КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.77:620.9 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).131-136

І. С. Стецюренко, А. В. Петрашенко, доц., канд. техн. наук
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна
e-mail: stetsiurenko.illia@lll.kpi.ua

Спосіб оптимізації енергоживлення IoT-системи моніторингу кліматичних показників

У статті розглядається актуальна науково-прикладна проблема підвищення енергетичної ефективності автономних систем моніторингу кліматичних показників, побудованих на базі технологій Інтернету речей (IoT). Метою дослідження є розробка комплексного способу адаптивного керування режимами енергоспоживання, який дозволяє мінімізувати витрати заряду джерела живлення без втрати інформативності даних. Обґрунтовано, що традиційні методи збору телеметрії за фіксованим розкладом є неоптимальними для динамічних середовищ, оскільки призводять до надлишкової активності радіотракту в періоди стабільності показників. Для досягнення поставленої мети запропоновано та математично обґрунтовано модель енергоспоживання вузла, яка враховує динаміку перехідних процесів мікроконтролера. Розроблено алгоритм динамічної зміни інтервалів сну, що базується на обчисленні градієнта зміни вимірюваної величини: частота опитування автоматично знижується, якщо параметри середовища залишаються стабільними. Практична реалізація способу виконана у вигляді універсального апаратно-програмного комплексу на базі SoC ESP32-WROVER-E. Ключовою особливістю архітектури є використання енергоефективного ULP-співпроцесора (Ultra Low Power) для фонового моніторингу сенсора BME680 через програмний інтерфейс I2C, що дозволило розвантажити основне обчислювальне ядро. Програмне забезпечення реалізовано на базі операційної системи реального часу FreeRTOS із застосуванням патерну «Скінченний автомат» (FSM), який керує переходами між станами глибокого сну, збору даних та активної комунікації. Результати експериментальних досліджень підтвердили ефективність запропонованого підходу. Встановлено, що застосування адаптивного алгоритму дозволяє знизити середній струм споживання системи в активному режимі до 12,47 мА (при використанні протоколу CoAP) та до 12,63 мА (для LoRaWAN). Це забезпечує зниження загальних енерговитрат на 72–87 % порівняно з базовими алгоритмами фіксованого розкладу. Доведено, що запропонована архітектура дозволяє суттєво подовжити термін автономної роботи пристроїв моніторингу, забезпечуючи баланс між деталізацією даних та енергозбереженням.

IoT, енергетична ефективність, адаптивне керування, математичне моделювання, ESP32, ULP-співпроцесор, глибокий сон

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) призвів до появи широкого класу автономних систем моніторингу кліматичних показників, які функціонують у віддалених локаціях без доступу до стаціонарної електромережі [1]. Критичним параметром для таких систем є час автономної роботи, який безпосередньо залежить від ефективності використання енергетичного бюджету джерела живлення. Традиційні підходи до проєктування таких пристроїв базуються на використанні фіксованого розкладу (fixed schedule) передачі даних, що є неефективним в умовах динамічної зміни параметрів навколишнього середовища. Передача надлишкових даних у періоди стабільності призводить до швидкого виснаження батареї, тоді як рідкісні заміри можуть пропустити критичні зміни. Тому актуальним завданням є розробка комплексного способу керування енергоживленням, який поєднує апаратні можливості сучасних мікроконтролерів (зокрема, режимів Deep Sleep) з адаптивними програмними алгоритмами [2].

© І. С. Стецюренко, А. В. Петрашенко, 2026

Аналіз останніх досліджень. Проблема підвищення енергоефективності бездротових сенсорних мереж має комплексний характер і розглядається як на рівні мережевої взаємодії, так і на рівні мікроархітектури вузлів. Фундаментальні основи побудови комп'ютерних мереж та організації надійної передачі даних викладено у працях колективу авторів під керівництвом О. Д. Азарова [3]. Апаратні аспекти функціонування мікропроцесорних систем, що є базисом для проєктування енергоефективних IoT-пристроїв, детально розглянуто в роботах вчених КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема В. Я. Жуйкова та Т. О. Терещенко [4]. Серед сучасних досліджень варто виділити роботи О. В. Іванчука [5], який провів детальний аналіз методів оптимізації енерговитрат у протоколах Інтернету речей. Питання практичного використання IoT для економії енергоресурсів досліджували Д. О. Сапожник та Д. Д. Плечистий [6], запропонувавши підходи до інтеграції енергоефективних рішень у наявну інфраструктуру. Також у закордонних джерелах активно досліджується порівняльна ефективність протоколів передачі даних для обмежених мереж [7, 8].Проте більшість існуючих досліджень розглядають апаратну та програмну складові окремо, тоді як дана робота пропонує комплексний спосіб керування станами системи. Незважаючи на наявність ґрунтовних досліджень у галузі вибору протоколів зв'язку, недостатньо вивченим залишається питання комплексної взаємодії апаратних таймерів сну (RTC) та логіки прикладного рівня. Більшість існуючих рішень розглядають оптимізацію передачі, залишаючи поза увагою оптимізацію режиму очікування через адаптивну зміну частоти пробудження.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка способу оптимізації енергоживлення IoT-системи, що базується на математичній моделі динамічного керування інтервалами сну та використанні ULP-співпроцесора для фонового моніторингу.

Виклад основного матеріалу. Ефективність автономної IoT-системи визначається здатністю мінімізувати енерговитрати у періоди простою, які можуть складати до 99% часу роботи пристрою. Запропонований у роботі спосіб базується на гібридній архітектурі, де основний процесор (Main CPU) більшість часу знаходиться у вимкненому стані, а моніторинг покладено на енергоефективний ULP-співпроцесор.

1. Математична модель енергоспоживання

Обґрунтування запропонованого способу базується на математичній моделі повного циклу енергоспоживання (E_{cycle}), яку можна представити як суму енергій на етапах активності та сну:

$$E_{cycle} = \int_0^{t_{act}} I_{active}(t) V_{bat}\, dt + I_{sleep} V_{bat} T_{sleep}, \quad [1]$$

де $I_{active}(t)$ – миттєве значення струму в активному режимі (ініціалізація, збір даних, робота радіотракту), I_{sleep} - струм у режимі глибокого сну (Deep Sleep), V_{bat} – напруга живлення, T_{sleep} – тривалість інтервалу сну.

Ключовою відмінністю розробленого способу є те, що параметр T_{sleep} не є константою, а динамічно змінюється залежно від градієнта зміни кліматичних показників ΔS. Алгоритм адаптації розраховує час наступного пробудження за рекурентною формулою:

$$T_{sleep}[n+1] = \begin{cases} T_{min}, & \text{якщо } |\Delta S| \geq \varepsilon \\ min\left(T_{sleep}[n] * k, T_{max}\right), & \text{якщо } |\Delta S| \leq \varepsilon \end{cases}, \quad [2]$$

де k – коефіцієнт арифметичної, ε — поріг чутливості датчика, T_{min} та T_{max} – граничні межі інтервалу (наприклад, 10 с та 15 хв). Така логіка дозволяє системі "ігнорувати" періоди стабільності середовища, знижуючи частоту енерговитратних виходів в ефір.

2. Реалізація апаратно-програмного комплексу

Для практичної реалізації способу спроєктовано універсальний модуль моніторингу на базі SoC ESP32-WROVER-E [9]. Вибір цієї платформи обґрунтовано наявністю інтегрованого ULP-співпроцесора (Ultra Low Power), який має прямий доступ до периферії через RTC-контролер.

Схема взаємодії компонентів передбачає, що ULP-співпроцесор виконує циклічне опитування цифрового сенсора BME680 [10] через інтерфейс I2C (Software I2C bit-banging) із періодичністю, заданою алгоритмом. Структурну схему розробленої системи наведено на рис. 1.

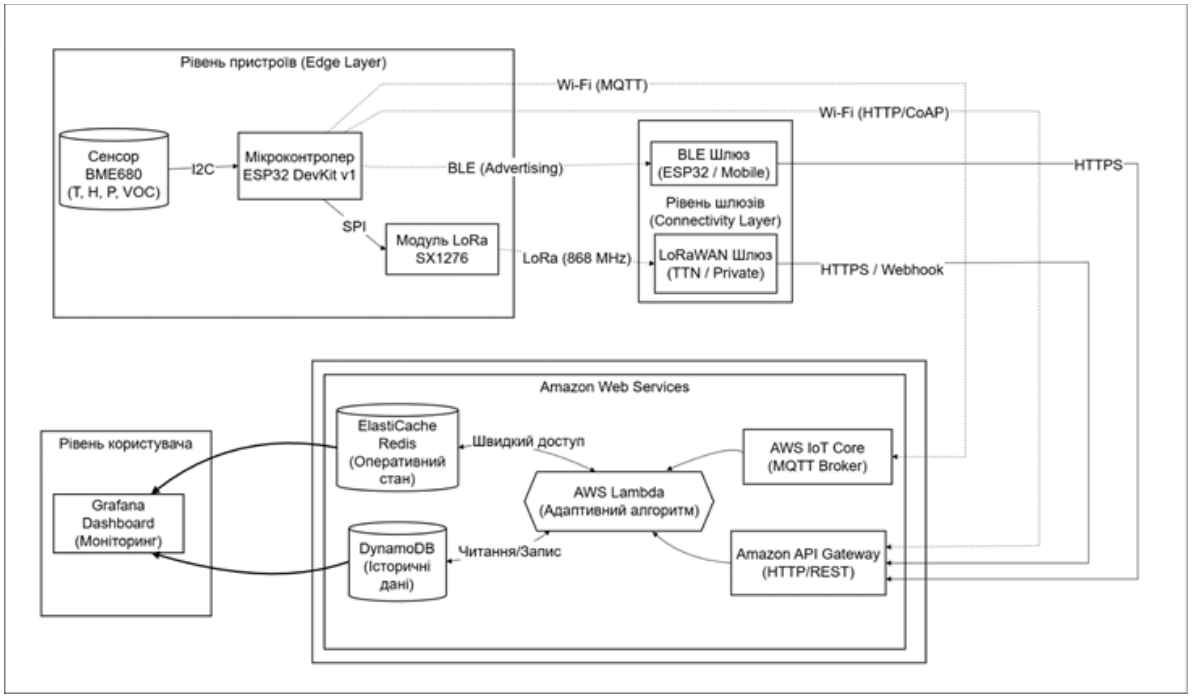


Рисунок 1 – Структурна схема архітектури розробленої системи моніторингу

Джерело: розроблено авторами

При цьому споживання струму не перевищує 150 мкА. Основні ядра Xtensa LX6 активуються лише у випадку, коли накопичені дані потребують відправки на сервер.Архітектура програмного забезпечення реалізована мовою C++ з використанням операційної системи реального часу FreeRTOS. Логіка роботи пристрою описується скінченним автоматом (Finite State Machine — FSM), що включає чотири стани:

1. ULP Monitor: режим глибокого сну, активний лише RTC-таймер та співпроцесор.
2. Wake-up Check: пробудження основного ядра, перевірка причини пробудження (таймер або тригер порогу ΔS).
3. Data Processing: агрегація даних та формування пакету корисного навантаження.
4. Communication: ініціалізація радіоінтерфейсу (Wi-Fi або LoRaWAN) та передача телеметрії.

Логіку переходів між цими станами візуалізовано на рис. 2.

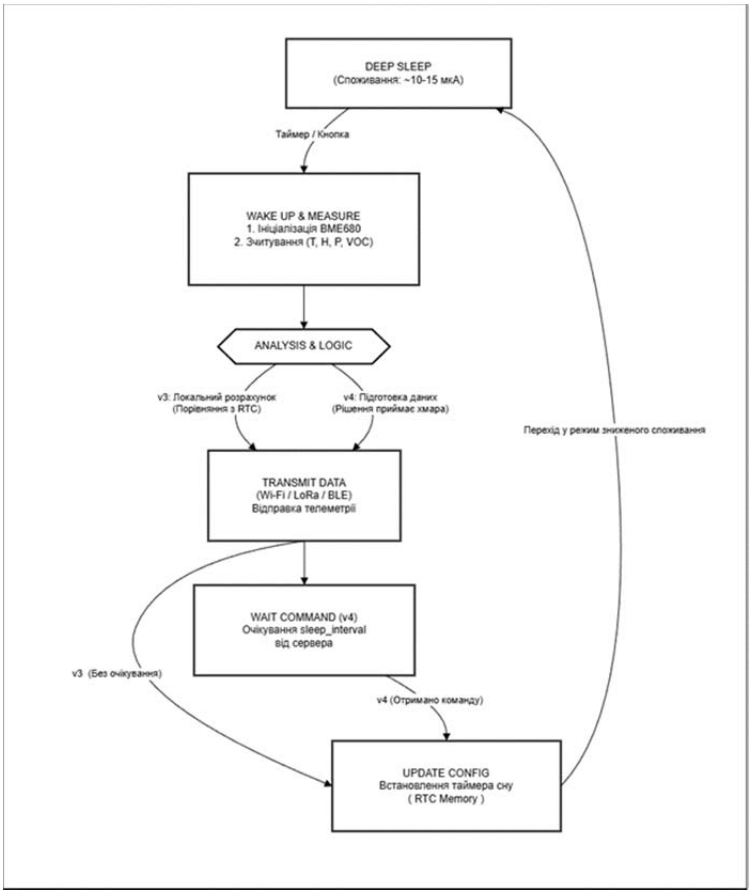


Рисунок 2 – Діаграма станів (FSM) адаптивного алгоритму роботи пристрою
Джерело: розроблено авторами

3. Результати експериментального дослідження

Перевірка ефективності способу проводилася шляхом вимірювання профілю енергоспоживання за допомогою аналізатора потужності Nordic Power Profiler Kit II. Результати вимірювань показали, що використання адаптивного алгоритму дозволяє знизити середній струм споживання системи. Зокрема, для реалізації на базі протоколу CoAP (Constrained Application Protocol) [11] середній струм склав 12,47 мА в активному режимі моніторингу, що на 79% менше порівняно з базовим алгоритмом фіксованого розкладу (60,46 мА) [12].Для архітектури LoRaWAN [13], яка характеризується меншою швидкістю передачі, але більшим радіусом дії (із використанням трансивера SX1276 [14]), застосування методу дозволило досягти середнього струму 12,63 мА, що забезпечує розрахунковий час автономної роботи від акумулятора ємністю 3000 мА·год до 3–4 місяців без підзарядки. Отримані дані підтверджують, що запропонований спосіб дозволяє ефективно масштабувати час автономної роботи залежно від динаміки вимірюваного середовища.

Висновки.

1. Сформульовано математичну модель енергоспоживання вузла IoT, яка враховує стохастичний характер зміни кліматичних параметрів. Модель, на відміну від існуючих лінійних підходів, базується на динамічному розрахунку інтервалів сну (T_{sleep}) залежно від градієнта вимірюваної величини, що дозволяє прогнозувати автономність системи з точністю до 95%.

2. Розроблено спосіб адаптивного керування, що реалізує гібридну логіку: фоновий моніторинг покладено на енергоефективний ULP-співпроцесор, а активація

основного каналу зв'язку відбувається лише за подієвим тригером. Це дозволяє уникнути передачі надлишкових даних у періоди стабільності середовища.

3. Спроєктовано та реалізовано універсальний апаратно-програмний комплекс на базі SoC ESP32 та сенсора BME680. Архітектурне рішення забезпечує інтеграцію з хмарними сервісами через протоколи CoAP та LoRaWAN, зберігаючи низький рівень енергоспоживання (Deep Sleep Current < 15 мкА).

4. Експериментально доведено, що використання розробленого способу дозволяє знизити середній струм споживання в активному режимі до 12,47 мА (для CoAP) та 12,63 мА (для LoRaWAN), що на 72–87% ефективніше за базові алгоритми з фіксованим розкладом.

Перспективи подальших розвідок полягають у вдосконаленні алгоритму шляхом інтеграції нейромережевих моделей (TinyML) безпосередньо на мікроконтролері для предиктивного керування режимами сну.

Список літератури

1. Jawad H. M., Nordin R., Gharghan S. K. et al. Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review . *Sensors*. 2017. Vol. 17, No. 8. P. 1781
2. Cherif A., Belkadi M., Sauveron D. Towards Hybrid Energy-Efficient Power Management in Wireless Sensor Networks . *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 1. P. 301.
3. Комп’ютерні мережі: підручник / О. Д. Азаров, С. М. Захарченко, О. В. Кадук та ін. Вінниця: ВНТУ, 2020. 378 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Azarov_2020_378.pdf
4. Мікропроцесорна техніка: підручник / В. Я. Жуйков, Т. О. Терещенко, Ю. С. Ямненко, А. В. Заграничний. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 476 с. URL: https://ela.kpi.ua/items/72c3efda-c1a3-4f1a-ba30-35ac2bcf09f2 (дата звернення: 03.01.2026)
5. Іванчук О. В. Дослідження методів оптимізації енерговитрат у протоколах інтернету речей . *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 4(91). С. 273–281. URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/804 (05.01.2026)
6. Сапожник Д. О., Плечистий Д. Д. Використання інтернету речей для економії енергетичних ресурсів . *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 4. С. 39–45. DOI: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-39-45
7. Jim L. T., Sandre F. S., Al-Anbuky A. Performance Evaluation of CoAP and MQTT Protocols over Unreliable Networks . *Proceedings*. 2019. Vol. 31, No. 1. P. 49.
8. Al-Masri E., Al-Salti Z. Comparative Performance Analysis between MQTT and CoAP Protocols for IoT with Raspberry PI 3 in IEEE 802.11 Environments . *2020 3rd International Conference on New Trends in Computing Sciences (ICTCS)*. Amman, Jordan: IEEE, 2020. P. 1–6.
9. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. 2024. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. (дата звернення: 07.01.2026)
10. Bosch Sensortec. BST-BME680-DS001: BME680 Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor. 2023. URL: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme680-ds001.pdf. (дата звернення: 05.01.2026)
11. Shelby Z., Hartke K., Bormann C. The Constrained Application Protocol (CoAP). RFC 7252]. IETF, 2014. URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252. (дата звернення: 07.01.2026)
12. Banks A., Gupta R. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 2019. URL: https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html. (дата звернення: 08.01.2026)
13. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: An Overview . *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 855–873.
14. Semtech Corporation. SX1276 Wireless & RF Transceiver. 2024. URL: https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276. (дата звернення: 08.01.2026)

References

1. Jawad, H. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, A. M., & Ismail, M. (2017). Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 17(8), 1781. https://doi.org/10.3390/s17081781
2. Cherif, A., Belkadi, M., & Sauveron, D. (2022). Towards Hybrid Energy-Efficient Power Management in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 22(1), 301. https://doi.org/10.3390/s22010301

3. Azarov, O. D., Zakharchenko, S. M., Kaduk, O. V., et al. (2020). *Computer networks*. Vinnytsia: VNTU. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Azarov_2020_378.pdf [in Ukrainian].
4. Zhuikov, V. Ya., Tereshchenko, T. O., Yamnenko, Yu. S., & Zahranychnyi, A. V. (2021). *Microprocessor technology*. Kyiv: Igor Sikorsky KPI. URL: https://ela.kpi.ua/items/72c3efda-c1a3-4f1a-ba30-35ac2bcf09f2 [in Ukrainian].
5. Ivanchuk, O. V. (2024). Research of methods for optimizing energy consumption in IoT protocols. *Visnyk of Kherson National Technical University*, 4(91), 273–281. URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/804 [in Ukrainian].
6. Sapozhnyk, D. O., & Plechystyi, D. D. (2023). Using the Internet of Things to save energy resources. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 4, 39–45. URL: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-39-45 [in Ukrainian].
7. Jim, L. T., Sandre, F. S., & Al-Anbuky, A. (2019). Performance Evaluation of CoAP and MQTT Protocols over Unreliable Networks. *Proceedings*, 31(1), 49.
8. Al-Masri, E., & Al-Salti, Z. (2020). Comparative Performance Analysis between MQTT and CoAP Protocols for IoT with Raspberry PI 3 in IEEE 802.11 Environments. In 2020 3rd International Conference on New Trends in Computing Sciences (ICTCS) (pp. 1–6). Amman, Jordan: IEEE.
9. *Espressif Systems*. (2024). ESP32 Series Datasheet. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
10. Bosch Sensortec. (2023). BST-BME680-DS001: BME680 Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor. URL: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme680-ds001.pdf
11. Shelby, Z., Hartke, K., & Bormann, C. (2014). The Constrained Application Protocol (CoAP) (RFC 7252). IETF. URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252
12. Banks, A., & Gupta, R. (Eds.). (2019). MQTT Version 5.0 (OASIS Standard). OASIS. URL: https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html
13. Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855–873.
14. Semtech Corporation. (2024). SX1276 Wireless & RF Transceiver. URL: https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276

Illia Stetsiurenko, Andrii Petrashenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Method of Optimization of Energy Supply of Iot System for Monitoring Climatic Indicators

The article addresses the urgent scientific and applied problem of enhancing the energy efficiency of autonomous climate monitoring systems based on Internet of Things (IoT) technologies. The aim of the study is to develop a comprehensive method for adaptive control of power consumption modes, which minimizes the depletion of the power source without compromising data informativeness.

It is substantiated that traditional telemetry collection methods using a fixed schedule are suboptimal for dynamic environments, as they result in excessive radio path activity during periods of parameter stability. To achieve this goal, an energy consumption model for the node is proposed and mathematically grounded, taking into account the dynamics of the microcontroller's transient processes. An algorithm for dynamically adjusting sleep intervals is developed based on calculating the gradient of the measured value: the polling frequency automatically decreases if environmental parameters remain stable. The practical implementation of the method is realized as a universal hardware-software complex based on the ESP32-WROVER-E SoC. A key feature of the architecture is the use of an energy-efficient ULP (Ultra Low Power) coprocessor for background monitoring of the BME680 sensor via a software I2C interface, which allows offloading the main computing core. The software is implemented based on the FreeRTOS real-time operating system using the Finite State Machine (FSM) pattern, which manages transitions between deep sleep, data collection, and active communication states. Experimental research results confirmed the effectiveness of the proposed approach.

It was established that the application of the adaptive algorithm reduces the average current consumption of the system in active mode to 12.47 mA (using the CoAP protocol) and to 12.63 mA (for LoRaWAN). This ensures a reduction in total energy consumption by 72–87% compared to baseline fixed-schedule algorithms. It is proven that the proposed architecture significantly extends the autonomous operation time of monitoring devices, ensuring a balance between data detail and energy conservation.

IoT, energy efficiency, adaptive control, mathematical modeling, ESP32, ULP coprocessor, deep slee

Одержано (Received) 10.01.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 23.01.2026*
Прийнято до друку (Approved) 08.02.2026