

## ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА НА НАЙ-МАЛКИТЕ КВАДРАТИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МОДЕЛНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ДВУКОЛЕКТОРЕН МАГНИТОТРАНЗИСТОР

**Казолис Димитриос Теодоси, Анатолий Александров, Гергана Миронова**

*Институт по технологии на Източна Македония и Тракия*

*Технически университет Габрово*

*Технически университет Габрово*

## APPLICATION OF THE SMALLEST SQUARES METHOD FOR DETERMINING THE MODEL PARAMETERS OF A TWO-COLLECTOR MAGNETOTRANSISTOR

**Kazolis Dimitrios Theodosius, Anatoliy Aleksandrov, Gergana Mironova**

*Eastern Macedonia and Thrace Institute of Technology*

*Technical university of Gabrovo*

*Technical university of Gabrovo*

### Abstract

*An approach for application of the smallest squares method is proposed to determine the parameters of a static PSpice based behavioral model of a two-collector magnetotransistor. The approach is based on a developed algorithm for processing information from experimentally obtained volt-ampere and magnetolectric characteristics. In order to repeatedly use of the same analytical dependences to determine different model parameters, it is offered operation with symbolic variables, as well as formation of solutions for polynomial coefficients in symbolic form. With the proposed approach, values of the model parameters of a sample of a two-collector magnetotransistor, type 2T1MP1 are obtained. For verification of the obtained values a simulation of volt-ampere and conversion characteristics is realized. An evaluation of the results is performed..*

**Keywords:** smallest squares method, behavioral model, magnetotransistor, PSpice.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на съвременната магнитоелектроника е тясно свързано с приложението на голямо разнообразие от галваномагнитни елементи. С приоритетен интерес сред тях са биполярните двуколекторни магнитотранзистори (ДМТ) [2, 6, 7, 15, 22], които се отличават от останалите видове магнитотранзистори [2, 4, 5, 7, 9, 20] с най-висока токова магниточувствителност и линейни характеристики в широк обхват на изменение на магнитното поле.

И докато по отношение на физическите процеси, характеристики и параметри на ДМТ съществува голямо количество ин-

формация [4, 6, 7, 9], то недостатъчна е информацията за техните електрически и магнитоелектрически характеристики и параметри, които са необходими за анализ на функционирането, избор на оптимален режим на работа и оценка на възможностите за реално практическо приложение на този вид елементи. Това е обективна предпоставка за изследване на характеристиките им при различни условия на функциониране, което може да се осъществи като се приложи или експериментален [1, 11, 19], или симулационен [3, 12, 15, 21] подход. С развитието на PSpice базирани интегрирани среди за автоматизирано проектиране в

електрониката, като MicroSim Design Lab [16], OrCAD [18], Cadence, NI Multisim и др., симулационният подход се превърна в доминиращ както по отношение на схеми и устройства, така и по отношение на градивните елементи.

Особено актуална в областта на автоматизираното проектиране в магнитотранзисторната електроника и нерешена в достатъчна степен е задачата, свързана с определяне на числените стойности на набора от моделни параметри на ДМТ при различни режими на работа. Това от своя страна изисква прилагането на подходящ метод за обработка на данни за волт-амперни, магнитоелектрически, волт-фарадни и времеви характеристики за ДМТ. Подходящи за целта са числените методи, като метод на Гаус, метод на хордите, метод на трите и петте ординати, нелинейни итеративни методи, метод на най-малките квадрати (МНМК) [14, 17] и др.

Изборът на метод се определя от различни фактори, като: ограничения по отношение на вид (табличен или графичен) и количество на данните за магнитотранзистора, които подлежат на обработка, точност на моделиране, бързодействие и т.н.

Целта на настоящата работа е определяне на числените стойности на набора от параметри, които характеризират предложени в [13] статичен PSpice базиран поведенчески модел на ДМТ, като се използва МНМК.

Аргументите за избора на МНМК са предимствата му пред останалите методи, а именно: висока точност на резултатите, тъй като единствено при него се минимизира средноквадратичната грешка между експериментални и моделни характеристики, универсалност на приложение, независимо от вида и броя на данните за обработка, възможност за алгоритмизация и програмна реализация с използване на символни променливи и извеждане на резултатите както в символен, така и в числен вид.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

*Същност на метода на най-малките квадрати*

Методът на най-малките квадрати, при който броят на обработваните данни, е

много по-голям от броя на неизвестните, е широко приложим в областта на експерименталното моделиране. Особено ефективен може да бъде този метод за определяне на моделните параметри на ДМТ при комбиниран подход на моделиране – аналитично и експериментално. При него основните статични и динамични характеристики на магнитотранзистора, от една страна, се представят чрез аналитични зависимости, в които фигурират неизвестните моделни параметри, а от друга – чрез експериментално получени данни. За прилагане на МНМК всяка една от използваните характеристика се апроксимира чрез полином от n-та степен спрямо променливата x:

$$p_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1)$$

Полиномът, коефициентите  $a_0^*, a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*$  на който минимизират функцията

$$\Phi(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^N \left[ y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n) \right]^2 \quad (2)$$

се явява полином на най-доброто приближение по МНМК.

Коефициентите  $a_0^*, a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*$  са решение на линейната алгебрична система уравнения от вида:

$$\begin{cases} N a_0 + \left( \sum_{i=1}^N x_i \right) a_1 + \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) a_2 + \dots + \left( \sum_{i=1}^N x_i^n \right) a_n = \sum_{i=1}^N y_i \\ \left( \sum_{i=1}^N x_i \right) a_0 + \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) a_1 + \left( \sum_{i=1}^N x_i^3 \right) a_2 + \dots + \left( \sum_{i=1}^N x_i^{n+1} \right) a_n = \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \dots \\ \left( \sum_{i=1}^N x_i^n \right) a_0 + \left( \sum_{i=1}^N x_i^{n+1} \right) a_1 + \left( \sum_{i=1}^N x_i^{n+2} \right) a_2 + \dots + \left( \sum_{i=1}^N x_i^{2n} \right) a_n = \sum_{i=1}^N x_i^n y_i \end{cases} \quad (3)$$

където:

N – брой точки от характеристиката, която се апроксимира;

$X_i, Y_i$  – експериментални стойности на аргумента и функцията (координати) за i-та точка от характеристиката;

N – Степен на апроксимацията полином.

Част от коефициентите, които се получават след прилагане на МНМК спрямо конкретна характеристика на магнитотранзи-

стора, са директно моделни параметри, а другите се използват за определяне на останалите параметри, свързани с тази характеристика.

Процедура и алгоритъм за приложение на МНМК за определяне на моделните параметри на ДМТ

С оглед определяне на апроксимиращите коефициенти, независимо от степента на полинома и без да е необходимо многократното повторение на едни и същи операции, тук се предлага процедура, при която се използват символни променливи и се получават решения също в символен вид. Процедурата за определяне на моделните параметри е предназначена за обработка на експериментални данни чрез МНМК и предполага реализация в Matlab среда [16]. Тя включва следните основни стъпки:

**Стъпка 1:** Дефинират се използваните символни променливи.

**Стъпка 2:** Задава се броят  $NA$  на апроксимациите, които да се извършат.

**Стъпка 3:** Задават се чрез вектори стойностите на координатите  $([x], [y])$  на точките, чрез които се апроксимира съответната характеристика.

**Стъпка 4:** Задава се степента  $n_i$  на  $i$ -тия апроксимиращ полином.

**Стъпка 5:** Извършва се проверка дали вече е извършвана апроксимация с полином от същата степен (идентифицира се чрез променливата  $m$ , която приема стойност 1, когато  $n$  участва с текущата стойност за първи път). Ако такъв полином вече е използван, следващите 2 стъпки се пропускат, а в противен случай, се изпълнява поредната стъпка.

**Стъпка 6:** Задават се в символен вид уравнения от вида (3), като броят им зависи от степента на апроксимиращия полином (за полином от  $n$ -та степен броят на уравненията е  $n+1$ ).

**Стъпка 7:** Решава се дефинираната система уравнения чрез използване на Matlab командата `solve`, в резултат на което се получават апроксимиращите коефициенти в символен вид.

**Стъпка 8:** Определя се броят на точките от апроксимираната характеристика, за които се обработват данните ( $N=length[x]$ ).

**Стъпка 9:** Чрез данните за  $X_i$ ,  $Y_i$  и  $N$  се пресмятат необходимите суми пред коефициентите в дефинираната в Стъпка 6 система линейни уравнения (в уравненията тези суми са в символен вид).

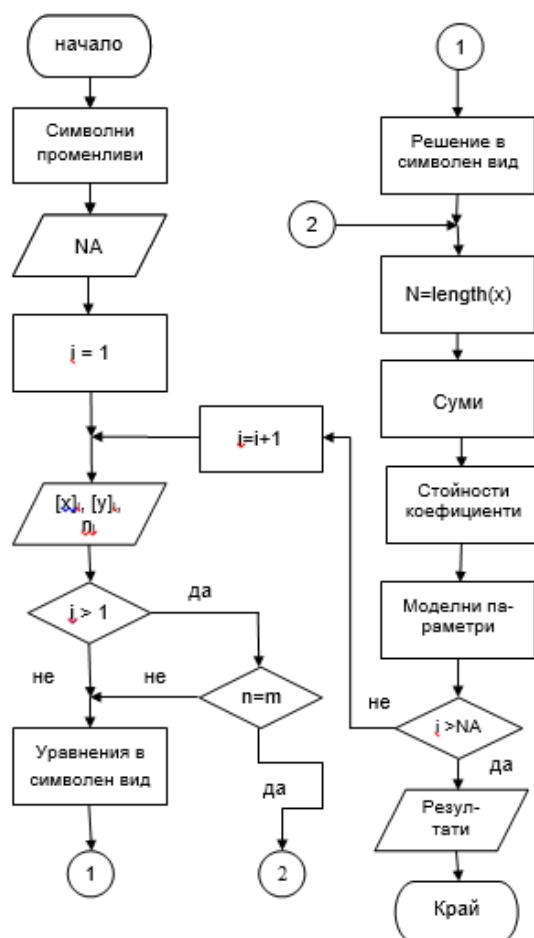
**Стъпка 10:** Пресмятат се моделните параметри (МП), които са свързани с апроксимираната характеристика.

**Стъпка 11:** Повтарят се операциите, започвайки от Стъпка 3, докато се изпълнят всички апроксимации.

**Стъпка 12:** Извеждат се резултатите за моделните параметри.

В последователността от операции чрез Стъпки 6 ÷ 9 се реализира МНМК.

На фиг. 1 е показана блок-схема на обобщен алгоритъм, разработен на базата на предложената процедура за определяне на моделните параметри на ДМТ в символен и числен вид.



Фиг. 1. Блок-схема на алгоритъм за определяне на моделни параметри на ДМТ чрез МНМК

Определяне на параметрите на статичен PSpice базиран поведенчески модел на дву-колекторен магнитотранзистор

Параметрите, които характеризират предложения в [13] статичен PSpice базиран поведенчески модел на двуколекторен магнитотранзистор, са:

$R_{BB'}$  - обемно съпротивление на базовата област;

$I_{C1S}$ ,  $I_{2S}$ ,  $I_{ES}$ - токове на насищане на двата колекторни и на емитерния преход;

$M_{C1}$ ,  $M_{C2}$ ,  $M_E$ - емисионни коефициенти на колекторните и емитерния преход;

$\alpha_{N1}$ ,  $\alpha_{N2}$  - коефициенти на предаване по ток за схема обща база (ОБ) в нормален активен режим на работа;

$\alpha_{II}$ ,  $\alpha_{I2}$  - коефициенти на предаване по ток за схема ОБ в инверсен режим на работа;

$S_{II}$ ,  $S_{I2}$  - токови магниточувствителности.

В някои случаи, вместо за двата колектора, се използват параметрите  $I_{CS}$ ,  $M_C$ ,  $\alpha_N$  и  $\alpha_I$  спрямо сумарния измерителен колектор С (режим на накъсо свързани колектори С1 и С2).

Информацията относно видовете характеристики и степените  $n$  на апроксимиращите полиноми, която е необходима за определяне на параметрите на статичния модел на ДМТ, е обобщена в табл. 1.

| Параметър               | Характеристика   | Степен $n$ |
|-------------------------|--|------------|
| $M_E, I_{ES}$           | $I_B = f(U_{BE})$ при малки токове   | 1          |
| $R_{BB1} (R_{BB'})$     | $I_B = f(U_{BE})$ при големи токове  | 3          |
| $\alpha_N$              | $I_C = f(U_{CE})$ при нормален активен режим на работа;<br>$I_C = f(U_{BE})$ | 1          |
| $M_C, I_{CS}, \alpha_I$ | $U_{CEsat} = f(I_C)$   | 1          |
| $S_{II}, S_{I2}$        | $\Delta I_C = f(B)$  | 1          |

Таб. 1.

За пресмятане на моделните параметри на ДМТ, тип 2Т1МП1 [10], са използвани експериментални данни от [19], както и тези, представени в таблици 2 ÷ 4.

|             |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_{BE}, V$ | 0,45 | 0,5  | 0,55 | 0,6  | 0,65 | 0,7  | 0,75 |
| $I_B, mA$   | 0    | 0,01 | 0,04 | 0,12 | 0,3  | 0,63 | 1,28 |

Таблица 2. Експериментални данни за характеристиката  $I_B = f(u_{BE})$

|             |           |           |      |     |      |     |      |
|-------------|-----------|-----------|------|-----|------|-----|------|
| $U_{BE}, V$ | 0,55      | 0,6       | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 |
| $I_C, mA$   | 0,01<br>5 | 0,03<br>5 | 0,12 | 0,4 | 1,0  | 2,2 | 4,9  |

Таблица 3. Експериментални данни за характеристика  $I_C = f(U_{BE})$

|                 |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $I_C, mA$       | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 |
| $U_{CEsat}, mV$ | 89   | 86  | 81  | 80  | 80  | 80  | 80  | 80  | 81  | 82  | 83  | 84  |

Таблица 4. Експериментални данни за характеристиката  $U_{CEsat} = f(I_C)$  при малки токове

За статичните моделни параметри на ДМТ се получават следните стойности:

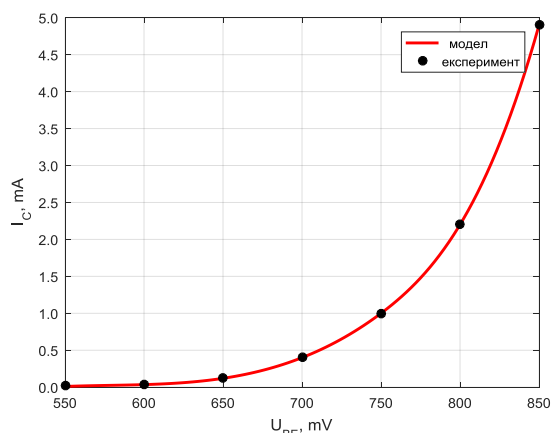
$$M_E=1,724, \quad I_{ES}=2,284E-11A, \\ R_{BB1}=127,124\Omega, \quad \alpha_N=0,719, \quad \alpha_{N1}=0,378, \\ \alpha_{N2}=0,378, \quad M_C=2,236, \quad M_{C1}=2,134, \\ M_{C2}=2,142, \quad I_{CS}=1,027E-10A, \quad I_{C1S}=2,093E-9A, \\ I_{C2S}=2,286E-9A, \quad \alpha_I=0,462, \quad \alpha_{II}=0,231, \\ \alpha_{I2}=0,231, \quad S_{II}=290,063 \mu A/T, \\ S_{I2}=289,251 \mu A/T.$$

Верификация на моделните параметри

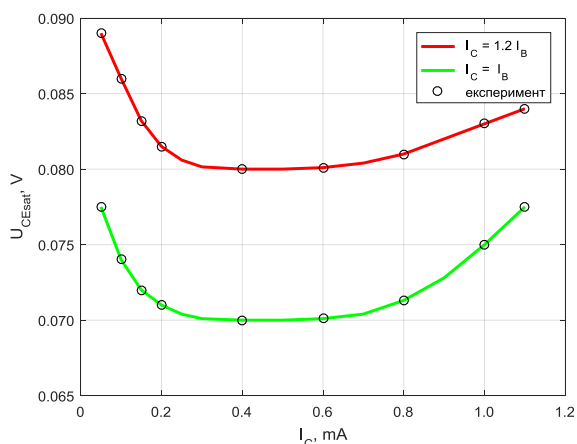
С цел установяване на достоверността на стойностите на параметрите на модела е извършена симулация на статични характеристики както на магнитотранзистора, така и на галваномантен преобразувател на линейно преместване, реализиран с ДМТ. И в двата случая за магнитотранзистора е използван предложеният в [13] поведенчески модел.

На фиг. 2 е показана симулираната проходна характеристика на ДМТ, а на фиг. 3 – изходната характеристика в режим на насищане при малки токове. Симулираните волт-амперни характеристики (ВАХ) на магнитотранзистора напълно удовлетворяват дефинираните от производителя [10] изисквания и ограничения. От сравнителната оценка на моделните и експерименталните характеристики (експерименталните данни са отразени с точки върху графични-

те изображения) следва, че средноквадратичната грешка не надвишава 1,25%.



Фиг. 2. Прходна характеристика на ДМТ



Фиг. 3. Характеристика на насищане при малки токове

С получените моделни параметри на ДМТ е извършено симулационно изследване и на галваномагнитен преобразувател на линейно преместване [8], блоквата схема на който е представена на фиг. 4.

Функционалните блокове в структурата на преобразувателя на фиг. 4 са:

N – S – магнитна система (в случая постоянен магнит);

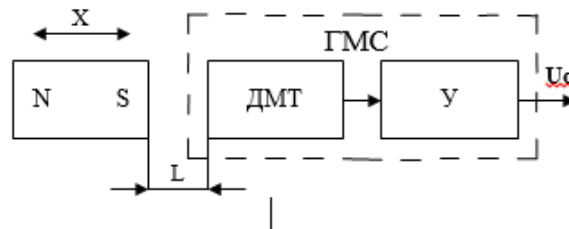
ДМТ – двуколекторен магнитотранзистор (галваномагнитен елемент)

У – усилвател на електрически сигнал (използва се операционен усилвател - ОУ).

Блоковете ДМТ и У формират галваномагнитния сензор (ГМС).

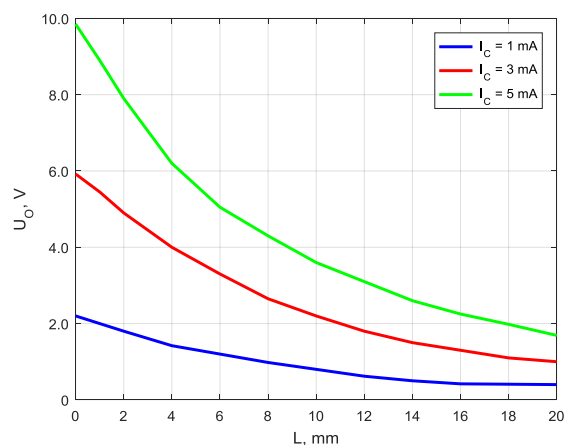
Принципът на функциониране на схемата се базира на преобразуване на измерваното линейно преместване  $L$  на постоянния магнит (преместването е в направление  $X$ , перпендикулярно на повърхността на сензора) в изменение на индукцията  $B$  на ма-

гнитното поле, която ДМТ преобразува в еквивалентен електрически сигнал. Тъй като сигналът е сравнително слаб, е необходимо той да бъде усилен.



Фиг. 4. Блокова схема на галваномагнитен преобразувател на линейно преместване

За сензорното устройство от фиг. 4 е симулирана преобразувателната характеристика  $U_0=F(L)$ , която отразява изменението на изходното напрежение  $U_0$  в зависимост от преместването  $L$ . От графичните изображения на получената характеристика  $U_0=F(L)$  на фиг. 5 при три постояннотоккови режима на работа на ДМТ (различни токове  $I_C$  на сумарния измерителен колектор) е очевидно, че зависимостта  $U_0=F(L)$  е нелинейна, като при  $L > 1$  mm, изменението на изходното напрежение е незначително, особено при малки стойности на тока  $I_C$ . Резултатите показват още, че с увеличаване на стойността на колекторния ток, изходното напрежение, както се очаква, също се увеличава, но същевременно и характеристиката  $U_0=F(L)$  става по-нелинейна. Симулираната функционална зависимост  $U_0=F(L)$  за сензорното устройство съответства на особеностите на преобразувателните характеристики на този вид галваномагнитни преобразуватели на неелектрически величини [8, 20].



Фиг. 5. Преобразувателна статична характеристика

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Анализът на получените резултати води до следните по-съществени изводи:

1. Предложената процедура за приложение на МНМК се явява ефективен подход за определяне на параметрите на статичния поведенчески модел на образци на ДМТ.

2. Процедурата не изисква наличието на графични зависимости за обработваните характеристики, което за магниточувствителните елементи е съществено, тъй като информацията за техните характеристики се получава експериментално в числен вид.

3. Моделните параметри се получават както в символен, така и в числен вид и съответстват на изискванията на PSpice базираните симулатори, което е предпоставка за създаване на библиотечни файлове с данни и ползването им за симулационно изследване на ДМТ.

4. Получените стойности на моделните параметри за конкретния ДМТ (2Т1МП1) са напълно коректни, което се потвърждава от симулираните с тях волтамперни характеристики на елемента и на преобразувателната характеристика на сензорно устройство, реализирано с този магнитотранзистор.

5. Предложеният подход може успешно да се използва за определяне и на моделните параметри, свързани с бариерните капацитети на PN преходите на магнитотранзистора.

## REFERENCE

[1] Alexandrov A., Goranov G., D. Georgiev, Automated system for research of galvanomagnetic sensors.// Mechanical Engineering and Electronics, issue 7-8,2012 pp. 22-25, ISSN 0025-455x  
[2] Alexandrov A.T. Semiconductor elements and integrated circuits. Gabrovo, Express, 2012.  
[3] Aleksandrov, A.T., P.D.Petrova, P.J.Todorov, V.D.Todorova, Modeling of a dualcollector magnetotransistor based on a SPICE software package. Third National Scientific and Applied Conference "Electronic Technology ET'94", Sozopol, Sept. 28-30, 1994, vol. 3, pp.73-78.  
[4] Vikulin, I.M., L.F. Vikulina, V.I. Stafeev. Magnetically sensitive transistors. Review. Physics and Technology of Semiconductors, 2001, Volume

35, Issue. 1, pp. 3-11, Academy of Communications of Ukraine, Odessa, Ukraine.  
[5] Vikulin I., M.Glaubergerman, L.F.Vikulina, Yu.A. Zaporozhchesko. Research of the characteristics of a dualcollector magnetotransistor. FTP, Volume 8, No. 3, pp. 580-583, 1974.  
[6] Vikulinm I.M. Dualcollector magnetotransistors. PIS, 1981, N10, 34-35.  
[7] Egazaryan, G.A., V.I. Stafeev. Magnetodides, magnetotransistors and their applications. M., Radio and communication, 1987.  
[8] Kotenko, G.I. Galvanomagnetic probes and their application. L., Energoizdat  
[9] Kulinich, M., M. Glaubergerman, V. Egorov. Magnetotransistors: physics, modeling, application. Monograph, LAMBERT Academic Publishing 978 - 3 - 8484 - 0860 - 3  
[10] Prospectus on the IAP - Plovdiv  
[11] P. Todorov, A. Aleksandrov, Petrova, P. Study on the static characteristics and parameters of the 2Т1МП1 magnetotransistor. News on TU - Gabrovo, volume XIX, 1996, p. 97-103.  
[12] Aleksandrov., Goranov G., P. Hubenov, Mathematical model of structured menu based on logics, The 5th International Virtual Conference on Advanced Scientific Results, EDIS – Publishing Institution of the University of Zilina - June, 26. - 30. 2017, стр.245-247 ISBN: 978-80-554-1337-2 ISSN: 1339-9071  
[13] Anatoliy Aleksandrov, Kazolis Dimitrios, Goran Goranov and Ivaylo Belovski, Analog Behavioural Approach for Modelling a Dual-Collector Magnetotransistor in a Static Mode of Operation., TIEM 2019, 12-14 September, Kavala Greece, Journal of Engineering Science and Technology Review. ISSN 17912377  
[14] Amir W. Al-Khafaji, John R. Tooley. Numerical Methods in Engineering Practice, Bradley University  
[15] Andreou, A.G., C.R. Westgate. A. C. Characterization and modeling of lateral bipolar Magnetotransistors IEDM. San Francisco Calif.,Dec.9-12,84 Techn. Dig," New York",1984.  
[16] Attia., J. O. PSPICE and MATLAB for Electronics. An Integrated Approach. CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-1263-9  
[17] Bilal M. Ayyub, Richard H. McGuen, Numerical Analysis for Engineers. Methods and Applications, Second Edition, 2015, CRC Press, ISBN:9781482250350  
[18] Goody, R. W. OrCAD PSpice for Windows, Volume II: Devices, Circuits and Operational Amplifiers (3rd Edition), Prentice Hall, 2000.  
[19] Goran Goranov, Anatoliy Aleksandrov, Kazolis Dimitrios and Gergana Mironova, Microprocessor System for Studying the Parameters of Dual-collector Bipolar Magnetic

Transistor, 2019 - IEEE International conference on High Technology for Sustainable Development HiTech, Electronic ISBN: 978-1-5386-7039-2

[20] Heremans, J. Solid state magnetic field sensors and application. -J.Phys. D., 1993,28, N 8, p. 1149- 1168.

[21] Karimi, Gh. R., S. Mirzakuchaki. Behavioral Modeling and Simulation of Semiconductor Devices and Circuits Using VHDL-AMS. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering,

Vol. 4, No. 4, October 2008, pp 165-175.

[22] Lozanova, S, Noykov, S., Ivanov, A., Roumenin, C. High sensitive dual-collector N+-P-N+ magnetotransistor. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences, Volume 61, Issue 7, 2008, pp. 933-938

The studies were carried out with the financial support of the CoC “QUASAR” - project № BG05M2OP001-1.002-0006