

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-254-260](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-254-260)

УДК 004.942:004.7

**Анна Миколаївна Усік<sup>1</sup>, Володимир Вікторович Казимир<sup>2</sup>**<sup>1</sup>асистент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [usik18@gmail.com](mailto:usik18@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4965-6863>. ResearcherID: E-2911-2019<sup>2</sup>доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [vvkazymyr@gmail.com](mailto:vvkazymyr@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. ResearcherID: Q-2925-2016**МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖЕВОГО НЕЙТРАЛІТЕТУ В ЕКОСИСТЕМІ ІОТ**

У статті розглянуто проблему мережевого нейтралітету в екосистемі Інтернету речей (IoT). Запропоновано імітаційну модель IoT-системи, що враховує пріоритетність трафіку різних типів користувачів та пристроїв. Модель реалізовано в системі EMS із використанням даних реальної корпоративної мережі на основі маршрутизаторів Mikrotik. Отримані результати дозволяють оцінити вплив пріоритизації на якість обслуговування IoT-пристроїв і доводять необхідність збереження мережевого нейтралітету для стабільного функціонування IoT-екосистем.

**Ключові слова:** IoT; екосистема; моніторинг; корпоративна мережа; глобальна мережа; імітаційне моделювання; EMS; Mikrotik.

Рис.: 6. Бібл.: 7.

**Актуальність теми дослідження.** Розвиток Інтернету речей (Internet of Things, IoT) є одним із ключових напрямів цифрової трансформації сучасного суспільства та промисловості. У контексті Індустрії 4.0 саме IoT формує основу інтеграції фізичного та віртуального світів, забезпечуючи взаємодію пристроїв, користувачів і сервісів у єдиному інформаційному середовищі. Сучасні IoT-системи поєднують тисячі сенсорів і виконавчих пристроїв, які генерують різномірний трафік і працюють у розподілених мережевих умовах.

Однією з ключових проблем розвитку таких систем є порушення мережевого нейтралітету (Network Neutrality, NN) — рівномірності доступу різних типів трафіку до мережевих ресурсів. Нерівномірний розподіл пропускної здатності призводить до зниження якості сервісів, затримок у передачі даних, погіршення надійності зв'язку між IoT-пристроями. Це особливо критично для систем реального часу – «розумних будинків», промислових IoT або кіберфізичних систем, де пріоритет трафіку безпосередньо впливає на стабільність функціонування всієї екосистеми [1].

З огляду на це, актуальним є створення математичних та імітаційних моделей, що дозволяють досліджувати вплив мережевого нейтралітету на ефективність функціонування IoT-систем і забезпечувати справедливий розподіл мережевих ресурсів. Такі дослідження мають вагомe значення для галузей комп'ютерних наук, телекомунікацій, інформаційних технологій та кіберфізичних систем, де важливим є підвищення якості обслуговування (QoS) та забезпечення рівного доступу до інтернет-інфраструктури [2].

Таким чином, тема дослідження є актуальною з погляду як наукового моделювання мережевих процесів, так і практичної оптимізації роботи сучасних IoT-екосистем, що розвиваються в умовах глобальної цифровізації [3].

**Постановка проблеми.** З розвитком Інтернету та технологій постає важливе питання щодо мережевого нейтралітету (net neutrality, скорочено NN), крім цього, увагу багатьох привертає перехід від NN до NNN (non-net neutrality) [4].

Проблема пріоритетності при передачі даних в IoT-середовищі є критичною, особливо в інфраструктурах реального часу. У цій роботі продемонстровано підхід до дослідження цього явища на прикладі системи «розумного будинку» (рис. 1), використовуючи імітаційне моделювання в середовищі EMS та апаратні засоби маршрутизації Mikrotik.

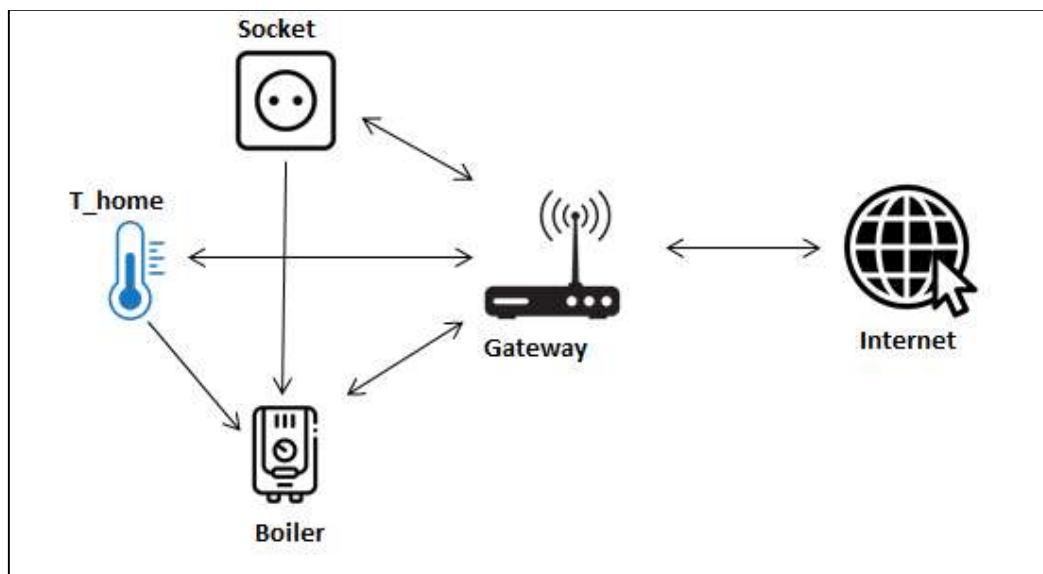


Рис. 1. Графічна модель розумного будинку

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання організації трафіку, QoS і нейтралітету в IoT-мережах досліджувалися вітчизняними та зарубіжними вченими, зокрема Mazhelis O., Luoma E., Warma H., Krämer J., Wiewiorra L., Weinhardt C. та ін.

В останні роки дослідники активно досліджують різні аспекти трафіку в IoT-системах, включно з його моделюванням, класифікацією і міжмережевою взаємодією. Так, у роботі [5] представлено генератор синтетичного IoT-трафіку та застосовано методи машинного навчання (Random Forest, KNN) для класифікації пристроїв за типами трафіку. Автори також використовують аналіз ентропії для підвищення безпеки переданих даних – цей підхід корисний як орієнтир при побудові моделей трафіку в IoT-екосистемах.

Інша важлива робота [6] зосереджена на задачі мережевого рівня інтероперабельності між технологіями Device-to-Device у IoT: запропоновано рішення на мережевому шарі, що дозволяє пристроям із різними протоколами й режимами координуватися без втрат продуктивності. Хоча ця робота не прямо стосується пріоритизації трафіку чи нейтралітету, вона демонструє складнощі узгодження мережових протоколів у гетерогенних IoT-середовищах, що є релевантним фоном для вашого дослідження.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри значну кількість робіт, присвячених оптимізації IoT-трафіку, питання впливу мережевого нейтралітету на ефективність взаємодії пристроїв залишається недостатньо дослідженим.

Більшість IoT-систем (наприклад, «розумні будинки» або промислові комплекси) генерують неоднорідний, асиметричний трафік, який не має пріоритету порівняно з іншими типами даних, але відіграє критично важливу роль у керуванні процесами.

Зовнішні фактори, такі як нерівнозначний доступ до мережових ресурсів, обмеження пропускної здатності та пріоритизація пакетів, досі залишаються малодослідженими в контексті IoT-систем.

**Мета дослідження.** У цій роботі пропонується взяти EMS як основу для розробки імітаційної моделі з урахуванням пропускної здатності, інтенсивності сигналу та об'єму пакету інформації, що передається.

Розроблена модель покликана забезпечити кількісну оцінку впливу мережевого нейтралітету на ефективність функціонування IoT-систем та дослідження можливостей оптимізації розподілу мережових ресурсів у гетерогенному середовищі.

Система EMS призначена для формалізованого опису складних стохастичних дискретних систем, автоматизованого створення та дослідження програмних імітаційних моделей, а також оцінки ефективності реальних систем на етапах проектування чи вдосконалення.

Її архітектура ґрунтується на формальному апараті Е-мереж та ієрархічному агрегатному підході, що дає змогу відображати як структуру, так і поведінку системи в наочній графічній формі. EMS також має зручний вебінтерфейсу, який дозволяє географічно віддаленим користувачам одночасно працювати над спільною моделлю.

Е-мережі забезпечують не лише моделювання потоків управління, а й потоків даних із можливістю кількісної обробки на переходах мережі. Це дає змогу реалізовувати маршрутизацію процесів і складну логіку взаємодії між компонентами моделі, що перевищує можливості традиційних мережових методів.

Типи переходів у Е-мережах:

- Т-перехід («виконання роботи») – спрацьовує при наявності мітки у вхідній позиції та відсутності її у вихідній;
- F-перехід («розгалуження шляхів») – активується при наявності мітки у вхідній позиції та відсутності її у вихідних;
- J-перехід («злиття шляхів») – спрацьовує при наявності міток в обох вхідних позиціях;
- X-перехід («перемикач альтернатив») – напрям процесу визначається значенням вирішальної процедури R;
- Y-перехід («вибір») – використовується для опису умов продовження процесу у разі злиття декількох шляхів, зокрема для відображення зворотних зв'язків [7].

Завдяки цим переходам обчислювальний процес у EMS керується не програмним кодом, а самими даними, що створює саморегульований режим роботи моделі. Такий підхід забезпечує функції контролю, трасування та підвищує надійність виконання моделювання.

**Виклад основного матеріалу.** Імітаційна модель (ІМ) дозволяє реалізовувати процес при заданих значеннях його параметрів у результаті прогону моделі. Перевагою ІМ є можливість опису поведінки елементів складної системи на високому рівні деталізації, відсутність обмеження на вид залежностей між параметрами ІМ і станом зовнішнього середовища, можливість дослідження динаміки взаємодії елементів у часі і просторі системи, зробили імітаційне моделювання основним методом дослідження складних систем [7].

За рис. 1 побудуємо імітаційну модель розумного будинку (рис. 2). Проблема пріоритетності тут вирішується за допомогою переходів-черг, які знаходяться перед шлюзом, вони працюють як Т-переходи, тільки можуть накопичувати мітки.

Технології, побудовані за принципами IoT, стали невід'ємною частиною сучасних комп'ютерних мереж, як локальних, так і глобальних. Саме тому на їхню роботу активно впливає активність і обмін інформацією між класичними комп'ютерними системами в мережі Інтернет. Для того щоб врахувати ці зовнішні чинники на роботу систем IoT, таких як розумний будинок або розумне місто, потрібно провести аналіз та дослідження навантаження у реальних комп'ютерних мережах та за допомогою полунатурного моделювання – мережових стендів.

Як основне джерело експериментальних даних обрано підприємство, що має велику кількість віддалених підрозділів та включає у свою структуру пристрої, які відповідають концепції IoT. Аналіз завантаження каналів центрального відділення показав, що найменшим періодом, який зберігає свої структурні особливості, є тиждень.

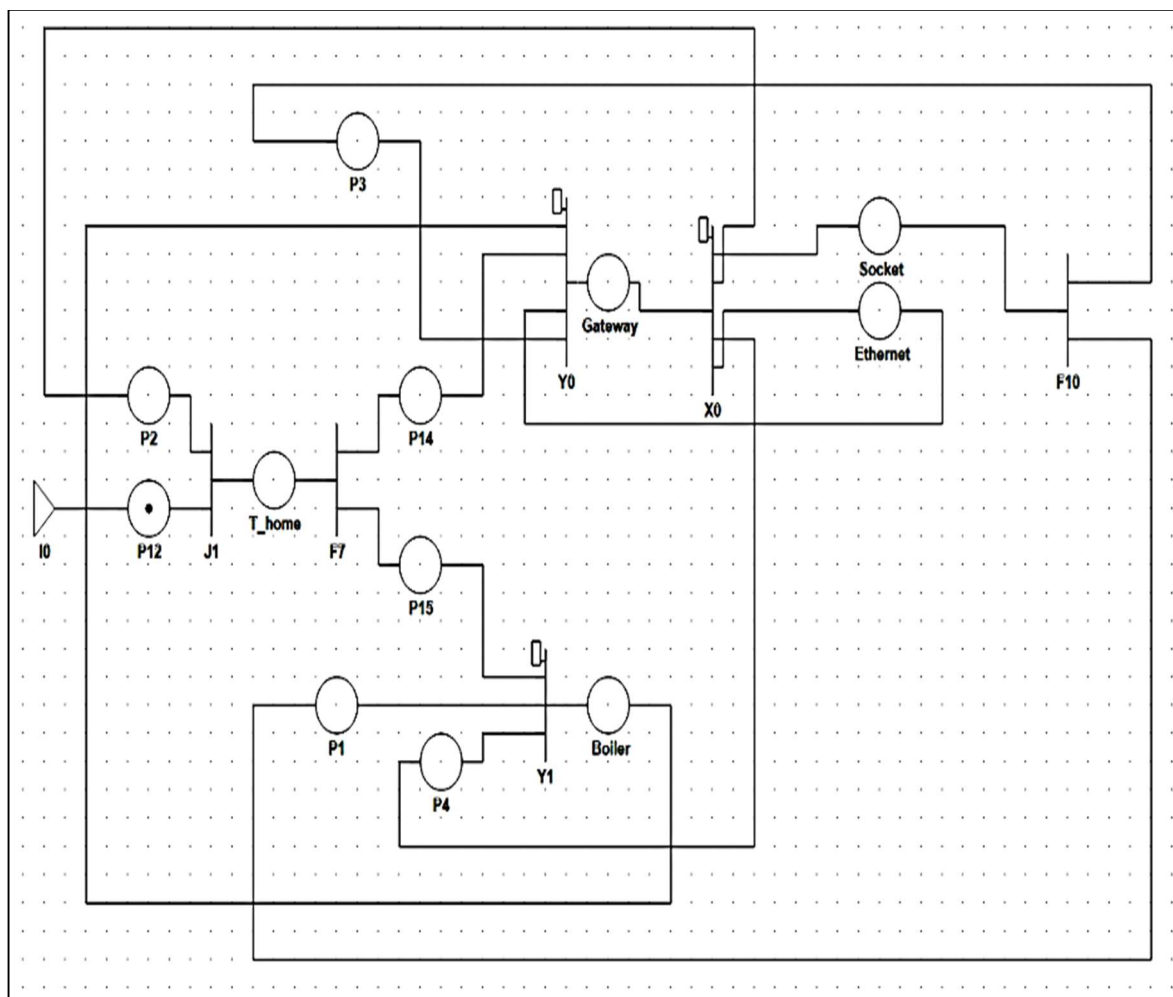


Рис. 2. Імітаційна модель

На рис. 3 наведено графік завантаження центрального каналу зв'язку протягом робочого тижня (з понеділка по п'ятницю).

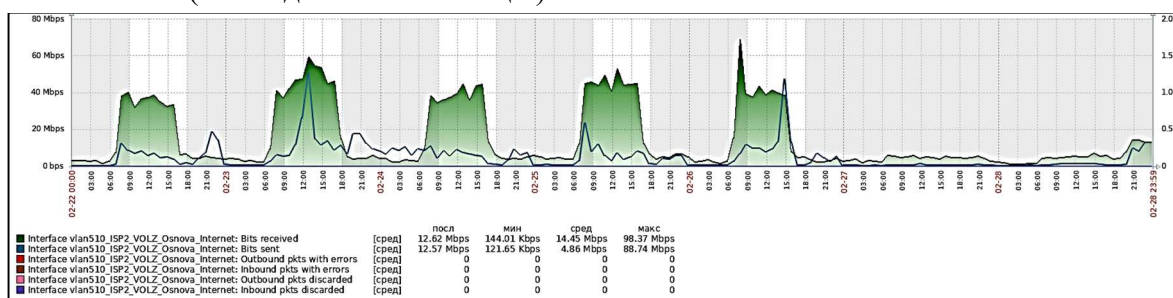


Рис. 3. Завантаження каналу Інтернет

Проаналізувавши отримані дані протягом тижня, можна зробити висновок, що суттєве навантаження, яке може вплинути на роботу системи IoT та комп'ютерної мережі загалом відбувається в робочий час з 6:00 до 18:00. Оберемо саме цей час для створення моделі поведінки комп'ютерної мережі, яку будемо використовувати для імітаційного моделювання.

Для того щоб побачити, що IoT пристрої незалежно від системи підприємства не впливають на завантаження каналів зв'язку, було зроблено вимірювання пропускної здатності каналів, до яких підключені IoT пристрої (рис. 4).

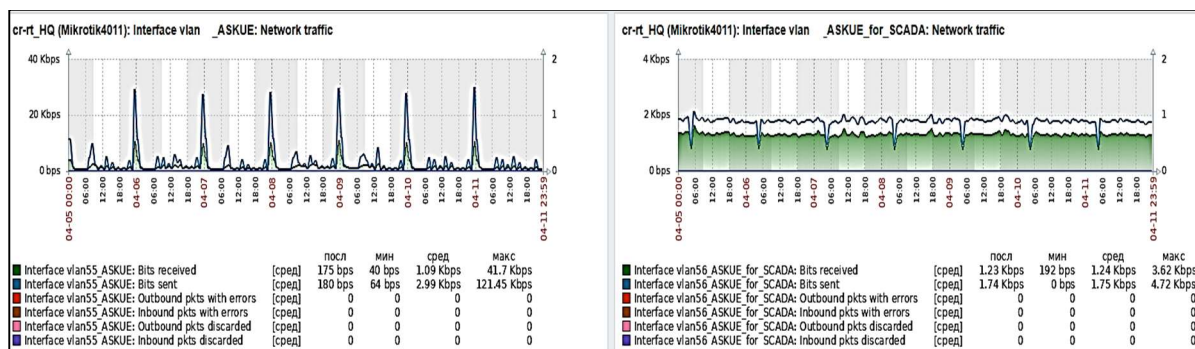


Рис. 4. Завантаження каналу IoT-пристроїв

Для мінімізації впливу трафіку абонентів на систему IoT налаштована пріоритизація трафіку. Черга пріоритетів має наступний порядок: VoIP, IoT, Users. У нашому випадку пріоритети налаштовані на маршрутизаторах за допомогою черг (рис. 5).

| Queue List                                                                                                                                             |                 |                  |                    |              |              |                  |                    |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------|--------------|------------------|--------------------|-------|
| Simple Queues   Interface Queues   Queue Tree   Queue Types                                                                                            |                 |                  |                    |              |              |                  |                    |       |
| <div> <div>+</div> <div>-</div> <div>↕</div> <div>✕</div> <div>📄</div> <div>🔍</div> <div>🔄 Reset Counters</div> <div>🔄 Reset All Counters</div> </div> |                 |                  |                    |              |              |                  |                    |       |
| #                                                                                                                                                      | Name            | Upload Max Limit | Download Max Limit | Packet Marks | Parent       | Upload Avg. Rate | Download Avg. R... | Total |
| 0                                                                                                                                                      | queue_parent    | 18M              | 18M                |              | none         | 5.6 kbps         | 16.5 Mbps          |       |
| 1                                                                                                                                                      | queue_VoIP      | 18M              | 18M                |              | queue_parent |                  |                    |       |
| 2                                                                                                                                                      | queue_IoT       | 10M              | 10M                |              | queue_parent |                  |                    |       |
| 3                                                                                                                                                      | queue_meeting   | 18M              | 18M                |              | queue_parent |                  |                    |       |
| 4                                                                                                                                                      | queue_education | 18M              | 18M                |              | queue_parent |                  | 10.8 Mbps          |       |
| 5                                                                                                                                                      | queue_office    | 18M              | 18M                |              | queue_parent | 760 bps          | 4.4 Mbps           |       |
| 6                                                                                                                                                      | queue_other     | 18M              | 18M                |              | queue_parent | 4.8 kbps         | 1230.3 kbps        |       |

Рис. 5. Налаштування черг у маршрутизаторі Mikrotik

Таким чином, можна зробити висновки, що для аналізу впливу трафіку мережі на роботу IoT-системи слід створити розподілення, що відповідає графіку функції, наведеної на рис. 6. Особливість полягає у різкому збільшенні навантаження на канал зв'язку протягом першої години і поступовому збільшенні протягом робочого дня.

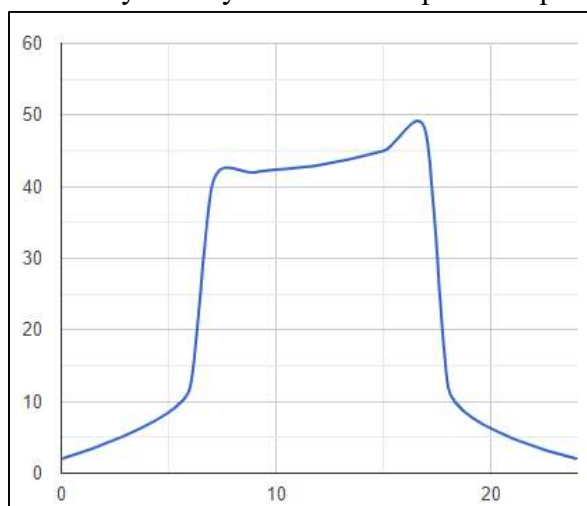


Рис. 6. Функція завантаження каналу зв'язку в робочий час

Математична залежність пропускної здатності каналів описується формулою:

$$f(x) = \begin{cases} e^{\lambda x} & x \in [0; 6] \\ \lambda x + 40 & x \in (6; 17) \\ e^{-\lambda(x-24)} & x \in [17; 24] \end{cases} \quad (1)$$

**Висновки.** Було проведено дослідження IoT-системи «розумний будинок», у межах якого розроблено імітаційну модель на базі EMS, що враховує пропускну здатність, інтенсивність сигналу та обсяг переданих даних.

Отримані результати підтвердили необхідність пріоритизованого обслуговування мережевих пристроїв, особливо в умовах підвищеного навантаження.

Розроблена модель дозволяє здійснювати кількісний аналіз впливу мережевого трафіку на продуктивність IoT-систем, а також прогнозувати оптимальні режими розподілу ресурсів.

Виведена математична залежність пропускну здатності каналів базується на емпіричних даних промислових IoT-систем і може бути використана для подальшого моделювання адаптивних механізмів керування трафіком у гетерогенних мережах.

### Список використаних джерел

1. Yildiz, M. (n.d.). Introduction to IoT Ecosystem. Medium. Retrieved from <https://medium.com/technology-hits/introduction-to-iot-ecosystem-25b359c8cf23>.
2. Mazhelis, O., Luoma, E., & Warma, H. (2012). Defining an Internet-of-Things ecosystem. In S. Andreev, S. Balandin, & Y. Koucheryavy (Eds.), *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking: ruSMART NEW2AN 2012* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7469, pp. 3-19). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32686-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32686-8_1).
3. Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). *Understanding the Internet of Things: Definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm*. *Ad Hoc Networks*, 56, 122-140. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.12.004>.
4. Usik, A., & Kazymyr, V. (2019). Evaluation cognitive maps for extended technology roadmapping in IoT. *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 244-248. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924225>.
5. Сидоренко О. В., Агеев Д. А. Аналіз та моделювання IoT-трафіку. *Вісник Харківського національного університету радіоелектроніки*, 4, 48-49. <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/1c982a24-62bb-49af-9354-3a32051cf8d3>.
6. Bello, O., Zeadally, S., & Badra, M. (2017). Network layer inter-operation of device-to-device communication technologies in Internet of Things (IoT). *Ad Hoc Networks*, 57, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.06.011>.
7. Казимир, В. В., & Посадська, А. С. (2016). Динамічна оцінка ризику виконання плану робіт методом імітаційного моделювання. *Технічні науки і технології: науковий журнал*, (3(5)), 113-122.

### References

1. Yildiz, M. (n.d.). Introduction to IoT Ecosystem. Medium. <https://medium.com/technology-hits/introduction-to-iot-ecosystem-25b359c8cf23>.
2. Mazhelis, O., Luoma, E., & Warma, H. (2012). Defining an Internet-of-Things ecosystem. In *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking* (pp. 1-14). Berlin, Heidelberg: Springer.
3. Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). Understanding the Internet of Things: Definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm. *Ad Hoc Networks*, 56, 122-140. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.12.004>.
4. Usik, A., & Kazymyr, V. (2019). Evaluation Cognitive Maps for Extended Technology Roadmapping in IoT. In *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* (pp. 244-248). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924225>.
5. Sydorenko, O. V., & Aheiev, D. A. (2025). Analiz ta modeliuvannia IoT-trafiky [Analysis and modeling of IoT traffic]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu radioelektroniky –Bulletin of Charkiw national University of Radio Electronics*, 4, 48-49. <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/1c982a24-62bb-49af-9354-3a32051cf8d3>.
6. Bello, O., Zeadally, S., & Badra, M. (2017). Network layer inter-operation of Device-to-Device communication technologies in Internet of Things (IoT). *Ad Hoc Networks*, 57, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.06.011>.

7. Kazymyr, V. V., & Posadska, A. S. (2016). Dynamichna otsinka ryzyku vykonannia planu robot metodom imitatsiinoho modeliuвання [Dynamic risk assessment of the work plan implementation using simulation modeling]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (3(5)), 113-122.

Отримано 20.09.2025

UDC 004.942:004.7

**Anna Usik<sup>1</sup>, Volodymyr Kazymyr<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Assistant of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [usik18@gmail.com](mailto:usik18@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4965-6863>. **ResearcherID:** E-2911-2019

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [vykazymyr@gmail.com](mailto:vykazymyr@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. **ResearcherID:** Q-2925-2016

## **SIMULATION OF NETWORK NEUTRALITY IN THE IOT ECOSYSTEM**

*The development of modern network systems is one of the top priorities in today's IT field. The vast majority of new systems are network-based. One of the most promising directions is the Internet of Things (IoT), which offers numerous advantages and distinctive features compared to traditional centralized client-server architectures. The rapid evolution of IoT has become possible due to four technological trends: decreased cost of computing power, reduced telecommunication service rates, rapid growth in the number of connected devices, and advancement of cloud computing and Big Data technologies.*

*Modern networks are heterogeneous in terms of traffic types. One of the most pressing challenges in the development of future global and corporate systems is the prioritization and fairness of resource allocation, i.e., network neutrality. Inequality in bandwidth allocation complicates the operation of systems that generate less traffic but are equally critical. In global networks, this phenomenon is often reflected in the preferential treatment of traffic generated by large corporations.*

*Recent open-access publications addressing the use of IoT technologies have been reviewed, along with studies devoted to mathematical modeling of network systems. The central research problem involves analyzing network neutrality in the IoT ecosystem from both theoretical and practical perspectives. The IoT ecosystem can be defined as a specific type of business ecosystem that includes a group of organizations and individuals that simultaneously compete and collaborate.*

*The aim of the article is to study the interaction of different traffic types in the IoT ecosystem using mathematical and simulation modeling, as well as to analyze their impact on the quality of network performance. The proposed model was developed in the EMS simulation system.*

*The main part of the study presents and analyzes a simulation model of an IoT system based on practical data obtained from a corporate network built with heterogeneous equipment. The MikroTik router served as the main data collection point. The analysis of the proposed simulation model highlights the specific characteristics of IoT system construction and confirms the obtained results through experiments conducted on a real network.*

**Keywords:** IoT; ecosystem; monitoring; corporate network; global network; simulation; EMS; MikroTik.

**Fig.:** 6. **References:** 7.