

Л. А. Савицька¹
 Б. Р. Тичина¹
 О. Д. Азаров¹
 Д. Д. Клепко¹

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ У СЕНСОРНИХ ВУЗЛАХ LoRaWAN

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто актуальну проблему зменшення енергоспоживання сенсорних вузлів у мережах стандарту LoRaWAN, які широко застосовуються в системах Інтернету речей (IoT) для організації довготривалого автономного моніторингу навколишнього середовища, інфраструктурних об'єктів, промислових та сільськогосподарських систем. Особливу увагу приділено аналізу факторів, що мають визначальний вплив на енергоспоживання кінцевих пристроїв, зокрема параметрів радіопередачі, частоти збирання та передавання даних, режимів роботи мікроконтролера та ефективності використання режимів сну.

У роботі проаналізовано сучасні підходи до підвищення енергоефективності сенсорних вузлів, які базуються на адаптивному керуванні параметрами фізичного та каналного рівнів мережі LoRaWAN, зокрема, вибір коефіцієнта розширення спектра (Spreading Factor), ширини смуги пропускання та вихідної потужності передавача. Особливу увагу приділено стратегіям мінімізації активного часу радіомодуля та мікроконтролера шляхом оптимізації алгоритмів збирання, обробки та пакетування даних.

Також у статті проведено імітаційне моделювання роботи сенсорних вузлів у середовищі NS-3 з урахуванням різних сценаріїв навантаження, щільності розміщення вузлів та варіантів налаштування параметрів радіоканалу. За результатами моделювання визначено залежності між енергоспоживанням вузлів, дальністю зв'язку, імовірністю втрати пакетів та часом автономної роботи пристроїв.

Отримані результати підтверджують, що коректний вибір параметрів швидкості передачі даних, вихідної потужності та періодичності активних сеансів зв'язку дозволяє суттєво підвищити енергоефективність сенсорних вузлів без істотного погіршення показників якості обслуговування. Запропоновані підходи можуть бути використані під час проектування енергоефективних IoT-систем на базі LoRaWAN для промислових, інфраструктурних та екологічних застосувань.

Ключові слова: LoRaWAN, енергоефективність, сенсорні вузли, оптимізація параметрів передачі, NS-3, Інтернет речей.

Вступ

З розвитком технологій Інтернету речей (IoT) збільшується потреба у сенсорних мережах, які здатні тривалий час працювати автономно, передаючи дані на великі відстані за мінімального споживання енергії. LoRaWAN є однією з найперспективніших технологій для таких завдань завдяки низькому енергоспоживанню та великій дальності передачі даних. Проте ефективне використання енергії залежить від налаштування параметрів мережі та апаратної платформи сенсорних вузлів. У цій статті досліджено способи оптимізації енергоспоживання сенсорних вузлів LoRaWAN та визначено оптимальні конфігурації для підвищення тривалості автономної роботи.

Постановка проблеми

Технологія LoRaWAN є однією з ключових платформ для побудови енергоефективних мереж Інтернету речей, що забезпечують передачу даних на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням. Сенсорні вузли, які працюють у таких мережах, зазвичай живляться від автономних джерел енергії, зокрема літєвих батарей або суперконденсаторів. Тривалість автономної роботи пристрою без заміни елемента живлення є критичною характеристикою, особливо у випадку розміщення вузлів у важкодоступних місцях або за умов великої кількості розгорнутих пристроїв. Проблема

оптимізації енергоспоживання вимагає дослідження впливу таких параметрів, як потужність передавача, швидкість поширення радіосигналу, інтервали передачі даних та використання режимів сну мікроконтролера та радіомодуля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання енергоефективності сенсорних вузлів у мережах LoRaWAN є одним з ключових напрямів сучасних досліджень. У роботах [1]—[3] розглядаються загальні принципи побудови мереж LPWAN та їх застосування в розподілених системах моніторингу. Автори зазначають, що основним фактором, який визначає тривалість автономної роботи вузла, є співвідношення часу активної передачі та режиму очікування.

У дослідженнях [4], [5] приділено увагу оптимізації параметрів радіопередачі, зокрема вибору значення коефіцієнта розширення спектра (Spreading Factor) та вихідної потужності передавача. Показано, що збільшення SF підвищує чутливість приймача та збільшує дальність зв'язку, проте одночасно зростає тривалість передачі пакета, що призводить до збільшення енергоспоживання.

Питання енергоспоживання мікроконтролера та периферійних компонентів розглянуто у роботах [6], [7], де запропоновано підхід до зменшення активного часу процесора за рахунок оптимізації алгоритмів збирання та обробки даних. Дослідження [8] описують застосування режимів глибокого сну та мінімізації частоти вимірювань для продовження терміну служби батареї.

Разом з тим, більшість робіт не враховує комплексного впливу параметрів LoRaWAN та енергетичних характеристик окремих компонентів сенсорного вузла. Це створює потребу в інтегрованому підході до оптимізації конфігурації вузла та режимів його роботи.

Мета та завдання статті

Метою статті є визначення раціональних параметрів конфігурації LoRaWAN, які забезпечують зменшення енергоспоживання сенсорних вузлів та підвищення тривалості їх автономної роботи на прикладі апаратної платформи RFM95W + Arduino Pro Mini.

Для досягнення мети в роботі поставлено такі завдання:

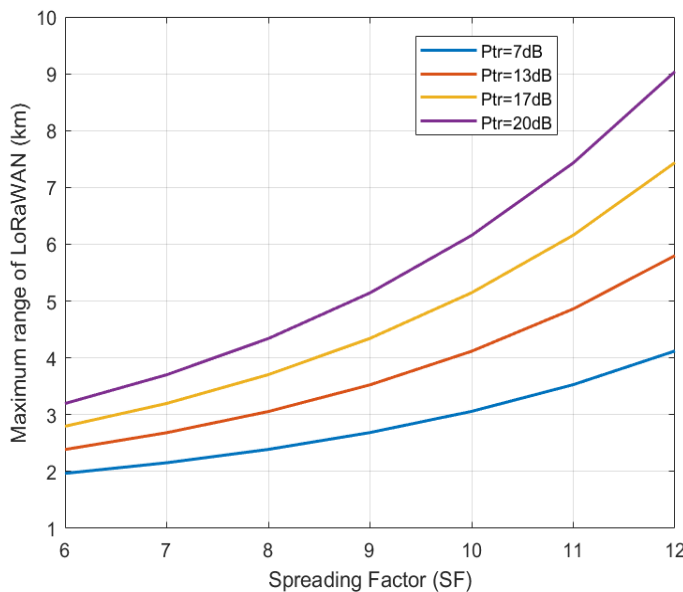
- проаналізувати фактори, що впливають на енергоспоживання вузлів LoRaWAN;
- оцінити енергетичні параметри апаратної платформи RFM95W + Arduino Pro Mini;
- виконати моделювання роботи сенсорного вузла за різних параметрів передачі даних у NS-3;

Основний матеріал дослідження

Архітектура мережі LoRaWAN.

LoRaWAN є мережею з топологією «star of star», у якій термінальні вузли взаємодіють зі шлюзами, що, у свою чергу, підключені до мережевого сервера. Основними компонентами є: сенсорний вузол, шлюз, мережевий сервер та сервер прикладних програм (Application Server). Сенсорні вузли передають дані асинхронно, використовуючи протокол ALOHA, що зменшує накладні витрати сигналізації, проте може призводити до колізій у разі великої кількості пристроїв.

Радіомодулі LoRa використовують модуляцію з розширенням спектра (CSS), яка дозволяє досягати великої дальності передачі (до 10...15 км у сільській місцевості та 2...5 км у міських умовах) за низької швидкості передачі даних. Ключовим параметром є коефіцієнт розширення спектра SF (Spreading Factor), який впливає на швидкість передачі та чутливість приймача (рис.)



Графік залежності максимальної відстані сигналу від Spreading Factor [4]

Апаратна платформа RFM95W + Arduino Pro Mini.

У дослідженні використовується сенсорний вузол, побудований на базі модуля RFM95W та мікроконтролера Arduino Pro Mini 3.3V. Мікроконтролер забезпечує обробку та формування пакета даних, тоді як RFM95W відповідає за радіопередачу.

Типові енергетичні параметри вузла:

- споживання у режимі сну мікроконтролера: 10...20 μ A;
- споживання радіомодуля в режимі прийому: \sim 10...12 mA;
- споживання радіомодуля в режимі передачі: 28...120 mA (залежно від вихідної потужності);
- напруга живлення: 3,3 В.

Додатково варто враховувати режим сну радіомодуля RFM95W, у якому струм споживання становить приблизно 0,2...1 μ A відповідно до технічної документації виробника.

Оскільки більшу частину часу вузол перебуває у стані очікування між сеансами передачі, саме режим сну радіомодуля та мікроконтролера визначає загальну енергоефективність системи.

Варіант живлення: автономне енергоживлення від одноелементної літієвої батареї Li-SOCl₂ (номінальна напруга \sim 3,6 В) з понижувальним LDO- або DC-DC регулятором до 3,3 В. У схемі передбачено фільтрацію живлення та захист від зворотного струму. Також розглядається опціональна підсистема енергонезалежної підзарядки — невелика сонячна панель (наприклад, 0,5...1 Вт) і контролер заряду, що дозволяє продовжити термін служби батареї у зовнішніх умовах. Такий варіант забезпечує довготривалу автономну роботу вузла у польових умовах і має перевагу низького саморозряду джерела живлення у разі малих струмів споживання в режимі сну.

Модель енергоспоживання сенсорного вузла.

Загальне енергоспоживання сенсорного вузла за період спостереження визначається як сума енерговитрат у режимах передачі, прийому, обробки та сну. Базове рівняння для обчислення енерговитрат можна подати у вигляді

$$E = U \cdot I \cdot t, \quad (1)$$

де U — напруга живлення, I — струм у відповідному режимі, t — тривалість роботи в режимі.

У контексті LoRaWAN тривалість передачі пакета визначається параметрами SF, BW (ширина смуги) та CR (коефіцієнт корекції помилок). Збільшення SF збільшує тривалість символу LoRa, що безпосередньо впливає на енергоспоживання під час передачі.

Фактори, що впливають на енергоспоживання.

На енергоспоживання сенсорного вузла впливають такі ключові параметри:

- коефіцієнт розширення спектра SF — визначає швидкість передачі та дальність;
- вихідна потужність передавача — впливає на стабільність каналу та радіус покриття;
- частота передачі повідомлень — використовується період 30 хв;
- режим сну мікроконтролера — визначає енергетичні втрати між сеансами передачі.

Для оцінювання ефективності мережі використано такі метрики:

– PDR (Packet Delivery Ratio) — відношення успішно доставлених пакетів до загальної кількості переданих.

– RSSI (Received Signal Strength Indicator) — рівень прийнятого сигналу на шлюзі.

– Energy per packet — енергоспоживання на передачу одного пакета.

Значення параметрів споживання струму, подані в табл. 1, отримані на основі технічної документації радіомодуля RFM95W та мікроконтролера Arduino Pro Mini, а також результатів експериментальних вимірювань, представлених у роботах [4]—[6].

Для оцінювання енергоспоживання прийнято такі параметри радіоінтерфейсу LoRa:

- ширина смуги каналу $BW = 125$ кГц;
- коефіцієнт корекції помилок $CR = 4/5$;
- довжина пакета 20 байт;
- напруга живлення вузла $U = 3,3$ В.

Тривалість передачі пакета визначалась за стандартною формулою LoRaWAN Time-on-Air.

Оцінки енергоспоживання подані в табл. 1.

Узагальнені параметри споживання енергії сенсорного вузла

Режим роботи	Споживання струму, мА	Тривалість активності, с	Енерговитрати, мДж
Передача (SF7)	40	0,06	~8
Передача (SF12)	120	1,2	~475
Сон	0,015	1800	~89

Очевидно, що збільшення SF суттєво підвищує енергоспоживання в процесі передачі, через що вибір цього параметра є критично важливим під час проектування мережі.

Моделювання у середовищі NS-3

Параметри моделі мережі.

Моделювання виконано у середовищі NS-3 з використанням моделі LoRaWAN. Основні параметри моделі подані в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри моделі

Параметр	Значення
Кількість вузлів	200
Радіус мережі, км	2
Кількість шлюзів	1
Частота, МГц	868
BW, кГц	125
CR	4/5
Потужність передавача, dBm	14...20
Інтервал передачі, хв	30

Для моделювання поширення сигналу використовувалась логарифмічна модель втрат сигналу (Log-distance Path Loss Model) з показником затухання $n = 2,7$, що відповідає умовам напівміської місцевості.

Опис моделі.

Моделювання виконано у NS-3 з 200 вузлами, розподіленими випадково у радіусі 2 км. Передача даних здійснюється з періодом 30 хв.

Оптимізація енергоспоживання виконувалася за наявності таких обмежень:

- $PDR \geq 90 \%$;
- $RSSI \geq -120 \text{ dBm}$;
- максимальна затримка передачі $\leq 60 \text{ хв}$.

Отже, параметри мережі вважалися оптимальними лише у випадку, якщо забезпечувалась достатня якість зв'язку.

Варіанти параметрів

Порівнювалися режими SF7 та SF12. SF7 забезпечує менше енергоспоживання, але й меншу дальність.

Результати моделювання показали, що використання SF12 призводить до значного збільшення часу передачі пакета (Time-on-Air), що підвищує енергоспоживання вузла.

Водночас застосування SF7–SF9 забезпечує зменшення часу передачі та зниження енергоспоживання зі збереженням значення PDR понад 90 % для вузлів, розташованих на відстані до 2 км від шлюзу.

За цих умов оптимальними виявилися параметри:

- SF7–SF9;
- потужність передавача 14...20 dBm;

– інтервал передачі 30...60 хв.

Зазначені параметри забезпечують мінімальне енергоспоживання зі збереженням прийнятної якості зв'язку.

Висновки

Отримані результати можуть бути використані в проектуванні енергоефективних сенсорних мереж LoRaWAN для систем екологічного моніторингу, розумного сільського господарства та інфраструктурних систем Інтернету речей.

У роботі досліджено вплив параметрів конфігурації LoRaWAN на енергоспоживання сенсорних вузлів на прикладі апаратної платформи RFM95W + Arduino Pro Mini. За допомогою моделювання у середовищі NS-3 оцінено залежність енергоспоживання вузла від значення коефіцієнта розширення спектра (SF), потужності передавача та періодичності передачі даних.

Результати моделювання показали, що збільшення SF суттєво підвищує тривалість передачі пакета та відповідно енергоспоживання радіомодуля. Найенергоефективнішими виявилися режими роботи з використанням SF7–SF9 за умов стабільного каналу зв'язку.

Отримані результати дозволяють рекомендувати застосування нижчих значень SF у поєднанні з оптимізованими інтервалами передачі та використанням режимів глибокого сну мікроконтролера для підвищення тривалості автономної роботи сенсорних вузлів LoRaWAN. Запропонований підхід може бути використаний в процесі проектування енергоефективних систем Інтернету речей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. Bor, J. Vidler, and U. Roedig, "LoRa for the Internet of Things," *Proc. of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN '16)*, 2016, pp. 361-366, <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/77615/>.
- [2] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, "A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016. <https://doi.org/10.3390/s16091466>.
- [3] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, 2016. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
- [4] F. Adelantado, et al., "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, 2017. <https://arxiv.org/pdf/1607.08011.pdf>.
- [5] B. Reynders, W. Meert, and S. Pollin, "Power and spreading factor control in low power wide area networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 817-827, 2016.
- [6] Z. Sheng, S. Yang, Y. Yu, A. Vasilakos, J. McCann, and K. Leung, "A survey on the IETF protocol suite for the Internet of Things: Standards, challenges, and opportunities," *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 91-98, 2013.
- [7] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, 2017.
- [8] LoRa Alliance, *LoRaWAN 1.1 Specification*, 2017. [Electronic resource]. Available: https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1-0/.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки ВНТУ

Дата надходження: 16.12.2025
Дата прийняття до публікації: 27.03.2026
Дата публікації: 8.04.2026

Савицька Людмила Анатоліївна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки, e-mail: savytska.liudmyla@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0003-1130-2621>;

Тичина Богдан Русланович — студент факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, e-mail: ticinabogdan@gmail.com ;

Азаров Олексій Дмитрович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки, e-mail: azarov2@vntu.edu.ua . <https://orcid.org/0000-0002-8501-1379>;

Кленко Денис Дмитрович — аспірант кафедри обчислювальної техніки, e-mail: svdeny@ukr.net . <https://orcid.org/0009-0009-5695-1730>.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

L. A. Savytska¹
B. R. Tychyna¹
O. D. Azarov¹
D. D. Klepko¹

Optimization of Energy Consumption in LoRaWAN Sensor Nodes

¹Vinnitsia National Technical University

This article addresses the current problem of reducing the energy consumption of sensor nodes in LoRaWAN networks, widely used in Internet of Things (IoT) systems for long-term autonomous monitoring of the environment, infrastructure facilities, industrial and agricultural objects. Special attention is paid to the analysis of factors that have a decisive influence on the energy consumption of the end devices, in particular radio transmission parameters, data collection and transmission frequency, microcontroller operating modes and the efficiency of sleep mode usage.

The paper analyzes modern approaches to improving the energy efficiency of sensor nodes, which are based on adaptive control of the physical and data link layer parameters of the LoRaWAN network, including the selection of the Spreading Factor, bandwidth and transmitter output power. Particular attention is paid to strategies aimed at minimizing the active time of the radio module and the microcontroller by optimizing data acquisition, processing and packet formation algorithms.

In addition, the article presents simulation modeling of the operation of sensor nodes in the NS-3 environment, taking into account various traffic load scenarios, node density and different radio channel configuration options. Based on the simulation results, the relationships between node energy consumption, communication range, packet loss probability and device battery lifetime were determined.

The obtained results confirm that the correct selection of data transmission rate, transmitter power and the frequency of active communication sessions can significantly increase the energy efficiency of sensor nodes without a significant degradation of communication quality. The proposed approaches can be used in the design of energy-efficient IoT systems based on LoRaWAN for industrial, infrastructure and environmental applications.

Keywords: LoRaWAN, energy efficiency, sensor nodes, optimization of transmission parameters, NS-3, Internet of Things.

Savytska Liudmyla A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Computer Engineering, e-mail: savytska.liudmyla@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0003-1130-2621>;

Tychyna Bohdan R. — Student of the Department of Information Technologies and Computer Engineering, e-mail: ticinabogdan@gmail.com ;

Azarov Olexii D. — Dr Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Computer Engineering, e-mail: azarov2@vntu.edu.ua ; <https://orcid.org/0000-0002-8501-1379>;

Klepko Denys D. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Technique, e-mail: svdeny@ukr.net . <https://orcid.org/0009-0009-5695-1730>