

УДК 004.738.5

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.053033

Б. І. СВЕРДЛЮК, аспірант;

Ю. К. КАГРАМАНОВА, аспірантка;

О. В. СЕНЬКОВ, докторант,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНТЕРНЕТІ РЕЧЕЙ (IoT)

**Інтернет речей (IoT) має значний економічний і екологічний вплив завдяки мільйонам взаємозв'язаних пристроїв, які використовують різні типи давачів для спілкування через інтернет. Загальновідомо, що для роботи кожного давача потрібна невелика кількість енергії, але з мільярдами давачів споживання енергії може бути значним. Тому вкрай важливо зосередитися на розробленні енергоефективних технологій Інтернету речей і екологічних вирішень. Внесок цієї статті полягає в підтриманні впровадження екологічно чистих рішень IoT через представлення аналізу енергоефективних практик і стратегій для IoT, щоб допомогти в розвитку стійких і енергоефективних технологій IoT у майбутньому. Розглянуто чотири принципи для досягнення цієї мети, зокрема: енергоефективний зв'язок між машинами (M2M); енергоефективні та екологічно стійкі безпроводові сенсорні мережі (WSN); енергоефективна радіочастотна ідентифікація (RFID); енергоефективні мікроконтролери та інтегральні схеми (IC).**

**Ключові слова:** Інтернет речей; IoT; Green IoT; енергоефективні технології; екологічно стійкий WSN; RFID; M2M.

### ВСТУП

Інтернет речей (IoT) об'єднує розумні пристрої в гетерогенну мережу для моніторингу та ухвалення рішень. Це передбачає використання обчислювальних ресурсів для застосування великих обсягів даних давачів. Екологічні обчислення дають змогу послуговуватися ресурсами та менш шкідливими методами для навколишнього середовища. Завдяки цьому припускається розроблення та усунення різних обчислювальних елементів, аби зменшити масштаб шкоди навколишньому середовищу.

Метою екологічних практик є використання обчислювальних ресурсів екологічно чистим і корисним для бізнесу способом. Кількість пристроїв, підімкнених до Інтернету речей (IoT) у всьому світі між 2019–2021 роками, із прогнозами на період із 2022 по 2030 рік, млрд, наведено на рис. 1. Отже, як унаочнює рис. 1, популярність гаджетів IoT зростає в міру того, як швидко організації наближаються до цифрової трансформації.

**Аналіз дослідження.** Зі значним збільшенням сенсорів та пристроїв Інтернету речей помітно зростає й їх енергоспоживання. Використання енергоефективних технологій може зменшити споживання завдяки застосуванню більш точних алгоритмів та енергоефективних протоколів зв'язку.

**Метою дослідження** є огляд енергоефективних технологій та аналіз їх впливу на споживання сенсорів IoT.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

#### Енергоефективний зв'язок між машинами (M2M)

Технологія M2M передбачає здатність розумних пристроїв спілкуватися один з одним і обмінюватися даними без втручання людини. Вона формує основу IoT і дає змогу створювати розумні системи, які можуть працювати та ухвалювати рішення незалежно. Одним із ключових застосувань технології M2M є сфера розумних міст, де її мож-

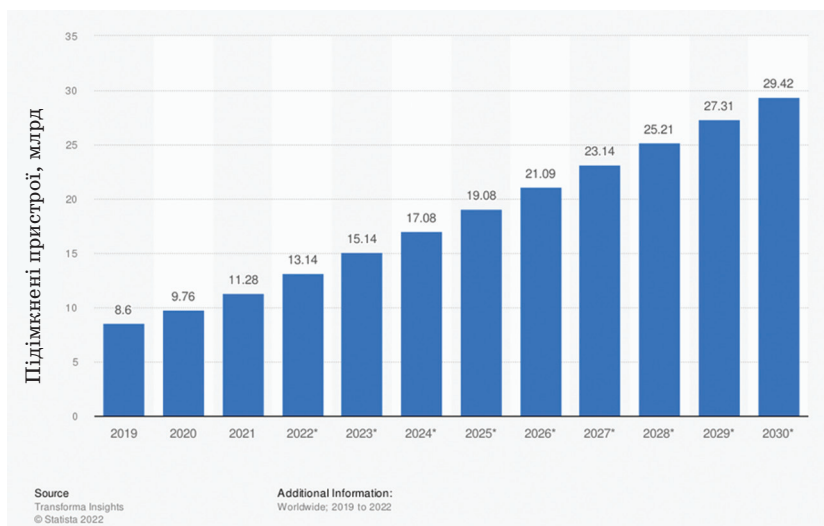


Рис. 1. Статистика підімкнених пристроїв IoT за роками

© Б. І. Свєрдлюк, Ю. К. Каграманова, О. В. Сєньков, 2022

на використовувати для оптимізації роботи інфраструктури, зокрема транспортних систем, громадського транспорту і комунальних послуг.

Зв'язок M2M також можна застосовувати в промисловості для підвищення ефективності та продуктивності, а також у сфері охорони здоров'я для забезпечення дистанційного моніторингу та лікування пацієнтів. Щоб досягти енергоефективності в системах M2M, можна послуговуватися різними стратегіями (рис. 2), включно з використанням протоколів зв'язку з низьким енергоспоживанням, реалізацією енергоефективних протоколів для передавання даних і методами збору енергії для живлення пристроїв M2M.

дається з невеликого чіпа, відомого як тег RFID, який пов'язаний з об'єктом, і зчитувача, здатного виявляти тег і спілкуватися з ним. Технологія RFID має широкий спектр застосувань, зокрема відстеження запасів, керування ланцюгом поставок і керування активами. До технологій підвищення енергоефективності можуть належати використання протоколів зв'язку з низьким енергоспоживанням, упровадження енергоефективних методів оброблення даних і використання методів збору енергії для живлення пристроїв RFID. Серед перспективних напрямів досліджень у галузі RFID є розроблення пасивних тегів RFID, які не потребують джерела енергії та можуть працювати



Рис. 2. Енергоефективні Green IoT-технології

### Безпроводові сенсорні мережі (WSN)

Wireless Sensor Networks (WSN) — це мережі невеликих, енергоефективних пристроїв, оснащених датчиками, які здатні безпроводово спілкуватися один з одним і з центральним концентратором. WSN можна використовувати для моніторингу та збору даних із різних середовищ. Зазвичай їх розгортають у широкому діапазоні програм, включно з промисловим моніторингом, охороною здоров'я та моніторингом навколишнього середовища. Щоб WSN стали більш енергоефективними, доцільно використовувати різні стратегії, які можуть охоплювати застосування енергоефективних протоколів зв'язку, упровадження методів збору енергії для живлення датчиків, а також використання енергоефективних методів зберігання та оброблення даних (див. рис. 2). Одним із перспективних дослідницьких контекстів у сфері WSN є застосування алгоритмів машинного навчання для зростання енергоефективності та оптимізації передавання даних і зниження загального споживання енергії в мережі. Загалом WSN мають потенціал для значного підвищення ефективності та стійкості, а отже, ймовірно залишатимуться важливою ділянкою досліджень у сфері IoT

### Радіочастотна ідентифікація (RFID)

Radio Frequency Identification (RFID) — це безпроводова технологія, яка ідентифікує та відстежує об'єкти за допомогою радіохвиль. Вона скла-

дається нескінченно довго, поки вони перебувають у радіусі RFID-зчитувача.

### Блоки мікроконтролерів (MCU) та інтегральні схеми (IC)

Мікроконтролери (MCU) та IC є ключовими компонентами багатьох електронних пристроїв, зокрема тих, що використовуються в IoT. MCU — це невеликі комп'ютери, які застосовують для керування та моніторингу роботи пристрою, тоді як IC — це інтегральні схеми, котрі використовують для оброблення та передавання інформації. Стратегії для підвищення енергоефективності мікроконтролерів та мікросхем можуть охоплювати використання методів проектування з низьким енергоспоживанням, реалізацію енергоефективних алгоритмів оброблення даних та методи збору енергії для живлення пристроїв. Однією з перспективних стратегій розвитку у сфері мікроконтролерів та мікросхем є використання алгоритмів ML для оптимізації їх продуктивності та зменшення енергоспоживання. Ще одна сфера уваги — поява більш енергоефективних матеріалів і інтелектуальних виробничих процесів для цих пристроїв.

### Енергоефективні комунікації M2M

Зв'язок M2M передбачає обмін даними між пристроями або датчиками без потреби у втручанні людини, і ці пристрої часто мають обмежені енергетичні ресурси через їхній малий розмір і/або

залежність від батарей. Застосування методів, які можуть допомогти системам зв'язку M2M зменшити енергоспоживання, є неминучим. А отже, такі методи становлять надзвичайний інтерес.

Запропоновані методи підвищення енергоефективності M2M у середовищі IoT зображено на рис. 3. Кількість енергії, збереженої для кожного підходу/техніки, залежить від низки ключових факторів, зокрема конкретної техніки, що використовується, типу системи зв'язку M2M, апаратного і програмного забезпечення пристрою та робочого середовища.

**Енергоефективне передавання даних**

Завдяки попередньому стисненню даних можна зменшити кількість енергії, яку використовують для їх передавання (таблиця).

Алгоритми ML можна використовувати для мінімізації надмірності даних і оптимізації швидкості передавання даних у багатостільникових мережах. Тип алгоритму залежить від конкретних потреб програми M2M, включно з обсягом і складністю доступних даних і необхідною точністю. Тестування різних алгоритмів і оцінювання їх продуктивності може допомогти визначити найбільш відповідний для конкретної програми M2M.

Існує така взаємодія між пристроями: пристрої M2M можуть співпрацювати в передаванні даних і спільно використовувати такі ресурси, як потужність, пропускна здатність і можливості оброблення, щоб знизити споживання енергії та підвищити продуктивність системи.

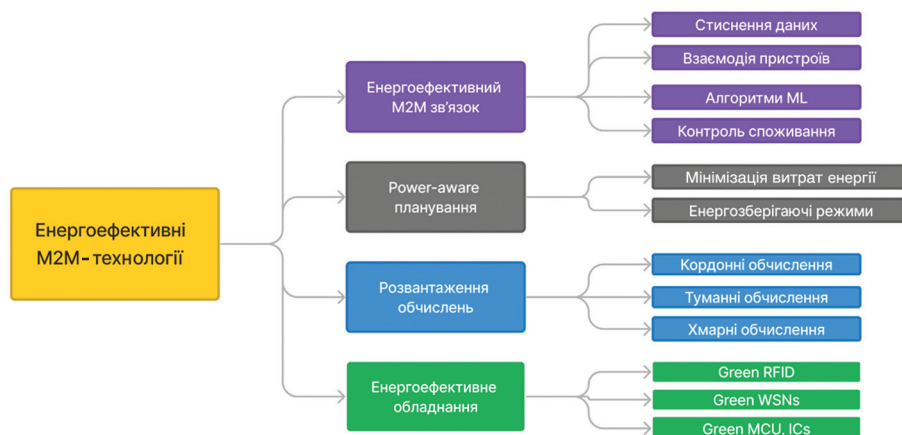


Рис. 3. Енергоефективні M2M-технології

**Алгоритми стиснення даних**

Техніка	Опис	Переваги	Недоліки
Кодування Хаффмана	Алгоритм стиснення даних без втрат, який кодує дані за допомогою префіксного коду змінної довжини на основі частот символів	- Простий у виконанні. - Адаптивний алгоритм. - Хороші коефіцієнти стиснення. - Стиснення без втрат	- Не підходить для високорельєваних даних. - Не підходить для потокового передавання даних. - Потрібне додаткове місце для зберігання коду префікса. - Повільний (не підходить для програм реального часу)
Алгоритм Лемпеля-Зіва-Велча (LZW)	Кодує дані ідентифікацією та заміною повторюваних шаблонів посиланнями	- Високий ступінь втрат. - Підходить як для стиснення без втрат, так і для стиснення із втратами	- Обмежується текстом та іншими невинуватливими даними. - Висока обчислювальна потужність для деяких реалізацій. - Не підходить для потокового передавання даних
Кодування довжини серії (RLE)	Техніка, яка зменшує розмір даних заміною повторюваних символів одним символом і підрахунком їх появи	- Ефективний для повторюваних даних. - Низька обчислювальна складність. - Низькі вимоги до пам'яті. - Підходить як для стиснення без втрат, так і для стиснення із втратами	- Неєфективний для неповторюваних даних. - Обмежений ступінь стиснення
Дельта-кодування	Кодує дані, подаючи різницю між послідовними значеннями, а не самі значення	- Високий коефіцієнт стиснення для даних часових рядів і числових даних. - Низька обчислювальна складність. - Підходить як для стиснення без втрат, так і для стиснення із втратами	- Може зберігати не всю оригінальну інформацію. - Може не підходити для конфіденційних даних
Прогнозне кодування	Техніка, яка прогнозує значення та кодує різницю між прогнозом і фактичним значенням	- Високий коефіцієнт стиснення для часових рядів та інших корельованих даних. - Низька обчислювальна складність. - Підходить як для стиснення без втрат, так і для стиснення із втратами	- Може зберігати не всю оригінальну інформацію. - Може не підходити для конфіденційних даних
Перетворення кодування	Використовує математичне перетворення для перетворення даних в інший домен, де їх можна більш ефективно закодувати.	- Високий ступінь стиснення для певних типів даних (наприклад, зображень, аудіо). - Можна використовувати для виділення функцій. - Підходить як для стиснення без втрат, так і для стиснення із втратами.	- Може не підходити для потокового передавання даних. - Висока обчислювальна складність. - Може зберігати не всю оригінальну інформацію.

Ретельно регулюючи потужність передавання пристроями M2M, можна зменшити енергію, потрібну для передавання даних. Є кілька методів, які можна реалізувати для контролю потужності та підвищення енергоефективності під час передавання даних M2M, таких як маршрутизація з урахуванням потужності, адаптивна модуляція та кодування, а також робочий цикл.

Відомо багато енергоефективних комунікаційних протоколів, розроблених спеціально для покращення передавання даних у зеленій мережі M2M. Однак кожен із цих протоколів має власний унікальний набір переваг та недоліків, і найбільш прийнятний протокол можна вибрати на основі конкретних вимог програми M2M.

### ВИСНОВКИ

У процесі дослідження останніх найсучасніших стратегій і практик енергозбереження в контексті екологічного Інтернету речей (Green IoT) на особливу увагу заслуговує енергоефективність екологічного обладнання пристроїв IoT. У межах статті було розглянуто енергоефективні комунікації M2M, енергоефективні й екологічно стійкі WSN, енергоефективні RFID та енергоефективні інтегральні схеми та мікроконтролери. Доведено, що

застосування цих технологій може значно зменшити енергоспоживання сенсорів IoT.

### Список використаної літератури

1. *Explored energy-saving practices for the IoT in the context of green IoT* / R. AArshad, S. Zahoor, M. A. Shah [et al.]. 2017.
2. *Investigated the role of IoT in the development of smart cities* / A. Zanella, N. Bui, A. Castellani [et al.]. 2014.
3. *Almotiri S. H., Khan M. A., Alghamdi M. A. Studied the use of mobile health (m-health) systems in the context of IoT.* 2016.
4. *Alsharif M. H., Nordin R. Analyzed the current trends and challenges in deploying millimeter wave, massive MIMO, and small cells for the evolution towards 5G wireless networks.* 2017.
5. *Lee C.-S., Kim D.-H., Kim J.-D. Proposed an energy-efficient active RFID protocol to avoid the over-hearing problem.* 2014.
6. *Conducted a survey on data mining techniques for IoT applications* / C.-W. Tsai, C.-F. Lai, M.-C. Chiang, L. T. Yang. 2013.
7. *Optimized the design of hybrid renewable systems, including grid, PV, bio-generator, diesel generator, and battery* / M. He, H. Forootan Fard, K. Yahya [et al.]. 2023.

B. I. Sverdiuk, Yu. K. Kahramanova, O. V. Senkov

### ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES IN THE INTERNET OF THINGS (IoT)

*The internet of things (IoT) has a significant economic and environmental impact owing to the billions or trillions of interconnected devices that use various types of sensors to communicate through the internet. It is well recognized that each sensor requires a small amount of energy to function; but, with billions of sensors, energy consumption can be significant. Therefore, it is crucial to focus on developing energy-efficient IoT technology and sustainable solutions. The contribution of this article is to support the implementation of eco-friendly IoT solutions by presenting a thorough examination of energy-efficient practices and strategies for IoT to assist in the advancement of sustainable and energy-efficient IoT technologies in the future. Four framework principles for achieving this are discussed, including (i) energy-efficient machine-to-machine (M2M) communications, (ii) energy-efficient and eco-sustainable wireless sensor networks (WSN), energy-efficient radio-frequency identification (RFID), and energy-efficient microcontroller units and integrated circuits (IC). This review aims to contribute to the next-generation implementation of eco-sustainable and energy-efficient IoT technologies.*

*The internet of things (IoT) is a revolutionary technology driving telecommunications advancements and improving people's quality of life worldwide. The IoT also has the potential to boost the global economy significantly. It is anticipated that the global economic impact of the IoT will be between USD 2.7 trillion and 6.2 trillion by 2025 due to IoT devices that are a critical component of emerging applications and play a central role in the widespread adoption of machine type communications. According to experts, the IoT has the potential to revolutionize different smart zones including modern healthcare applications, smart homes and smart cities*

**Keywords:** internet of things; green IoT; energy-efficient; energy harvesting; wireless charging; green 6G; green communications; eco-sustainable WSN; RFID; M2M.