

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БАГАТОСТРИБКОВИХ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ПРИ ОБРОБЦІ ДАНИХ З ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

У роботі досліджується енергетична ефективність передачі даних у багатострибкових (multi-hop) безпроводних сенсорних мережах, побудованих на базі частотних перетворювачів фізичних величин. На основі радіомоделі першого порядку проведено математичний аналіз двох стратегій: централізованої обробки (передача масиву "сирих" часових міток) та периферійних обчислень (передача розрахованих фізичних значень). Доведено, що попереднє агрегування та розрахунок частоти безпосередньо на мікроконтролері вузла є критичною вимогою для мінімізації корисного навантаження (payload) та забезпечення життєздатності багатострибкових топологій.

**Ключові слова:** безпроводна сенсорна мережа, частотний сенсор, радіомодель першого порядку, багатострибкова маршрутизація, периферійні обчислення, енергоспоживання.

## Abstract

The study investigates the energy efficiency of data transmission in multi-hop wireless sensor networks based on frequency converters of physical quantities. Based on a first-order radio model, a mathematical analysis of two strategies was performed: centralized processing (transmission of an array of "raw" time stamps) and peripheral computing (transmission of calculated physical values). It has been proven that preliminary aggregation and frequency calculation directly on the node microcontroller is a critical requirement for minimizing payload and ensuring the viability of multi-hop topologies.

**Keywords:** wireless sensor network, frequency sensor, first-order radio model, multi-hop routing, edge computing, energy consumption.

## Вступ

Найбільш енергоємним вузлом автономних пристроїв безпроводних сенсорних мереж (БСМ) є радіотрансивер. При використанні високоточних частотних сенсорів (наприклад, на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором [1], [2]) виникає архітектурна дилема: транслювати масив первинних даних (часових міток фронтів сигналу) для подальшого складного розрахунку на хмарному сервері, чи виконувати обчислення частоти локально на мікроконтролері вузла (парадигма Edge Computing). Від цього вибору безпосередньо залежить обсяг даних, що генерується кожним вузлом.

Метою роботи є кількісна оцінка впливу обсягу переданих даних з частотних сенсорів на загальний енергетичний бюджет багатострибкової безпроводної сенсорної мережі за допомогою математичного моделювання радіотракту.

## Математична модель енергоспоживання

Для оцінки ефективності використовується класична "Радіомодель першого порядку" (First Order Radio Model) [3]. Згідно з цією моделлю, енергія  $E_{Tx}$ , що витрачається вузлом на передачу пакета даних довжиною  $k$  біт на відстань  $d$ , складається з витрат на роботу електронних схем модулятора  $E_{elec}$  та енергії підсилювача потужності  $\epsilon_{amp}$ :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \cdot k + \epsilon_{amp} \cdot k \cdot d^{\alpha}$$

де  $\alpha$  — показник втрат на трасі поширення радіохвиль (типово  $\alpha = 2$  для відкритого простору та  $\alpha = 4$  для складних умов багатопроменевого поширення).

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \cdot k$$

### Аналіз стратегій передачі у багатострибкових мережах

Розглянемо лінійну багатострибкову топологію [4], де інформація від кінцевого вузла передається до базової станції (шлюзу) через  $N$  проміжних вузлів-ретрансляторів (multi-hop routing).

Стратегія 1 (Централізована). Вузол передає масив "сирих" відліків таймера. Розмір пакета  $k_{raw}$  становить десятки або сотні байт (наприклад, 100 байт = 800 біт).

Стратегія 2 (Edge Computing). Мікроконтролер вузла самостійно розраховує частоту методом зворотного рахунку, застосовує лінійну регресію та передає єдине значення фізичної величини (наприклад, тип float,  $k_{edge} = 4$  байти = 32 біти).

У багатострибковій мережі проміжний вузол не лише передає власні дані, але й витрачає енергію на прийом та ретрансляцію транзитних пакетів. Загальна енергія, що витрачається всією мережею на доставку одного пакета через  $N$  ретрансляцій, дорівнює:

$$E_{total} = N \cdot E_{Tx}(k, d) + (N - 1) \cdot E_{Rx}(k)$$

Як наочно показано на рис. 1 та рис. 2, рівняння демонструє лінійну залежність загальних енерговитрат мережі від розміру корисного навантаження  $k$ . Якщо кінцевий вузол використовує Стратегію 1, розмір пакета  $k_{raw}$  є великим, що призводить до каскадного виснаження батарей усіх проміжних вузлів (майже 900 мкДж для 10 стрибків). Зменшення довжини пакета ( $k_{edge} \ll k_{raw}$ ) шляхом локальної обробки частотного сигналу (Стратегія 2) кардинально розвантажує мережу, зменшуючи енерговитрати у 25 разів. Незважаючи на те, що обчислення частоти потребує кількох мікросекунд роботи процесора, ця енергія є на кілька порядків меншою за енергію радіопередачі.

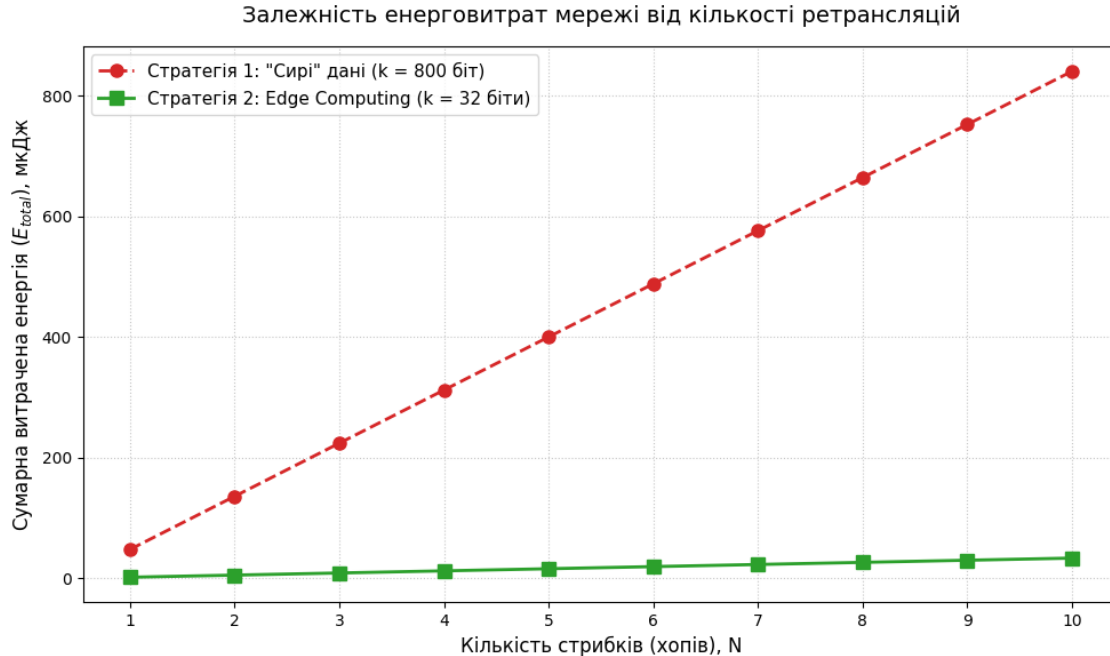


Рис. 1. Залежність сумарних енерговитрат мережі від кількості ретрансляцій для різних стратегій обробки даних частотного сенсора

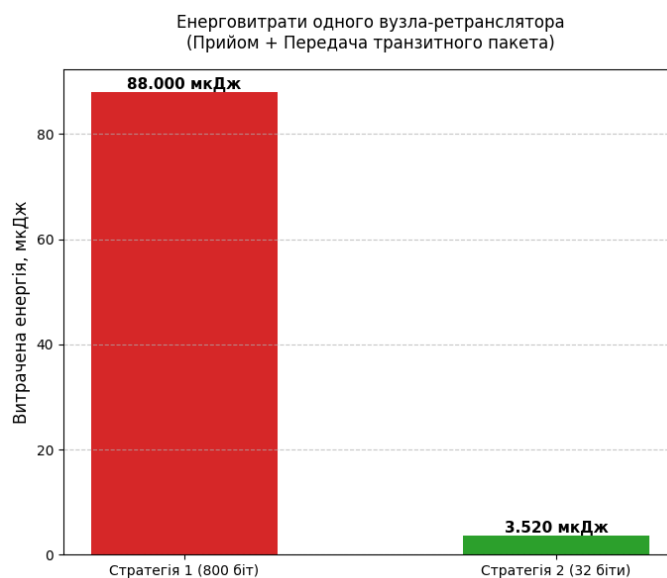


Рис. 2. Порівняння енерговитрат одного проміжного вузла на прийом та ретрансляцію транзитного інформаційного пакета

### Висновки

Математичне моделювання доводить, що проста трансляція первинних параметрів (часових міток) частотних сенсорів є енергетично неефективною, особливо у багатострибкових топологіях. Перенесення математичної обробки сигналу безпосередньо на мікроконтролер сенсорного вузла (Edge Computing) дозволяє радикально скоротити довжину інформаційного пакета  $k$ . Таке скорочення забезпечує експоненційне зростання загального часу життя безпроводної мережі та є обов'язковою умовою при проектуванні сучасних масштабованих IoT-систем.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Osadchuk A. V., Osadchuk I. O., Semenov A. O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2021. Т. 13, № 4. С. 04001–1–04001–6. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(4\).04001](https://doi.org/10.21272/jnep.13(4).04001).
2. Osadchuk O. V., Osadchuk I. O., Skoshchuk V. K. IoT system with frequency converters of physical quantities on FPGA. *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2025. Т. 15, № 3. С. 59–66. URL: <https://doi.org/10.35784/iapgos.7076>.
3. Tudose D., Gheorghe L., Țăpuș N. Radio transceiver consumption modeling for multi-hop wireless sensor networks. *U.P.B. Scientific Bulletin, Series C*. 2013. Vol. 75, Iss. 2. P. 75–86. URL: [https://elf.cs.pub.ro/wsn/wiki/media/pdf/articol\\_dt\\_v4.pdf](https://elf.cs.pub.ro/wsn/wiki/media/pdf/articol_dt_v4.pdf).
4. Surendra S., Sandeep S. Wireless Sensor Networks: Balanced Energy Consumption Model With Clustering And Energy Consumption. *Elementary Education Online*. 2021. URL: <https://ilkogretim-online.org/index.php/pub/article/download/2193/2141/4228>.

**Завальнюк Максим Євгенович** — аспірант кафедри Інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [mezgoodle@gmail.com](mailto:mezgoodle@gmail.com).

Науковий керівник: **Осадчук Олександр Володимирович** — д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [osadchuk.o.v@vntu.edu.ua](mailto:osadchuk.o.v@vntu.edu.ua)

**Zavalniuk Maksym Yev.** — postgraduate student at the department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [mezgoodle@gmail.com](mailto:mezgoodle@gmail.com).

Supervisor: **Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych** — doctor of technical sciences, professor, head of the department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [osadchuk.o.v@vntu.edu.ua](mailto:osadchuk.o.v@vntu.edu.ua)