join dissimilar materials. An overview article [1] describes the most commonly used techniques and technologies for joining dissimilar materials: mechanical joining processes, chemical joining processes, thermal fusion joining processes, including electric arc welding, laser beam welding and electron beam welding, and hybrid joining processes.

The electron beam welding (EBW) method has been intensively used in modern industrial production, mainly in the automotive industry, aircraft construction, shipbuilding, etc. due to its significant advantages compared to other welding methods. Among the main advantages of electron beam welding over other methods are: high power density, high welding speed, which allows the formation of very narrow and deep welds, the presence of a protective vacuum environment, etc. In EBW, the kinetic energy of a beam of accelerated electrons with a very high energy density (over $10^6$ W/cm$^2$) is converted into heat, accompanied by sharp heating, melting and vaporization of the processed metals. A vapor-gas channel called a "keyhole" is formed, consisting of superheated vapor in the medium surrounded by liquid metal [2, 3]. Complex physical and physical-chemical processes take place in the molten pool under the action of various forces [4]. The heating and cooling processes of the molten metal in the region of the weld seam, as well as the metal in the heat-affected zone, is carried out at very high speeds. As a result, phase transformations occur, which, together with large temperature gradients, lead to the appearance of residual stresses and deformations. Due to the different materials that fuse together, in many cases intermetallic compounds are formed in the weld zone, which are often brittle and make the joint unsustainable. In [5], an overview of the weldabilities of dissimilar materials using the EBW method was made.

There are a number of studies that describe the welding of materials with different thermophysical properties by the electron

beam welding method [6-11]. The main goal of the research is based on the need to obtain composite structures in the weld seam by combining two different materials, preserving the advantages of the properties possessed by each material separately. Good weld quality is largely determined by the crystallographic structure and the presence of intermetallic phases.

The aim of the present work is to characterize the structure and mechanical properties of specific pairs of dissimilar materials concerning the applied technological conditions during the EBW. We have focused our attention on light metals (copper, titanium, aluminum) due to their importance for a variety of practical applications [12-18]. In this work, we present results on the investigation of the structure and mechanical properties of electron beam welded specimens of copper and stainless steel, copper and aluminum alloy, and titanium and Ti6Al4V alloy.

## METHODS AND MATERIALS

The subjects of our investigation were the following three types of electron beam welded samples: copper and 304L stainless steel; copper and Al 6082 T6 aluminum alloy; titanium and Ti6Al4V titanium alloy (Ti64). The chemical composition of listed alloys is shown in Table 1.

***Table 1.*** *The chemical composition of studied alloys.*

| 304L | | Al 6082 T6 | | Ti6Al4V | |
|---|---|---|---|---|---|
| El. | wt, % | El. | wt, % | El. | wt, % |
| C | 0.03 | Si | 1.3 | Al | 5.5 |
| Mn | 1.52 | Mg | 1.0 | V | 4.5 |
| Si | 0.10 | Mn | 0.8 | Fe | 0.3 |
| P | 0.03 | Fe | 0.2 | Ti | Bal. |
| S | 0.03 | Cr | 0.1 | | |
| Cr | 17.70 | Al | Bal. | | |
| Ni | 8.30 | | | | |
| N | 0.10 | | | | |
| Fe | Bal. | | | | |

Electron beam welding was carried out on the Evobeam Cube 400 welding unit manufactured by Evobeam. Plates with dimensions of 100x50x8 mm of two different materials were joined via EBW. The technological parameters of EBW were different for different welded couples and are shown in Table 2.

***Table 2.*** *Technological conditions of EBW.*

| Sample | Cu / 304L | Cu / Al6082T6 | Ti / Ti6Al4V |
|---|---|---|---|
| Accelerating voltage $U_a$, kV | 60 | 60 | 60 |
| Beam current I, mA | 50 | 50 | 35 |
| Welding speed v, mm/s | 5 | 15 | 10 |
| Offset | - | 0.4 mm towards Al 6082 T6 | - |
| Beam oscillation | - | circle $r_{osc.}$=0.1mm | - |

X-ray diffractometer (XRD) “Bruker D8 Advance” was used for phase analysis. The method was “Coupled Two Theta”, using Co Kα radiation with wavelength 1.78897 Å and line focus orientation. The X-ray generator current was 40 mA and the used voltage was 35 kV. The step size of the test was 0.05° and the time for the step was 0.25 s.

ZwickRoell Vibrophore 100 combined static and dynamic testing machine was used for mechanical characteristics determination. Microhardness measurement was performed using the Vickers method. Determination of microhardness for all experimental points was performed with a force load of 0.49 N using a semi-automatic microhardness tester ZWICK/ Indentec - ZHVμ-S. The line along which the microhardness was measured is located at middle depth of the weld seam.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Electron beam welding of Cu and 304L stainless steel

The X-ray diffraction patterns of the welded copper-stainless steel specimen, pure copper, and 304L are shown in Fig. 1. The presence of two phases is visible – a solid solution of copper and γ-iron (with a face centered cubic crystal lattice fcc) and α-iron (with a body centered cubic crystal lattice bcc). The appearance of the metastable phase of α-iron is associated with the large temperature gradients that occur in the electron beam welding procedure.

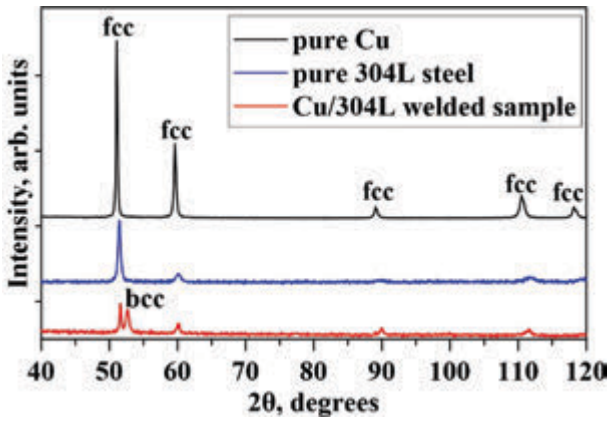



***Fig. 1.*** *X-ray patterns of the welded copper-stainless steel specimen, pure copper and pure 304L steel.*

The observed structure of the SEM image (Fig. 2) confirms the presence of the two phases mentioned above in the fusion zone.

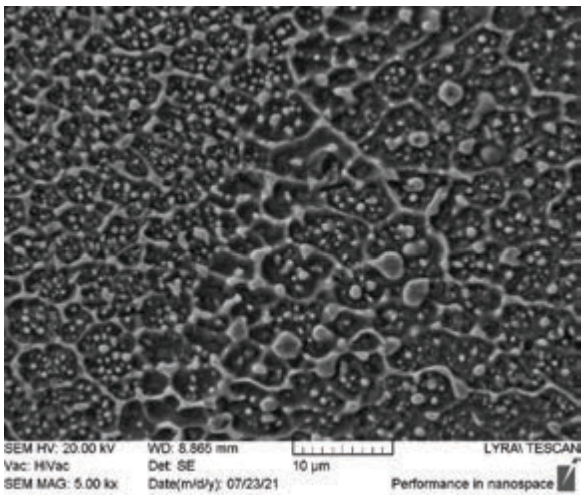



***Fig. 2.*** *SEM image of the fusion zone of the welded Cu/304L sample.*

Table 3 shows the measured values of the mechanical properties of the initial materials and the welded joint. The measured values for the tensile strength of the weld as well as the elongation are within close range of those of pure copper.

***Table 3.*** *Tensile test results of Cu/304L weld.*

| Material | Yield strength $R_{p\,0.2}$, MPa | Tensile strength $R_m$, MPa | Total extension $A_t$,% |
|---|---|---|---|
| Pure Cu | 267 | 275 | 16.8 |
| Pure 304L | 298 | 608 | 35.8 |
| Cu/304L | 93 | 218 | 14.6 |

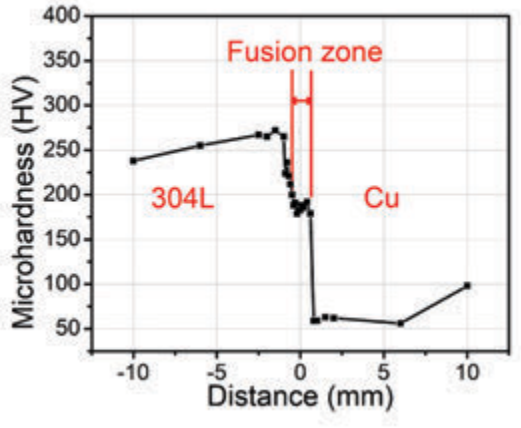



***Fig. 3.*** *Distributions of the microhardnesses along the weld cross-section in the middle of the depth of the Cu/304L weld.*

The microhardness distribution in the middle of the weld along the cross-section is shown in Fig. 3. In the fusion zone, intermediate hardness values to those of pure copper and pure stainless steel are observed.

**Electron beam welding of Cu and Al6082T6 alloy**

Electron beam offset and electron beam oscillation were applied to the making of a copper/aluminum alloy sample. The beam offset was towards the aluminum alloy side. The electron beam oscillation was a circular.

The X-ray diffraction patterns of the welded copper-aluminum alloy specimen, pure copper, and Al6082T6 are shown in Fig. 4. The main phase observed in the fusion zone is $CuAl_2$ with a body-centered tetragonal structure. In addition, aluminum and copper peaks having a face-centered cubic structure are also observed.

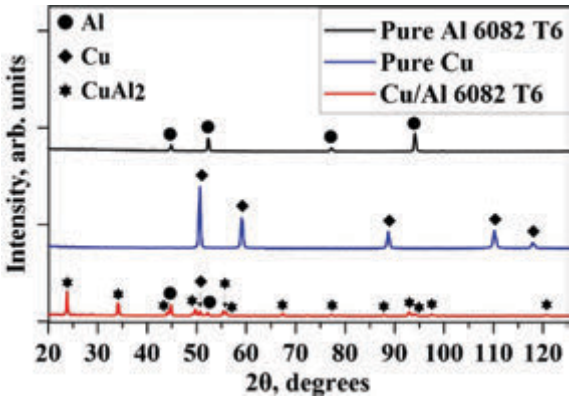



***Fig. 4.*** *X-ray patterns of the welded copper-aluminum alloy specimen, pure copper, and pure Al 6082 T6.*

The fusion zone of the specimen contains three phases – an aluminum matrix, an ordered solid solution of copper and aluminum in the form of $CuAl_2$, and pure copper in the region towards the copper plate, as can also be seen from the SEM image shown in Figure 5.

The studied sample did not show satisfactory strength in the tensile tests.

In Fig. 6, the microhardness distribution in the cross-section of the welded Cu/Al 6082 T6 sample is shown. At both edges of the fusion zone there is a significant increase in hardness compared to the initial materials. The reason for this is the above-mentioned intermetallic phase.

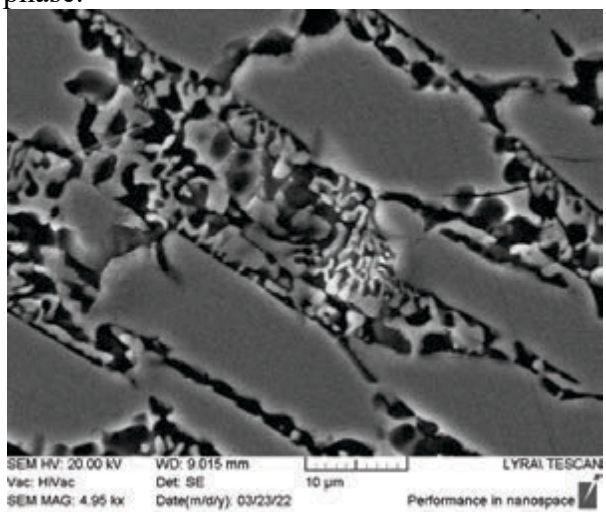



***Fig. 5.*** *SEM image of the fusion zone of the welded Cu/Al 6082 T6 sample.*

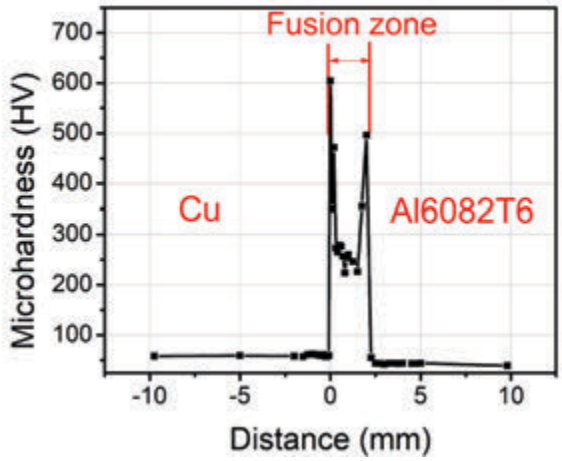



***Fig. 6.*** *Distributions of the microhardnesses along the weld cross-section in the middle of the depth of the Cu/Al6082T6 weld.*

**Electron beam welding of Ti and Ti6Al4V alloy**

The two initial materials have a similar chemical composition, but quite different thermophysical characteristics. The phase composition of the welded joint, as well as of the pure Ti and Ti6Al4V samples were studied by XRD experiments.

Considering the pure Ti plate, its phase composition is in the form of a single-phase of α-titanium. In contrast, the structure of the titanium alloys is in the form of a double-phase of α+β. It is well known that β is the high-temperature modification of Ti and is stable above 1153 K. However, the appearance of this phase can be not only due to high-temperature reasons. It could be attributed also due to the existence of β stabilizing elements, such as Ta, Nb, V, etc. As mentioned previously, 4 at. % V exists within the titanium alloy, which is the reason for the appearance of the beta phase at room temperature. The structure of the welded joint is in the form of a single-phase α' martensite, formed due to the very large cooling rate during the welding procedure.

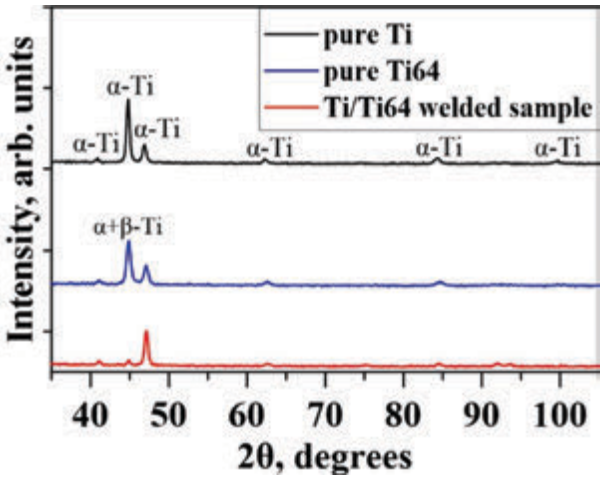



***Fig. 7.*** *X-ray patterns of the welded titanium-titanium alloy specimen, pure titanium, and pure Ti64.*

In the SEM image of the fusion zone (Fig.8) it is seen that there is no presence of the β-phase of Ti. The formed martensitic structure in the weld seam is clearly visible.

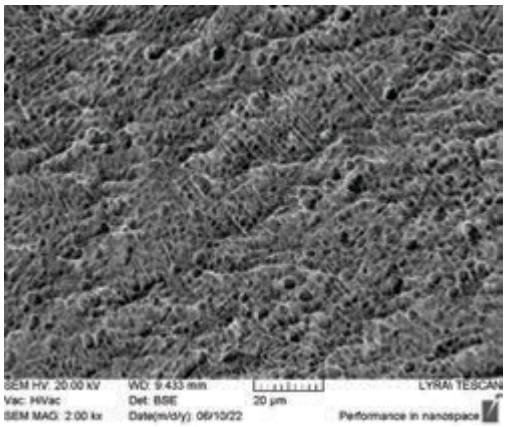


***Fig. 8.*** *SEM image of the fusion zone of the welded Ti/Ti64 sample.*

The measured values of yield strength, tensile strength and relative elongation of the initial materials and the welded joint are shown in Table 4. The achieved tensile strength of the weld is practically equivalent to that of pure titanium.

***Table 4.*** *Tensile test results of Ti/Ti64 weld.*

| Material | Yield strength $R_{p0,2}$, MPa | Tensile strength $R_m$, MPa | Total extension $A_t$,% |
|---|---|---|---|
| Pure Ti | 372 | 511 | 22.1 |
| Pure Ti6Al4V | 1031 | 1064 | 10.6 |
| Ti/Ti64 | 125 | 510 | 17.4 |

The microhardness distribution along the cross-section of the weld is shown in Fig. 9. Increased hardness is observed in the fusion zone, which is due to the resulting martensitic structure. A rise in the hardness is also seen in the surrounding heat affected zones of both materials, again due to the phase transitions resulting from the high temperature gradients at EBW.

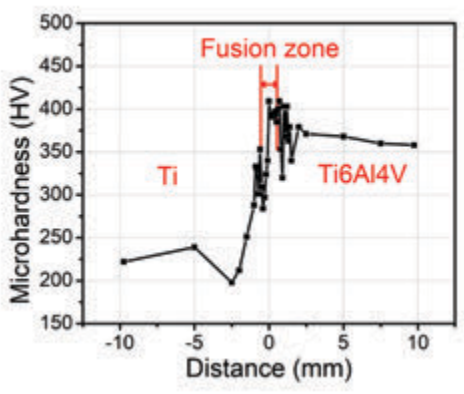



***Fig. 9.*** *Distributions of the microhardnesses along the weld cross-section in the middle of the depth of the Ti/Ti6Al4V weld.*

## CONCLUSION

In this paper, we demonstrated the possibilities for the fabrication of welded joints between dissimilar metals and alloys using electron beam technologies. Precisely selected technological conditions during the welding process led to obtaining strong and unbreakable welds. On the other hand, it contributes to the improvement of the mechanical characteristics (hardness, yield and, tensile strength) of the joints. These properties are very important for the implementation of dissimilar joints in various branches of modern industry.


## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Bulgarian National Scientific Found under Grant No KP06-N47/6.


## REFERENCE


[1] Martinsen K, Hu SJ, Carlson BE, Joining of dissimilar materials. *CIRP Annals* 64(2) (2015) 679-699.

[2] Шиллер З, Гайциг У, Панцер З, *Электронно-лучевая технология*, Москва, изд. Енергия (1980).

[3] Mihailov V, Karhin V, Petrov P, *Fundamentals of welding* (In English), Polytechnic University Publishing, St. Petersburg (2016).

[4] Weglowski M, Błacha S, Phillips A, Electron beam welding-Techniques and trends-Review. *Vacuum* 130 (2016) 72-92.

[5] Sun Z, Karppi R, The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview. *Journal of Materials Processing Technology* 59(3) (1996) 257–267.

[6] Guo S, Zhou Q, Peng Y, Xu XF, Diao CL, Kong J, Luo TY, Wang KH, Zhu J, Study on strengthening mechanism of Ti/Cu electron beam welding. *Materials & Design* 121 (2017) 51–60.

[7] Chen G, Yin Q, Guo C, Zhang B, Feng J, Beam deflection effects on the microstructure and defect creation on electron beam welding of molybdenum to Kovar. *Journal of Materials Processing Technology* 267 (2019) 280-288.

[8] Dinda SK, Kar J, Roy GG, Kockelmann W, Srirangam P, Texture mapping in electron beam welded dissimilar copper-stainless steel joints by neutron diffraction. *Vacuum* 181 (2020) 109668.

[9] Roy, C, Pavanan V, Vishnu G, Hari PR, Arivarasu M, Manikandan M, Ramkumar D, Arivazhagan N, Characterization of metallurgical and mechanical properties of commercially pure copper and AISI 304 dissimilar weldments. *Procedia Materials Science* 5 (2014) 2503 – 2512.

[10] Yeganeh VE, Li P, Effect of beam offset on microstructure and mechanical properties of dissimilar electron beam welded high temperature titanium alloys. *Materials Design*, 124 (2017) 78–86.

[11] Wang SQ, Liu JH, Chen DL, Tensile and fatigue properties of electron beam welded dissimilar joints between Ti-6Al-4V and BT9 titanium alloys. *Materials Science & Engineering A*, 584 (2013) 47–56.

[12] Kovalev SV, Portnykh AI, Aslamova VY, Research of Ti-6Al-4V titanium alloy welded joints made by electron beam welding, designed for operation in cryogenic conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 971 (2020) 022005.

[13] Fujii H, Takahashi K, Yamashita Y, Application of Titanium and Its Alloys for Automobile Parts. *Nippon Steel Technical Report* 88 (2003) 70–75.

[14] Kaur S, Ghadirinejad K, Oskouei RH, An Overview on the Tribological Performance of Titanium Alloys with Surface Modifications for Biomedical Applications. *Lubricants* 7(8) (2019) 65–80.

[15] Williams JC, Boyer RR, Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components. *Metals* 10(6) (2020) 705.

[16] Schauerte O, Titanium in automotive production. *Advanced Engineering Materials* 5(6) (2003) 411–418.

[17] Lusch C, Börsch M, Heidt C, Magginetti N, Sas J, Weiss KP, Grohmann S, Qualification of Electron-Beam Welded Joints between Copper and Stainless Steel for Cryogenic Application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 102 (2015) 012017.

[18] Poo-arporn Y, Duangnil S, Bamrungkoh D, Klangkaew P, Huasranoi C, Pruekthaisong P, Boonsuya S, Chaiprapa J, Ruangvittayanon A, Saisombat C, Gas tungsten arc welding of copper to stainless steel for ultra-high vacuum applications. *Journal of Materials Processing Technology* 277 (2020) 116490.

# ИЗПОЛЗВАНЕ НА ИНТЕРПОЛАЦИОННИ И ЕКСТРАПОЛАЦИОННИ МЕТОДИ В ЛАБОРАТОРНИЯ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКА

**Фатме Падикова[1], Даниела Недева[2], Николай Ангелов[3]**

*[1, 2, 3]Технически университет – Габрово*

# USE OF INTERPOLATION AND EXTRAPOLATION METHODS IN THE LABORATORY PRACTICUM IN PHYSICS

**Fatme Padikova[1], Daniela Nedeva[2], Nikolay Angelov[3]**

*[1, 2, 3] Technical University of Gabrovo*

**Abstract**

*Various interpolation and extrapolation methods have been proposed in the study of functional dependencies between quantities in the laboratory practicum in physics for students of technical universities. Interpolation and extrapolation with polynomials, trigonometric polynomials, rational polynomials, Lagrange polynomials and rational functions are used. By means of these methods, students can determine values of studied quantities that do not coincide with the obtained experimental results or values of quantities that are outside the fields of experimental research. The results are processed using EXCEL.*

**Keywords:** physics, laboratory practicum, interpolation method, extrapolation method, EXCEL.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Лабораторен практикум по физика помага на студентите по-добре да разбират и научават основните физични закони, да придобиват умения за самостоятелна експериментална работа, да се запознаят с измервателна апаратура и методи за физически измервания, да научат как да записват и обработват резултатите от измерванията и да анализират и оценяват получените крайни резултатите [1 – 3].

За реализация на тези цели често се прилага интердисциплинарния подход [7 – 10]. В науката често се използва тясната връзка между физиката и математиката. Прилагат се различни математическите методи за решаване на физични проблеми и формулиране на физични теории. В частност, математически методи се прилагат в лабораторния практикум по физика за получаване на стойности на величини, различни от експерименталните.

Цел на доклада е дискутиране на различни интерполационни и екстраполационни методи за представяне на зависимости между експериментално определени величини, изследване на възможностите им за прилагане в конкретни упражнения от лабораторния практикум по физика.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

При снемане на експериментални данни за дискретни стойности на аргумента $x_i$ се измерват или получават косвено стойности на функцията $y_i$ (i = 1, 2, 3, …, $n$+1). Често за стойности на аргумента x, различни от xi, е необходимо да се знаят стойностите на функцията y. Използват се следните методи:

- **интерполация**

Когато е изпълнено условието

$x \in (x_1, x_{n+1})$ ; (1)

- **екстраполация**

Когато е изпълнено едно от условията

$x < x_1$ ,

$x > x_{n+1}$ . (2)

При това функциите за интерполация [1] могат да бъдат от различен тип:

- ***полиноми;***

Общият вид на полином от $n$-та степен е

$$P(x)=a_n x^n + a_{n-1}x^{n-1} +\ldots+ a_i x^i +\ldots + a_1 x + a_0 \quad (3)$$

Използват се най-често, тъй като пресмятанията с полиномите са най-опростени – когато зависимостта между изследваните величини е линейна или може да се представи с крива от втора, трета или по-висока степен;

- ***рационални полиноми;***

Рационалните полиноми са от вида

$$R(x) = \frac{a_n x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \ldots + a_i x^i + \ldots + a_1 x + a_0}{b_n x^n + b_{n-1}x^{n-1} + \ldots + b_i x^i + \ldots + b_1 x + b_0} \quad (4)$$

Рационалните полиноми се използват за приближаване или моделиране на по-сложни уравнения в науката и техниката, включително сили във физиката, в спектроскопията, при вълнови функции за атоми и молекули, аеродинамиката, при определяне на концентрации на разтвори, в акустиката, оптиката и фотографията.

- ***тригонометрични полиноми;***

$$T(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{n} [a_i \cos(ix) + b_i \sin(ix)] \quad (5)$$

Използват се при изследване на периодични функции, най-често за механични и електрични трептения и за вълнови процеси.

- ***експоненциални полиноми.***

Общият вид на експоненциален полином се дава с израза

$$E(x) = a_1 e^{\alpha_1 x} + a_2 e^{\alpha_2 x} +\ldots+ a_i e^{\alpha_i x} +\ldots + a_{n-1} e^{\alpha_{n-1} x} + a_n e^{\alpha_n x} \quad (6)$$

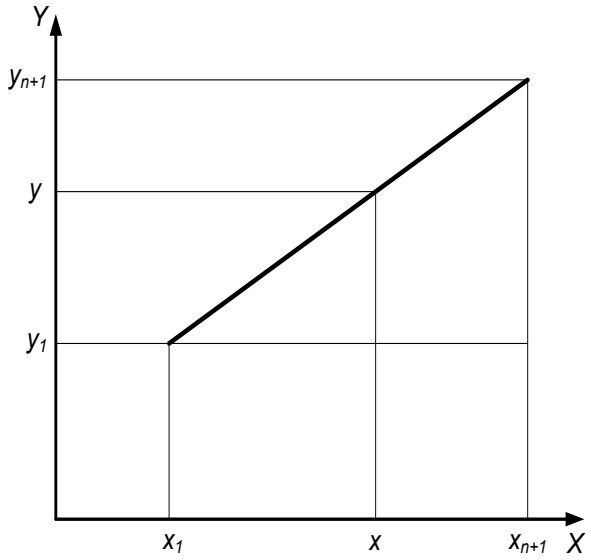
При експоненциални зависимости между изследваните величини – зависимост на съпротивлението на полупроводник от температурата, изследване на свободни затихващи трептения.

В лабораторния практикум по физика успешно могат да се прилагат:

- ***линейна интерполация;***

Зависимостта $y = y(x)$ трябва да е линейна или близка до линейната. Тя е представена графично на фиг. 1. Стойността на функцията $y$ за аргумент $x$, несъвпадащ с експерименталните данни и намиращ се в интервала $x \in (x_1, x_{n+1})$ се дава с израза

$$y = y_1 + \frac{y_{n+1} - y_1}{x_{n+1} - x_1}(x - x_1) . \quad (7)$$




***Фиг. 1.*** *Определяне на стойността на функцията $y$ за аргумента $x$ чрез линейна интерполация*

В лабораторния практикум по физика [4 – 6] в Технически университет – Габрово линейна интерполация може да се използва в следните упражнения:

*- Изследване на процесите на трептене на течност в U-видна тръба;*

*- Определяне на зависимостта на показателя на пречупване на светлината във въздух от налягането;*

*- Определяне на светлинен поток и светлинен добив на светлинен източник;*

*- Изследване на температурната зависимост на съпротивлението на метал и полупроводник.*

- ***полиноми на Лагранж.***

При по-сложна зависимост между изследваните величини при интерполация е удачно да се използват полиноми на Лагранж от втора, трета или по-висока степен.

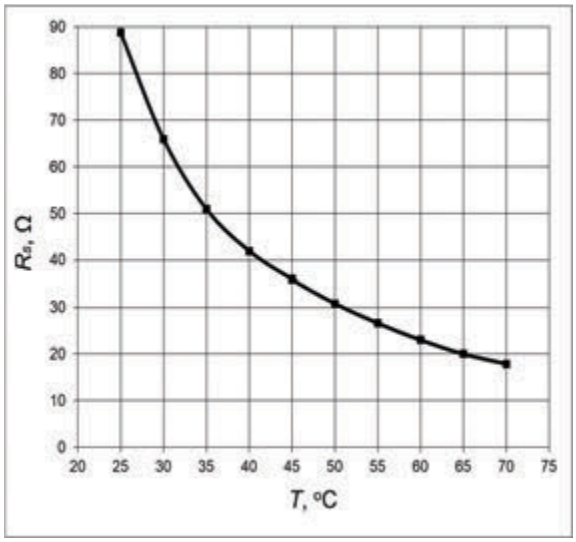
Полиномът на Лагранж [11-12] има вида

$$L_n(x) = \sum_{i=1}^{n+1} y_i \frac{(x-x_1)(x-x_2)...(x-x_{i-1})(x-x_{i+1})}{(x_i-x_1)(x_i-x_2)...(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})} \ldots \frac{(x-x_n)(x-x_{n+1})}{(x_i-x_n)(x_i-x_{n+1})} . \quad (8)$$

Като пример за използване на полином на Лагранж може да се даде изследване на експерименталната зависимост на съпротивлението $R_s$ на полупроводников образец от температурата $T$. На фиг. 2 е представена графика на експерименталната зависимост $R_s = R_s(T)$. За получаване на полинома на Лагранж се използват резултатите от 4 измервания (табл. 1).

Съгласно (8) се представя изследваната зависимост с полином на Лагранж

$$R_s = 88{,}8\frac{(T-40)(T-55)(T-70)}{(25-40)(25-55)(25-70)} + 42{,}0\frac{(T-25)(T-55)(T-70)}{(40-25)(40-55)(40-70)} + 26{,}7\frac{(T-25)(T-40)(T-70)}{(55-25)(55-40)(55-70)} + 18{,}0\frac{(T-25)(T-40)(T-55)}{(70-25)(70-40)(70-55)} .$$




***Фиг. 2**. Графика на експерименталната зависимост $R_s = R_s(T)$ за полупроводников образец*

Таблица 1. Експериментални резултати за получаване полинома на Лагранж за зависимостта $R_s = R_s(T)$

| Температура $T$, °C | Съпротивление $R_s$, Ω |
|---|---|
| 25 | 88,8 |
| 40 | 42,0 |
| 55 | 26,70 |
| 70 | 18,00 |

Получава се полином на Лагранж от трета степен

$R_s = -1{,}2296297.10^{-3}T^3 + 0{,}2175556T^2 - 13{,}295556T + 304{,}429637$,

където $T$ е в °C, а $R_s$ е в Ω.

Представянето на експериментални зависимости чрез полиноми на Лагранж може да се използва в следените упражнения от лабораторния практикум по физика в Технически университет – Габрово:

*- Определяне на стойности и величини, характеризиращи феромагнитни материали;*

*- Изследване на температурната зависимост на съпротивлението на метал и полупроводник;*

*- Определяне на интензитета на нажежаема лампа;*

*- Изследване на спектъра на газоразрядна лампа с помощта на монохроматор УМ2;*

*- Снемане на характеристики на фотоклетка;*

*- Изследване на температурната зависимост на съпротивлението на метал и полупроводник;*

*- Изследване на зависимостта на електропроводимостта на полупроводниците от интензитета на електрическото поле.*

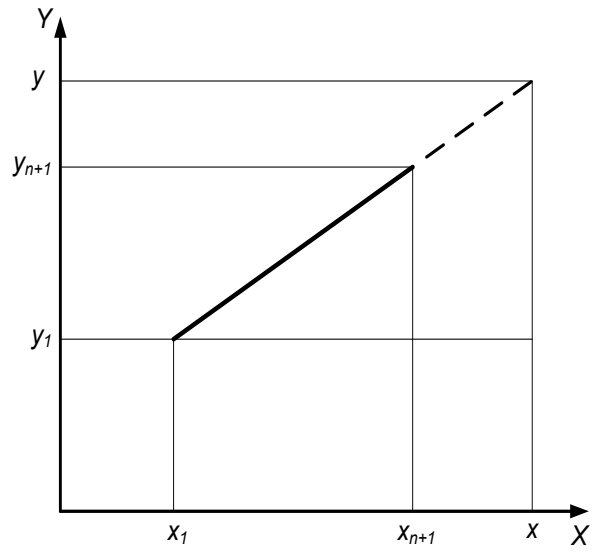
За екстраполация се използват функции от същия тип като най-често грешката е поголяма. Показана е линейна екстраполация, която се използва в изработваните от студентите лабораторни упражнения по физика.

Зависимостта $y = y(x)$ също трябва да е линейна или близка до линейната. Тя е представена графично на фиг. 3. Аргументът $x$ не съвпада с експерименталните данни и за него е изпълнено условието

$x < x_1$ или $x > x_{n+1}$.

Стойността на функцията $y$ се получава от израза

$$y = y_1 + \frac{y_{n+1} - y_1}{x_{n+1} - x_1}(x - x_1) . \quad (4)$$




***Фиг. 3.*** *Определяне на стойността на функцията* $y$ *за аргумента* $x$ *чрез линейна екстраполация*

Линейна екстраполация е подходяща при представяне на експериментални зависимости в следните упражнения от лабораторния практикум по физика:

*- Изследване на процесите на трептене на течност в U-видна тръба;*

*- Определяне на зависимостта на показателя на пречупване на светлината във въздух от налягането;*

*- Определяне на светлинен поток и светлинен добив на светлинен източник;*

За предложените методи на интерполация и екстраполация са разработени програми на EXCEL за пресмятане на стойности на функцията за различни стойности на аргумента, които не съвпадат с експериментално измерените величини. Например, за температура $T_1$ = 29 °C се получава съпротивление на полупроводниковия образец $R_{s1}$ = 70,3 Ω, а за температура $T_2$ = 42 °C съпротивление – $R_{s2}$ = 39,4 Ω.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучаването и прилагането на интерполационни и екстраполационни методи в лабораторния практикум по физика показва на студентите как от експериментални данни с дискретни стойности на величини се получават стойности на функцията за всяка стойност на аргумента в изследвания интервал. Тези знания са в помощ и при обучението им по инженерните дисциплини през цялото време на следването в университета и в бъдещата им работа като инженери.

Студентите виждат и взаимната връзка между изучаваното в две различни дисциплини и ползата от интеграционния подход в обучението.

## REFERENCE


[1] Smith, W., Experimental Physics. Principles and Practice for the Laboratory, CRC Press, 2022, 452 Pages, ISBN 9781032336657.

[2] Sokołowska, D., Michelini, M., The Role of Laboratory Work in Improving Physics Teaching and Learning, Springer, 2018, 190 Pages, ISBN: 978-3-319-96184-2.

[3] Bernard, C., C. Epp, Laboratory Experiments in College Physics, Wiley, 1994, 400 Pages, ISBN: 978-0-471-00251-2.

[4] Stoyanova-Temova, P. i dr., Fizika. Praktikum za laboratorni uprazhneniya, Univ. Izd. "Vasil Aprilov", Gabrovo, 2000 (in Bulgarian).

[5] Angelov, N., P. Danailov, D. Nedeva, Praktikum po Fizika, Univ. Izd. "Vasil Aprilov", Gabrovo, 2020, ISBN 978-954-683-621-2 (in Bulgarian).

[6] Danailov P., N. Angelov, D. Nedeva, Fizika: laboratoren dnevnik, Izd. "Eks-pres", Gabrovo, 2019, ISBN 978-954-490-657-3 (in Bulgarian).

[7] Bulgariu, M., Physics in an Interdisciplinary Approach, AIP Conference Proceedings 1203, 1256, 2010; DOI: https://doi.org/10.1063/1.3322350

[8] Tishenko, V., I. Kobrinskaya, Viyavlenie Prioritetnih Nauchnih Napravlenij: Mezhdudisciplinarniy Podhod, Izd. IMEMO RAN, Moskva, 2016 (in Russian).

[9] Minaeva, A., Ispolzvanie Mezhdupredmetnih Svyazey v Prepodavanii Matematiki v Tehnicheskom VUZE, Mezhdunarodnij studencheskij Vestnik, № 5(3), 2015, ISSN 2409-529X (in Russian).

[10] Boniolo, G., P. Budinich, M. Trobok, The Role of Mathematics in Physical Sciences — Interdisciplinary and Philosophical Aspects, Springer, 244 Pages, 2005, DOI: 10.1007/1-4020-3107-6-1.

[11] Barbeau, E., Polynomials, Springer, New York, 2003, 462 Pages, ISBN 13:978-0-387-40627-5.

[12] Chapra, S., R. Canale, Numerical Methods for Engineers, Mc Graw Hill, 2015, 970 Pages, ISBN 978–0–07–339792–4.

# РАДИОАКТИВНОСТ В *ACHILLEA MILLEFOLIUM* L. СЪБРАН ОТ ДВА РЕГИОНА В БЪЛГАРИЯ

**Нина Архангелова[1], Сениха Салим[1], Даниела Недева[2], Жени Димитрова[1]**

*[1]ШУ „Епископ Константин Преславски“*
*[2]ТУ - Габрово*

# RADIOACTIVITY IN *ACHILLEA MILLEFOLIUM* L. COLLECTED FROM TWO REGIONS IN BULGARIA

**Nina Arhangelova[1], Seniha Salim[1], Daniela Nedeva[2], Zheni Dimitrova[1]**

*[1] Konstantin Preslavsky University of Shumen*
*[2] Technical University of Gabrovo*

**Abstract**

*This research involves radiological study to assess medical herbs collected from the Shumen Plateau and Chavei village. The determination of specific activity concentrations were carried out using Ge(Li) detector for gamma spectrometric measurements. The results from the analysis for mean concentration of $^{40}K$, $^{232}Th$ and $^{226}Ra$ in Achillea millefolium L. (Shumen Plateau) were 1364.27±204.64 Bq/kg, 68.85±10.33 Bq/kg, 44.66±6.7 Bq/kg , and for Achillea millefolium L. (Chavei village) were 1445.48±216.82 Bq/kg, 53.29±7.99 Bq/kg, 71.89±10.78 Bq/kg. For each sample from Achillea millefolium L.- flower, leaves and stems Radium equivalent activity, Internal radiation hazard, External radiation hazard, Total yearly effective dose equivalent and Excess lifetime Cancer Risk have been determined. All results of the present work were found to be lower than their corresponding allowed limits, and hence will pose relatively none serious health risk and the radioactive hazard is low for human beings.*

**Keywords:** *Achillea millefolium* L., Activity concentration, Radium equivalent activity, Radiation dose, Annual effective dose, ELCR

## ВЪВЕДЕНИЕ

В ежедневието си човек използва множество лечебни растения под различни форми като чайове, екстракти, етерични масла и други. Голяма част от билките населението събира самостоятелно в различни райони на страната, без да е информирано за евентуалната радиационна опасност при употреба на големи количества от съответната билка. Ето защо оценката на радиационния риск би дала добра информация за облъчването на човека от естествени радионуклиди. Над 80% от облъчването на човека се дължи на естествени източници на радиация, които се откриват в околната среда, т.е. причиняват външно облъчване на човека.

Целта на настоящото изследването е да се оцени радиационния риск и нивото на радиация на Белия равнец (*Achillea millefolium* L.), едно от най-широко използваните у нас лечебни растения.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Белият равнец (*Achillea millefolium* L.) е многогодишно тревисто растение, което обитава тревисти места, ливади, храсталаци. Широко разпространен е в цяла България, от 0 до 2000 метра надморска височина. Цъфти от май до септември [1].

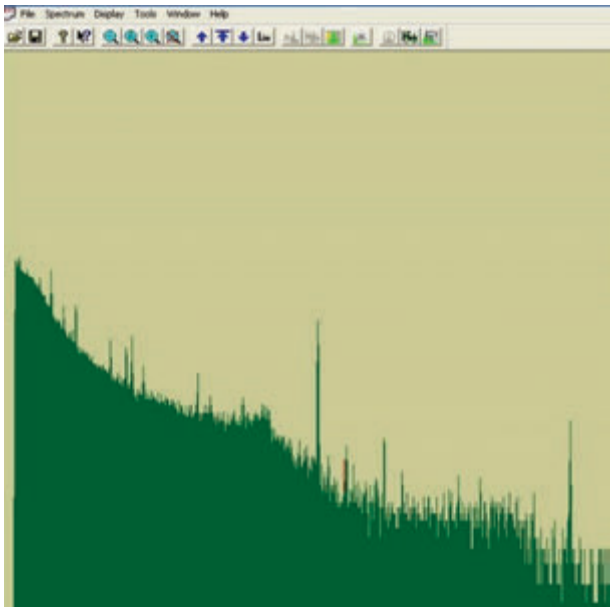
За провеждане на гама-спектрометричния анализ бяха подбрани цъфнали растения, събрани през месец юни (около Еньовден) от две области в България – Северна България, област Габрово, община Габрово, с. Чавеи и Североизточна България, област Шумен, община Шумен, Природен парк

Шуменско плато. Информация за местата на пробовземане е дадена в таблица 1.

***Таблица 1.*** *Информация за местоположенията от където са събрани пробите*

| Място | с. Чавеи | Шуменско плато |
|---|---|---|
| Област | Габрово | Шумен |
| Координати | 42°55'14"N 25°15'33"E | 43°16'45,6"N 26°56'59,9"E |
| Надморска височина [m] | 475 | 470 |

Събрани са листа, стъбла и цветове от Бял равнец от двете местности. Пробите са изсушени, стрити и приготвени за провеждане на гама-спектрометричен анализ. За целта беше използвана гама-спектрометпичната система, разположена в лабораторията по Ядрена физика и радиоекология в Шуменски университет. Системата включва полупроводников германиеволитиев детектор с изградена пасивна защита и ефективност на детектора 4.5% за линията на $^{137}$Cs (E = 661.66 keV) [2]. Получените данни се обработват посредством специализиран софтуер за гама спектри ANGES [3]. Методиката за определяне на радионуклидите е свързана с идентификация на гама линиите по техните енергии и пресмятане на специфичната активност на всеки регистриран радионуклид, чрез нетните площи на регистрираните пикове. Примерен спектър е представен на фигура 1.



***Фиг. 1****. Спектър получен от проведения гама-спектрометричен анализ*

Специфичната активност на всеки от радионуклидите е пресметната по формула (1):

$$A_{sp} = \frac{S_{net}}{I.t.\varepsilon.m} \qquad (1)$$

$S_{net}$ – нетна площ на пика
$I$ – квантов добив
$t$ – времето за събиране на спектъра
$\varepsilon$ – ефективност на детектора за съответната гама линия
m – маса на измерваната проба [4].

В таблица 2 са представени резултатите от проведения гама-спектрометричен анализ.

***Таблица 2.*** *Резултати от проведения гама-спектрометричен анализ на пробите от Бял равнец*

| Място на пробовземане | проба | Специфична активност [Bq/kg] | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $^{226}$Ra | $^{232}$Th | 40K |
| Шуменско плато | цвят | 46.14±6.92 | 61.69±9.25 | 1531.53±229.73 |
| | листа | 45.78±6.87 | 98.82±14.82 | 1439.42±215.91 |
| | стъбла | 42.07±6.31 | 46.04±6.91 | 1121.87±168.28 |
| с. Чавеи, Габрово | цвят | 47.50±7.13 | 73.67±11.04 | 1996.51±299.48 |
| | листа | 95.80±14.23 | 35.69±5.35 | 1226.77±184.02 |
| | стъбла | 73.37±11.01 | 38.78±5.82 | 1113.15±166.97 |

Специфичната активност на $^{226}$Ra е в интервала от 42 – 96 Bq/kg. Най-висока специфична активност за $^{226}$Ra е отчетена в листата на Белия равнец събрани от с. Чавеи, а най-ниска стойност в стъблата от Шуменско плато. Специфичните активности за $^{232}$Th са в интервал от 35 до 99 Bq/kg, като най-ниската стойност е отчетена за листата събрани от с. Чавеи, а най-високата стойност е получена за листата на Белия равнец събран от Шуменско плато. Специфичните активности за $^{40}$K са в интервала от 1100 до 2000 Bq/kg, като най-ниската специфична активност е определена за стъблата, а най-високата стойност е отчетена за цветовете събрани от с. Чавеи.

За определяне на радиационните ефекти върху човека се използват различни фактори на въздействие.

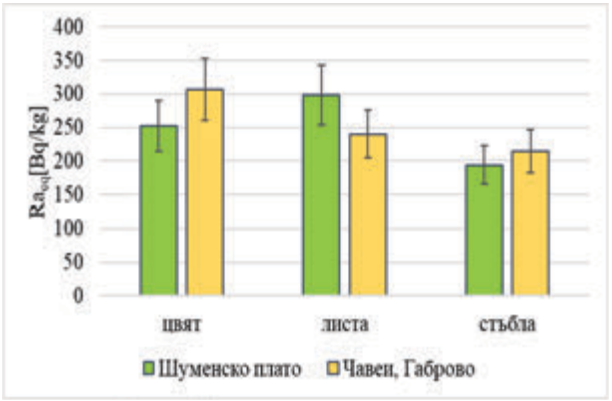
**1. Радиев еквивалент ($Ra_{eq}$)**

Този фактор се прилага за оценка на радиологичната опасност на проби от околната среда. Той може да бъде пресметната по формула (2) [5]:

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K\ , \qquad (2)$$

където $A_{Ra}$, $A_{Th}$, и $A_K$ са специфичните активности на $^{226}$Ra, $^{232}$Th и $^{40}$K.

Данните за радиев еквивалент получени за пробите от Бял равнец са представени на фигура 2.




***Фиг. 2**. Графично представяне на радиев еквивалент в листа, стъбла и цветове на Бял равнец*

Стойностите получени за радиевият еквивалент са в интервал от 190 до 310 Bq/kg. Най-високи стойности са отчетени в пробата от цвят събрана от с. Чавеи и в пробата от листа събрана от Шуменското плато, а най-ниски стойности са отчетени в стъблата и на двете проби.

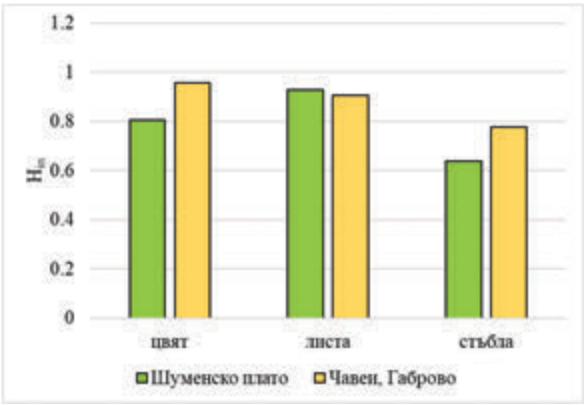
**2. Индекси при външно и вътрешно облъчване.**

Тези индекси са свързани с опасността от външно ($H_{ex}$) или вътрешно ($H_{in}$) облъчване на организмите. Приема се, че същата скорост на разпадане ще бъде получена от 370 Bq/kg за външно облъчване и 185 Bq/kg при вътрешно облъчване за $^{226}$Ra, 259 Bq/kg за $^{232}$Th и 4810 Bq/kg за $^{40}$K присъстващи в пробата [6]:

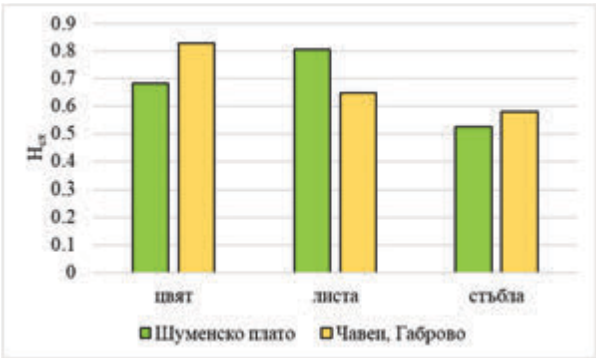
$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \qquad (3)$$

$$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \qquad (4)$$

Получените резултати са представени графично на фигури 3 и 4.




***Фиг. 3**. Графично представяне на индекса на вътрешно облъчване*




***Фиг. 4**. Графично представяне на индекса на външно облъчване*

Всички пресметнати стойности за индексите на вътрешно и външно облъчване са по-малки от 1. Като и за двата индекса, стойностите са най-ниски за стъблата.

### 3. Мощност на погълнатата доза

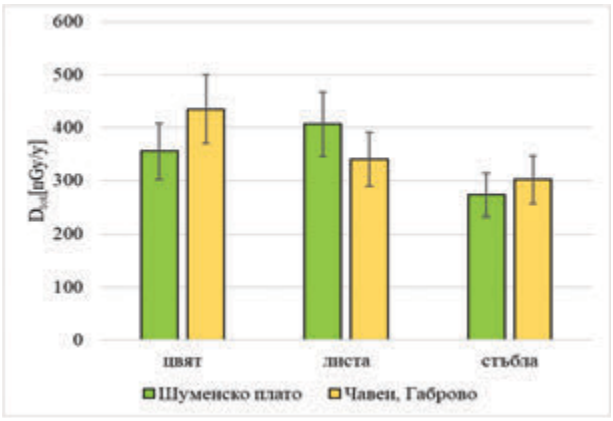
Мощността на погълнатата доза във въздуха може да бъде пресметната чрез (5) и (6), с които се оценява съответно мощността на погълнатата доза на открито и мощността на погълнатата доза на закрито. Общата мощност на погълнатата доза се пресмята като сума от мощности на погълнатите дози за година получени на открито и закрито (7).

$$D_{out} = 0.436A_{Ra} + 0.599A_{Th} + 0.0417A_K \quad (5)$$

$$D_{in} = 0.92A_{Ra} + 1.1A_{Th} + 0.081A_K \quad (6)$$

$$D_{tot} = D_{out} + D_{in} \quad (7)$$

Резултатите получени за общата мощността на погълнатата доза за Белия равнец са представени на фигура 5.




***Фиг. 5**. Графично представяне на общата мощност на погълнатата доза за Бял равнец*

Стойностите изчислени за мощността на погълнатата доза са в интервала от 273 до 435 nGy/y. Най-висока стойност е получена за пробата от цветове събрана от с. Чавеи.

### 4. Годишна индивидуална ефективна доза

Оценка на годишната индивидуална ефективна доза получена на открито и на закрито, може да се направи като се вземат предвид коефициентите на преобразуване от мощността на погълнатата доза във въздуха в ефективната доза и коефициента на заетост на открито и закрито. Съгласно докладите на UNSCEAR (1993, 2000) [7], се използват следните коефициенти на преобразуване: 0.7 Sv/Gy от абсорбираната доза във въздуха до ефективната доза, получена от възрастни. Счита се, че около 20% от времето хората прекарват на открито, а 80% на закрито, поради което коефициентите на открито и закрито ще бъдат съответно 0.2 и 0.8. Следователно годишната индивидуална ефективна доза $E_{out}$ (mSv/y) на открито може да бъде изчислена по формула (8), а на закрито по формула (9).

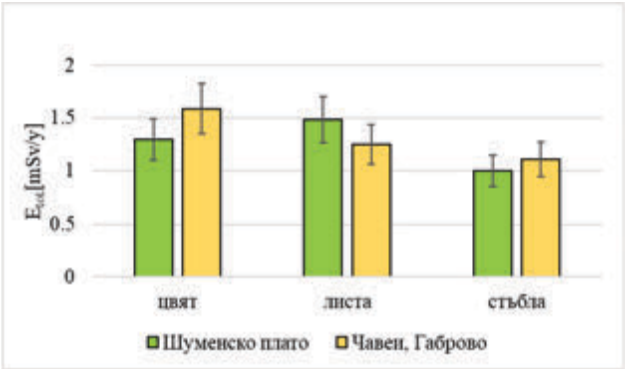
$$E_{out}\left[\frac{mSv}{y}\right] = D_{out}\left[\frac{nGy}{h}\right] + 8760[h] * 0.2 * 0.7\left[\frac{Sv}{Gy}\right] = D_{out}\ 1.226\ [\mu Sv] \quad (8)$$

$$E_{in}\left[\frac{mSv}{y}\right] = D_{in}\left[\frac{nGy}{h}\right] + 8760[h] * 0.8 * 0.7\left[\frac{Sv}{Gy}\right] = D_{out} * 4.905\ [\mu Sv] \quad (9)$$

Средната годишна ефективна доза може да бъде пресметната като сума от средната годишна ефективна доза получена на закрито и средната годишна ефективна доза на открито:

$$E_{tot} = E_{out} + E_{in} \quad (10)$$

Резултатите за средната годишна индивидуална ефективна доза получени за пробите от Бял равнец са представени на фигура 6.




***Фиг. 6**. Графично представяне на резултатите получени за средната годишна индивидуална ефективна доза за пробите от Бял равнец*

Средната годишна индивидуална ефективна доза е най-висока в цветовете на белия равнец, събран от с. Чавеи. Най-ниски стойности са отчетени за стъблата на двете проби.

### 5. Повишен риск от рак през целия живот

Рискът от рак през целия живот (*ELCR* – Excess lifetime cancer risk) може да се определи като вероятност от развитие на рак

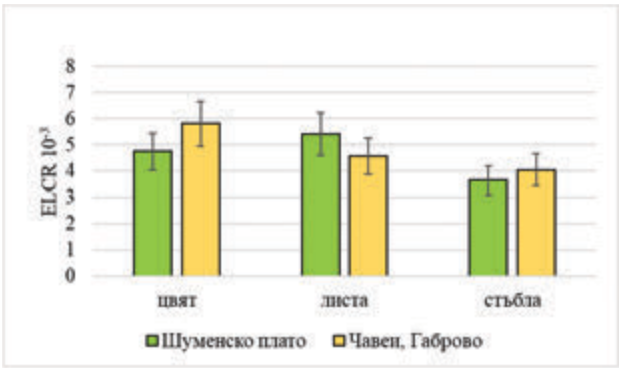
поради нивата на излагане на радиация. Този фактор може да бъде пресметнат, като се вземат предвид стойностите получени за средната годишна ефективна доза, средната продължителност на живот ($D_L$) и рисковия фактор ($R_F$), който съгласно ICRP (International Commission on Radiological Protection) е 0.05 за населението в случай на стохастични ефекти [8]. Средната продължителност на живот за България, съгласно данни от националния статистически институт за периода 2019-2021 година е 73 години [9]. Сумата от стойностите получени за повишен риск от рак на открито (11) и на закрито (12) дава общия повишен риск от рак през целия живот (13).

$$ELCR_{out} = E_{out} D_L R_F \quad (11)$$

$$ELCR_{in} = E_{in} D_L R_F \quad (12)$$

$$ELCR_{tot} = ELCR_{out} + ELCR_{in} \quad (13)$$

Резултатите получени за риска от рак през целия живот са представени на фигура 7.




***Фиг. 7**. Графично представяне на резултатите получени за риска от рак през целия живот получени за пробите от Бял равнец*

Стойностите получени за риска от рак през целия живот са в интервал от 3.6 $10^{-3}$ - 5.8 $10^{-3}$. Най-ниски стойности отново са получени за стъблата, а най-висока стойност е отчетена за цветовете на Белия равнец събран от с. Чавеи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа са представени резултати свързани с оценката на радиационния риск при употреба на широко употребяваната в ежедневието билка Белият равнец (*Achillea millefolium* L.). Пресметнати са радиевия еквивалент, индексите при вътрешно и външно облъчване, общата мощност на погълнатата доза, годишната ефективна доза и риска от рак през целия живот. Пресметнатите стойности за всички радиационни фактори на въздействие са най-високи за листата на Белия равнец, събран от с. Чавеи, а най-ниски са за стъблата и на двете проби.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Измерванията са направени с финансовата подкрепа на проект РД-08-80/09.02.2022 г., на ШУ "Епископ Константин Преславски" и подкрепени от Министерство на образованието и науката по Националната програма „Млади учени и постдокторанти – 2".

## REFERENCE

[1] https://bgflora.net/families/asteraceae/achillea/achillea_millefolium/achillea_millefolium.html
[2] Jechev, A., „System for low background gamma measurements", Thesis, Shumen University, 1996.
[3] Mishev, Pl., Vidolov, V., Program ANGES, Research Contact 9493/RO, Vienna, Austria, IAEA.
[4] G. Vassilev, Radioecology – Radiation, Ecology, Human, Bulgaria, Theta Cons., Sofia, Bulgaria, 2005.
[5] J. Beretka, P.J. Mathew, Health Phys., 1985, 48, 87.
[6] R. Veiga, N. Sanches, R. M. Anjos, K. Macario, J. Bastos, M. Iguatemy, J. G. Aguiar, A. M. A. Santos, B. Mosquera, C. Carvalho, M. Baptista Filho, N. K. Umisedo, Radiat. Meas. 41 (2006) 189.
[7] UNSCEAR (2000). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly, With Scientific Annexes, United Nations Publication, New York.
[8] ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.ICRP. Publication 60, Ann.ICRP21 (1-3), 1991.
[9] https://www.nsi.bg/bg

# РАДИОАКТИВНОСТ В ТРИ ЛЕЧЕБНИ РАСТЕНИЯ, СЪБРАНИ ОТ РЕГИОНА НА ШУМЕН, БЪЛГАРИЯ

**Нина Архангелова[1], Сениха Салим[1], Даниела Недева[2], Жени Димитрова[1]**

*[1]ШУ „Епископ Константин Преславски“*
*[2]ТУ - Габрово*

# RADIOACTIVITY IN THREE HERBS COLLECTED FROM REGION IN SHUMEN, BULGARIA

**Nina Arhangelova[1], Seniha Salim[1], Daniela Nedeva[2], Zheni Dimitrova[1]**

*[1] Konstantin Preslavsky University of Shumen*
*[2] Technical University of Gabrovo*

**Abstract**

*This research involves study to assess radiation in herbs collected from region in Shumen, Bulgaria. The determination of specific activity concentrations were carried out using Ge(Li) detector for gamma spectrometric measurements. The results from the analysis for concentration of $^{40}K$, $^{232}Th$ and $^{226}Ra$ in Taraxacum were 1000±194 Bq/kg, 43±6 Bq/kg, 50±8 Bq/kg, for Stellaria media were 2770±416 Bq/kg, 108±16 Bq/kg, 54±8 Bq/kg and for Lamium purpureum were 1290±194 Bq/kg, 54±8 Bq/kg, 56±8 Bq/kg. For each sample Radium equivalent activity, Internal radiation hazard, External radiation hazard, Total yearly effective dose equivalent and Excess lifetime Cancer Risk have been determined.*

**Keywords:** *Taraxacum officinale* L., *Lium purpureum* L., *Stellaria media* L., Activity concentration, Radium equivalent activity, Annual effective dose, ELCR

## ВЪВЕДЕНИЕ

В природата се срещат различни видове лечебни растения, които имат способността да натрупват, както различни химични елементи, така и отделни радиоактивни изотопи в различни количества. Хората, в своето ежедневие употребяват различни растения под формата на подправки, чайове и други е важно да се знае, какво е съдържанието и количество на радионуклидите, които са акумулирани от тях.

През последните години все по-често за оценка на риска от вътрешно и външно облъчване на човека се използват индекси свързани с количеството на радионуклидите попаднали в организма на човека, вследствие пребиваването му на открито и закрито и консумиране на различни видове храни и напитки.

За целта на нашето проучване бяха изследвани три вида лечебни растения: Червена мъртва коприва (*Lium purpureum* L.), Лечебно глухарче (*Taraxacum officinale* L.) и Средна звездица (*Stellaria media* L.). Определени са специфичните активности на радионуклидите $^{40}K$, $^{232}Th$ и $^{226}Ra$, както и са пресметнати коефициенти свързани с радиационния риск.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Широко разпространени на територията на България и добре познати на хората са трите лечебни растения, които са обект на нашето изследване – Средна звездица (*Stellaria media* L.), Лечебно глухарче (*Taraxacum officinale* L.) и Червена мъртва коприва (*Lium purpureum* L.).

Средна звездица (Фиг. 1а) е наричана още Врабчови чревца, Звездица, Мишакиня, Птича трева. Тя е лечебно, хранително и плевелно растение от семейство Карамфилови (Caryophyllaceae) [1]. Едногодишно или двугодишно тревисто растение. Среща се в цялата страна от 0 до 1500 метра надморска височина. Расте край пътища, в дворове, край огради, като плевел в ниви, влажни тревисти места. Цъфти целогодишно. Прилага се при лечение на ревматизъм, ставни заболявания, запек, кожни инфекции и рани от изгаряния и др. [3].



***Фиг. 1а**. Снимка на Средна звездица (Stellaria media* L.)

Лечебното глухарче (Фиг. 1б) е многогодишно тревисто растение от семейство Сложноцветни (Asteraceae). Обитава тревисти места - ливади, поляни, паркове; край пътища; пустеещи места и др. Расте в цялата страна, достига до 2500 m надморска височина. Цъфти от март до ноември. Лечебно и хранително растение. Най-често за билка се използва корен от Глухарче, а младите листа се употребяват като салата. Също така се използва за стимулиране секрецията на храносмилателната система, чернодробни и жлъчни заболявания, депресия, за засилване на апетита и като диуретично средство и др. [2].



***Фиг. 1а**. Снимка на Лечебно глухарче (Taraxacum officinale* L.*)*

Червената мъртва коприва (Фиг. 1в) принадлежи към семейство Устоцветни (Lamiaceae) и е едногодишно тревисто растение. Среща се на територията на цялата страна от 0 до 1200 m надморска височина. Расте по тревисти и буренливи места, ниви. Цъфти през периода март – май. [1, 2]. Има аналгетично, противовъзпалетилно, антимикробно и антиоксидантно действие. Прилага се при болки в гърлото и възпалени сливици [4, 5]. Притежава противоалергично, седативно, транквилизиращо, укрепващо, спазмолитично, антиаритмично, диуретично, антисептично действия и др. [6, 7].



***Фиг. 1в**. Снимка на Червена мъртва коприва (Lium purpureum* L.*)*

За целта на нашето изследване бяха събрани листа от глухарче, червена мъртва коприва и средна звездица от двора на Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“, гр. Шумен. Събраните проби бяха почистени и изсушени при стайна температура. За определяне на концентрацията на радионуклидите $^{40}$K, $^{232}$Th и $^{226}$Ra количества от 14 – 16 g от фино стритите проби бяха подложени на гама-спектрометричен анализ. Анализът  е проведен в лабораторията по Ядрена физика и радиоекология на Шуменски университет посредством намиращата се там гама-спектрометпичната система, която включва полупроводников германиеволитиев детектор с ефективност 4.5% за 661.66 keV гама-линията на $^{137}$Cs, обем на кристала 60 cm$^3$ и работно напрежение 1 kV. Около детектора е изградена нискофонова пасивна защита състояща се от 100 mm олово, 5 mm алуминий и 1 mm кадмий [8]. Регистрираните гама-спектри се обработват чрез

специализирания софтуер ANGES, който дава възможност да се идентифицират радионуклидите в пробите по техните енергийни линии и да се пресметнат активностите им [9]. Специфичните активности на пробите се определят посредством израз (1), в който с $S_{net}$ е нетната площ на пика, $I$ е квантовия добив, $t$ е живото времето за събиране на спектъра, $\varepsilon$ е ефективността на детектора за конкретна гама-линия, а m е маса на измерваната проба в [kg] [10].

В таблица 1 са представени получените резултатите за $^{40}$K, $^{232}$Th и $^{226}$Ra от проведения гама-спектрометричен анализ.

***Таблица 1.*** *Резултати от проведения гама-спектрометричен анализ на пробите от Червена мъртва коприва (*Lium purpureum *L.), Лечебно глухарче (*Taraxacum officinale *L.) и Средна звездица (*Stellaria media *L.), събрани в района на ШУ*

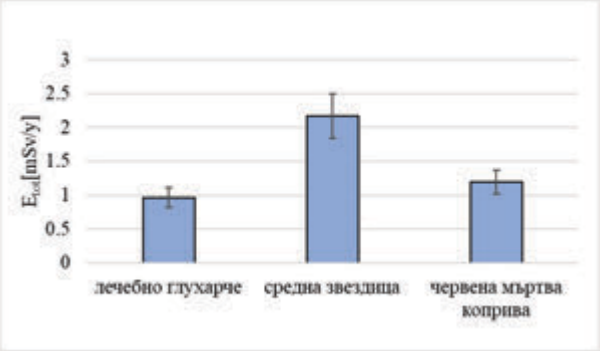
| проба | Специфична активност [Bq/kg] | | |
|---|---|---|---|
| | $^{226}$Ra | $^{232}$Th | 40K |
| Червена мъртва коприва | 56±8.4 | 54±8 | 1290±194 |
| Лечебно глухарче | 50±7.5 | 43±7.5 | 1000±150 |
| Средна звездица | 52±7.8 | 108±16 | 2770±416 |

Получените стойности за специфичната активност на $^{226}$Ra са в интервала от 50 до 56 Bq/kg. Най-висока стойност е отчетена за Червената мъртва коприва, а най–ниска за Лечебното глухарче. Отчетените стойности и за трите билки са близки в рамките на експерименталната грешка. Специфичните активности за $^{232}$Th са в интервал от 43 до 108 Bq/kg, като най-ниската стойност е отчетена за Лечебното глухарче, а най-висока е за Средната звездица. Специфичните активности получени за $^{40}$K са в интервала от 1000 до 2770 Bq/kg, като най-ниската стойност е регистрирана за Лечебното глухарче, а най-високата е тази получена за Средната звездица.

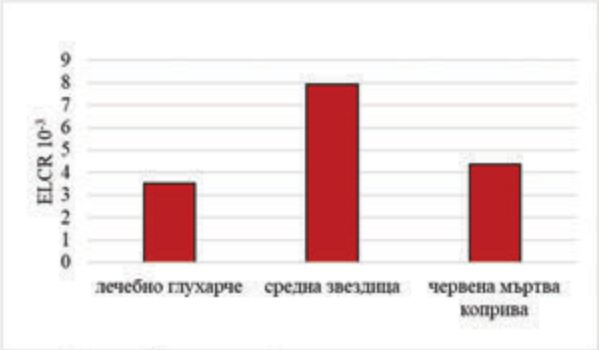
На база получените резултати от гама-спектрометричния анализ са изчислени някои от по-популярните радиационни фактори, позволяващи оценяването на радиационните ефекти върху човека вследствие облъчване с естествени радионуклиди намиращи се в обкръжаващата ни среда. Резултатите за радиев еквивалент ($Ra_{eq}$) и индексите при външно ($H_{ex}$ ) и вътрешно ($H_{in}$) облъчване са представени в Таблица 2, а стойностите за средната годишна индивидуална ефективна доза ($E_{tot}$) и повишен риск от рак през целия живот ($ELCR_{tot}$) са представени на фигури 4 и 5 [11].

***Таблица 2.*** *Резултати получени за радиев еквивалент ($Ra_{eq}$), Индекси при външно ($H_{ex}$ ) и вътрешно ($H_{in}$) облъчване при анализ на проби от Червена мъртва коприва (Lium purpureum* L.), *Лечебно глухарче (Taraxacum officinale* L.*) и Средна звездица (Stellaria media* L.*), събрани в района на ШУ*

| проба | $Ra_{eq}$ [Bq/kg] | $H_{in}$ | $H_{ex}$ |
|---|---|---|---|
| Лечебно глухарче | 189±28 | 0.51 | 0.64 |
| Средна звездица | 420±63 | 1.13 | 1.27 |
| Червена мъртва коприва | 233±35 | 0.63 | 0.78 |




***Фиг. 2**. Графично представяне на средната годишна индивидуална ефективна доза получена за трите лечебни растения, събрани от двора на ШУ*




***Фиг. 3**. Графично представяне на резултатите получени за риска от рак през целия живот за пробите от Лечебно глухарче, Средна звездица и Червена мъртва година събрани от двора на ШУ"Епископ Константин Преславски"*

Стойностите получени за радиевият еквивалент са съответно 189±28 Bq/kg за Лечебно глухарче, 233±35 Bq/kg за Червена мъртва коприва и най-високата отчетена стойност е 420±63 Bq/kg за Средна звездица.

Пресметнати са индексите от външно и вътрешно облъчване (на открито и закрито) като единствено стойностите получени за Средната звездица са над 1, а стойностите получени за Лечебно глухарче и Червена мъртва коприва са в интервала от 0.5 до 0.8.

Средната годишна индивидуална ефективна доза е пресметната като сума от годишната ефективна доза получена на открито и същата получена на закрито. Годишната ефективна доза получена на открито е изчислена, като се вземат предвид коефициентът на заетост на открито (20% от 8760 часа годишно или 0,2 от 8760 часа) както и коефициентът на преобразуване от погълнатата доза във в ефективна доза [11]. Според доклада на UNSCEAR от 1993 г. коефициентът на преобразуване е 0.7 Sv/Gy за преобразуване на погълнатата доза във въздуха в ефективна доза. Така изчислената обща годишната ефективна доза е най-висока за пробата от Средна звездица (2.17 mSv/y) и най-ниска за пробата от Лечебно глухарче (0.96 mSv/y).

Използвайки стойностите получени за средната годишна ефективна доза и имайки в предвид данните за средната продължителност на живот ($D_L$), която по данни от националния статистически институт за периода 2019-2021 година е 73 години [12] и рисковия фактор ($R_F$), който съгласно ICRP (International Commission on Radiological Protection) е 0.05 за населението в случай на стохастични ефекти [13] може да бъде пресметнат общия повишен риск от рак през целия живот [11]. Стойностите получени за риска от рак през целия живот за трите изследвани от нас лечебни растения са в интервал от $3.5\ 10^{-3}$ - $7.9\ 10^{-3}$. Най-висока стойности отново е получени за пробата от Средна звездица, а най-ниска за пробата от Лечебно глухарче.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа са представени резултати за специфичните активности на $^{40}K$, $^{232}Th$ и $^{226}Ra$ получени след проведен гама-спектрометричен анализ на проби от Лечебно глухарче, Средна звездица и Червена мъртва коприва, събрани в двора на централна сграда на Шуменски университет. Най-високи стойности за $^{40}K$, $^{232}Th$ са отчетени за Средната звездица, а за $^{226}Ra$ в Червената мъртва коприва.

Пресметнати са и радиевия еквивалент, индексите на вътрешно и външно облъчване, средна годишна индивидуална ефективна доза и коефициента отчитащ риска от рак през целия живот. Най-високи стойности за всички споменати по-горе коефициенти са отчетени за пробата от Средна звездица събрана в района на ШУ, а най-ниски те са за Лечебното глухарче.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Измерванията са направени с финансовата подкрепа на проект РД-08-80/09.02.2022 г., на ШУ "Епископ Константин Преславски" и подкрепени от Министерство на образованието и науката по Националната програма „Млади учени и постдокторанти – 2".

## REFERENCE


[1] Zahariev, D., Dimitrova, Zh., Kaschieva, M., Boicheva, P., Taneva, L., „ Album of medicinal plants in Bulgaria", 2015

[2] The Bulgarian flora online - https://bgflora.net

[3] Habib H. Ahmadand Mukhtar Alam, Traditional uses of medicinal plants of Nandiar Khuwarr catchment (District Battagram), Pakistan, Journal of Medicinal Plants Research, Vol. 5(1), 39-48

[4] Özhatay N., Ç. Kizilarslan, WILD PLANTS USED AS MEDICINAL PURPOSE IN THE SOUTH PART OF İZMİT (NORTHWEST TURKEY), Turk J. Pharm. Sci. 9(2), 2012, 199-218

[5] Yalcin, F.N., Duygu Kaya, Ethnobotany, Pharmacology and Phytochemistry of the Genus Lamium (Lamiaceae), FABAD J. Pharm. Sci., 31, 2006, 43-52

[6] http://healingweeds.blogspot.bg/2013/04/purple-deadnettle.html

[7] Dimitrova, D., Dimitrov, M., Vraca, 2014, „Medicinal plants in Natural Park Vrachanski Balkan", ISBN 978-954-2953-33-3

[8] Jechev, A., „System for low background gamma measurements", Thesis, Shumen University, 1996

[9] Mishev, Pl., Vidolov, V., Program ANGES, Research Contact 9493/RO, Vienna, Austria, IAEA

[10] G. Vassilev, Radioecology – Radiation, Ecology, Human, Bulgaria, Theta Cons., Sofia, Bulgaria, 2005

[11] UNSCEAR (2000). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly, With Scientific Annexes, United Nations Publication, New York.

[12] https://www.nsi.bg/bg

[13] ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.ICRP. Publication 60, Ann.ICRP21 (1-3), 1991