

Кузьмінський Артем Ростиславович

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

ORCID 0009-0007-9961-8845

Носков Вячеслав Іванович

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

ORCID 0000-0002-8098-6871

Бондарчук Андрій Петрович

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ

ORCID 0000-0001-5124-5102

ГІБРИДНИЙ ПІДХІД ПОЄДНАННЯ NB-IOT З LORA

Анотація: Дана робота присвячена порівняльному аналізу радіотехнологій мереж Інтернету Речей з метою визначення оптимальних рішень для забезпечення надійного, енергоефективного та масштабованого зв'язку між пристроями. Оскільки технології IoT використовуються для збору та обміну даними в умовах динамічно змінюваних мереж, важливим аспектом є їх здатність адаптуватися до різних умов навколишнього середовища та забезпечувати стабільну роботу при обмежених ресурсах. У роботі розглядаються основні бездротові радіотехнології, що використовуються в IoT-системах, зокрема Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee, Z-Wave, LoRa, Sigfox та NB-IoT. Для кожної з цих технологій здійснюється аналіз характеристик, таких як дальність та швидкість передачі даних, енергоефективність, пропускна здатність, а також вартість розгортання, підтримки інфраструктури.

Одним з ключових моментів є порівняння технологій в контексті їх застосування в різних сценаріях IoT, таких як міські та віддалені райони, а також специфічні потреби в рамках критичних інфраструктур. Особлива увага приділяється перспективі інтеграції таких технологій, як NB-IoT та LoRa, у межах гібридного підходу, який дозволяє поєднати переваги стабільного мобільного зв'язку та високої енергоефективності. Така інтеграція відкриває можливості для розробки мультипротокольних рішень, що забезпечують більш ефективну та надійну передачу даних в умовах низької щільності покриття, зокрема у сільських та віддалених районах, де традиційні мобільні мережі не можуть забезпечити необхідний рівень покриття.

Результати дослідження сприятимуть формуванню рекомендацій для практичного впровадження IoT-систем, підвищення їх продуктивності та надійності, що може мати значний потенціал для застосування в «розумних» містах, промисловості, аграрному секторі, чи, наприклад, охороні здоров'я. Розвиток гібридних IoT-мереж, у яких використовуються декілька різних радіотехнологій, дозволяє досягти балансу між економічністю, автономністю пристроїв та якістю обслуговування, що може стати ключовим для успішного розвитку Інтернету речей у майбутньому.

Ключові слова: Інтернет речей, IoT, порівняльний аналіз, радіотехнології, гібридна архітектура, LPWAN, WPAN, енергоефективність, NB-IoT, LoRa, мережі IoT.

Artem Kuzminsky

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

ORCID 0009-0007-9961-8845

Vyacheslav Noskov

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
ORCID 0000-0002-8098-6871

Andrii Bondarchuk

State University of Information and Communication Technologies, Kyiv
ORCID 0000-0001-5124-5102

HYBRID APPROACH TO COMBINING NB-IOT WITH LORA

Abstract: This work is dedicated to the comparative analysis of radio technologies for the Internet of Things (IoT) networks with the aim of identifying optimal solutions for ensuring reliable, energy-efficient, and scalable communication between devices. Since IoT technologies are used for data collection and exchange in dynamically changing networks, an important aspect is their ability to adapt to various environmental conditions and provide stable operation under resource constraints. The work examines the main wireless radio technologies used in IoT systems, including Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee, Z-Wave, LoRa, Sigfox, and NB-IoT. For each of these technologies, an analysis is performed of characteristics such as range and data transfer speed, energy efficiency, bandwidth, as well as the cost of deployment and infrastructure maintenance.

One of the key aspects is the comparison of these technologies in the context of their application in different IoT scenarios, such as urban and remote areas, as well as specific needs within critical infrastructures. Special attention is given to the potential integration of technologies like NB-IoT and LoRa within a hybrid approach, which combines the benefits of stable mobile connectivity and high energy efficiency. Such integration opens up opportunities for the development of multi-protocol solutions that ensure more efficient and reliable data transmission in low coverage-density conditions, particularly in rural and remote areas where traditional mobile networks cannot provide the necessary coverage.

The results of this research will contribute to the formulation of recommendations for the practical implementation of IoT systems, enhancing their performance and reliability, which can have significant potential for application in smart cities, industry, agriculture, and healthcare. The development of hybrid IoT networks, utilizing multiple different radio technologies, allows for a balance between cost-efficiency, device autonomy, and service quality, which could be key to the successful development of the Internet of Things in the future.

Keywords: Internet of Things, IoT, comparative analysis, radio technologies, hybrid architecture, LPWAN, WPAN, energy efficiency, NB-IoT, LoRa, IoT networks.

Вступ

Інтернет речей (IoT) – це концепція взаємодії фізичних пристроїв через мережу без участі людини, яка забезпечує автоматичний обмін даними між сенсорами, смарт-пристроями, автомобілями, обладнанням тощо. IoT-системи активно впроваджуються в різних сферах – від «розумних» міст і аграрного сектору до промисловості та охорони здоров'я, підвищуючи ефективність процесів, знижуючи витрати та покращуючи якість життя.

Ключовим елементом функціонування таких мереж є вибір радіотехнології, що забезпечує надійний та енергоефективний зв'язок. Технології відрізняються між собою за швидкістю, дальністю дії, споживанням енергії та вартістю впровадження. Внаслідок розвитку даної технології зростає інтерес до гібридних підходів, що поєднують різні типи радіотехнологій. Наприклад, одним із таких варіантів є комбінація можливостей NB-IoT та LoRa. Така інтеграція дозволяє поєднати переваги мобільного зв'язку з високою надійністю та широким покриттям LoRa при мінімальному енергоспоживанні, що відкриває нові перспективи для розвитку ефективних і гнучких IoT-систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Протягом останніх років можна спостерігати появу низки робіт, які присвячені порівняльному аналізу радіотехнологій для мереж Інтернету речей. У статті [1] автори систематизували певні ключові параметри — енергоефективність, дальність дії, пропускна здатність та питання безпеки й сумісності — для деяких технологій, таких як Wi-Fi, BLE, ZigBee, LoRa та 6LoWPAN, показавши, що кожен протокол займає власну «нішу» залежно від умов експлуатації. Дослідження [2, 4] поглибили тему, продемонструвавши, що оптимізація MAC-рівня (режими сну, адаптивне керування циклом пробудження), наприклад у BLE та ZigBee, може збільшити час автономної роботи пристроїв без погіршення якості зв'язку.

Гібридні мережі, які об'єднують переваги кількох стандартів, викликають особливий інтерес, проте їх інтеграція в рамках єдиної інфраструктури може стикатися із деякими складнощами сумісності та розподілу ресурсів [1]. У роботі [6] запропоновано архітектуру LoRaWAN + NB-IoT із fog-обчисленнями на рівні шлюзів, що дозволяє зменшити затримки при обробці критичних подій і розвантажити хмару, зберігаючи при цьому низьке споживання енергії й масштабованість мережі. Автори також надали первинний аналіз енергоспоживання LoRa/NB-IoT-шлюзу, що робить оцінку цього підходу більш ґрунтовною. Це також підтверджує доцільність гібридного підходу як одного з можливих трендів у розвитку IoT-мереж.

Таким чином, результати огляду сучасних досліджень підтверджують необхідність системного порівняння характеристик IoT-технологій, як для коротких, так і для великих відстаней, щоб чітко визначити їхні параметри і від цього обирати оптимальні сценарії застосування. Водночас ідея гібридного підходу поєднання кількох радіотехнологій в рамках однієї мережі, як, наприклад LoRa та NB-IoT, що буде розглядатися у даній роботі, може виявитися перспективним інструментом, який відкриє широкі можливості для реалізації різноманітних завдань: від моніторингу довкілля до інтелектуального управління транспортом. Саме тому ця робота зосереджена на комплексному аналізі характеристик різних IoT-технологій, їх порівнянні та розгляді гібридного підходу поєднання LoRa та NB-IoT.

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка та обґрунтування методики оптимізації продуктивності IoT-мереж шляхом використання гібридного поєднання LoRa і NB-IoT та адаптивного балансування навантаження із урахуванням енергоспоживання, затримок і втрат пакетів.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- Окремо розглянути параметри сучасних радіотехнологій, таких як Wi-Fi, BLE, ZigBee, Z-Wave, LoRa, Sigfox, NB-IoT;
- Провести порівняльний аналіз даних радіотехнологій за критеріями енергоефективності, радіусу дії, пропускної здатності, доцільності їх використання у певних сценаріях тощо;
- Обґрунтувати доцільність гібридного поєднання технологій LoRa та NB-IoT для побудови масштабованих та надійних IoT-систем;
- Розробити концепцію гібридної архітектури мережі LoRa + NB-IoT зобразити її схематично та визначити принципи розподілу функцій між протоколами;
- Проаналізувати можливості адаптації гібридного підходу до різних галузевих сценаріїв, зокрема в умовах інфраструктурних обмежень.

Вимоги до радіотехнологій для IoT

Сучасні системи Інтернету речей вимагають застосування радіотехнологій, які забезпечують надійний зв'язок між пристроями при мінімальному енергоспоживанні. Оскільки

здебільшого IoT-пристрої працюють саме від батарей, критично важливо, щоб технологія мала низьке енергоспоживання для продовження терміну експлуатації без частих заміन акумуляторів або додаткових витрат на електроенергію.

Крім енергоефективності, важливим показником є дальність зв'язку. Різні сценарії застосування IoT вимагають різного покриття: від невеликих локальних мереж у розумних будинках до широкомасштабних мереж для моніторингу міст або сільськогосподарських угідь. Відповідно, обрана технологія повинна забезпечувати достатній радіус дії, що дозволить підтримувати зв'язок навіть за умов складного ландшафту або на великих відстанях.

Швидкість передачі даних, або пропускна здатність, є ще одним ключовим параметром. Для деяких застосувань, таких як відеоспостереження або потокова передача інформації, необхідна висока швидкість для своєчасного та якісного обміну даними. Водночас, для задач, пов'язаних з передачею невеликих пакетів даних, як-от сенсори температури чи вологості, достатньою буде і менша швидкість передачі.

Не менш важливою є економічна доцільність технології є важливим фактором. Вартість розгортання мережі IoT включає як початкові інвестиції в обладнання та інфраструктуру, так і поточні витрати на обслуговування та експлуатацію. Оптимальне рішення має забезпечувати баланс між високою ефективністю і доступністю, що дозволить зменшити загальні витрати проекту при максимальній продуктивності системи.

Таким чином, оптимальна радіотехнологія для IoT повинна поєднувати енергоефективність, достатній радіус дії, прийнятну швидкість передачі даних і розумну вартість, щоб забезпечити стабільну та довготривалу роботу системи в реальних умовах.

Технології для коротких дистанцій (Wi-Fi, BLE, Zigbee, Z-Wave)

Для реалізації IoT-систем у приміщеннях або на невеликих територіях найчастіше використовуються технології бездротового зв'язку малого радіусу дії. Вони забезпечують швидкий та стабільний зв'язок на невеликих відстанях і добре підходять для взаємодії між сенсорами, контролерами та центральними вузлами. До найпоширеніших належать Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee та Z-Wave — кожна з яких має свої особливості, переваги та обмеження.

Однією з найпоширеніших технологій бездротового зв'язку є **Wi-Fi**, що забезпечує високу швидкість передачі даних і широко використовується у домашніх та офісних мережах. Незважаючи на те, що Wi-Fi споживає багато енергії та потребує високої початкової вартості налаштування порівняно з іншими трансиверами малої потужності, після створення інфраструктури він простий у використанні та може бути легко інтегрований з існуючими технологіями та пристроями IoT. Він використовує зіркову топологію, де центральна точка доступу (AP – Access Point) підключена до всіх інших вузлів, і кожен зв'язок організується лише через AP.

Для IoT розробники технології Wi-Fi додали нову специфікацію, створивши стандарт IEEE 802.11ah, відомий як Wi-Fi HaLow. Він використовує неліцензійну ділянку діапазону 900 МГц і має збільшений радіус дії. Для Wi-Fi також були розроблені більш енергоефективні трансивери RNU. Багатопрохідна маршрутизація, коригування робочого циклу в MAC-рівні також допомагають покращити енергоспоживання[4, 5].

Хоча ця технологія дозволяє передавати великі обсяги даних, її енергоспоживання зазвичай є вищим порівняно з іншими рішеннями для IoT, тому вона не завжди оптимальна для пристроїв, які працюють від автономних джерел живлення протягом тривалого часу.

Наступна технологія, а саме **Bluetooth Low Energy**, розроблена для програм із низьким енергоспоживанням. Вона представлена двома різними режимами реалізації, а саме одинарним

та подвійним. У однорежимній реалізації існує лише один стек протоколів з низьким енергоспоживанням, тоді як у подвійному режимі функції з низькою потужністю споживання інтегровані з класичним Bluetooth. Щоб збільшити радіус дії, технологія використовує частотну маніпуляцію GFSK (GFSK – Gauss Frequency Shift Keying). Для зниження електроспоживання використовуються такі методи, як низька швидкість передачі даних, менша кількість каналів для стрибків частоти, скорочення часу пробудження, тощо.

В доповнення до BLE, що базувалася на 4-й версії Bluetooth, існує **Bluetooth 5**, що має можливість контролювати такі параметри, як дальність, швидкість передачі даних, довжина пакета або пропускна здатність широкомовних повідомлень. З 40 доступних фізичних каналів 37 використовувалися для передачі даних, а решта використовується для передачі так званих advertising packets (пакетів оголошень) по аналогії з hello-пакетами в протоколі маршрутизації OSPF. Це потрібно для виявлення сусідніх пристроїв, встановлення та підтримки з'єднань з ними. Поряд із високим радіусом дії та швидкістю в версії Bluetooth 5 підвищена здатність транслювати повідомлення, що його ідеальним для застосувань IoT. Також подовжений час автономної роботи та здатність співіснувати з іншими мережами, такими як Wi-Fi [4].

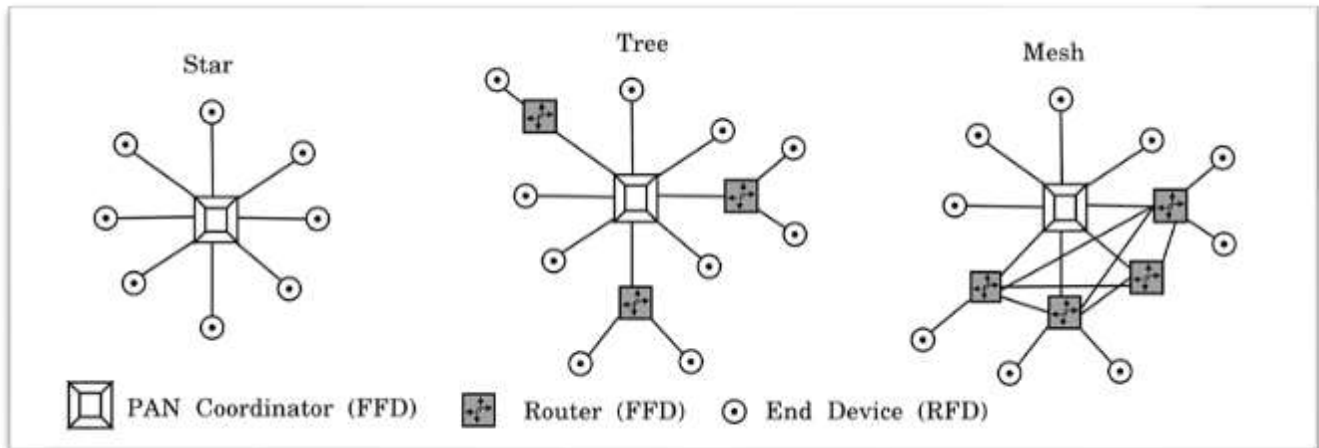


Рис. 1. Основні топології які використовуються в радіотехнологіях IoT [4]

ZigBee — це протокол з низьким енергоспоживанням і низькою швидкістю, спеціально розроблений для пакетної передачі даних із випадковими інтервалами. Регулюючи період сну, можна збільшити термін автономної роботи вузла Zigbee. Мережа Zigbee може бути сформована за допомогою топології дерева, зірки або сітки (рис. 1), а її конфігурація може бути різноманітною. Існує два типи пристроїв: повнофункціональний пристрій FFD (Full-Function Device) і пристрій зі зниженою функцією RFD (Reduced-Function Device). FFD, будучи більш функціональним, може використовуватися як координатор PAN (PAN – Personal Area Network), координатор або пристрій, тоді як RFD, з його обмеженими функціями, може працювати лише як пристрій. Рівні PHY і MAC Zigbee відповідають усім специфікаціям і технічним аспектам, визначеним стандартом IEEE 802.15.4. Мережевий рівень реалізовано в Zigbee для керування бездротовою мережею, розподілу адрес і маршрутизації.

Протокол **Z-Wave** здебільшого застосовується для систем домашньої автоматизації і відповідає вимогам специфікації ITU-T G.9959. Він зазвичай формує сітчасту мережу для взаємодії з побутовими пристроями. Технологія Z-Wave забезпечує радіус покриття до 40 м. Протокол використовує вузькосмугову частотну маніпуляцію (FSK) і працює на частотах 868,42 МГц у Європі та 908,42 МГц у США. Z-Wave застосовує протокол з низьким енергоспоживанням MAC-рівня і механізм CSMA-CA для керування доступом до спільного радіоканалу. Завдяки

високому рівню сумісності між вузлами, інформація може передаватися через послідовні вузли в мережі. Більшість вузлів знаходяться в режимі сну і активуються лише для виконання специфічних завдань.

Кожна з цих технологій має свої переваги та обмеження, тому вибір конкретного рішення залежить від специфічних вимог застосування, таких як необхідна швидкість передачі даних, енергозбереження, вартість та умови експлуатації мережі.

Технології для великих відстаней (LoRa, Sigfox, NB-IoT)

У багатьох сценаріях застосування IoT необхідно забезпечити стабільний зв'язок між пристроями, розташованими на значній відстані один від одного, з мінімальним енергоспоживанням. Для цього використовуються технології класу LPWAN (Low Power Wide Area Network), які дозволяють передавати дані на десятки кілометрів при мінімальному енергоспоживанні. На відміну від рішень для локальних мереж, LPWAN-технології орієнтовані на невелику пропускну здатність, але забезпечують надзвичайно довгий термін автономної роботи пристроїв. Однією з таких технологій є LoRa.

LoRa — це технологія фізичного рівня (PHY). Для організації зв'язку використовується радіодіапазони нижче 1 ГГц і забезпечується дальність до 15 км при низькому рівні споживання електроенергії. Для придушення завад використовується спеціальна техніка розширеного спектра CSS (Chirp Spread Spectrum). Також використовується завадостійке кодування послідовним кодом для підвищення чутливості приймача. Швидкість передачі даних варіюється від 300 біт/с до 37,5 кбіт/с.

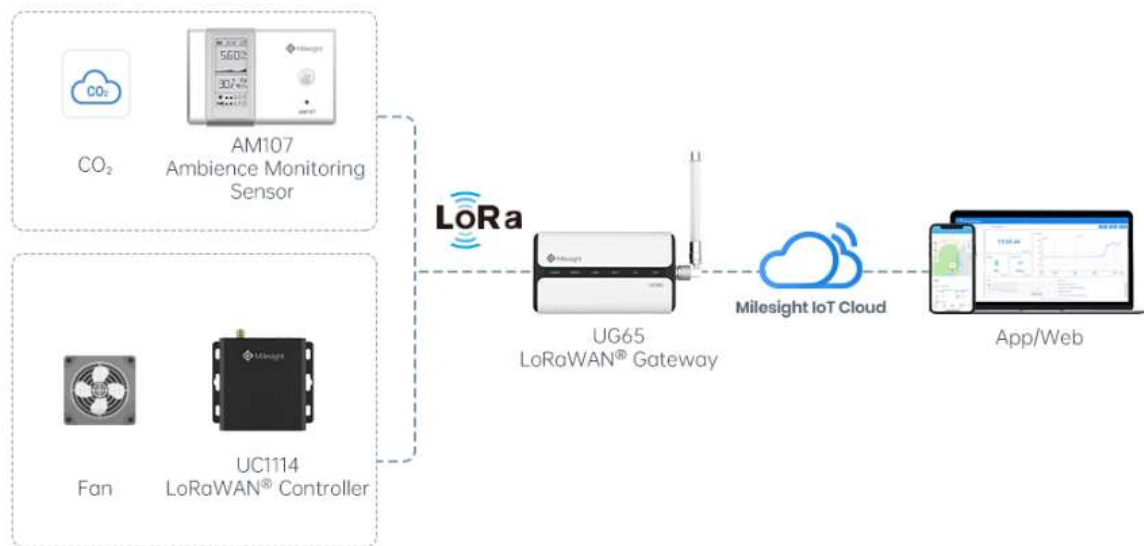


Рис. 2. Приклад використання шлюзу LoRaWAN компанії Milesight

На рівні MAC використовується простий ALOHA. У цьому протоколі пристрій надсилає дані в радіоканал без попереднього узгодження з іншими пристроями. Використання різних каналів і ортогональних кодів дозволяє LoRa встановлювати з'єднання між кількома вузлами. LoRa класифікує пристрої на три категорії відповідно до їхніх вимог до затримки та енергоспоживання. Клас А споживає найменшу потужність із трьох, але страждає від найдовшої затримки, тоді як клас С споживає найвищу потужність і забезпечує найшвидший обмін даними. Клас В підтримує компроміс між затримкою та енергоспоживанням. У мережі передача даних відбувається асинхронним способом. Мережева модель LoRaWAN відповідно до OSI показана на рис. 2. В мережі LoRaWAN один і той же пакет може бути переданий кілька разів, що створює

надмірність. Центральний мережевий сервер видаляє повторювані пакети та керує мережею за допомогою відповідної перевірки безпеки. Для помірного трафіку LoRaWAN забезпечує надійну систему зв'язку, однак, як тільки трафік перетне максимальні межі, його продуктивність знижується, і виникають проблеми з керуванням робочим циклом, стрибками частоти та механізмами доступу до каналу.

Ще одна популярна технологія – **Sigfox** має поширене використання, навіть не зважаючи на те, що у 2022 р. оголошено банкрутство компанії-розробника і її активи викупила компанія UnaBiz. Технологія використовує радіодіапазон нижче 1 ГГц. Мережа Sigfox складається з базових станцій із когнітивними програмно-визначеними радіостанціями, які підключені до внутрішніх серверів за допомогою мережі на основі IP. Використовується фазова маніпуляція BPSK (Binary Phase Shift Keying). Смуга частот радіоканалу обмежена на рівні 100 Гц, що в свою чергу обмежує швидкість передачі на рівні 100 біт/с. Однак на такій невеликій швидкості забезпечується значна дальність передачі. Sigfox використовує зіркову мережеву топологію, і їй завжди потрібен мобільний оператор для передачі згенерованого трафіку. Оскільки швидкість обмежена, то пристрої Sigfox можуть передавати до 140 повідомлень на день в напрямку базової станції з максимальним корисним навантаженням користувача лише 12 байтів, а в напрямку від базової станції до пристроїв – до 4 повідомлень з корисним навантаженням 8 байтів кожне [3, 4]. Використовуючи зміну часу та частоти та багаторазову передачу, можна покращити надійність Sigfox. Цей підхід, з використанням ультравузьких смуг, забезпечує надзвичайно низьке енергоспоживання, що дозволяє пристроям працювати протягом багатьох років від однієї батареї. Проте Sigfox орієнтована на передачу дуже малих обсягів інформації, що підходить для застосувань, де дані надходять не часто та невеликими об'ємами.

Для забезпечення зв'язку IoT, що працює в невеликій частині доступного спектру існуючих мереж LTE з мінімальною смугою пропускання 180 кГц, була розроблена технологія **NB-IoT** (Narrowband Internet of Things), також відома як LTE Cat-NB1. Технологія оптимізована для зменшення вартості, складності та енергоспоживання за рахунок зниження швидкості передачі даних до 250 Кбіт/с по низхідній лінії та 20...250 кбіт/с в зворотному напрямку, що дозволяє пристроям працювати на одному заряді батареї до 8–10 років. NB-IoT забезпечує високу ємність мережі, дозволяючи підключати десятки тисяч пристроїв до однієї базової станції, а також має покращене покриття, що дозволяє сигналу проникати у важкодоступні місця, як-от підвали або приміщення з товстими стінами. Завдяки своїй стабільності, високому рівню захисту даних та економічній ефективності, NB-IoT активно використовується для віддаленого моніторингу та керування пристроями. Ця технологія оптимально підходить для індустріальних рішень і міських систем, де потрібно забезпечити надійне підключення великої кількості пристроїв навіть при низькій швидкості передачі даних (рис. 3).



Рис. 3. Багатофункціональний сенсор NB-IoT (температура / вологість / освітлення / CO₂)

Особливості, переваги та недоліки радіотехнологій

Радіотехнології, що використовуються в IoT-системах, суттєво відрізняються між собою за технічними характеристиками, сферою застосування та вартістю реалізації. Правильний вибір технології дозволяє забезпечити стабільну роботу пристроїв з урахуванням вимог до швидкості передачі, енергоефективності, дальності дії та кількості підключень.

Щоб краще зрозуміти поточну ситуацію на ринку, розглянемо приблизну (так як абсолютно точних даних не публікувалося) динаміку зростання кількості IoT-пристроїв за основними технологіями зв'язку впродовж останніх років (рис. 4).

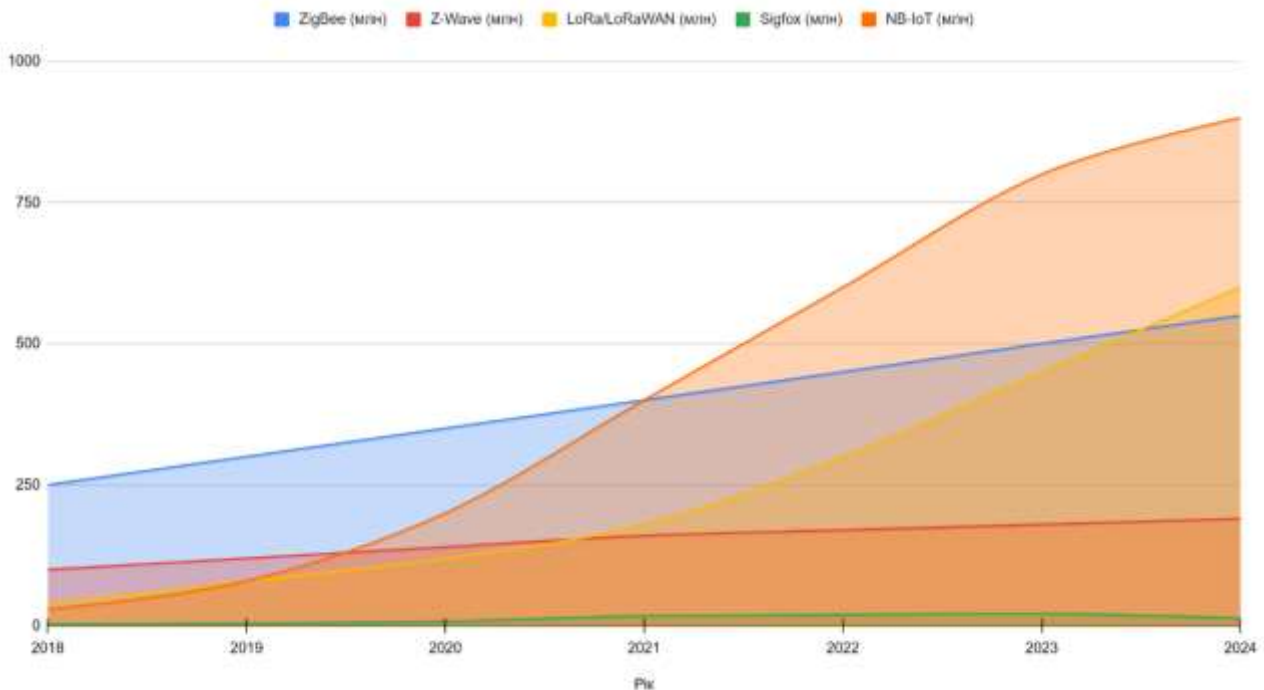


Рис. 4. Динаміка зростання кількості IoT-пристроїв за період 2018 – 2024 р.

Також можна розглядати поєднання одразу кількох технологій в рамках однієї, гібридної, IoT мережі, але більш детально це розглянемо це пізніше.

- Wi-Fi забезпечує високу швидкість передачі даних і підтримку широкого спектру додатків, однак має високе енергоспоживання, що робить його менш придатним для автономних пристроїв, які працюють від батарей.
- BLE оптимізований для мінімального споживання енергії. Це чудовий варіант для носимих пристроїв, датчиків руху чи температури, хоча він має обмежений радіус дії та не надто високу пропускну здатність.
- Zigbee є популярною технологією для систем «розумного дому», завдяки підтримці mesh-топології та низькому енергоспоживанню. Проте, через обмежену швидкість та чутливість до перешкод, його використання у складних середовищах може бути не завжди ефективним.
- Z-Wave подібний до Zigbee, але працює на менш завантажених частотах, що зменшує рівень інтерференції. Його головні обмеження — нижча швидкість передачі даних та менша кількість доступних пристроїв на ринку.

- LoRa призначений для зв'язку на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням, що особливо корисно в сільському господарстві, екологічному моніторингу та інших розподілених системах. Головним недоліком є низька пропускна здатність.
- Sigfox дозволяє надсилати невеликі обсяги даних з дуже низьким енергоспоживанням, але працює тільки через інфраструктуру оператора, що обмежує його використання в окремих регіонах.
- NB-IoT — потужна технологія з підтримкою існуючих LTE-мереж. Вона забезпечує надійний зв'язок у густонаселених або важкодоступних місцях, але потребує більших інвестицій і залежить від мобільного оператора.

Таблиця 1

Порівняння радіотехнологій IoT

Технологія	Частота	Дальність	Швидкість	Енерго-споживання	Переваги	Недоліки
Wi-Fi	2,4 ГГц / 5 ГГц	До 100 м	11–9600 Мбіт/с	Високе	Висока швидкість, велика кількість пристроїв	Високе споживання енергії, мала дальність
Bluetooth (BLE)	2,4 ГГц	До 100 м (BLE)	До 2 Мбіт/с	Низьке	Енергоефективність, сумісність зі смартфонами	Мала дальність, обмежена кількість пристроїв
Zigbee	2,4 ГГц	До 100 м	До 250 Кбіт/с	Низьке	Мережева топологія, низьке споживання	Низька швидкість, обмежена дальність
Z-Wave	868 МГц (ЄС) / 908 МГц (США)	До 100 м	До 100 кбіт/с	Низьке	Енергоефективність, хороша прохідність через стіни	Менша підтримка пристроїв, обмежена пропускна здатність
LoRa (LoRaWAN)	868 МГц (ЄС) / 915 МГц (США)	2–15 км	До 50 кбіт/с	Дуже низьке	Велика дальність, робота в складних умовах	Низька швидкість, ліцензування частот у деяких країнах
NB-IoT	Ліцензовані діапазони (700-2100 МГц)	1–15 км	До 250 кбіт/с	Низьке	Інтеграція з мобільними мережами, висока надійність	Залежність від операторів, плата за підключення
Sigfox	868 МГц (ЄС) / 902 МГц (США)	10–50 км	До 100 біт/с	Дуже низьке	Велика дальність, енергоефективність	Дуже низька швидкість, обмежена підтримка

Для зручного узагальнення ключових характеристик та порівняння наведених технологій нижче наведено табл. 1. Вона дозволяє швидко оцінити, які рішення найкраще відповідають вимогам конкретного IoT-сценарію.

Приклад застосування технологій. Рекомендації щодо вибору

Інтернет речей охоплює широкий спектр сфер, де потрібна автоматизована взаємодія між пристроями, збирання даних у реальному часі та віддалене керування. Завдяки IoT сьогодні можна реалізовувати рішення, що підвищують ефективність, безпеку й зручність у повсякденному житті, промисловості та міській інфраструктурі.

Якщо ж наводити повноцінні приклади, то IoT активно впроваджується у різних ситуаціях, як приклад можна навести:

- Системи «розумного дому» — для автоматизації освітлення, безпеки, клімат-контролю.
- Промислову автоматизацію — Контроль обладнання, моніторинг процесів, прогнозування збоїв.
- Міське середовище — розумні ліхтарі, сміттєві контейнери, паркування, транспортні системи.
- Сільське господарство — моніторинг ґрунту, погоди, стану врожаю.
- Медицину — для дистанційного моніторингу стану пацієнтів. Наприклад, у Кореї (південній) намагаються зробити такі пристрої доступними для людей похилого віку, а в Туреччині впроваджуються програми партнерства між державою і бізнесом для боротьби з діабетом.
- Енергетику — облік споживання, керування навантаженням, «розумні» лічильники.
- Носимі пристрої — фітнес-трекери, розумні годинники, медичні сенсори, окуляри з доповненою реальністю.

Якщо ж говорити про використання та розвиток IoT в Україні, то можна згадати про те, що IoT активно розвивається завдяки ініціативам провідних телекомунікаційних компаній, як я вже згадував раніше, таких як Київстар чи Vodafone. Ці компанії пропонують інноваційні рішення для бізнесу та громад, сприяючи цифровізації різних секторів економіки.

Kyivstar пропонує комплексні IoT-рішення для бізнесу, включаючи автоматизований облік споживання ресурсів (Smart Metering), точне позиціонування техніки (RTK) та мобільні мережі як сервіс. Компанія забезпечує повний цикл — від надання M2M SIM-карт до хмарних платформ для обробки даних. Її рішення активно використовуються в агросекторі, енергетиці та для розвитку інфраструктури розумних міст. Окрім IoT, компанія також розвиває 5G-технології в Україні. Вона проводила та проводить пілотні випробування 5G у певних містах України. Очікується, що впровадження 5G відкриває нові можливості для розвитку Інтернету речей та сприятиме їхньому широкому впровадженню в різних сферах економіки та побуті, оскільки швидкість передачі даних та зниження затримок, які забезпечує 5G, є критично важливими для роботи численних IoT-рішень.

Vodafone з 2019 року розгортає мережу NB-IoT, спеціально призначену для IoT-пристроїв. Ця мережа забезпечує стабільний зв'язок навіть у важкодоступних місцях, таких як підвали чи шахти ліфтів. Серед реалізованих проєктів — смарт-лічильники для «Київводоканалу», моніторинг суден для «УДП» та впровадження IoT у міжнародних річкових перевезеннях. Компанія також активно співпрацює з компанією «Нафтогаз» щодо використання IoT SIM-карт у розумних лічильниках газу.

При виборі радіотехнології для IoT перш за все варто чітко визначити вимоги конкретного проєкту. Це включає не лише технічні параметри — такі як швидкість передачі даних, дальність зв'язку, енергоспоживання, але й бюджетні обмеження та умов експлуатації мережі.

- Wi-Fi – доцільно використовувати для високошвидкісного IoT (розумні будинки, камери, потокове відео), в основному для стаціонарних систем, де є постійне живлення;
- Bluetooth (BLE) – ідеальний для переносних пристроїв (фітнес-браслети, розумні годинники), наприклад комбінація IoT пристрою та смартфона, що працюють як єдина система;
- Zigbee, Z-Wave – також добре працюють у розумних будинках, але частіше знаходять своє місце у сфері автоматизації (як приклад передача даних з лічильників);
- LoRa, Sigfox – ефективні для розподілених датчиків (розумне місто, аграрні рішення, різні ферми тощо);
- NB-IoT – як технологія що інтегрована з LTE підходить для IoT у сфері індустрії, логістики, транспорту та інфраструктури.

Ідея гібридного підходу поєднання радіотехнологій

В цілому ідея поєднання двох стандартів, або ж так званого гібридного підходу, не є чимось новим, але при цьому втілення інтеграції, наприклад, NB-IoT з LoRa може відкрити можливості для створення систем IoT, які будуть поєднувати переваги обох технологій. Такий підхід дозволяє поєднати стабільне покриття та високу надійність NB-IoT з енергоефективністю та великим радіусом дії LoRa. Нижче наведено основні аспекти розвитку цієї ідеї:

Концепція гібридної архітектури передбачає ефективний розподіл завдань між різними технологіями зв'язку, такими, наприклад, як NB-IoT та LoRa. NB-IoT ідеально підходить для ситуацій, де критично важлива надійність з'єднання та інтеграція з мобільною мережею, наприклад, для передавання даних від індустріальних сенсорів або систем моніторингу в міських умовах. Водночас LoRa є оптимальним варіантом для забезпечення зв'язку на великих територіях у сільській місцевості або важкодоступних регіонах, де необхідно мінімізувати енергоспоживання. Для досягнення більшої ефективності може бути використано рішення з інтеграцією обох технологій через шлюзи або концентратори, які одночасно підтримують обидва протоколи. Це дозволяє, наприклад, збирати дані з сенсорів через LoRa і передавати їх на центральний сервер або в «хмару» через NB-IoT, забезпечуючи надійне з'єднання.

Для забезпечення ефективної інтеграції технологій LoRa та NB-IoT в рамках єдиної мережі, необхідно впровадити відповідні архітектурні рішення, що дозволяють оптимально використовувати можливості кожної з цих технологій. А саме:

- Розробка мультипротокольного шлюзу, який буде оснащений як LoRa-модулем, так і NB-IoT модулем. Такий шлюз може бути розміщений в критичних точках мережі, забезпечуючи збирання даних з LoRa-сенсорів, їх первинну обробку та передачу через NB-IoT.
- Наступним кроком необхідно розробити програмне забезпечення, що буде виконувати конвертацію даних між протоколами. Це дозволить стандартизувати повідомлення незалежно від типу мережі, що значно спростить інтеграцію та обробку даних на серверному рівні.

Переваги та обґрунтування необхідності гібридного підходу

Гібридний підхід, що поєднує LoRa та NB-IoT, може мати ряд суттєвих переваг, які роблять його необхідним для забезпечення ефективної роботи сучасних мереж IoT. По-перше, використання LoRa забезпечує покриття в регіонах з низькою щільністю мобільного покриття, що дозволяє зв'язувати віддалені або сільські території, де традиційні мобільні мережі можуть бути відсутні. Водночас NB-IoT гарантує стабільність і надійність передачі даних у міських умовах, де важливе забезпечення безперебійного зв'язку. По-друге, завдяки надзвичайно

низькому енергоспоживанню LoRa, датчики можуть працювати протягом тривалого часу від батарей, що знижує витрати на обслуговування та зменшує потребу в частих замінах елементів живлення. NB-IoT, у свою чергу, забезпечує стабільне з'єднання навіть у складних умовах, що є критично важливим для застосувань, де надійність зв'язку є пріоритетом. Окрім цього, гібридна система дає можливість адаптуватися до різних сценаріїв використання – від розумних міст до сільськогосподарських угідь, що дозволяє забезпечити оптимальний баланс між ефективністю, масштабованістю та витратами, знижуючи ризики та покращуючи загальну гнучкість системи.

При інтеграції різних мережевих технологій ми можемо стикнутися з кількома потенційними викликами та проблемами. Одним із таких є забезпечення сумісності між протоколами, про що ми говорили вище, що може вимагати розробки спеціалізованого програмного забезпечення та створення протоколів конвергенції. Вирішенням цієї проблеми може стати використання відкритих стандартів та API для забезпечення інтеграції між технологіями. Іншим важливим аспектом є ефективне управління енергоресурсами, адже необхідно оптимізувати навантаження на LoRa та NB-IoT, щоб забезпечити їх стабільну роботу. Для цього можна застосувати розумні алгоритми планування передачі даних та адаптивне керування енергоспоживанням. Крім того, варто враховувати, що інтеграція двох технологій може збільшити початкові витрати на обладнання. Проте, завдяки зменшенню витрат на обслуговування у подальшому та довшому терміну служби пристроїв, ці додаткові витрати можуть бути компенсовані в довгостроковій перспективі завдяки підвищеній ефективності та надійності системи.

Гібридний підхід на основі LoRa та NB-IoT може відкрити широкі можливості для різних сценаріїв застосування. У розумних містах NB-IoT можна використовувати для передачі критичних даних з центральних систем управління, забезпечуючи стабільний і надійний зв'язок, в той час як LoRa ефективно покриватиме віддалені райони чи окраїни міста, де потрібно мінімізувати витрати енергії. У сільському господарстві LoRa стане ідеальним вибором для моніторингу агрономічних параметрів на великих територіях, таких як ґрунтова вологість, при цьому дані передаватимуться через шлюз до центральної системи за допомогою NB-IoT. В індустріальних застосуваннях, де надійність зв'язку є критично важливою, NB-IoT використовується для контролю важливих процесів, тоді як LoRa застосовується для моніторингу менш критичних параметрів, таких як температура або рівень вологи в різних зонах виробництва. Такий підхід дозволить оптимізувати зусилля та ресурси для різних потреб в залежності від специфіки кожної галузі.

Розподіл завдань між NB-IoT та LoRa

У гібридній архітектурі NB-IoT і LoRa взаємодіють на різних рівнях мережі, кожен стандарт бере на себе ту частину завдань, для якої він оптимізований. LoRa, завдяки наднизькому енергоспоживанню та великому радіусу дії, може використовуватися для збору “базових” даних із розподілених сенсорних вузлів. Ці вузли можуть знаходитися на значних відстанях один від одного або в умовах слабого мобільного покриття (сільська місцевість, промислові зони, екологічні станції).

Особливо це може бути аргументовано тим, що на територіях не сильно розвинутих держав досі існують суттєві проблеми з мобільним зв'язком — зокрема, недостатнє покриття та обмежена кількість базових станцій мобільних операторів, що ускладнює повноцінне розгортання NB-IoT мереж. У таких умовах LoRa стає ефективною альтернативою або доповненням, оскільки не потребує централізованої мобільної інфраструктури, дозволяючи створювати локальні приватні мережі з мінімальними витратами. Таким чином, гібридна модель — коли в одній системі поєднується NB-IoT там, де є мобільне покриття, та LoRa там, де його бракує — дозволяє

забезпечити надійне з'єднання і стабільний збір даних незалежно від географічних або інфраструктурних обмежень.

В рамках України такий підхід також є цілком доцільним з декількох факторів: мобільне покриття досить хороше у містах, але в сільській місцевості, гірських районах або зонах, що постраждали від війни, існують "мертві зони". Тому NB-IoT можна використовувати у покритих регіонах, тоді як LoRa — там, де мобільна мережа слабка або відсутня. Також, як ми вже зазначали неодноразово - LoRa є ефективним рішенням для передачі невеликих обсягів даних із низькою частотою, проте вона не підходить для задач, що потребують високої пропускну здатності, стабільного зв'язку або реального часу. Крім того, робота у перевантаженому неліцензованому діапазоні підвищує ризик завад. Натомість NB-IoT, що працює в ліцензованому спектрі, забезпечує кращу якість, стабільність та безпеку передачі даних, особливо в критичних сценаріях.

В продовження питання розподілу - сенсори періодично вимірюють параметри (температуру, вологість, рівень ґрунтових добрив тощо) і надсилають їх на локальний LoRa-шлюз. Завдяки простій топології "зірка" чи "mesh" (залежно від щільності розташування вузлів), мережа LoRa забезпечує стабільний зв'язок при надзвичайно низькому енергоспоживанні, що дозволяє сенсорам працювати роками на одній батареї.

NB-IoT у цій схемі виконує роль надійного каналу прив'язки (backhaul) до «хмарної» платформи чи центрального сервера. Локальний шлюз отримує пакетовані дані від десятків чи сотень LoRa-вузлів, агрегує їх і передає далі через NB-IoT. Оскільки NB-IoT побудований на ліцензованих частотах мобільного оператора, він гарантує високу доступність, якість зв'язку та безпеку передавання навіть у густонаселених чи складних урбаністичних умовах. Таким чином, обсяги "легких" даних користуються дешевим LoRa-каналом, а сам шлюз — платним, але надійним NB-IoT.

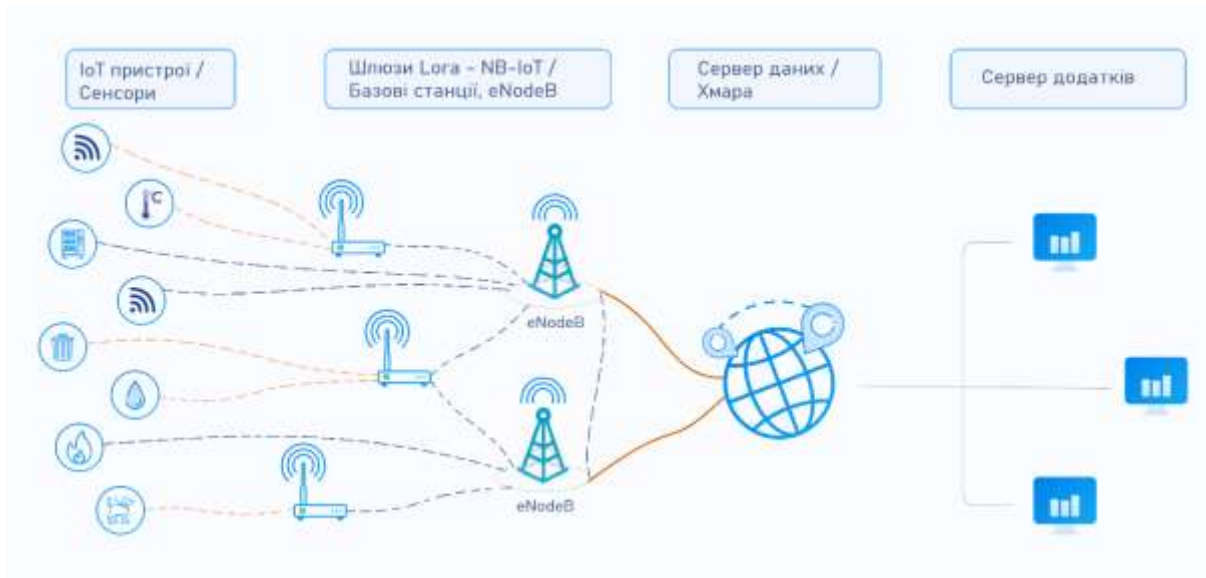


Рис. 5. Архітектура гібридної IoT-системи NB-IoT та LoRa

На рис. 5 ілюструється архітектура гібридної мережі, з якої можна в загальному вигляді побачити яким чином працює дана система. Спочатку сенсори та IoT-пристрої збирають вимірювання та передають їх по двох каналах: енергоефективні LoRa-датчики відправляють невеликі пакети на місцеві LoRa-NB-IoT шлюзи, а NB-IoT-модулі напряму зв'язуються з базовими станціями eNodeB мобільного оператора. Шлюзи агрегують дані з десятків або сотень LoRa-пристроїв і доправляють їх у ядро мережі через вбудований NB-IoT-модуль, тоді як eNodeB прямо передає NB-IoT-трафік у Core Network. Далі об'єднана інформація надходить на сервер

даних у «хмарі», де її зберігають і попередньо обробляють, а після цього результати передаються на сервер застосувань для формування аналітики і керуючих команд. Так забезпечується плавний потік даних від польових сенсорів до користувацьких інтерфейсів.

У якості прикладу можна розглянути систему моніторингу аграрного поля. Розкидані по периметру та внутрішній зоні поля бездротові датчики на основі LoRa вимірюють вологість ґрунту, температуру повітря та освітленість. Кожні кілька годин вони будуть відправляють невеликі пакети (по кілька десятків байт) до локального LoRa-шлюзу, встановленого на центральній вежі. Шлюз акумулює всі дані, формує одну велику порцію інформації та відправляє її через NB-IoT, наприклад, три рази на добу в хмару, де аналітична система визначає, які ділянки потребують зрошення або добрив. Якщо ж на полях фіксується критичне значення (наприклад, різке падіння вологості чи небезпечна температура), шлюз негайно надсилає аварійне повідомлення через NB-IoT без очікування чергової передачі, завдяки вбудованому пріоритетному механізму.

Таке розподілення дозволяє досягнути оптимального балансу між енергоефективністю (довготривала робота сенсорів на LoRa), економічністю (мінімальні витрати на передачу дрібних пакетів) та надійністю (гарантована доставка критичних повідомлень через NB-IoT). Одночасно ми можемо отримати масштабовану систему. Так як додавання нових LoRa-датчиків майже не впливає на витрати, а NB-IoT-шлюз буде легко справлятися зі зростаючими обсягами агрегованих даних. Такий гібридний підхід може бути адаптований до багатьох сценаріїв — від розумних міст і логістики до віддаленого моніторингу інфраструктури чи екологічного контролю.

Висновки

Порівняльний аналіз радіотехнологій для IoT показав, що кожна з них має свої сильні та слабкі сторони, які визначають їхню придатність для конкретних сценаріїв. Високошвидкісні технології, такі як Wi-Fi, забезпечують потужну передачу даних, проте мають високе енергоспоживання, через що вони не завжди підходять для автономних пристроїв. Енергоефективні рішення, зокрема BLE, ZigBee та Z-Wave, дозволяють створювати стабільні локальні мережі, але обмежені в швидкості та дальності зв'язку. LPWAN-технології, такі як LoRa, Sigfox та NB-IoT, оптимізовані для забезпечення зв'язку на великих відстанях з мінімальними витратами енергії, що робить їх зручними для використання в аграрних рішеннях, розумних містах та розподілених системах. В свою чергу гібридний підхід, що поєднує LoRa та NB-IoT, надає можливість отримати переваги обох технологій, забезпечуючи оптимальне покриття на великих відстанях і високу енергоефективність завдяки LoRa, а також стабільність і надійність зв'язку, характерні для NB-IoT. Цей підхід може бути особливо корисним для впровадження IoT-систем у різних сферах, таких як розумні міста, сільське господарство та промислові застосування. Однак для успішної реалізації такого рішення необхідно враховувати ретельне планування мережевої архітектури, розробку спеціалізованого програмного забезпечення та інтеграцію обох протоколів. Враховуючи ці фактори, гібридний підхід може значно покращити продуктивність, гнучкість та економічну ефективність IoT-систем.

Список використаної літератури

1. Elkhodr M., Shahrestani S., Cheung H. Emerging Wireless Technologies in the Internet of Things: A Comparative Study // *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*. – 2016. – № 8(5). – DOI: 10.5121/ijwmn.2016.8505.
2. Морін Е., Маман М., Гвізетті Р., Дуда А. Порівняння тривалості роботи пристроїв у бездротових мережах для Інтернету речей // *IEEE Access*. – 2017. – DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2688279.

3. Al-Sarawi S., Anbar M., Alieyan K., Alzubaidi M. Internet of Things (IoT) Communication Protocols: Review // *Proceedings of the 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*. – 2017. – DOI: 10.1109/ICITECH.2017.8079928.
4. Bhoyar P., Sahare P., Dhok S. B., Deshmukh R. B. Communication Technologies and Security Challenges for Internet of Things: A Comprehensive Review // *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. – 2018. – DOI: 10.1016/j.aeue.2018.11.031.
5. Badihi B. Analysis and characterization of short-range and low-power radio technologies for Internet of Things: Protocol and Application : doctoral thesis / B. Badihi. – Aalto University, 2021. – ISBN 978-952-64-0240-6.
6. Peruzzi G., Pozzebon A. Combining LoRaWAN and NB-IoT for Edge-to-Cloud Low Power Connectivity Leveraging on Fog Computing // *Applied Sciences*. – 2022. – № 12(3). – DOI: 10.3390/app12031497.
7. Anderson M. Networking the IoT with IEEE 802.15.4/6LoWPAN [Електронний ресурс] // The PTR Group. – Режим доступу: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/27510-networking-the-iot-with-ieee-802-15-4-6lowpan>.
8. Zhang Y., Wang X. Performance Analysis of the IEEE 802.15.4 Protocol for Smart Grid Applications // *Sensors*. – 2021. – DOI: 10.3390/s21124079.
9. Watteyne T. Using IEEE 802.15.4e TSCH in IoT: Problem Statement [Електронний ресурс] // IETF RFC 7554. – 2015. – Режим доступу: <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc7554/>.
10. Ambient Intelligence. 15th European Conference, 2019 / Eds.: De Ruyter B., Mavrommati I. – Springer, 2019. – DOI: 10.1007/978-3-030-34255-5_13
11. Pocero L., Tsampas S., Mylonas G., Amaxilatis D. Experiences from Using LoRa and IEEE 802.15.4 for IoT-enabled Classrooms [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2102.08675>.