

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИМУЛАТОРИ ЗА 6LOWPAN БЕЗЖИЧНИ  
СЕНЗОРНИ МРЕЖИ ЗА ЦЕЛИТЕ НА ОБУЧЕНИЕТО****STUDY OF 6LOWPAN WIRELESS SENSOR NETWORK SIMULATORS  
FOR PURPOSES OF EDUCATION****Aydan Haka***Technical University of Varna, Bulgaria  
aydin.mehmed@tu-varna.bg***Abstract**

*The widespread use of Internet of Things technologies and their increasing use in recent years requires the study of these technologies in terms of quality of service. This can be done by using simulation software that will minimize the cost and time of building such a network. This paper presents a comprehensive comparative evaluation of some of the most well-known simulators to explore the quality of service on the 6LoWPAN Internet of Things network. A system of criteria for performing a comprehensive comparative analysis of simulators for the 6LoWPAN network is proposed.*

**Keywords:** 6LoWPAN, Sensor Network Simulators, Comparison

**ВЪВЕДЕНИЕ**

С активното развитие на клетъчните мрежи от четвърто и пето поколение [1] се развиват и клетъчните Internet of Things (IoT) мрежи [2]. Постепенното навлизане на тези мрежи в заобикалящия ни свят през последните години [1] и внедряването им за различни приложения в ежедневието диктува необходимостта от изследване на такъв тип мрежи. Изследването на една такава мрежа изисква закупуване на оборудване, с което да се изгради и тества исканата функционалност. Преди обаче да се инвестира във физическото оборудване е по-разумно да се изгради и изследва такава мрежа, като се използва симулационна среда. След изследване на симулирана примерна мрежа може да се прецени дали е реално необходима инвестицията или какви са недостатъците на първоначалната идея и как да се подобри тя. Този подход за изследване на безжична сензорна мрежа за IoT може да се въведе и в образованието. За целите на обучението основните изисквания към една симулационна среда може да са:

- моделиране на различни механизми за приоритизация на трафика при 6LoWPAN;

- моделиране на различни видове трафик;
- възможност за изграждане на различни мрежови архитектури за 6LoWPAN;
- възможност за визуално представяне на изследваната мрежа;
- анализ на получените резултати;
- лиценз за ползване;
- лесна инсталация;
- време за изучаване;
- нагледно представяне на въведените данни;
- извеждане на статистически резултати за направените тестове;
- използване на процесора;
- използване на паметта.

**КРИТЕРИИ ЗА АНАЛИЗ НА  
СИМУЛАЦИОННИ СРЕДИ ЗА  
БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ**

За извършване на комплексен сравнителен анализ на симулационни среди за 6LoWPAN сензорни мрежи е необходимо да се използва набор от критерии, според които да се определи кой от изследваните симулатори е най-подходящ за целите на обучението.

Направени са множество сравнителни анализи на симулатори за безжични сензорни мрежи като при различните проучвания се разглежда различен набор от критерии за извършване на сравнението, както е направено в [3] и [4].

В [3] се разглеждат следните критерии за извършване на сравнение:

- среда, на която работи;
- входни данни за симулатора;
- скалируемост;
- модел на комуникационния канал;
- мобилни възли;
- поддържана хардуерна платформа;
- разширение на функционалността;
- PНУ модел;
- сензорен канал;
- енергийно профилиране;
- оценяване батерията/времето за живот;
- точност по време/мощност.

Изследването представено в [4] отисва два набора от критерии за сравнение на симулатори за безжични сензорни мрежи:

- първи набор: език за програмиране, документация, използвана операционна система, графичен потребителски интерфейс, година на последна версия;
- втори набор: моделиране на консумацията на енергия, моделиране на мобилност, скалируемост, разширение на функционалността.

В разгледаните проучвания използваните критерии не са достатъчни за оценяване на симулационните среди по отношение на обучението. За целта може да се обединят част от представените в [3] и [4] критерии с тези, касаещи обучението. Това се прави, за да се прецизира комплексната оценка на сравняваните симулатори. За извършване на комплексния сравнителен анализ се предлага следната комбинация от критерии:

- моделиране на различни механизми за приоритизация на трафика при 6LoWPAN;
- моделиране на различни видове трафик;
- възможност за изграждане на различни мрежови архитектури за 6LoWPAN;

- симулиране на 6LoWPAN мобилност;
- анализ на получените резултати;
- възможност за визуално представяне на изследваната мрежа;
- нагледно представяне на въведените данни;
- извеждане на статистически резултати за направените тестове;
- поддържане на графичен потребителски интерфейс;
- наличие на ръководство за потребители и разработчици;
- поддържана операционна система;
- скалируемост;
- поддържана хардуерна платформа;
- оценяване батерията/времето за живот;
- моделиране на консумацията на енергия;
- език за програмиране;
- лесна инсталация;
- време за изучаване;
- използване на процесора (Average CPU);
- използване на паметта (Commit);
- лиценз за ползване.

### КОМПЛЕКСНА ОЦЕНКА ЗА КАЧЕСТВОТО НА СИМУЛАЦИОННИ СРЕДИ ЗА 6LoWPAN СЕНЗОРНИ МРЕЖИ

Разнотипността на разглежданите критерии за оценка на симулаторите, не позволява извеждане на конкретна функция за качеството на оценяваните симулатори. Заради това комплексният сравнителен анализ може да се извърши чрез изчисляване на средна аритметична и средна геометрична математическа зависимост, както е направено в [5, 6].

Аритметичният комплексен показател се изчислява по формулата:

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n b_i d_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (1)$$

Геометричният комплексен показател се изчислява по следната формула:

$$Rz = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{b_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}}, \quad (2)$$

където нормираната количествена оценка на  $i$ -тия показател е:

$$0 \leq d_i \leq 1 \quad (3)$$

$n$  - брой на показателите, а  $b_i$  е  $i$ -я тегловен коефициент, като:

$$\sum_{i=1}^n b_i = 1 \quad (4)$$

За целите на изследването тегловните коефициенти  $b_i$  се вземат равни.

Съществуват редица симулационни среди, позволяващи симулиране на 6LoWPAN технология. В настоящото изследване са разгледани едни от най-известните: COOJA, OMNET++, NS-3, QualNet, TOSSIM. Разглежданите среди са сравнени с предложения симулационен софтуер и е представена средна аритметична и средна геометрична оценка на всеки от тях. На база получените оценки може да се определи най-подходящият симулационен софтуер за целите на обучението.

COOJA [7] – мрежов симулатор, позволяващ симулиране на истински хардуерни платформи. Предложена е от Contiki OS, съсредоточена към изследване поведението на безжична сензорна мрежа. Симулаторът поддържа четири модела на разпространение, един от които трябва да се избере при нова симулация:

- Constant Loss Unit Disk Graph Medium – модел с постоянна загуба, който поддържа идеален обхват на предаване, при който възлите в обхвата получават пакети, а тези извън него не получават такива;
- Distance Loss Unit Disk Graph Medium – разширение на Constant Loss Unit Disk Graph Medium модела, като взема предвид и радиосмущенията при предаване;
- Directed Graph Radio Medium – разглежда закъсненията при разпространението на пакетите по радиовръзките;
- Multipath Ray-tracer Medium – изпъл-

зва методите за проследяване на лъчи, за да изчисли мощността на приемника, също може да изчисли дифракциите, отраженията и пречупванията по радиовръзките.

OMNeT++ [8] – модулна платформа, базирана на C++ с възможност за разширяване. Предоставя модули за симулиране на специфична за бласста функционалност като поддръжка на сензорни мрежи, безжични ad-hoc мрежи, Интернет протоколи, моделиране на производителността и др. През 2013г. е представен модела за симулиране на 6LoWPAN сензорна мрежа, който интегрира в себе си част от функциите, дефинирани от Contiki [9]. Разпространява се под академичен публичен лиценз.

NS-3 [10] – симулатор с отворен код на C++, разработен през 2006г. и базиран на дискретни събития, предназначен за изследователска и образователна работа. NS-3 изучава механизми за предаване и интеграция. Обвързванията на Python не работят на Cygwin, поддържа се само IPv4.

QualNet [11] – комерсиално производно на GloMoSim, базиран на C++. Издаден е през 2000г. от Scalable Network Technology (SNT). Основава се на GUI модел, използван за проектиране, анимация и анализ. Предоставя комерсиални протоколи и модели за устройства с висока точност, сравнителна оценка на производителността на различни протоколи на всеки слой, мащабируемост, чрез поддръжка на паралелно изпълнение.

TOSSIM [12] – представлява симулатор специално създаден за безжични сензорни мрежи, работещи на TinyOS. Представлява мрежов симулатор с отворен код, базиран на дискретни събития, който е изграден на NesC, C++ и Python. Може да се стартира на Linux или Cygwin под Windows. Предоставя графичен потребителски интерфейс и може да поддържа симулиране на хиляди възли. Библиотеката от протоколи съдържа и 802.15.4 MAC. TOSSIM е специално разработен за TinyOS приложения.

Предложен [13] – предложената симулационна среда представлява продукт с отворен код, написан на езика C#. Предоставя интуитивен и лесен за работа графичен потребителски интерфейс. Позволява изследване на 6LoWPAN сензорна мрежа, като

предоставя графики и статистически данни за симулираните действия.

В Таблица 1 е извършено сравнение на шест симулатора на 6LoWPAN мрежа. Сравнението е извършено чрез провеждане на експерименти с въвеждане на параметри на една и съща 6LoWPAN мрежа, с едни и същи входни данни. Симулирани са едни и същи ситуации и са анализирани получените резултати.

В Таблица 2 са представени комплексните аритметични и комплексните геометрични оценки на изследваните симулатори, съгласно формули (1) и (2), базирайки се на извършените експерименти, резултатите, от които, са описани в Таблица 1.

Резултатите от комплексните оценки доказват, че **COOJA** и **QualNet** симулаторите предоставят най-добри възможности за изследване на 6LoWPAN мрежи.

*Таблица 1. Сравнение на симулатори на 6LoWPAN мрежи*

| Критерии за сравнение на 6LoWPAN симулатори                              | Изследвани симулатори              |                |                        |                                     |                          |             |
|--|------------------------------------|----------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------|
|  | COOJA                              | QualNet        | OMNeT++                | NS-3                                | TOSSIM                   | Предложен   |
| моделиране на различни механизми за приоритизация на трафика при 6LoWPAN | Да напълно                         | Да напълно     | Да напълно             | Да напълно                          | Да напълно               | Да напълно  |
| моделиране на различни видове трафик                                     | Да напълно                         | Да частично    | Да частично            | Да напълно                          | Да напълно               | Да напълно  |
| възможност за изграждане на различни мрежови архитектури за 6LoWPAN      | Да напълно                         | Да напълно     | Да напълно             | Да напълно                          | Да напълно               | Да напълно  |
| симулиране на 6LoWPAN мобилност  | Да напълно                         | Да напълно     | Да напълно             | Да напълно                          | Да частично              | Да напълно  |
| анализ на получените резултати   | Да напълно                         | Да напълно     | Да напълно             | Да напълно                          | Да напълно               | Да напълно  |
| възможност за визуално представяне на изследваната мрежа                 | Да напълно                         | Да напълно     | Да напълно             | Да напълно                          | Да частично              | Да частично |
| нагледно представяне на въведените данни                                 | Да напълно                         | Да напълно     | Да напълно             | Да напълно                          | Да напълно               | Да напълно  |
| извеждане на статистически резултати за направените тестове              | Да напълно                         | Да напълно     | Да напълно             | Да напълно                          | Да напълно               | Да напълно  |
| поддържане на графичен потребителски интерфейс                           | Да напълно                         | Да напълно     | Да напълно             | Да напълно                          | Да частично              | Да напълно  |
| наличие на ръководство за потребители и разработчици                     | Да напълно                         | Да напълно     | Да частично            | Да напълно                          | Да напълно               | Да напълно  |
| поддържана операционна система   | Linux (Tiny OS)                    | Windows, Linux | Linux, MAC OS, Windows | Linux, MAC OS, Windows experimental | Linux, Windows (Tiny OS) | Windows     |
| скалируемост   | Да частично                        | Да напълно     | Да частично            | Да частично                         | Да напълно               | Да частично |
| поддържана хардуерна платформа   | Tmote sky, Z1, WiSMote, MicaZ, ESB | Виртуална      | Z-Wave, EnOcean        | STM32,                              | MicaZ                    | Виртуална   |

|                                       |                         |                          |                           |                               |  |            |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|--|------------|
| оценяване батерията/времето за живот  | Да напълно / Да напълно | Да частично / Да напълно | Да частично / Да частично | Да напълно / Да напълно       | Да напълно / Да напълно (при разновидност mTossim) | He/He      |
| моделиране на консумацията на енергия | Да напълно              | Да напълно               | Да напълно                | Да напълно                    | Да напълно (при разновидност mTossim)              | He         |
| език за програмиране                  | Java, Contiki           | C++                      | C++                       | C++, Optional Python Bindings | NesC, C++, Python                                  | C#         |
| лесна инсталация                      | Да напълно              | Да напълно               | Да частично               | Да частично                   | Да частично  | Да напълно |
| време за изучаване                    | Средно                  | Кратко                   | Средно                    | Продължително                 | Средно   | Кратко     |
| използване на процесора               | 10.85                   | 27.65                    | 7.57                      | 11.56                         | 9.59   | 4.20       |
| използване на паметта                 | 566 782KB               | 950 874KB                | 439 500KB                 | 570 932KB                     | 498 950KB  | 200 520KB  |
| лиценз за ползване                    | Безплатен               | Платен търговски         | Безплатен                 | Безплатен                     | Безплатен  | Безплатен  |

Таблица 2. Сравнение на комплексните оценки на симулатори за 6LoWPAN мрежи

| Комплексен показател | Изследвани симулатори |         |         |       |        |           |
|----------------------|-----------------------|---------|---------|-------|--------|-----------|
|                      | COOJA                 | QualNet | OMNeT++ | NS-3  | TOSSIM | Предложен |
| $R_a$                | 0.481                 | 0.474   | 0.415   | 0.466 | 0.417  | 0.417     |
| $R_c$                | 0.414                 | 0.402   | 0.345   | 0.402 | 0.358  | 0.302     |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена е система от критерии за сравнение и комплексна оценка на симулатори за 6LoWPAN мрежи. Предложените комплексни оценки осигуряват сравнимост на резултатите и намаляват субективността в оценяването на симулационните среди. Според представените резултати от изследването поради широкия набор от разглеждани критерии най-подходящ за изследване на 6LoWPAN сензорни мрежи е симулатор COOJA. Ако се разгледат критериите поотделно, се вижда, че предложеният симулатор предоставя оптимални стойности спрямо – „Лесна инсталация“, „Време за изучаване“, „Използване на процесора“, „Използване на паметта“, „Лиценз за ползване“, които са от изключителна важност по отношение на обучението. Също така предоставя съизмерими, с останалите симулатори, резултати спрямо много други критерии. Това доказва, че предложеният симулатор е подходящ за целите на обучението.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ericsson Mobility Report June 2019, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report>, Last visit on 18.09.2019
- [2] 5G Americas, IoT Deployments, <https://www.5gamericas.org/resources/deployments/deployments-iot/>, Last visit on 18.09.2019
- [3] Minakov, I., Passerone, R., Rizzardi, A., Sicari, S. A Comparative Study of Recent Wireless Sensor Network Simulators. //ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), August 2016, Volume 12, Issue 3, pp: 20 – 20:39, ISSN: 1550-4859
- [4] Saidallah, M., Fergougui, A. E., Elalaoui, A. E. A Survey and Comparative Study of Open-Source Wireless Sensor Network Simulator. //International Journal of Advanced Research in Computer Science (IJARCS), Vol. 7, No. 3, 2017, E-ISSN: 0976-5697
- [5] Haka, A., Aleksieva, V., Valchanov, H. Comparative Evaluation of Mechanisms for Traffic Prioritization in LTE Networks. //Proceedings, 2019 16-th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 6-8 June 2019, Varna, Bulgaria, pp: 406-410, ISBN: 978-1-7281-1412-5, IEEE Catalog number: CFP19L07-USB
- [6] Dinev, D., Aleksieva, V., Valchanov, H. Comparative Analysis of Prototypes Based on Li-Fi Technology. //Proceedings, 2019 16-th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 6-8 June 2019, Varna, Bulgaria, pp: 531-534, ISBN: 978-1-7281-1412-5, IEEE Catalog number: CFP19L07-USB
- [7] (COOJA). Contiki OS, COOJA Network Simulator, <http://www.contiki-os.org/>, Last visit on 15.09.2019

- [8] (OMNeT++). OMNeT++ Network Simulator, What is OMNeT++?, <https://omnetpp.org/intro/>, Last visit on 15.09.2019
- [9] Kirsche, M., Hartwing, J. Poster Abstract: A 6LoWPAN Model for OMNeT++. //Proceedings of the 6<sup>th</sup> International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, Cannes, France – March 05-07, 2013, pp: 330-333, ISBN: 978-1-4503-2464-9
- [10] (NS3). Network Simulator 3, <https://www.nsnam.org/>, Last visit on 18.09.2019
- [11] (QualNet). QualNet simulator, <https://www.scalable-networks.com/qualnet-network-simulation>, Last visit on 18.09.2019
- [12] (TOSSIM). TOSSIM simulator, <http://www.tinyos.net/>, Last visit on 18.09.2019
- [13] Vasilev, R., Haka, A. Enhanced Simulation Framework for Realisation of Mobility in 6LoWPAN Wireless Sensor Networks, in press (paper presented to XXVIII International Scientific Conference Electronics – ET2019, September 12-14, 2019, Sozopol, Bulgaria, [https://e-university.tu-sofia.bg/e-conf/files/24/Prog\\_ET2019.pdf](https://e-university.tu-sofia.bg/e-conf/files/24/Prog_ET2019.pdf))