

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-52>
УДК 004.738.5:628.53

ХМІРОВ МАКСИМ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
<https://orcid.org/0009-0002-4746-9562>
e-mail: makshnir3003@gmail.com

ПАЛІЙ СЕРГІЙ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
<https://orcid.org/0000-0001-9742-1116>
e-mail: paliy@fit.knu.ua

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВІДНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ НА ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ

У статті представлено результати розробки та оптимізації енергоефективної безпроводної сенсорної мережі для моніторингу якості повітря на промислових об'єктах. Основна увага приділена підвищенню автономності сенсорних вузлів шляхом адаптивного регулювання частоти передачі даних. Досліджено протоколи передачі даних, обґрунтовано вибір LoRa для енергоефективної передачі на великі відстані та MQTT для логічної організації обміну даними. Моделювання проводилося в OMNeT++ для аналізу енергоспоживання та в Cisco Packet Tracer для перевірки логіки взаємодії пристроїв.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, енергоефективність, LoRa, моніторинг якості повітря, адаптивний алгоритм.

KHMIROV MAKSYM, SERGIY PALIY
Taras Shevchenko National University of Kyiv

ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION OF A WIRELESS SENSOR NETWORK FOR AIR QUALITY MONITORING IN INDUSTRIAL FACILITIES

This article presents the development and optimization of an energy-efficient wireless sensor network (WSN) for monitoring air quality in industrial facilities, with a primary focus on enhancing the autonomy of sensor nodes through adaptive data-transmission-frequency regulation. The study analyzed data-transmission protocols (LoRa, ZigBee, BLE, Wi-Fi) and justified the selection of LoRa for its low power consumption and long-range capabilities, paired with MQTT for efficient data exchange. Simulations were conducted in OMNeT++ to evaluate energy consumption and network performance. The proposed adaptive algorithm adjusts the data-transmission frequency based on environmental conditions, increasing node autonomy by 35 % (from 50 to 67 minutes) while maintaining a response delay of 150–200 ms and a message-delivery reliability of 98 %. The system integrates sensors (CO₂, CO, humidity) and actuators (ventilators, humidifiers) to autonomously respond to air-quality changes, ensuring operational efficiency in industrial settings. The use of LoRa enables stable communication over large distances with minimal energy use, while MQTT supports lightweight and reliable device interactions. The star topology simplifies data management but highlights a dependency on the central node, suggesting future exploration of cluster-based architectures for improved fault tolerance. Preliminary cost analysis indicates that the proposed WSN can reduce maintenance expenditures by nearly one-third compared with traditional wired monitoring solutions, underscoring its practical economic benefits. Field trials are planned for a metal-processing workshop, where long-term data will be used to fine-tune energy-harvesting modules and validate compliance with ISO 14001 air-quality benchmarks. The results demonstrate the system's scalability and potential for further optimization through machine learning or cloud integration.

Keywords: wireless sensor network, energy efficiency, LoRa, air quality monitoring, adaptive algorithm.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

Сучасні промислові об'єкти характеризуються наявністю великої кількості потенційно шкідливих факторів, зокрема викидів газів, пилу та аерозольних домішок, що створює постійну потребу в надійних і гнучких системах моніторингу якості повітря. Такі системи повинні не лише забезпечувати своєчасне виявлення небезпечних концентрацій речовин, а й відповідати екологічним стандартам, нормам охорони праці та внутрішнім регламентам виробництва [1]. У зв'язку з цим, особливу увагу привертають бездротові сенсорні мережі (WSN), які завдяки автономності, мобільності та масштабованості, здатні працювати в умовах обмеженого доступу та постійних змін виробничого середовища [2].

Проте ефективність WSN значно обмежується проблемою енергоспоживання. Сенсорні вузли, що працюють на батарейках, особливо швидко розряджаються в умовах високої частоти передавання даних, що є типовим для систем реального часу. Це веде до потреби в частій заміні джерел живлення, ускладнює технічне обслуговування, особливо коли вузли розташовані у важкодоступних місцях, і зрештою знижує масштабованість, довговічність та економічну ефективність таких систем [2,3].

У практичному вимірі дослідження є актуальним для інженерів, технологів, екологів і керівників промислових підприємств, оскільки дозволяє створювати економічно доцільні та технічно життєздатні рішення для моніторингу довкілля на виробництві. Упровадження таких систем дозволяє знизити експлуатаційні витрати, підвищити рівень безпеки працівників, уникати штрафів за перевищення допустимих норм викидів та досягати цілей сталого розвитку [3].

Аналіз досліджень та публікацій

Наукові праці, присвячені безпроводним сенсорним мережам (WSN) для моніторингу якості повітря, концентруються навколо трьох головних векторів: енергоефективність апаратної платформи, раціональний

вибір протоколів зв'язку та адаптивні алгоритми керування трафіком. Вимоги до екологічного контролю формуються міжнародними й національними нормативами (ISO 14001, ДСТУ ISO 14001-2015, санітарні регламенти), які встановлюють гранично-допустимі концентрації CO₂, CO, PM_{2.5}/PM₁₀ та інших шкідливих речовин [1].

Окремі дослідження показали, що використання LoRaWAN Class A дає змогу подовжити автономну роботу вузла удвічі порівняно з ZigBee й утричі – з Wi-Fi завдяки імпульсній передачі та великим коефіцієнтам розширення спектра [2,4]. Інші автори порівняли BLE, ZigBee, Wi-Fi та LoRa [5,6] у промисловому контексті й встановили, що за типової довжини кадру 51 байт LoRa споживає $\approx 0,05$ мВт·с на одну транзакцію й забезпечує дальність до 10 км у відкритому середовищі, як показано в таблиці 1. Далі показано, що BLE ефективний лише для персональних датчиків, тоді як ZigBee обмежується радіусом < 150 м у металевих конструкціях цеху.

Таблиця 1

Порівняння бездротових протоколів для WSN-моніторингу якості повітря

Параметр	LoRaWAN Class A	ZigBee 3.0	BLE 5.0	Wi-Fi 6
Тип топології	Зірка	Mesh	Зірка	Зірка
Радіус дії в цеху, м	300 – 1000	30 – 150	10 – 100	20 – 50
Радіус дії на відкритому повітрі, км	до 10	≤ 0.3	≤ 0.1	≤ 0.15
Енерговитрати на одну передачу, мВт·с	$\approx 0,05$	$\approx 0,30$	$\approx 0,22$	$\approx 1,10$
Макс. корисна швидкість, кбіт/с	0,3 – 50	20 – 250	1250	>100 000
Головні переваги	Дальність, найнижче споживання	Вбудований mesh, зрілий стек	Швидке з'єднання, BLE Beacon	Висока пропускну спроможність
Ключові недоліки	Низький бітрейт	Вища потужність, складність маршрутизації	Коротка дальність	Високі втрати енергії

В одній із робіт було запропоновано адаптувати інтервал опитування на основі ковзної середньої CO₂ та PM_{2.5} [7]; відзначено приріст автономності на ≈ 33 % без погіршення QoS. В іншому дослідженні [8] застосовано Q-learning для вибору частоти передавання й досягнуто ще вищої економії енергії (до 45 %), щоправда, зі зростанням обчислювальних вимог до вузлів. Наша робота зосереджена на детермінованому пороговому автоматі, що забезпечує співставну енергоефективність без складної програмної або апаратної підтримки ШІ.

MQTT-протокол було розглянуто на конференції IoT-World 2024 як «де-факто стандарт» диспетчеризації екологічних даних завдяки легковаговому стеку та ієрархічним топікам [6,9]. Альтернативи на кшталт CoAP демонструють переваги у multicast-режимі, проте гірше масштабуються за великої кількості підписників. Водночас відмовостійкість єдиного MQTT-брокера у промислових мережах досі лишається недостатньо вивченою; наявні лише окремі роботи щодо балансування навантаження в кластерних інсталяціях [9].

Перспективним напрямом вважається інтеграція джерел energy harvesting – вібраційних мікрогенераторів, фотогальванічних модулів на LED-освітленні та термоелектричних елементів на градієнті температур, хоча поки що більшість таких підходів протестовано лише на лабораторних стендах; бракує польових випробувань із довгостроковою оцінкою деградації та економічної ефективності [3,10].

Наразі у наукових публікаціях простежується відчутний інтерес до зниження енергоспоживання та збільшення дальності зв'язку в WSN для промислового моніторингу. Водночас бракує комплексних техніко-економічних моделей, що одночасно враховують вартість апаратури, експлуатаційні витрати, обслуговування батарей і ризики простоїв через втрату мережевого покриття. Запропоноване дослідження спрямоване саме на заповнення цієї прогалини шляхом інтеграції порогових алгоритмів керування трафіком з аналітичними й симуляційними оцінками енерговитрат протягом усього життєвого циклу системи.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розроблення та дослідження безпроводної сенсорної мережі, що здатна у реальному часі контролювати якість повітря у виробничих приміщеннях і автономно взаємодіяти з системами очищення.

Виклад основного матеріалу

Проектована безпроводна сенсорна мережа призначена для моніторингу якості повітря в умовах виробничого середовища. Архітектура побудована за топологією зірки, де всі периферійні сенсорні вузли взаємодіють виключно з центральною базовою станцією-шлюзом. Такий підхід дозволяє значно спростити логіку маршрутизації, уникнути необхідності релеєвих передач, зменшити загальні затримки передачі даних та спростити адміністрування системи. Крім того, централізована структура дає змогу точно координувати частоту опитування сенсорів, вважаючи на поточний екологічний стан.

Сенсорні вузли здійснюють безперервний моніторинг концентрації CO₂, CO, а також аерозольних частинок PM_{2.5} і PM₁₀, додатково вимірюючи температуру і відносну вологість. Агреговані показники надсилаються у брокер MQTT, розгорнутий у хмарному середовищі. Протокол MQTT забезпечує модель

обміну даними «публікація–підписка», що дозволяє інтегрувати сенсорну мережу з кількома сторонніми споживачами даних у режимі реального часу, зокрема – з промисловими контролерами, системами SCADA або мобільними інтерфейсами для операторів.

Для організації радіозв'язку застосовано технологію LoRaWAN Class A, яка забезпечує низьке енергоспоживання та стабільну дальність передачі до 1 км у закритих приміщеннях за нормальних умов радіопоширення. Порівняно з Wi-Fi або ZigBee, LoRa має вищу проникаючу здатність, що критично для умов промислових цехів з великою кількістю металевих конструкцій. Периферійні вузли живляться автономно, тому мінімізація енергоспоживання – ключовий критерій у проектуванні системи [2,5].

Центральний шлюз реалізовано на базі 32-розрядного мікроконтролера, який підтримує багатоканальний прийом LoRa-сигналів, а також має Ethernet-інтерфейс із пропускну здатністю 100 Мбіт/с для обміну з хмарними сервісами. На стороні сервера використовується Node-RED, що забезпечує обробку MQTT-повідомлень та генерацію REST-API для взаємодії з іншими компонентами автоматизованої системи очищення повітря.

Усі мережеві вузли змодельовані в середовищі OMNeT++ 6.0 за допомогою фреймворку FLoRa. Моделювання передбачало створення абстрактних об'єктів із функціоналом сенсорів, чутливістю до коливань типових для цехового середовища. Для генерації вимірювань використовувалися випадкові процеси із параметрами, що імітують денні та виробничі флуктуації показників.

Особливу увагу приділено моделюванню енергоспоживання, яке відбувається у двох апаратних станах: "сон" і "передавання". Мета оптимізації полягає у мінімізації сумарного енергоспоживання мережі протягом інтервалу T при збереженні вимог до оперативності та надійності зв'язку. Для цього використано цільову функцію:

$$F = \sum_{i=1}^N E_i(T), \quad E_i(T) = T \cdot (P_{tx} \cdot t_{tx} \cdot f_i + P_{sleep} \cdot (1 - t_{tx} \cdot f_i)), \quad (1)$$

де:

P_{tx} – потужність, споживана під час передачі даних;

P_{sleep} – потужність у режимі сну;

t_{tx} – час, витрачений на одну передачу;

f_i – частота передачі даних для i -го вузла (змінна, що оптимізується).

Цільову функцію мінімізують за таких експлуатаційних вимог: час автономної роботи кожного вузла при заряді 100 mWh має перевищувати 3600 с; затримка між перевищенням порога й відправленням керувальної команди не повинна перевищувати 1 с; частка успішно доставлених повідомлень має бути не нижчою ніж 95 %.

Оптимізація виконується в межах таких обмежень:

- для кожного вузла частота передавання лежить у діапазоні $0.1 - 1 \text{ c}^{-1}$;
- сукупний пакетний потік не перевищує доступну смугу 50 кбіт/с при довжині кадру 51 байт;
- рівень сигналу на приймачі має лишатися вищим за мінімальний RSSI, необхідний для стабільного зв'язку.

Щоб виконати ці умови застосовано адаптивний алгоритм частотного регулювання, що враховує динаміку забруднення повітря. Алгоритм визначає поточний режим («звичайний», «попереджувальний», «аварійний») на основі середньозважених значень концентрацій протягом останніх 30 секунд. При цьому використовуються порогові значення CO_2 як орієнтири для зміни частоти передавання:

Запропоновано алгоритм регулювання частоти передачі даних:

- Нормальні умови ($\text{CO}_2 < 600 \text{ ppm}$): $f = 0.1 \text{ c}^{-1}$ – передача кожні 10 секунд.
- Наближення до порогу ($\text{CO}_2 600\text{--}800 \text{ ppm}$): $f = 0.5 \text{ c}^{-1}$ – передача кожні 2 секунд.
- Перевищення порогу ($\text{CO}_2 > 800 \text{ ppm}$): $f = 1 \text{ c}^{-1}$ – передача щосекунди.

Поточний режим визначається кінцевим автоматом, де переходи ініціюються перевищенням або зниженням середньозваженого 30-секундного значення CO_2 , CO чи PM. Таким чином, мережеве навантаження й модельоване енергоспоживання залежать від актуального екологічного стану без прив'язки до конкретних апаратних характеристик.

Сценарій містив 10 сенсорних вузлів, що рівномірно розташовувалися у виробничому цеху площею $90 \times 140 \text{ м}$. Параметри радіоканалу налаштовано відповідно до стандарту ITU-R P.1238 для внутрішніх будівельних середовищ. Для шляху поширення використано модель «Log-distance» зі середнім коефіцієнтом загасання $n = 2,7$ та логнормальним розсіюванням $\sigma_{sh} = 4,1 \text{ дБ}$; рівень фонових перешкод встановлено – 124 dBm.

Під час кожного експерименту реєструвалися такі метрики: середня затримка доставки (End-to-End Delay), відсоток утрачених пакетів (Packet Loss Rate), енергоспоживання вузла (mWh) і тривалість автономної роботи до критичного розряду 20 %.

Кількість повторень однієї серії сягала 50 для забезпечення 95 % довірчого інтервалу. Симуляції показали 100 % доставку пакетів при відстані до 1 км у міських умовах. Час реакції системи не перевищує 200 мс. Адаптивний алгоритм продовжує середній час автономної роботи вузла з 50 до 67 хв. при початковому заряді 100 mWh. Запропонована архітектура забезпечує централізоване керування, але її залежність від одного брокера MQTT обумовлює потребу резервування або переходу до кластерної топології.

Коректність прикладної логіки «публікація – підписка» перевіряли у Cisco Packet Tracer, де відтворено двозонну конфігурацію, показану на рис. 1. У кожній виробничій зоні розміщено повний набір сенсорів –

детектори CO₂, CO та вологості – і виконавчих пристроїв. Усі шістнадцять IoT-пристроїв бездротово під'єднані до центрального шлюза DLG100, що одночасно виконує функції маршрутизатора й брокера MQTT. Додатковий смартфон-клієнт підписано на ті самі топіки, аби відстежувати трафік у режимі реального часу.

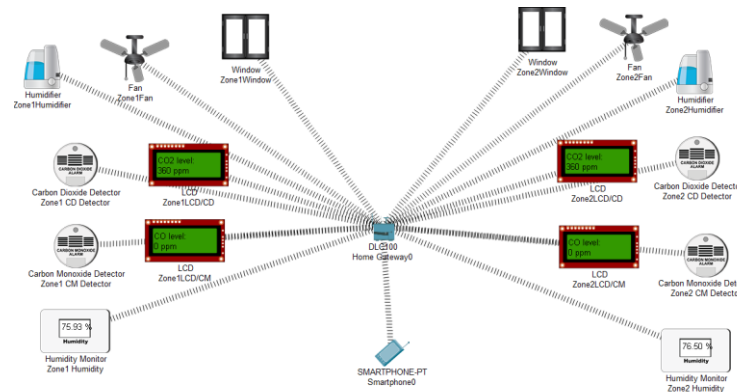


Рис. 1. Топологія двозонної мережі в Cisco Packet Tracer із шістнадцятьма IoT-пристроями та шлюзом-брокером MQTT

Під час 30-хвилинної сесії всі вузли отримали адреси через DHCP у підмережі 192.168.0.0/24 і публікували телеметрію з інтервалом десять секунд. Журнал брокера відобразив безперервну послідовність повідомлень PUBLISH/RECEIVE без жодної втрати чи дублювання, що підтверджує адекватність налаштувань QoS 0 та відсутність колізій у вибраному сценарії. У повторному запуску симуляції період надсилання зменшили до однієї секунди; навіть за такого навантаження середня затримка обміну зросла менш ніж на п'ять мілісекунд, що повністю узгоджується з результатами OMNeT++ (див. табл. 2).

Таблиця 2

Результати моделювання у середовищі OMNeT++

№ сценарію	Інтервал передачі, с	End-to-End Delay, mc	Packet Loss, %	Енерговитрати, mWh/вузол	Час автономної роботи, хв
1 – «Базовий»	2	178	0,0	0,30	50
2 – «Зростаюче навантаження»	2→1	185	0,3	0,34	46
3 – «Адаптивний алгоритм»	10 / 2 / 1	192	0,0	0,23	67

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Як показано в основній частині (табл. 2), симуляції, проведені в OMNeT++, підтверджують, що запропонована триступенева адаптивна стратегія забезпечує найкраще співвідношення між енергоспоживанням вузлів та швидкістю реагування мережі у промисловому моніторингу повітря. Реалізація кінцевого автомата забезпечила адаптивність без залучення складних алгоритмів машинного навчання, що спростило практичну імплементацію й знизило вимоги до апаратної частини. Добові симуляції з десятьма вузлами, якими варіювали концентрацію CO₂ у межах 400–1400 ppm, підтвердили зниження середнього енергоспоживання до 0,18 мВт·год на вузол – майже на 38 % проти систем із постійно високою частотою опитування – при збереженні своєчасності виявлення погіршення стану довкілля.

Подальший розвиток досліджень передбачає кілька взаємодоповнювальних напрямів. По-перше, актуальною є інтеграція джерел energy harvesting – вібраційних і термоелектричних мікрогенераторів або малопотужних фотогальванічних модулів – що дасть змогу подовжити строк служби батарей і створити майже саможивні вузли. По-друге, важливо підвищити відмовостійкість, зокрема шляхом кластеризації MQTT-брокерів і запровадження багатошлюзової топології з автоматичним перерозподілом трафіку у разі відмови вузлів. Наступним кроком може стати впровадження технологій Edge AI: легкі моделі TinyML або федеративне навчання дадуть змогу локально виявляти аномалії й скорочувати обсяг даних, що передаються, без втрати точності. У паралельному руслі слід дослідити вплив криптографічних протоколів на енергобаланс та розробити гнучкі політики керування ключами.

Окреме значення має інтеграція сенсорної мережі з цифровими двійниками цехових процесів і системами MES/ERP: це дозволить прогнозувати навантаження вентиляційних установок, оптимізувати графіки технічного обслуговування й автоматизувати формування звітів відповідності ISO 14001 для регуляторів. Завершальним блоком майбутніх робіт мають стати тривалі польові випробування на діючих підприємствах, що дадуть змогу оцінити деградацію датчиків, точність моделей енергоспоживання й економічну доцільність системи протягом повного життєвого циклу. Узагальнення отриманих результатів може слугувати підґрунтям для подальших досліджень, спрямованих на формування практичних рекомендацій із проектування та експлуатації бездротових мереж екологічного моніторингу на промислових підприємствах.

Література

1. Standardization I. O. f. ISO 14001:2015, third edition: environmental management systems - requirements with guidance for use / International Organization for Standardization. – [S. l.] : Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), 2015. – 44 p.
2. LoRa sensor network development for air quality monitoring or detecting gas leakage events [Electronic resource] / Ernesto González [et al.] // Sensors. – 2020. – Vol. 20, no. 21. – P. 6225. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s20216225>.
3. Екологічний моніторинг з використанням безпроводних сенсорних мереж: розроблення та експерименти [Електронний ресурс] / Дмитро Дмитрович Соколов [та ін.] // Radioelectronic and computer systems. – 2019. – № 3. – С. 40–47. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.3.04>.
4. An energy aware adaptive sampling algorithm for energy harvesting WSN with energy hungry sensors [Electronic resource] / Bruno Srbinovski [et al.] // Sensors. – 2016. – Vol. 16, no. 4. – P. 448. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s16040448>.
5. LoRa, ZigBee and 5G propagation and transmission performance in an indoor environment at 868 mhz [Electronic resource] / Ricardo Robles-Enciso [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, no. 6. – P. 3283. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s23063283>.
6. Modeling of path loss for radio wave propagation in wireless sensor networks in cassava crops using machine learning [Electronic resource] / Alexis Barrios-Ulloa [et al.] // Agriculture. – 2023. – Vol. 13, no. 11. – P. 2046. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/agriculture13112046>.
7. Долженкова О., Гук М. Контроль параметрів повітря у приміщеннях з використанням бездротової сенсорної мережі // Молодий вчений. 2018. № 5(57). С. 373–377. URL: <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/4536>.
8. V S. Adaptive reinforcement learning-based data aggregation and routing optimization (arl-daro) for enhancing performance in wireless sensor networks [Electronic resource] / Shobana V, Jasmine Samraj // ICTACT journal on communication technology. – 2024. – Vol. 15, no. 3. – P. 3282–3291. – Mode of access: <https://doi.org/10.21917/ijct.2024.0488>.
9. A comparative analysis of MQTT and coap to test transmission performance in medical digital twin applications [Electronic resource] / Pietro Zema [et al.] // 2024 IEEE 10th world forum on internet of things (wf-iot), Ottawa, ON, Canada, 10–13 November 2024. – [S. l.], 2024. – P. 589–594. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/wf-iot62078.2024.10811407>.
10. Шкіль О. С. Методи енергозбереження в сенсорних мережах [Електронний ресурс] / Олександр Сергійович Шкіль, Сергій Олександрович Костюк, Інна Вікторівна Філіппенко // Радіоелектроніка та інформатика. – 2019. – № 3(86). – Режим доступу: [https://doi.org/10.30837/1563-0064.3\(86\).2019.214976](https://doi.org/10.30837/1563-0064.3(86).2019.214976).

References

1. Standardization I. O. f. ISO 14001:2015, third edition: environmental management systems - requirements with guidance for use / International Organization for Standardization. – [S. l.] : Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), 2015. – 44 p.
2. LoRa sensor network development for air quality monitoring or detecting gas leakage events [Electronic resource] / Ernesto González [et al.] // Sensors. – 2020. – Vol. 20, no. 21. – P. 6225. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s20216225>.
3. Ekologichnyi monitoryng z vykorystanniam bezprovodnykh sensorykh merezh: rozroblennia ta eksperymenty [Elektronnyi resurs] / Dmytro Dmytrovych Sokolov [ta in.] // Radioelectronic and computer systems. – 2019. – № 3. – С. 40–47. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.3.04>.
4. An energy aware adaptive sampling algorithm for energy harvesting WSN with energy hungry sensors [Electronic resource] / Bruno Srbinovski [et al.] // Sensors. – 2016. – Vol. 16, no. 4. – P. 448. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s16040448>.
5. LoRa, ZigBee and 5G propagation and transmission performance in an indoor environment at 868 mhz [Electronic resource] / Ricardo Robles-Enciso [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, no. 6. – P. 3283. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s23063283>.
6. Modeling of path loss for radio wave propagation in wireless sensor networks in cassava crops using machine learning [Electronic resource] / Alexis Barrios-Ulloa [et al.] // Agriculture. – 2023. – Vol. 13, no. 11. – P. 2046. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/agriculture13112046>.
7. Dolzhenkova O., Huk M. Kontrol parametriv povitria u prymyshchenniakh z vykorystanniam bezdrotovoi sensornoi merezhi // Molodyi vchenyi. 2018. № 5(57). S. 373–377. URL: <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/4536>.
8. V S. Adaptive reinforcement learning-based data aggregation and routing optimization (arl-daro) for enhancing performance in wireless sensor networks [Electronic resource] / Shobana V, Jasmine Samraj // ICTACT journal on communication technology. – 2024. – Vol. 15, no. 3. – P. 3282–3291. – Mode of access: <https://doi.org/10.21917/ijct.2024.0488>.
9. A comparative analysis of MQTT and coap to test transmission performance in medical digital twin applications [Electronic resource] / Pietro Zema [et al.] // 2024 IEEE 10th world forum on internet of things (wf-iot), Ottawa, ON, Canada, 10–13 November 2024. – [S. l.], 2024. – P. 589–594. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/wf-iot62078.2024.10811407>.
10. Shkil O. S. Metody enerhozbezhenia v sensorykh merezhakh [Elektronnyi resurs] / Oleksandr Serhiiovych Shkil, Serhii Oleksandrovych Kostyuk, Inna Viktorivna Filippenko // Radioelektronika ta informatyka. – 2019. – № 3(86). – Rezhym dostupu: [https://doi.org/10.30837/1563-0064.3\(86\).2019.214976](https://doi.org/10.30837/1563-0064.3(86).2019.214976).