

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: «Аналіз радіотехнологій мереж Інтернету речей»

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ТС-22

Мехеда Денис Максимович _____

Керівник:

Доцент кафедри ЕКІР, доцент

Носков Вячеслав Іванович _____

Рецензент:

Незалежний експерт з телекомунікацій,

к.т.н. Вахрушев Володимир Платонович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма – «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Мехеді Денису Максимовичу

1. Тема роботи «Аналіз радіотехнологій мереж Інтернету речей», керівник роботи Носков Вячеслав Іванович, доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912 - С.
2. Термін подання студентом роботи 9 червня 2026 року
3. Вихідні дані до роботи: матеріали статей та наукових видань, інформаційні ресурси мережі Інтернет, навчально-методичні матеріали. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.
4. Зміст роботи: Обґрунтувати актуальність теми. Виконати аналіз концепції Інтернету речей, архітектури IoT, сформулювати вимоги до бездротових мереж для IoT. Створити класифікацію IoT-радіотехнологій: короткого радіусу дії (WPAN/WLAN) та широкого покриття (LPWAN). Виконати детальний аналіз радіотехнологій короткого радіусу дії та радіотехнологій широкого покриття. Порівняти радіотехнології та запропонувати рекомендації щодо практичного їх використання.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)
 - 1) Тема, мета, об'єкт та предмет дослідження;
 - 2) Ключові сфери застосування Інтернету речей

- 3) Трирівнева архітектура Інтернету речей
 - 4) Кількісні вимоги до бездротових технологій для IoT
 - 5) Порівняльна характеристика груп IoT-радіотехнологій з кількісними показниками
 - 6) Зведені технічні характеристики основних IoT-радіотехнологій
 - 7) Технічні можливості та порівняння радіотехнологій короткого радіусу дії – 2 слайди
 - 8) Технічні можливості та порівняння радіотехнологій LPWAN – 2 слайди
 - 9) Рекомендації щодо використання радіотехнологій у різних сферах IoT
 - 10) Приклади впроваджень IoT-радіотехнологій в Україні та світі
 - 11) Висновки
6. Дата видачі завдання 31 жовтня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Інтернет речей: архітектура та вимоги до бездротових мереж	15.03.2026	Виконано
2	Радіотехнології короткого радіусу дії для IoT	10.04.2026	Виконано
3	Радіотехнології широкого покриття (LPWAN)	15.05. 2026	Виконано
4	Порівняльний аналіз та практичні аспекти впровадження	25.05.2026	Виконано
5	Вступ, Висновки	1.06.2026	Виконано
6	Чистовий варіант дипломної роботи, презентація	5.06.2026	Виконано

Студент

Денис МЕХЕДА

Керівник роботи

Вячеслав НОСКОВ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 101 сторінку, 38 рисунків, 42 таблиці, 38 джерел.

Мета роботи — виконати аналіз радіотехнологій, що застосовуються в мережах Інтернету речей, визначити їх основні технічні характеристики, переваги, обмеження та надати рекомендації щодо вибору оптимальних технологій для різних сценаріїв використання.

Об'єкт дослідження — бездротові мережі Інтернету речей.

Предмет дослідження — радіотехнології мереж Інтернету речей, зокрема технології короткого радіусу дії та технології широкого покриття.

У роботі розглянуто концепцію Інтернету речей, типові архітектури IoT-систем, вимоги до бездротових мереж та класифікацію радіотехнологій за дальністю дії, енергоспоживанням, пропускну здатністю, масштабованістю і вартістю впровадження. Проаналізовано технології короткого радіусу дії, зокрема BLE, ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi та Wi-Fi HaLow, а також технології широкого покриття LPWAN: LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M і 5G Massive IoT.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи Інтернету речей, архітектуру IoT-систем і вимоги до бездротових мереж. У другому розділі виконано аналіз радіотехнологій короткого радіусу дії для IoT. У третьому розділі досліджено LPWAN-технології, які забезпечують передавання даних на великі відстані з низьким енергоспоживанням. У четвертому розділі проведено порівняльний аналіз технологій та сформульовано рекомендації щодо їх використання у «розумному місті», «розумному будинку», промисловому IoT, аграрному секторі та системах моніторингу.

У результаті дослідження встановлено, що універсальної радіотехнології для всіх IoT-сценаріїв не існує. Найефективнішим підходом є використання гетерогенних IoT-систем, у яких різні технології поєднуються залежно від вимог конкретної підсистеми. Для локальних мереж доцільно застосовувати BLE, ZigBee, Z-Wave або Wi-Fi, тоді як для великих територій, комунального обліку, аграрного

IoT та міської інфраструктури більш придатними є LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M та інші LPWAN-рішення.

Ключові слова: Інтернет речей, IoT, радіотехнології, бездротові мережі, BLE, ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi HaLow, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M, LPWAN, Smart City, Smart Home, IIoT.

ABSTRACT

The bachelor thesis contains 101 pages, 38 figures, 42 tables, and 38 references.

The aim of the thesis is to analyze radio technologies used in Internet of Things networks, determine their main technical characteristics, advantages and limitations, and provide recommendations for selecting the most suitable technologies for different application scenarios.

The object of the research is wireless Internet of Things networks.

The subject of the research is radio technologies for Internet of Things networks, in particular short-range technologies and wide-area low-power technologies.

The thesis examines the concept of the Internet of Things, typical IoT system architectures, requirements for wireless networks, and the classification of radio technologies by communication range, energy efficiency, data rate, scalability, and deployment cost. Short-range technologies such as BLE, ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi, and Wi-Fi HaLow are analyzed. Wide-area LPWAN technologies, including LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M, and 5G Massive IoT, are also considered.

The first chapter presents the theoretical foundations of the Internet of Things, IoT architecture, and wireless network requirements. The second chapter analyzes short-range radio technologies for IoT. The third chapter studies LPWAN technologies that provide long-distance data transmission with low energy consumption. The fourth chapter presents a comparative analysis of the technologies and provides recommendations for their use in smart cities, smart homes, industrial IoT, agriculture, and monitoring systems.

As a result of the research, it was determined that there is no universal radio technology suitable for all IoT scenarios. The most effective approach is the use of heterogeneous IoT systems, where different technologies are combined depending on the requirements of each subsystem. BLE, ZigBee, Z-Wave, and Wi-Fi are appropriate for local networks, while LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M, and other LPWAN solutions are more suitable for large areas, smart metering, agricultural IoT, and urban infrastructure.

Keywords: Internet of Things, IoT, radio technologies, wireless networks, BLE, ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi HaLow, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M, LPWAN, Smart City, Smart Home, IIoT.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	16
1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....	18
1.1 Концепція Інтернету речей, розвиток та сфери застосування	18
1.1.1 Еволюція концепції IoT	19
1.1.2 Сфери застосування IoT.....	19
1.2 Типові архітектури Інтернету речей	21
1.2.1 Трирівнева модель архітектури IoT.....	21
1.2.2 Розширені моделі: Edge, Fog та Cloud.....	22
1.2.3 Роль шлюзів та стандарти інтеграції	23
1.3 Вимоги до бездротових мереж Інтернету речей.....	24
1.3.1 Енергоефективність.....	24
1.3.2 Дальність зв'язку.....	25
1.3.3 Пропускна здатність.....	26
1.3.4 Масштабованість, надійність та вартість.....	27
1.4 Класифікація IoT-радіотехнологій: короткого радіусу дії (WPAN/WLAN) та широкого покриття (LPWAN)	29
1.4.1 Технології короткого радіусу дії (WPAN/WLAN).....	29
1.4.2 Технології широкого покриття (LPWAN)	29
1.4.3 Гетерогенні IoT-системи.....	31
1.5 Висновки до розділу 1	33
2 РАДІОТЕХНОЛОГІЇ КОРОТКОГО РАДІУСУ ДІЇ ДЛЯ IoT.....	34
2.1 Bluetooth Low Energy (BLE): архітектура, протоколи, швидкість, енергоспоживання, застосування	34
2.1.1 Архітектура та стек протоколів	34
2.1.2 Швидкість та режими роботи.....	36
2.1.3. Енергоспоживання та автономна робота	37

2.1.4 Типові сценарії застосування BLE в IoT.....	38
2.2 ZigBee (IEEE 802.15.4): топології мереж, надійність, сценарії використання ..	40
2.2.1 Фізичний рівень та параметри IEEE 802.15.4.....	40
2.2.2 Типи вузлів і топології мереж ZigBee	41
2.2.3 Надійність передавання даних	43
2.2.4 Сценарії використання ZigBee	44
2.3 Z-Wave: особливості, переваги в «розумному домі»	45
2.3.1 Субгігагерцовий частотний діапазон та переваги.....	46
2.3.2 Mesh-архітектура та типи пристроїв	47
2.3.3 Переваги Z-Wave в «розумному домі».....	48
2.4 Wi-Fi (802.11ah / Wi-Fi HaLow): адаптація Wi-Fi для IoT, швидкість та дальність.....	50
2.4.1 Класичний Wi-Fi в IoT: переваги та обмеження	50
2.4.2 IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow): технічні характеристики	51
2.4.3 Механізми масштабованості: TWT та RAW	52
2.4.4 Сценарії застосування Wi-Fi HaLow	53
2.5 Порівняння технологій WPAN/WLAN для IoT	54
2.5.1 Порівняльний аналіз за критерієм енергоефективності	55
2.5.2 Матриця вибору технології за сценарієм.....	56
2.5.3 Гетерогенна архітектура IoT-системи	57
2.6 Висновки до розділу 2	59
3 РАДІОТЕХНОЛОГІЇ ШИРОКОГО ПОКРИТТЯ (LPWAN).....	60
3.1 LoRaWAN: принцип роботи, діапазони частот, дальність, енергоефективність	60
3.1.1 Параметри модуляції: SF, BW, CR та ADR	60
3.1.2 Мережева архітектура та класи пристроїв.....	61
3.1.3 Частотні плани та енергоефективність.....	62
3.2 Sigfox: архітектура, вузькосмуговий підхід, переваги та обмеження	63
3.2.1 UNB-модуляція та архітектура мережі	64
3.2.2 Обмеження на дані та порівняння переваг/недоліків	65

3.3 NB-IoT (Narrowband IoT): інтеграція з LTE/5G, пропускна здатність, покриття	66
3.3.1 Фізичний рівень та пропускна здатність.....	66
3.3.2 MCL 164 дБ та механізми PSM/eDRX	67
3.4 LTE-M (Cat-M1): особливості, відмінність від NB-IoT	68
3.4.1 Фізичний рівень та швидкість.....	69
3.4.2 Хендовер, VoLTE та відмінності від NB-IoT	69
3.5 5G Massive IoT: можливості та перспективи	70
3.5.1 Ієрархія 5G IoT-технологій.....	71
3.5.2 RedCap (NR-Light) та eRedCap.....	71
3.6 Порівняння LPWAN-технологій (швидкість, енергія, дальність, вартість)	73
3.6.1 Зведена технічна порівняльна таблиця	74
3.6.2 Порівняння за енергоефективністю.....	75
3.6.3 Матриця вибору за сценарієм	75
3.6.4 Гетерогенна LPWAN-архітектура	76
3.7 Висновки до розділу 3.....	77
4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ	78
4.1 Ключові критерії порівняння радіотехнологій IoT	78
4.1.1 Енергоефективність.....	78
4.1.2 Пропускна здатність та масштабованість	79
4.1.3 Дальність дії та CAPEX/OPEX.....	80
4.1.4 Зведена матриця відповідності сценаріям	81
4.2 Аналіз сильних і слабких сторін BLE, ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT та інших технологій	81
4.2.1 BLE та ZigBee	82
4.2.2 Z-Wave та Wi-Fi HaLow.....	82
4.2.3 LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M.....	83
4.3 Вибір оптимальної технології для «розумного міста», «розумного дому» та промисловості (IIoT).....	84
4.3.1 «Розумне місто» (Smart City)	84

4.3.2 «Розумний будинок» (Smart Home)	86
4.3.3 Промисловий IoT (IIoT)	87
4.4 Приклади впровадження IoT в Україні та світі	88
4.4.1 Впровадження в Україні	88
4.4.2 Впровадження у світі	90
4.5 Перспективи розвитку: інтеграція IoT з 5G, 6G та edge computing	91
4.5.1 5G Advanced та Ambient IoT	91
4.5.2 6G та IoT майбутнього	92
4.5.3 Edge Computing та TinyML	93
4.5.4 Digital Twin та AI/ML для IoT	94
4.5.5 Перспективи IoT в Україні	95
4.6 Висновки до розділу 4	96
ВИСНОВКИ	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

Скорочення	Розшифрування (англ)	Пояснення (укр)
3GPP	3rd Generation Partnership Project	Міжнародне об'єднання організацій зі стандартизації мобільного зв'язку
5G	Fifth Generation	п'яте покоління мобільних мереж
6G	Sixth Generation	перспективне шосте покоління мобільних мереж
ADR	Adaptive Data Rate	адаптивне керування швидкістю передавання даних у LoRaWAN
AES	Advanced Encryption Standard	стандарт симетричного шифрування даних
AMR	Automatic Meter Reading	автоматизоване зчитування показників лічильників
AP	Access Point	точка доступу бездротової мережі
BLE	Bluetooth Low Energy	енергоефективна технологія Bluetooth для IoT-пристроїв
BW	Bandwidth	ширина смуги частот
CAPEX	Capital Expenditures	капітальні витрати на створення або розгортання системи
Cloud Computing	Cloud Computing	хмарні обчислення, централізована обробка та зберігання даних
CoAP	Constrained Application Protocol	легковаговий прикладний протокол для пристроїв з обмеженими ресурсами
CSS	Chirp Spread Spectrum	метод модуляції, що використовується у технології LoRa
DL	Downlink	передавання даних від мережі до кінцевого пристрою
Edge Computing	Edge Computing	граничні обчислення поблизу джерела даних

eDRX	extended Discontinuous Reception	механізм подовженого циклу прийому в NB-IoT та LTE-M
Fog Computing	Fog Computing	проміжний рівень обробки даних між пристроєм і хмарою
GW	Gateway	шлюз, який забезпечує передавання даних між локальною IoT-мережею та зовнішньою мережею
IIoT	Industrial Internet of Things	промисловий Інтернет речей
IoT	Internet of Things	Інтернет речей
IP	Internet Protocol	мережевий протокол для адресації та передавання даних
ISM	Industrial, Scientific and Medical	неліцензовані частотні діапазони для промислових, наукових і медичних застосувань
LTE-M	LTE for Machines	стільникова технологія IoT для мобільних пристроїв із підтримкою хендвера
LPWAN	Low Power Wide Area Network	енергоефективна бездротова мережа широкого покриття
M2M	Machine-to-Machine	міжмашинна взаємодія без прямої участі людини
MCL	Maximum Coupling Loss	максимально допустимі втрати в радіоканалі
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport	легковаговий протокол обміну повідомленнями для IoT
NB-IoT	Narrowband Internet of Things	вузькосмугова стільникова технологія Інтернету речей
NTN	Non-Terrestrial Network	неназемна мережа, зокрема супутникова мережа зв'язку
OPEX	Operating Expenditures	операційні витрати на експлуатацію системи
PDR	Packet Delivery Ratio	коефіцієнт успішної доставки пакетів
PSM	Power Saving Mode	режим енергозбереження у

QoS	Quality of Service	стільникових IoT-технологіях якість обслуговування в мережі
RAW	Restricted Access Window	механізм розподілу доступу в Wi-Fi HaLow
RedCap	Reduced Capability	спрощений клас 5G-пристроїв для IoT
RF	Radio Frequency	радіочастотний сигнал або радіочастотний діапазон
RFID	Radio Frequency Identification	радіочастотна ідентифікація об'єктів
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	система диспетчерського керування та збору даних
SF	Spreading Factor	коефіцієнт розширення спектра у LoRaWAN
Smart City	Smart City	розумне місто, що використовує цифрові та IoT-рішення для управління інфраструктурою
Smart Home	Smart Home	розумний будинок з автоматизованим керуванням побутовими системами
TinyML	Tiny Machine Learning	машинне навчання на малопотужних мікроконтролерах
TSN	Time Sensitive Networking	мережеві технології з детермінованою затримкою
TWT	Target Wake Time	механізм планового пробудження пристроїв у Wi-Fi
UL	Uplink	передавання даних від кінцевого пристрою до мережі
VoLTE	Voice over LTE	голосовий зв'язок через мережу LTE
Wi-Fi HaLow	IEEE 802.11ah	енергоєфективна Wi-Fi-технологія субгігагерцового діапазону для IoT
WLAN	Wireless Local Area Network	бездротова локальна мережа

WPAN	Wireless Personal Area Network	бездротова персональна мережа
Z-Wave	Z-Wave	бездротова технологія для систем «розумного будинку»
ZigBee	ZigBee / IEEE 802.15.4	бездротова mesh-технологія для сенсорних IoT-мереж

ВСТУП

Інтернет речей є одним із найбільш важливих напрямів розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Його сутність полягає в об'єднанні фізичних об'єктів, сенсорів, виконавчих пристроїв, шлюзів, хмарних платформ та програмних сервісів у єдину систему, яка забезпечує автоматизований збір, передавання, обробку та аналіз даних. Завдяки цьому IoT-рішення активно застосовуються у «розумних містах», «розумних будинках», промисловості, аграрному секторі, транспорті, енергетиці, медицині та системах моніторингу критичної інфраструктури.

Сучасний стан розвитку Інтернету речей характеризується швидким збільшенням кількості підключених пристроїв, розширенням сфер використання сенсорних мереж та зростанням вимог до бездротової інфраструктури. На відміну від традиційних комп'ютерних мереж, IoT-системи часто складаються з великої кількості малопотужних пристроїв, які мають обмежені обчислювальні ресурси, невелику ємність джерел живлення та різні умови експлуатації. Саме тому вибір радіотехнології є одним із ключових етапів проєктування IoT-системи, оскільки від нього залежать дальність зв'язку, енергоспоживання, надійність передавання даних, масштабованість, вартість розгортання та можливість подальшого розвитку системи.

Актуальність теми дипломної роботи зумовлена тим, що на сьогодні існує велика кількість бездротових технологій для Інтернету речей, кожна з яких має власні переваги, обмеження та сферу доцільного застосування. Технології короткого радіусу дії, такі як BLE, ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi та Wi-Fi HaLow, широко використовуються у локальних мережах, системах автоматизації будинків, медичних і носимих пристроях, промислових датчиках та офісних системах. Водночас технології широкого покриття LPWAN, зокрема LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT та LTE-M, забезпечують передавання даних на значні відстані та є доцільними для «розумного міста», аграрного IoT, комунального обліку, моніторингу інфраструктури та віддалених об'єктів.

Наявність різних технологічних підходів створює потребу у їх системному порівнянні. Наприклад, BLE є ефективним для пристроїв із низьким енергоспоживанням і короткими сеансами обміну даними, ZigBee та Z-Wave добре підходять для mesh-мереж у будівлях, Wi-Fi забезпечує високу пропускну здатність, LoRaWAN дозволяє створювати приватні мережі широкого покриття, NB-IoT забезпечує глибоке проникнення сигналу в складних умовах, а LTE-M підтримує мобільність і голосові сервіси. Отже, вибір технології повинен здійснюватися не за принципом універсальності, а на основі аналізу конкретного сценарію використання.

Існуючі дослідження та практичні впровадження підтверджують, що ефективна IoT-інфраструктура найчастіше має гетерогенний характер. Це означає, що в одній системі можуть одночасно використовуватися декілька радіотехнологій: наприклад, ZigBee або Z-Wave для датчиків у будинку, Wi-Fi для камер, BLE для налаштування пристроїв, LoRaWAN для міських сенсорів, NB-IoT для лічильників у підвалах, LTE-M для рухомих об'єктів. Такий підхід дозволяє оптимально поєднувати дальність, енергоефективність, надійність, вартість та функціональні можливості.

1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

1.1 Концепція Інтернету речей, розвиток та сфери застосування

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) є сучасною концепцією розвитку інформаційно-комунікаційних технологій, що передбачає інтеграцію фізичних об'єктів у єдине інформаційно-комунікаційне середовище з метою забезпечення їх взаємодії, збору, передачі та обробки даних. У загальному розумінні Інтернет речей визначається як мережа взаємопов'язаних пристроїв, оснащених сенсорами, обчислювальними елементами та засобами зв'язку, які здатні функціонувати автономно або з мінімальною участю людини.

На відміну від традиційних комп'ютерних мереж, орієнтованих переважно на обмін інформацією між користувачами, Інтернет речей базується на принципі взаємодії між пристроями, що реалізується у вигляді міжмашинних комунікацій (M2M). У такій системі фізичні об'єкти виступають не лише джерелами даних, а й активними елементами, здатними реагувати на зміни середовища та виконувати керуючі дії. Це дозволяє створювати розподілені інтелектуальні системи, у яких прийняття рішень може здійснюватися без прямого втручання людини.

Особливістю Інтернету речей є використання великої кількості пристроїв з обмеженими ресурсами, що мають низьку обчислювальну потужність, малий обсяг пам'яті та обмежене енергоспоживання. Такі пристрої функціонують в умовах обмеженого радіусу зв'язку та потребують застосування спеціалізованих протоколів і технологій, які забезпечують ефективну передачу даних за мінімальних витрат енергії.

Інтернет речей характеризується масштабованістю та гетерогенністю. Масштабованість проявляється у можливості підключення мільярдів пристроїв. Гетерогенність полягає у використанні різномірних пристроїв, що відрізняються за функціональними можливостями, апаратною реалізацією та використовуваними технологіями зв'язку.

1.1.1 Еволюція концепції IoT

Розвиток концепції Інтернету речей має чітко визначені історичні передумови. Вперше термін «Internet of Things» був запропонований Кевіном Ештоном у 1999 році у контексті використання RFID-технологій автоматичної ідентифікації об'єктів. На початковому етапі IoT розглядався як розширення систем автоматизації та обліку, однак з розвитком інформаційних технологій ця концепція набула значно ширшого значення.

Активний розвиток Інтернету речей розпочався у 2010-х роках і був зумовлений рядом технологічних факторів: розвитком бездротових мереж, зменшенням вартості сенсорів, поширенням мобільних технологій, впровадженням хмарних обчислень та протоколу IPv6. За прогнозами Ericsson, кількість підключених IoT-пристроїв досягне 30 мільярдів до 2030 р.



Рисунок 1.1 – Хронологія розвитку концепції Інтернету речей (1999–2030)

1.1.2 Сфери застосування IoT

На сучасному етапі Інтернет речей знаходить широке застосування у різних галузях діяльності. Концепція «розумного міста» передбачає використання IoT для управління міською інфраструктурою, транспортними потоками, системами освітлення та екологічного моніторингу. У сфері енергетики IoT застосовується для

створення інтелектуальних енергетичних систем. У галузі охорони здоров'я технології IoT дозволяють реалізувати дистанційний моніторинг стану пацієнтів.

Значного розвитку IoT набув у промисловості — формується напрям промислового IIoT (Industrial Internet of Things). Його використання дозволяє автоматизувати виробничі процеси, здійснювати моніторинг обладнання в реальному часі та підвищувати ефективність управління виробництвом. У сільському господарстві IoT-рішення оптимізують зрошення, контролюють вологість ґрунту та стан культур.



Рисунок 1.2 – Ключові сфери застосування Інтернету речей

Таблиця 1.1 – Кількість підключених IoT-пристроїв та темпи зростання за секторами (2024 р.)

Сфера	Типові застосування	Кількість пристр. (2024)	Річне зростання
Smart Home	Датчики, замки, клімат, освітлення	~5,4 млрд	~19%
Smart City	Освітлення, паркінг, довкілля	~1,2 млрд	~25%
Промисловість IIoT	Вібрація, температура, AGV	~3,8 млрд	~22%

Продовження таблиці 1.1

Охорона здоров'я	Моніторинг, носимі, лікарні	~0,6 млрд	~28%
Аграрний IoT	Ґрунт, зрошення, теплиці	~0,8 млрд	~20%
Транспорт/логіст.	Трекери, флот, холодний ланцюг	~1,5 млрд	~18%

1.2 Типові архітектури Інтернету речей

Архітектура Інтернету речей визначає принципи побудови системи, структуру її компонентів та організацію взаємодії між фізичними пристроями, мережевою інфраструктурою і обчислювальними ресурсами. Вона є основою для забезпечення ефективного функціонування IoT-систем, оскільки саме архітектурні рішення визначають можливості масштабування, рівень енергоефективності, затримки передачі даних та загальну продуктивність системи.

Функціонування Інтернету речей передбачає комплексну взаємодію декількох ключових підсистем: ідентифікації пристроїв, сенсорики, передачі даних, обробки інформації та надання сервісів. Такий підхід дозволяє розглядати IoT як багаторівневу систему, де кожен рівень виконує окремі функції, але водночас інтегрований у загальну структуру.

1.2.1 Трирівнева модель архітектури IoT

Найбільш поширеною є трирівнева модель архітектури Інтернету речей, яка включає рівень сприйняття, мережевий рівень та прикладний рівень. Рівень сприйняття забезпечує взаємодію з фізичним середовищем і включає сенсори, датчики та виконавчі пристрої. Мережевий рівень відповідає за передачу даних між пристроями та системами обробки інформації. Прикладний рівень виконує функції обробки, аналізу та інтерпретації даних.

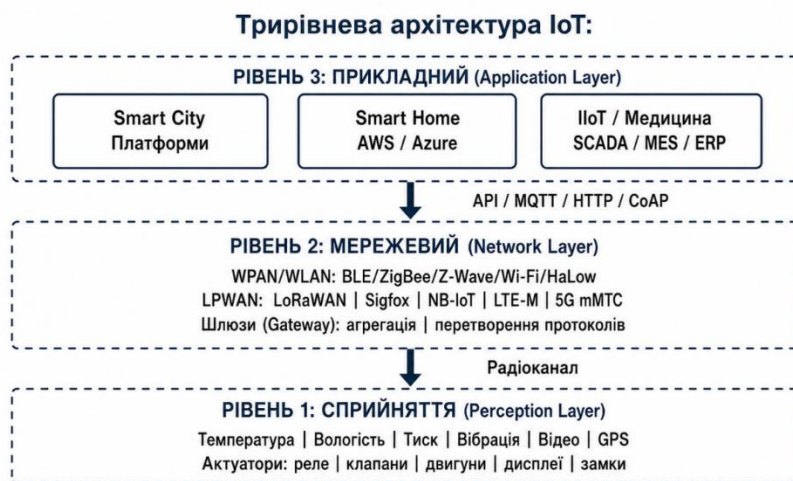


Рисунок 1.3 – Трирівнева архітектура Інтернету речей

1.2.2 Розширені моделі: Edge, Fog та Cloud

У сучасних IoT-системах поряд із базовою архітектурою широко застосовуються розширені підходи, що передбачають використання граничних (Edge) та туманних (Fog) обчислень. Граничні обчислення дозволяють виконувати обробку даних безпосередньо на рівні пристроїв або поблизу джерела їх виникнення, що зменшує затримки (до 1-5 мс) та знижує навантаження на мережу. Туманні обчислення забезпечують розподілену обробку даних на проміжному рівні між пристроями та хмарою.

Хмарні обчислення забезпечують централізовану обробку та зберігання інформації, що дозволяє реалізовувати складні аналітичні функції та забезпечує масштабованість системи. Водночас передача великих обсягів даних до хмари потребує ефективної організації мережевої взаємодії та збільшує затримку (50–200 мс).

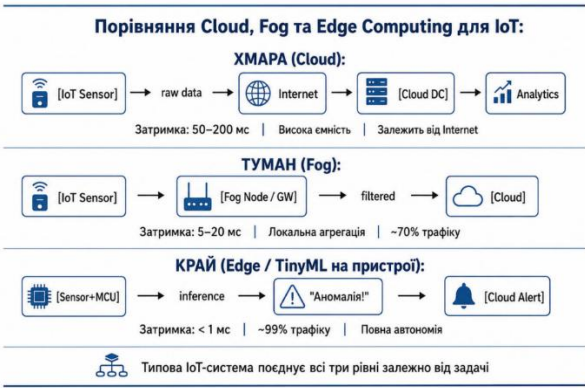


Рисунок 1.4 – Порівняння Cloud, Fog та Edge Computing для обробки IoT-даних

Таблиця 1.2 – Порівняння підходів до обробки IoT-даних: Cloud vs Edge/Fog

Характеристика	Cloud Computing	Edge/Fog Computing
Затримка обробки	50–200 мс	< 5–20 мс
Обсяг переданих даних	Всі сирі дані	Лише результати/аномалії
Автономія при відключ.	Повна залежність	Часткова автономія
Аналітичні можливості	Необмежені (ML-кластери)	Обмежені (TinyML)
Захист даних (GDPR)	Дані покидають об'єкт	Дані залишаються локально
Типові застосування	Аналітика, ML-навчання	Реальний час, управління

1.2.3 Роль шлюзів та стандарти інтеграції

Важливим компонентом архітектури Інтернету речей є шлюзи (Gateway), які забезпечують взаємодію між локальними мережами пристроїв та глобальною мережею. Вони виконують функції агрегації даних, перетворення протоколів і забезпечення сумісності між різними технологіями зв'язку. Типові функції шлюзу: конвертація BLE → MQTT → AWS IoT Core; агрегація сотень LoRaWAN-пакетів перед відправленням у хмару; локальна фільтрація та первинна обробка; забезпечення безпеки (TLS 1.3, сертифікати X.509).

Стандарти протоколів прикладного рівня для IoT: MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) — легковаговий брокерний протокол публікації/підписки, що споживає мінімум ресурсів; CoAP (Constrained Application Protocol) — REST-

подібний протокол для пристроїв з обмеженими ресурсами (UDP, < 1 кБ заголовок); AMQP та HTTP/HTTPS — для сумісності з хмарними IoT-платформами (AWS, Azure, Google Cloud). Стандарт OPC-UA (IEC 62541) є основним протоколом для промислових IoT-систем та SCADA-інтеграції.



Рисунок 1.5 – Роль IoT-шлюзу як точки конвергенції різних радіотехнологій

1.3 Вимоги до бездротових мереж Інтернету речей

Бездротові мережі є основою функціонування Інтернету речей, оскільки саме вони забезпечують взаємодію між пристроями, що можуть бути просторово розподілені та мати різні технічні характеристики. Особливості IoT-систем формують специфічні вимоги до бездротових технологій передачі даних — як якісні, так і кількісні. Нижче детально розглянуто шість ключових вимог із зазначенням конкретних числових показників.

1.3.1 Енергоефективність

Енергоефективність є однією з найважливіших вимог для IoT-технологій, оскільки більшість пристроїв живляться від батарей або акумуляторів обмеженої ємності. Вимоги до автономності: батарейні сенсори повинні забезпечувати термін

служби від 2 до 15 років без заміни джерела живлення. Батарейка формату АА має ємність 2 400–3 000 мАч — при середньому струмі 1 мкА це відповідає ~274 рокам, однак реальні умови роботи (температура, саморозряд, вимоги до RF-передавання) знижують цей показник.

Ключові числові показники для бездротового модуля: струм у режимі глибокого сну — не більше 0,1–5 мкА; пікове споживання при передаванні — від 5 мА (BLE) до 44 мА (LoRaWAN) або 300 мА (NB-IoT); тривалість радіопередавання за один сеанс — 1–1500 мс (залежно від технології та обсягу даних); частота сеансів — від 1 разу на добу до кількох разів на хвилину залежно від застосування.

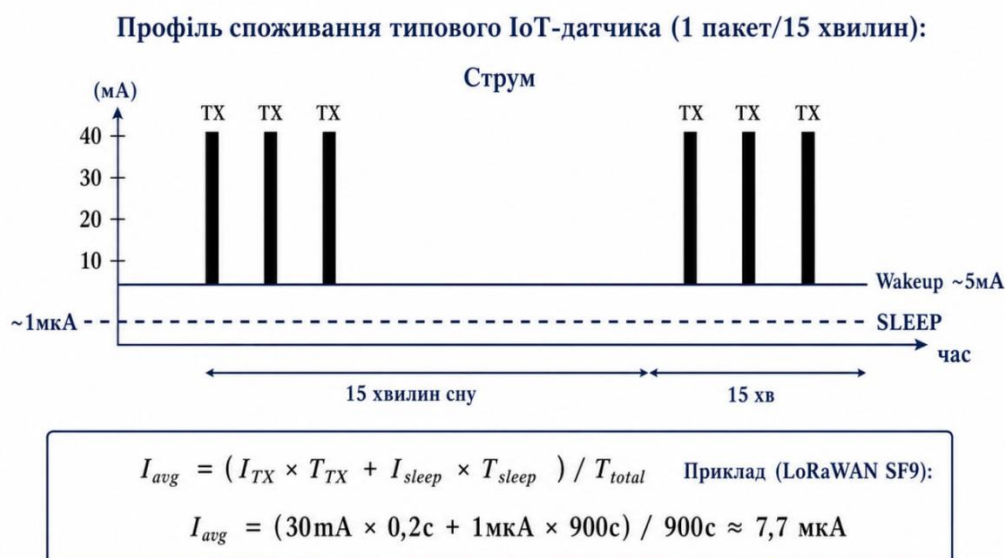


Рисунок 1.6 – Профіль споживання струму IoT-датчика та розрахунок середнього значення

1.3.2 Дальність зв'язку

Вимоги до дальності зв'язку кардинально відрізняються залежно від сценарію застосування. Для систем автоматизації будинку достатня дальність 10–50 м всередині приміщення при загасанні через 2–4 стіни. Для промислових об'єктів — 50–500 м з урахуванням металевих конструкцій. Для муніципальних систем та аграрного IoT — 1–15 км у відкритому просторі. Кількісний параметр дальності

оцінюється через MCL (Maximum Coupling Loss — максимально допустимі втрати у каналі, дБ): більше MCL — більша можлива дальність або краще проникнення через перешкоди.

Значення MCL для різних технологій: BLE 5.x (Coded S=8) — ~137 дБ; ZigBee — ~104 дБ; Wi-Fi 802.11n — ~105 дБ; Wi-Fi HaLow (802.11ah) — ~127 дБ; LoRaWAN (SF12) — ~157 дБ; Sigfox — ~162 дБ; NB-IoT — ~164 дБ (рекордний показник серед стандартизованих технологій). Різниця у 20 дБ між GPRS (~144 дБ) та NB-IoT (~164 дБ) означає, що NB-IoT здатний підтримувати зв'язок у місцях, де GPRS повністю непрацездатний: підвали, колодязі, ліфтові шахти.

1.3.3 Пропускна здатність

У більшості IoT-застосувань пристрої передають невеликі обсяги даних. Типовий пакет IoT: 10–50 байт payload (температура, координати GPS, показання лічильника). Мінімум необхідна пропускна здатність для більшості датчиків: 100–10 000 біт/с. Для LPWAN-технологій цілком достатньо кількох сотень біт/с.

Виняток становлять мультимедійні IoT-застосування: IP-камери 720p — потребують 500 Кбіт/с–2 Мбіт/с; камери 1080p/4K — 2–25 Мбіт/с; аудіо VoIP — 8–64 Кбіт/с; потокові медичні дані (ЕКГ 12 відведень, 1000 Гц) — ~240 Кбіт/с. Ці застосування вимагають Wi-Fi, LTE-M або 5G RedCap.

Параметр затримки (Latency) є критичним для охоронних та управляючих систем. Вимоги: Smart Home автоматизація — < 500 мс; промислове управління — < 100 мс; роботизовані лінії (5G URLLC) — < 1 мс; критичні системи безпеки (відключення аварійного клапана) — < 50 мс.

Таблиця 1.3 – Кількісні вимоги до бездротових технологій для IoT

Вимога	Мінімальне значення	Оптимальне значення	Застосування
Споживання (сон)	< 10 мкА	< 1 мкА	Батарейні датчики
Термін служби батар.	> 2 роки	> 10 років	Лічильники, сенсори
Дальність (місто)	> 200 м	> 2–5 км	Smart City

Продовження таблиці 1.3

MCL	> 130 дБ	> 155 дБ	Підземні об'єкти
Пропускна здатність	> 100 біт/с	> 1 Кбіт/с	Телеметрія
Затримка	< 10 с	< 500 мс	Автоматизація
Кількість пристроїв	> 100/GW	> 1 000/GW	Масові розгортання
Вартість модуля	< \$15	< \$5	Масове виробництво

1.3.4 Масштабованість, надійність та вартість

Масштабованість мережі визначається здатністю обслуговувати велику кількість одночасно підключених пристроїв. Конкретні вимоги: для Smart Home — 10–100 пристроїв на хаб; для будівлі чи підприємства — 100–10 000 вузлів; для міської системи — понад 100 000 пристроїв. Технології з ALOHA-подібним доступом (LoRaWAN) при навантаженні більш ніж 10% каналу зазнають зростання колізій, тому при планових розгортаннях закладають не більше 2 000–5 000 пристроїв активного передавання на шлюз.

Надійність передачі даних оцінюється коефіцієнтом успішної доставки пакетів (PDR — Packet Delivery Ratio). Для критичних застосувань (охоронні системи, медицина) вимагається PDR > 99,9%; для моніторингових систем — PDR > 95–99%; для телеметрії — PDR > 90%. Надійність забезпечується через: ARQ (Automatic Repeat Request) — повтор при відсутності ACK; FEC (Forward Error Correction) — виправлення помилок без повтору (LoRa Coding Rate); просторове різноманіття (Space Diversity) — кілька шлюзів або базових станцій.

Економічна ефективність є критично важливою умовою масового впровадження IoT. Вартість кінцевого модуля повинна бути в діапазоні \$1–15 залежно від технології. OPEX (операційні витрати): для нестільникових технологій (BLE, ZigBee, LoRaWAN — приватна мережа) — практично нульовий; для

стільникових (NB-IoT, LTE-M) — \$1–8 на пристрій на рік залежно від оператора та обсягу даних.

Таблиця 1.4 – Кількісні вимоги до масштабованості, надійності та вартості IoT-рішень

Вимога	Кількісний показник	Пояснення
Масштабованість (мережа)	> 1 000–65 000 вузлів/мережа	Залежить від технології та топології
Навантаження (ALOHA)	< 10% ефірного часу каналу	Запобігання колізіям у нестільникових
PDR (надійність)	> 99,9% (критичні) / > 95% (норм)	Коефіцієнт успішної доставки пакетів
Безпека (шифрування)	AES-128 мінімум	Стандарт для всіх IoT-технологій
Вартість модуля	\$1–15 (масовий сегмент)	\$2–5 — Sigfox; \$3–10 — BLE, LoRaWAN
OPEX (нестільникові)	~\$0/рік/пристрій	BLE, ZigBee, Z-Wave, LoRaWAN (прив.)
OPEX (стільникові)	\$1–8/рік/пристрій	NB-IoT, LTE-M через MNO-оператора

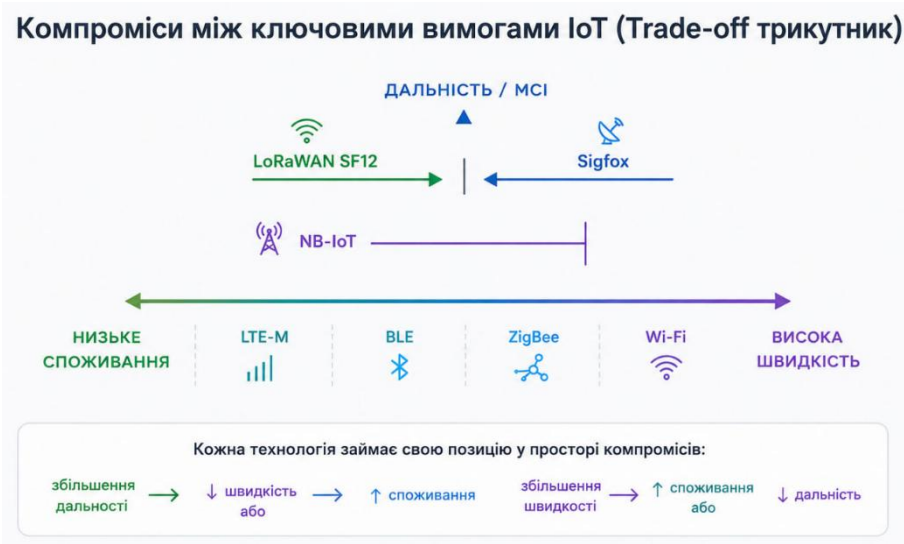


Рисунок 1.7 – Ключові компроміси (trade-off) між вимогами до IoT-технологій

1.4 Класифікація IoT-радіотехнологій: короткого радіусу дії (WPAN/WLAN) та широкого покриття (LPWAN)

Ключовою складовою будь-якої IoT-системи є бездротовий рівень передавання даних, який безпосередньо визначає характеристики всієї мережі. На сьогодні існує велика кількість радіотехнологій, кожна з яких розроблялась для конкретних умов застосування. Для систематизації цих технологій і полегшення процесу вибору рішення застосовують класифікацію за радіусом дії та архітектурою мережі.

Найпоширенішим підходом є поділ IoT-радіотехнологій на дві великі групи: технології короткого радіусу дії (WPAN/WLAN) та технології широкого покриття (LPWAN). Кожна група охоплює кілька конкретних стандартів та протоколів, які відрізняються між собою за технічними характеристиками і сферами застосування.

1.4.1 Технології короткого радіусу дії (WPAN/WLAN)

До WPAN (Wireless Personal Area Network) належать: Bluetooth Low Energy (BLE 5.x — версія 5.4, 2023 р.), ZigBee (IEEE 802.15.4-2020, підтримує mesh до 65 000 вузлів), Z-Wave (ITU-T G.9959, субГГц 868/908 МГц), Thread (IEEE 802.15.4 + IPv6, Matter-сумісний) та WirelessHART/ISA-100 (промислові варіанти). Ці технології забезпечують дальність від 10 до 1000 м (BLE Coded PHY), споживають 5–35 мА при передаванні та менше 1 мкА у режимі сну.

До WLAN (Wireless Local Area Network) для IoT відносяться стандарти сімейства IEEE 802.11: класичний Wi-Fi 6 (802.11ax, до 9,6 Гбіт/с, 2,4/5/6 ГГц) та Wi-Fi HaLow (802.11ah, до 78 Мбіт/с, субГГц ~0,9 ГГц, дальність до 1 км, до 8 192 клієнтів на AP). Wi-Fi є ідеальним для пристроїв із постійним живленням та великим трафіком (камери, Smart TV, шлюзи).

1.4.2 Технології широкого покриття (LPWAN)

LPWAN (Low Power Wide Area Network) розроблені для передавання невеликих обсягів даних на значні відстані з мінімальним споживанням. LoRaWAN (LoRa Alliance, 500+ членів): CSS-модуляція, SF7–SF12, EU868/US915, дальність 2–

30 км, батарея до 15 років, приватні та публічні мережі. Sigfox (UnaBiz): UNB 100 Гц, 140 пакетів/добу, 12 байт, NaaS-модель, дальність до 50 км. NB-IoT (3GPP R13+): ліцензований LTE-спектр, MCL 164 дБ, PSM/eDRX, оптимальний для підвалів та підземних об'єктів. LTE-M (Cat-M1, 3GPP R13+): 1 МГц канал, до 1 Мбіт/с, хендовер, VoLTE, для мобільних пристроїв.

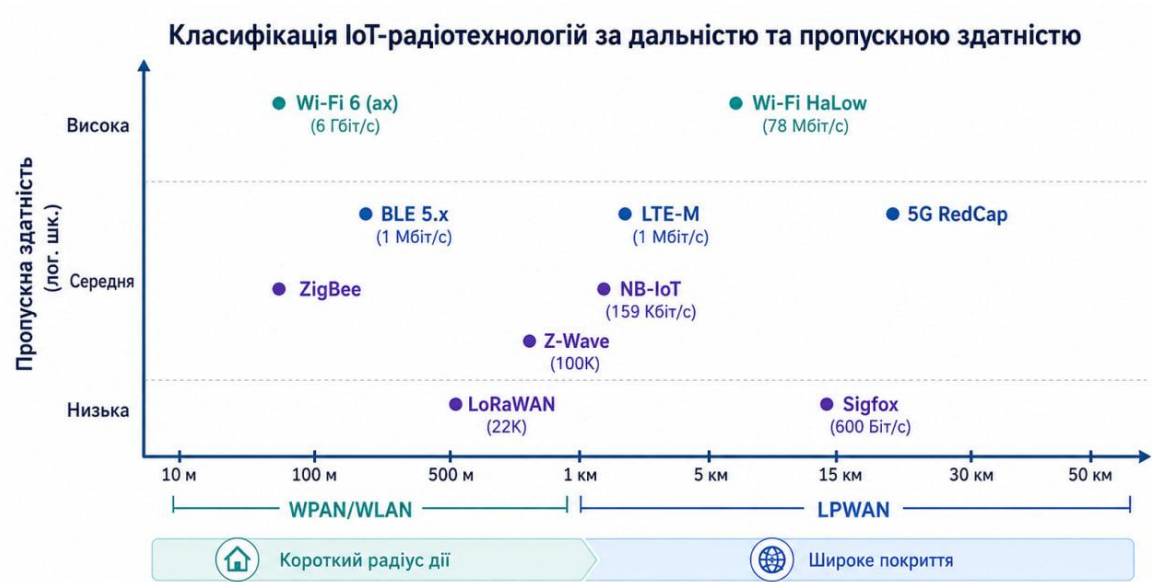


Рисунок 1.8 – Класифікація IoT-радіотехнологій за дальністю та пропускну здатністю

Таблиця 1.5 – Порівняльна характеристика груп IoT-радіотехнологій з кількісними показниками

Характеристика	WPAN/WLAN	LPWAN
Радіус дії	10–1000 м (WLAN до ~1 км)	1–50+ км
Пропускна здатність	250 Кбіт/с–9,6 Гбіт/с	100 біт/с–1 Мбіт/с
Енергоспоживання TX	5–250 мА (технологія-залежно)	10–300 мА (коротко, рідко)
Споживання (сон)	0,1–50 мкА	0,1–15 мкА (PSM/Sleep)
Частотний діапазон	2,4 ГГц / 5 ГГц / 6 ГГц / SubGHz	ISM 868/915 МГц або LTE ліц.

Продовження таблиці 1.5

MCL (дБ)	~104–137 дБ	~157–164 дБ
Масштабованість	10–65 000 вузлів/мережа	Тисячі–мільйони/GW або MNO
Спектр	Переважно нелінійний (ISM)	ISM або ліцензований (MNO)
Типові сценарії	Smart Home, офіс, медицина, IoT-локальний	Smart City, агро, smart metering
Приклади технологій	BLE, ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi, HaLow	LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M

1.4.3 Гетерогенні IoT-системи

Підхід, заснований на гетерогенній архітектурі — коли в одній системі поєднуються кілька радіотехнологій — дозволяє максимально ефективно розподілити функції між компонентами. Наприклад, у «розумному будинку»: датчики комунікують через ZigBee-mesh (батарея, 30–100 м), смартфон налаштовує пристрої через BLE (без шлюзу), IP-камери підключені через Wi-Fi 6 (висока швидкість для відео), а комунальний лічильник надсилає показники через NB-IoT (MCL 164 дБ для підвалу).

Стандарт Matter (Connectivity Standards Alliance, версія 1.3, 2024 р.) уніфікує рівень застосунку для Smart Home пристроїв поверх Wi-Fi, BLE та Thread (IEEE 802.15.4 + IPv6). Це дозволяє пристроям від Apple, Google, Amazon та сотень інших виробників взаємодіяти через єдиний протокол без прив'язки до хмари конкретного вендора. Matter підтримується Home Assistant, Apple HomeKit, Google Home та Amazon Alexa.

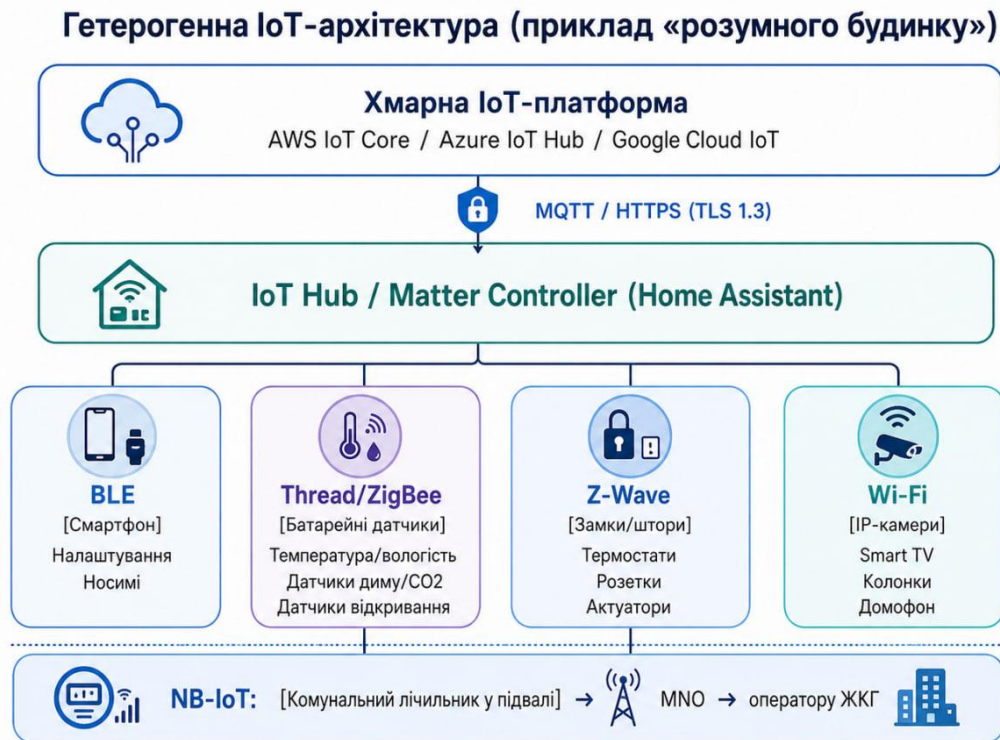


Рисунок 1.9 – Гетерогенна IoT-архітектура «розумного будинку» з поєднанням технологій

Таблиця 1.6 – Зведені технічні характеристики основних IoT-радіотехнологій

Технологія	Діапазон	Дальність	Макс. швидкість	Спожив. ТХ	MCL (дБ)
BLE 5.x	2,4 ГГц	30–1000 м	2 Мбіт/с	5–15 мА	~137
ZigBee	2,4 ГГц	10–100 м	250 Кбіт/с	15–30 мА	~104
Z-Wave	868 МГц	30–40 м	100 Кбіт/с	25–35 мА	~105
Wi-Fi HaLow	~0,9 ГГц	до 1 км	78 Мбіт/с	15–30 мА	~127
Wi-Fi 6 (ax)	2,4/5/6 ГГц	15–150 м	9,6 Гбіт/с	80–250 мА	~105
LoRaWAN (SF12)	868/915 МГц	2–30 км	~0,3 Кбіт/с	24–44 мА	~157
Sigfox	868/915 МГц	3–50 км	100 біт/с	10–25 мА	~162
NB-IoT (R14)	LTE ліц.	1–15 км	159 Кбіт/с	120–300 мА	164
LTE-M Cat-M1	LTE ліц.	1–15 км	1 Мбіт/с	180–380 мА	155,7

1.5 Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи Інтернету речей, зокрема поняття IoT, етапи розвитку цієї концепції, основні сфери застосування та типові архітектурні підходи до побудови IoT-систем. Визначено, що ефективність роботи таких систем значною мірою залежить від правильно обраної бездротової технології, оскільки саме вона впливає на дальність зв'язку, енергоспоживання, пропускну здатність, затримку, масштабованість і вартість впровадження. У розділі також проаналізовано ключові вимоги до бездротових мереж IoT та наведено класифікацію радіотехнологій на технології короткого радіусу дії WPAN/WLAN і технології широкого покриття LPWAN. Встановлено, що кожна з технологій має власні переваги та обмеження, тому її вибір повинен здійснюватися з урахуванням конкретного сценарію застосування: для «розумного будинку» доцільними є BLE, ZigBee, Thread або Wi-Fi, тоді як для «розумного міста», аграрного сектору та систем моніторингу на великих відстанях більш придатними є LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT та LTE-M. Отже, матеріал першого розділу формує необхідну теоретичну базу для подальшого порівняльного аналізу конкретних IoT-радіотехнологій у наступних розділах роботи.

2 РАДІОТЕХНОЛОГІЇ КОРОТКОГО РАДІУСУ ДІЇ ДЛЯ IoT

2.1 Bluetooth Low Energy (BLE): архітектура, протоколи, швидкість, енергоспоживання, застосування

Bluetooth Low Energy (BLE) — стандарт бездротового зв'язку малого радіусу дії, розроблений компанією Nokia під назвою «Wibree» та включений до специфікації Bluetooth 4.0 у 2010 році організацією Bluetooth Special Interest Group (SIG). Технологія спеціально оптимізована для застосувань, що вимагають мінімального енергоспоживання при збереженні стійкого зв'язку на відстані до 100 метрів. На відміну від класичного Bluetooth, BLE не призначений для безперервної передачі даних великого обсягу, натомість орієнтований на короткочасний обмін невеликими пакетами — що робить його ідеальним для IoT-пристроїв із живленням від батарей.

Ключова перевага BLE полягає в тому, що технологія є нативно підтримуваною мільярдами смартфонів, планшетів і ноутбуків по всьому світу, тобто BLE-пристрій може взаємодіяти зі споживчою електронікою без будь-яких додаткових шлюзів. Ця властивість суттєво знижує вартість і складність розгортання IoT-систем.

2.1.1 Архітектура та стек протоколів

Стек протоколів BLE має ієрархічну структуру і поділяється на дві основні частини: контролер (Controller), що відповідає за радіочастотну та каналну обробку, та хост (Host), що реалізує логіку вищих рівнів. Між ними розміщений інтерфейс HCI (Host Controller Interface), що дозволяє реалізовувати кожен компонент на окремих мікросхемах або об'єднати в єдиному SoC (System on Chip).

Фізичний рівень (PHY) BLE функціонує у діапазоні 2,4 ГГц (ISM-смуга 2400–2483,5 МГц) і розділений на 40 радіоканалів із кроком 2 МГц. З них 3 канали є рекламними (advertising channels: 37, 38, 39) і 37 — каналами даних. Для захисту від завад застосовується метод адаптивного перескоку частоти (AFHS — Adaptive Frequency Hopping).

Рівень каналного доступу (Link Layer) управляє п'ятьма станами: Standby, Advertising, Scanning, Initiating та Connected. На рівні L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) здійснюється мультиплексування протоколів вищого рівня. Протокол ATT (Attribute Protocol) реалізує модель «клієнт-сервер» для читання та запису атрибутів. GATT (Generic Attribute Profile) визначає структуру даних у вигляді сервісів і характеристик. Профілі GAP і SM відповідають за виявлення пристроїв і безпечне з'єднання.

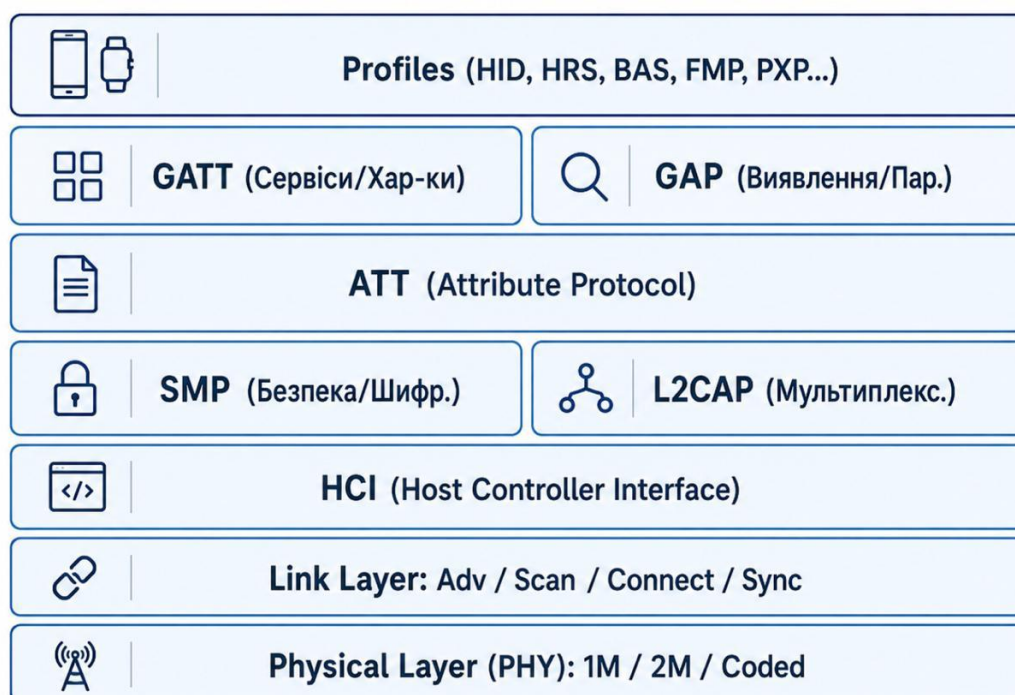


Рисунок 2.1 – Стек протоколів Bluetooth Low Energy

Специфікація BLE 5.0 (2016 р.) запровадила три режими фізичного рівня: LE 1M PHY (стандартний, 1 Мбіт/с), LE 2M PHY (2 Мбіт/с, вища швидкість та менша затримка) та LE Coded PHY (125/500 Кбіт/с, збільшена до 4–8 разів дальність за рахунок надлишкового кодування). Coded PHY зі S=8 дозволяє досягти дальності понад 1 км у відкритому просторі — що суттєво розширює сферу застосування BLE за межі традиційних персональних мереж.

Версія BLE 5.1 (2019 р.) додала підтримку визначення напрямку (AoA/AoD — Angle of Arrival / Angle of Departure) для систем прецизійного позиціонування з

точністю до сантиметрів. BLE 5.2 (2020 р.) запровадила ізохронні канали та протокол LE Audio для передачі звуку з малою затримкою.

Таблиця 2.1 – Еволюція специфікацій Bluetooth Low Energy

Версія BLE	Рік	Ключові нововведення
BLE 4.0	2010	Базова специфікація BLE, низьке споживання
BLE 4.2	2014	Збільшення MTU, Privacy, IPv6/6LoWPAN
BLE 5.0	2016	2M PHY, Coded PHY (до 1 км), Extended Adv.
BLE 5.1	2019	AoA/AoD позиціювання, сантиметрова точність
BLE 5.2	2020	LE Audio, ізохронні канали, EATT
BLE 5.3	2021	Enhancements для LE Power Control
BLE 5.4	2023	PAwR (Periodic Adv. with Response), ECSN

2.1.2 Швидкість та режими роботи

Корисна пропускна здатність BLE суттєво залежить від версії, налаштувань з'єднання та розміру пакету. У режимі LE 1M PHY максимальна теоретична швидкість становить 1 Мбіт/с, однак реальна корисна пропускна здатність з урахуванням заголовків, підтверджень та інтервалів між пакетами складає приблизно 125–260 Кбіт/с. У режимі LE 2M PHY — до 500 Кбіт/с.

Структура фрейму BLE включає: преамбулу (1–2 байти), поле доступу (4 байти), заголовок PDU (2 байти), поле payload (0–255 байтів) та CRC (3 байти). Мінімальний інтервал між подіями (Connection Interval) може становити від 7,5 мс до 4 с, що визначає затримку та частоту передавання даних. Для IoT-сенсорів зазвичай застосовують великі інтервали (100 мс – 2 с) для економії енергії.

BLE підтримує два основні режими обміну: Advertising Mode — пристрій циклічно передає рекламні пакети без встановлення з'єднання (використовується для маячків, Proximity і Asset Tracking) та Connection Mode — між двома пристроями встановлюється двонаправлений зв'язок із GATT-обміном. Починаючи з BLE 5.0

доступний режим Periodic Advertising, що дозволяє передавати широкомовні дані з синхронізованим розкладом без встановлення з'єднання.

Таблиця 2.2 – Швидкість та дальність різних режимів PHY у BLE 5.x

Режим PHY	Символьна швидкість	Корисна швидкість	Дальність (відкрито)
LE 1M PHY	1 Мбіт/с	~125–260 Кбіт/с	~30–100 м
LE 2M PHY	2 Мбіт/с	~400–500 Кбіт/с	~20–80 м
LE Coded S=2	500 Кбіт/с (ефект.)	~125–240 Кбіт/с	~200–400 м
LE Coded S=8	125 Кбіт/с (ефект.)	~30–60 Кбіт/с	~800–1000+ м

2.1.3. Енергоспоживання та автономна робота

Енергоефективність є головною конкурентною перевагою BLE над іншими бездротовими технологіями для локальних мереж. Досягається вона завдяки трьом ключовим механізмам: короткій тривалості радіообміну (мілісекунди замість секунд), глибокому режиму сну між сеансами передавання та мінімальним накладним витратам протоколу.

Типові значення струмоспоживання BLE-модуля: у режимі передавання при +0 дБм — від 5 до 15 мА; при прийомі (Rx) — від 4 до 12 мА; у режимі глибокого сну — від 0,1 до 2 мкА. Враховуючи, що IoT-датчик проводить переважну більшість часу у стані сну і здійснює передавання лише раз на кілька хвилин або годин, середнє споживання може становити менше 10 мкА. Це дозволяє пристрою на батарейці CR2032 (225 мАч) працювати від 3 до 10 років залежно від інтенсивності передавань.

Механізм Connection Parameters дозволяє налаштовувати: Slave Latency — дозволяє периферійному пристрою пропустити до N циклів зв'язку без відповіді (залишаючись при цьому «підключеним»); Supervision Timeout — максимальний час очікування перед розривом з'єднання; Connection Interval — базова частота

синхронізації. Оптимальне поєднання цих параметрів дозволяє суттєво зменшити кількість активних прокидань радіомодуля і знизити середнє споживання.

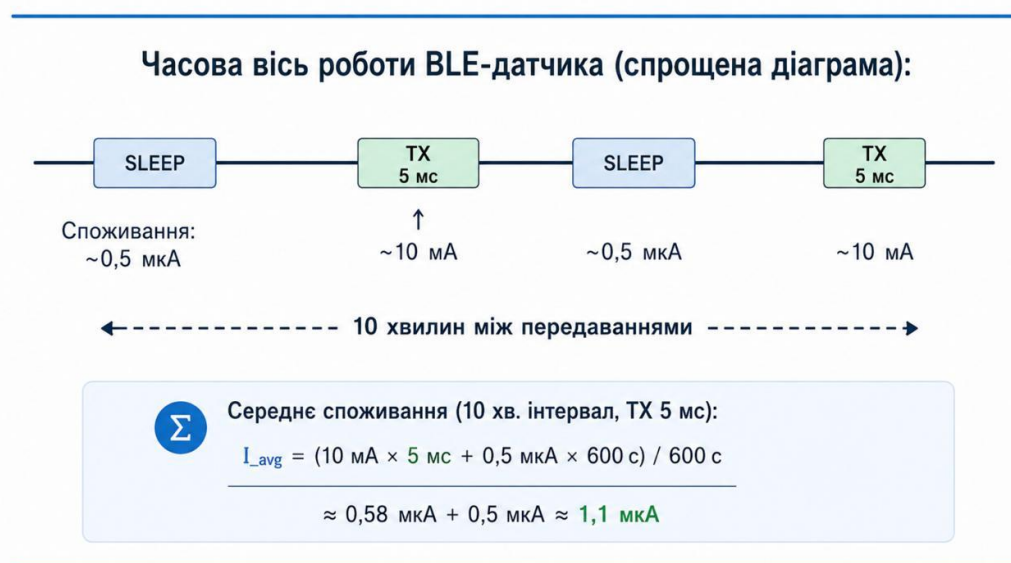


Рисунок 2.2 – Профіль споживання струму BLE-датчика з інтервалом передавання 10 хвилин

2.1.4 Типові сценарії застосування BLE в IoT

Широта підтримки BLE на мобільних платформах зумовила його домінування в сегменті персональних і носимих IoT-пристроїв. BLE є стандартним інтерфейсом для фітнес-браслетів, розумних годинників (Fitbit, Apple Watch, Garmin), медичних датчиків (глюкометри, пульсоксиметри, тонометри, ЕКГ-пристрої), бездротових навушників та систем слухових апаратів.

У сфері «розумного дому» BLE використовується для первинного налаштування (provisioning) пристроїв ZigBee, Z-Wave та Wi-Fi — навіть якщо основне з'єднання здійснюється іншою технологією. Системи смарт-замків (Yale, Schlage, August) підтримують BLE для взаємодії зі смартфоном у безпосередній близькості.

BLE Beacons (маячки) на основі протоколів iBeacon (Apple) та Eddystone (Google) широко застосовуються для навігації у приміщеннях: аеропортах, торгових центрах, музеях, лікарнях. Технологія AoA/AoD (BLE 5.1+) дозволяє досягати точності позиціювання у 0,1–0,3 м, що відкриває можливості для систем локалізації промислових активів (RTLS).

У промисловому IoT BLE застосовується для моніторингу стану обладнання (вібрація, температура), де пристрій може передавати дані безпосередньо на планшет або смартфон технічного персоналу без потреби у фіксованій інфраструктурі. Smart retail використовує BLE для відстеження покупців у магазинах (proximity marketing) та моніторингу запасів.

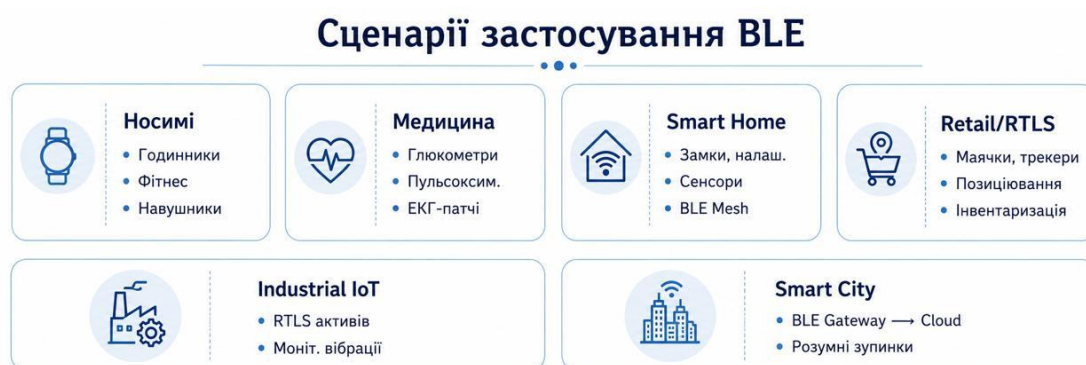


Рисунок 2.3 – Сценарії застосування BLE в IoT-системах

Технологія Bluetooth Mesh (окрема специфікація SIG, 2017 р.) розширює BLE до повноцінної mesh-мережі, де кожен вузол може ретранслювати повідомлення. Це відкриває BLE для сценаріїв автоматизації будівель: керування освітленням, датчики присутності, системи HVAC. BLE Mesh підтримується в стандарті Matter (раніше CHIP), що став єдиним протоколом сумісності між Apple HomeKit, Google Home та Amazon Alexa.

Таблиця 2.3 – Ролі BLE у різних IoT-сценаріях

Сценарій	Вимоги	Роль BLE
Носимі пристрої	Низьке споживання, смартфон	Основний канал даних до смартфона
Медичні датчики	Надійність, сертифікація	Передача вимірювань, GATT-профілі
RTLS/Маячки	Точність, масштаб	Advertising, AoA/AoD
Smart Home	Сумісність, налаштування	Provisioning, Matter, BLE Mesh
IIoT	Надійність, безпека	RTLS активів, OTA update

2.2 ZigBee (IEEE 802.15.4): топології мереж, надійність, сценарії використання

ZigBee — стандарт для малопотужних бездротових сенсорних мереж, розроблений на основі специфікації IEEE 802.15.4. Стандартизація протоколів вищого рівня здійснюється Connectivity Standards Alliance (CSA, до 2021 р. — ZigBee Alliance), яка об'єднує сотні виробників електронних пристроїв. ZigBee-рішення активно використовуються у промисловій автоматизації, системах «розумного дому», управлінні освітленням та медицині завдяки підтримці mesh-мереж, великій кількості вузлів і відносно низькому енергоспоживанню.

Назва «ZigBee» є алюзією на «зигзагоподібний» танець бджіл, якими вони передають інформацію про розташування джерела нектару — що відображає принцип передачі інформації через мережу вузлів. Стандарт набув широкого поширення завдяки підтримці таких гігантів, як Philips (Hue), IKEA (Trådfri), Samsung SmartThings, Amazon та Apple.

2.2.1 Фізичний рівень та параметри IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 визначає фізичний та каналний рівні ZigBee. Стандарт підтримує три частотні діапазони: 2,4 ГГц — 16 каналів (11–26) із кроком 5 МГц, глобально; 868 МГц — 1 канал, Європа; 915 МГц — 10 каналів, Америка. Переважна більшість комерційних ZigBee-пристроїв використовує діапазон 2,4 ГГц,

оскільки він забезпечує найвищу швидкість (250 Кбіт/с символна) та сумісність у різних регіонах.

Для модуляції застосовується O-QPSK із DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): широкосмуговий сигнал має вищу завадостійкість і менш чутливий до вузькосмугових перешкод. Чіп-послідовність із 32 чіпів на символ підвищує ефективну обробку здатність. Доступ до середовища здійснюється методом CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access — Collision Avoidance) — перед передачею вузол «прослуховує» канал і відкладає передачу у разі зайнятості.

Максимальна потужність передавача регулюється до +20 дБм, хоча більшість пристроїв використовують +3 до +10 дБм. Дальність між двома вузлами у відкритому просторі — від 30 до 100 м. В умовах приміщень із цегляними стінами — від 10 до 30 м нагор. Чутливість приймача зазвичай становить −92 до −102 дБм, що забезпечує стійкий зв'язок навіть за умов часткового поглинання сигналу перешкодами.

Таблиця 2.4 – Порівняння фізичного рівня IEEE 802.15.4 за діапазонами

Параметр	868/915 МГц	2,4 ГГц	Примітка
Кількість каналів	1 / 10	16	Канали 0 / 1–10 / 11–26
Символьна швидкість	20 / 40 Кбіт/с	250 Кбіт/с	Тільки 2,4 ГГц для IoT
Модуляція	BPSK/GFSK	O-QPSK	DSSS на всіх діапазонах
Макс. ТХ потужність	+10 дБм	+20 дБм	Регулюється в прошивці
Дальність (вузол-вузол)	20–100 м	30–100 м	У відкритому просторі

2.2.2 Типи вузлів і топології мереж ZigBee

ZigBee визначає три типи мережевих вузлів. Координатор (ZC — ZigBee Coordinator) — єдиний обов'язковий пристрій у мережі, відповідає за ініціалізацію PAN (Personal Area Network), присвоєння мережевих адрес, зберігання таблиць маршрутизації. Завжди підключений до мережі живлення. Маршрутизатор (ZR — ZigBee Router) може ретранслювати пакети від інших вузлів, бере участь у

маршрутизації, також живиться від мережі (або великої батареї). Кінцевий пристрій (ZED — ZigBee End Device) лише приймає та надсилає власні дані, не бере участі в маршрутизації, може тривалий час перебувати у сплячому режимі (від секунд до годин).

ZigBee підтримує три топологічні структури мереж. Зірка (Star) — всі пристрої підключені безпосередньо до координатора. Проста у налаштуванні, але обмежена дальністю однієї ланки. Дерево (Cluster Tree) — ієрархічна структура: координатор на верхівці, маршрутизатори формують гілки, кінцеві пристрої — листя. Mesh (Повна сітка) — найгнучкіша: будь-який маршрутизатор може взаємодіяти з будь-яким іншим, дані передаються через найоптимальніший маршрут.

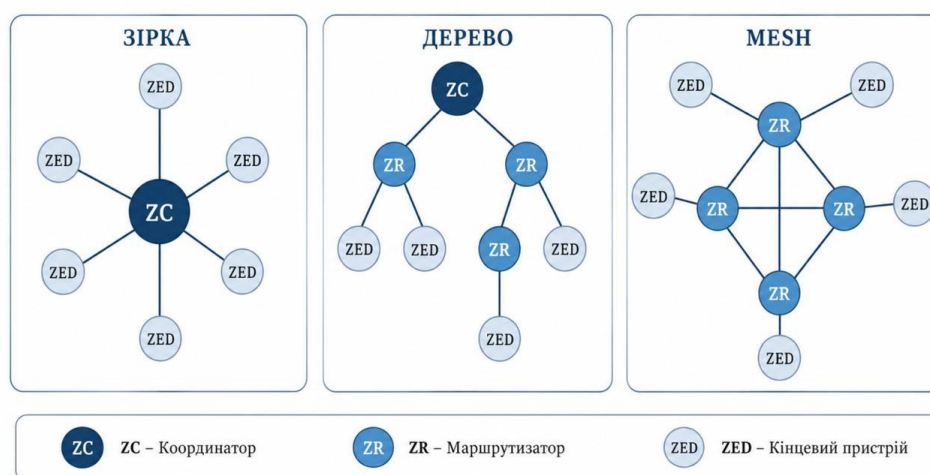


Рисунок 2.4 – Топологічні структури мереж ZigBee: зірка, дерево, mesh

Mesh-топологія є найважливішою перевагою ZigBee перед BLE та Wi-Fi для великих сенсорних мереж. По-перше, mesh дозволяє збільшити ефективну зону покриття: навіть якщо кожен вузол охоплює лише 20 м, ланцюжок із 5 маршрутизаторів забезпечить покриття на 100 м від координатора. По-друге, mesh забезпечує самовідновлення: якщо один маршрутизатор виходить з ладу, протокол автоматично знаходить альтернативний маршрут. По-третє, масштабованість — ZigBee-мережа підтримує до 65 000 вузлів.

Для маршрутизації у ZigBee застосовується протокол AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) або його аналоги. При необхідності надіслати пакет до вузла, маршрут до якого невідомий, ініціатор розсилає запит RREQ (Route Request), а цільовий вузол відповідає RREP (Route Reply). Після встановлення маршруту він кешується в таблицях маршрутизаторів.

2.2.3 Надійність передавання даних

Надійність є критичною характеристикою для ZigBee-мереж у промислових та охоронних застосуваннях. Специфікація забезпечує надійність на кількох рівнях. На фізичному рівні: DSSS-модуляція підвищує завадостійкість; CSMA-CA мінімізує колізії; CRC-16 дозволяє виявляти помилки передавання. На канальному рівні: підтвердження ACK (опціональне для broadcast, обов'язкове для unicast); автоматичний повтор передачі при відсутності ACK (до 7 спроб за замовчуванням).

На мережевому рівні забезпечується дублювання маршрутів у mesh-топології — при відмові основного маршруту автоматично активується резервний. На рівні застосунку (ZDO — ZigBee Device Object) визначаються механізми: виявлення пристроїв, прив'язки (binding), групові адреси та публікація/підписка (Publish/Subscribe). ZigBee PRO (розширений профіль) додає підтримку стохастичної маршрутизації та покращену безпеку.

Безпека ZigBee базується на AES-128 (Advanced Encryption Standard). Визначено два рівні: мережевий ключ (Network Key, NWK) — спільний для всіх пристроїв мережі, та ключ посилення (Link Key, APS) — унікальний для кожної пари пристроїв. ZigBee 3.0 запровадив єдиний профіль безпеки на основі стандарту IETF для обміну ключами та аутентифікації.

Таблиця 2.5 – Механізми забезпечення надійності в ZigBee

Рівень надійності	Механізм	Результат
Фізичний (PHY)	DSSS, CSMA-CA, CRC-16	Захист від завад і колізій
Канальний (MAC)	ACK + повтор (до 7 разів)	Гарантована доставка на hop
Мережевий (NWK)	Багатомаршрутний mesh AODV	Відновлення при відмові вузла
Безпека (APS)	AES-128, NWK Key + Link Key	Шифрування та автентифікація

Механізм ACK та повтору в ZigBee (MAC рівень):

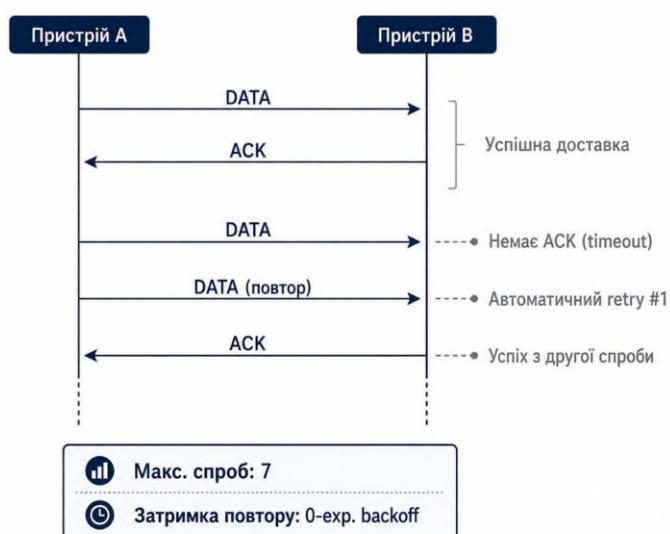


Рисунок 2.5 – Діаграма підтвердження доставки та повтору пакетів у ZigBee MAC

2.2.4 Сценарії використання ZigBee

Найбільш поширеним сценарієм ZigBee є автоматизація «розумного будинку» та будівель. Philips Hue — одна з найвідоміших ZigBee-екосистем: мільйони розумних ламп спілкуються через ZigBee-mesh та підключаються до хаба Hue Bridge. IKEA Trådfri використовує ZigBee для керування освітленням без необхідності смартфона. Samsung SmartThings, Amazon Echo Plus (вбудований ZigBee-координатор) та Apple HomePod підтримують ZigBee для управління широким спектром пристроїв.

У промисловій автоматизації ZigBee застосовується для бездротових сенсорних мереж (WSN): моніторинг температури, вологості та тиску у виробничих

цехах; контроль вібрації обладнання; аварійна сигналізація; бездротові системи збору даних від лічильників (AMR — Automatic Meter Reading). Промисловий профіль ZigBee Industrial Plant Monitoring розроблений спеціально для цих задач.

У медицині та системах охорони здоров'я ZigBee використовується для персональних мереж здоров'я (Personal Area Network — PAN): пацієнтські монітори, системи відстеження персоналу, розумні ліжка, датчики в операційних та реанімаційних відділеннях. Профіль ZigBee Health Care визначає стандартні GATT-подібні сервіси для медичних пристроїв.

Таблиця 2.6 – Сценарії та приклади застосування ZigBee в IoT-системах

Сектор	Пристрої	Приклади продуктів/платформ
Smart Home	Лампи, розетки, замки, сенсори	Philips Hue, IKEA, SmartThings
Промисловість (ІоТ)	Сенсори Т/Р/вологості, вібрації	Honeywell, Emerson, GE Digital
Smart Metering	Лічильники газу, води, тепла	Landis+Gyr, Itron, Siemens
Медицина	Монітори пацієнтів, сенсори	ZigBee Health Care Profile
Освітлення будівель	Диммери, балластри, сенсори	DALI-2 + ZigBee, Lutron

2.3 Z-Wave: особливості, переваги в «розумному домі»

Z-Wave — пропрієтарний протокол бездротового зв'язку для автоматизації будинку, розроблений данською компанією Zensys у 1999 році. У 2008 р. Zensys придбала компанія Sigma Designs, а у 2018 р. — Silicon Labs, яка й сьогодні виробляє мікросхеми Z-Wave та управляє стандартом через Z-Wave Alliance. У 2020 р. стандарт отримав статус міжнародного — ITU-T G.9959 — і формально став відкритим, хоча виробництво чіпів залишається у Silicon Labs.

Ключова відмінність Z-Wave від конкурентів — цілеспрямована оптимізація виключно для «розумного будинку» (residential automation). Протокол не

намагається охопити промисловість, медицину чи міські мережі — натомість досягає виняткової стабільності та сумісності між пристроями різних виробників у побутовому середовищі. Станом на 2024 рік понад 4 000 сертифікованих Z-Wave продуктів доступні від більш ніж 700 виробників.

2.3.1 Субгігагерцовий частотний діапазон та переваги

Найважливішою технічною особливістю Z-Wave є робота в субгігагерцовому діапазоні. На відміну від BLE та ZigBee, що функціонують у перевантаженому діапазоні 2,4 ГГц, Z-Wave використовує регіонально обумовлені частоти: 868,4 МГц (Європа, зокрема Україна), 908,4 МГц (США/Канада), 916 МГц (Ізраїль), 919,8 МГц (Гонконг), 921,4 МГц (Австралія/Нова Зеландія). Це ізолює Z-Wave від домашніх мереж Wi-Fi, Bluetooth-гарнітур, мікрохвильових печей та інших 2,4 ГГц-пристроїв.

Фізичні переваги субгігагерцового діапазону визначаються законами поширення радіохвиль. Для частоти 868 МГц втрати на вільному просторі на 9,4 дБ менші, ніж для 2,4 ГГц при однаковій відстані. Поглинання будівельними матеріалами (бетон, цегла, армована цегла) також суттєво менше для 868 МГц: цегляна стіна товщиною 20 см додає близько 3–6 дБ втрат для 868 МГц проти 8–15 дБ для 2,4 ГГц. На практиці це означає, що Z-Wave стабільно перекриває 2–4 кімнати через стіни — без повторювачів.

Для модуляції Z-Wave використовує FSK (Frequency Shift Keying) у базовій версії та GFSK (Gaussian FSK) у Z-Wave Plus (500-та серія) та G.9959 (700-та серія). Швидкість 9,6 Кбіт/с — у «класичних» пристроях 100/200-ї серії; 40 Кбіт/с — у 400-й серії; 100 Кбіт/с — у 500-й та 700-й серіях (Z-Wave Plus/700). Ці швидкості більш ніж достатні для команд автоматизації (кілька десятків байт).

Порівняння проникності сигналу через будівельні матеріали		
(((•)))		
Матеріал / товщина	868 МГц (Z-Wave)	2.4 ГГц (ZigBee / BLE)
 Дерев. перегородка	1–3 дБ	2–5 дБ
 Цегляна стіна 20 см	3–6 дБ	8–15 дБ
 Залізобетон 15 см	6–12 дБ	15–25 дБ
 Армована стеля	10–18 дБ	20–35 дБ
 Менше дБ = менші втрати = стійкіший зв'язок через перешкоди		

Рисунок 2.6 – Порівняння затухання сигналу в будівельних матеріалах для 868 МГц та 2,4 ГГц

2.3.2 Mesh-архітектура та типи пристроїв

Z-Wave використовує mesh-топологію з контролером та маршрутизуючими вузлами. Контролер (Controller) — головний вузол мережі. Розрізняють первинний (Primary Controller) та вторинний (Secondary). Первинний контролер — це зазвичай Z-Wave Hub (SmartThings, Vera, Fibaro Home Center, Homey тощо), що зберігає повну таблицю маршрутів і керує процесом включення/виключення пристроїв. Маршрутизуючі вузли (Routing Slaves) — пристрої з постійним живленням: розумні розетки, вимикачі, диммери, актуатори жалюзі. Вони ретранслюють пакети для пристроїв поза прямою дальністю контролера. Сплячі кінцеві вузли (FLiRS / Sleeping Slaves) — датчики на батарейках: датчики відкриття, руху, температури. FLiRS (Frequently Listening Routing Slaves) прокидаються кожні 250 мс для перевірки повідомлень — що забезпечує затримку відповіді менше 1 с при відносно низькому споживанні.

Максимальна кількість вузлів у класичній Z-Wave-мережі — 232. Хоча це менше, ніж у ZigBee (65 000), для «розумного будинку» цілком достатньо. Максимальна кількість хопів (ретрансляцій) — 4 — що при дальності одного хопу 30–40 м дозволяє охопити 120–160 м від контролера без прямої видимості.

Z-Wave Long Range (ZWLR, 2021 p.) — нова опція стандарту, що кардинально збільшує дальність до 1,6 км у відкритому просторі і кількість пристроїв до 4 000. ZWLR не використовує mesh-ретрансляцію: всі пристрої підключаються безпосередньо до концентратора (Hub). Це відкриває Z-Wave для нових сценаріїв: котеджні містечка, таунхауси, невеликі комерційні будівлі.

Таблиця 2.7 – Порівняння Z-Wave 700 та Z-Wave Long Range

Характеристика	Z-Wave (700 серія)	Z-Wave LR	Примітка
Макс. вузлів	232	4 000	Значне збільшення
Макс. хопів	4 хопи	Без mesh	ZWLR — пряме підключення
Дальність	30–40 м/хоп	До 1 600 м (LOS)	Субгігагерцовий діапазон
TX потужність	+13 дБм	+20 дБм	Збільшена для ZWLR
Швидкість	100 Кбіт/с	100 Кбіт/с	Для обох варіантів
Споживання сну	<1 мкА (FLIRS 250мс)	<1 мкА	Роки від батарей

2.3.3 Переваги Z-Wave в «розумному домі»

Головним конкурентним козирем Z-Wave є гарантована міжвиробнича сумісність. Кожен сертифікований Z-Wave-пристрій проходить обов'язкове тестування на сумісність у лабораторіях Z-Wave Alliance. Це означає, що розетка від Fibaro, вимикач від Aeotec, датчик від Sensative та хаб від SmartThings будуть працювати разом без додаткових налаштувань. Така гарантія є значною перевагою для кінцевого споживача порівняно з ZigBee, де сумісність між різними виробниками не завжди є абсолютною.

Безпека Z-Wave забезпечується фреймворком S2 (Security 2, введеним у 700-й серії): AES-128 ССМ шифрування, взаємна автентифікація через ECDH (Elliptic Curve Diffie-Hellman), захист від replay-атак за допомогою однонаправлених лічильників (sequence counters). Процес включення (inclusion) нового пристрою з S2 вимагає QR-коду або PIN, що унеможливорює «підробку» нових вузлів у мережі.

Низька затримка реакції є критичною для систем освітлення та безпеки. Z-Wave забезпечує затримку від команди до виконання 50–100 мс для пристроїв із постійним живленням та до 1 с для FLiRS-датчиків. Це в рази швидше, ніж, наприклад, хмарні сценарії автоматизації, де затримка може сягати 5–10 с. Локальна обробка команд без необхідності доступу до Інтернету є ще однією важливою перевагою.

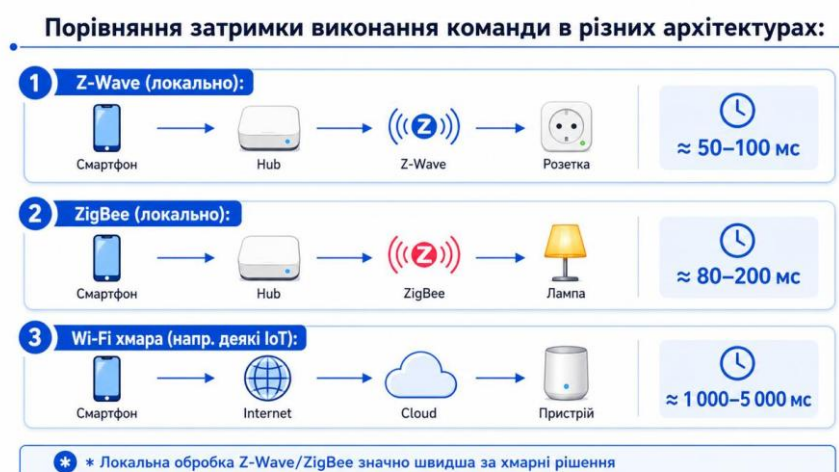


Рисунок 2.7 – Порівняння затримки виконання команди в різних IoT-архітектурах

Таблиця 2.8 – Порівняння Z-Wave та ZigBee для застосувань «розумного будинку»

Функція	Z-Wave	ZigBee (для порівняння)
Частота	868/908/916... МГц (субГГц)	2,4 ГГц (переважно)
Макс. вузлів	232 (ZWLR: 4 000)	65 000
Завади від Wi-Fi	Практично відсутні	Можливі
Сертифікація	Обов'язкова, гарантована сумісність	Рекомендована, але не завжди
Безпека	AES-128, S2 (ECDH)	AES-128, NWK+APS
Затримка команди	50–100 мс (mains), <1с (FLiRS)	80–300 мс
Типовий Hub	SmartThings, Fibaro, Homey	SmartThings, Amazon Echo Plus

2.4 Wi-Fi (802.11ah / Wi-Fi HaLow): адаптація Wi-Fi для IoT, швидкість та дальність

Wi-Fi є найбільш поширеною бездротовою технологією на планеті: мільярди пристроїв підключені до Wi-Fi-мереж у домашніх, офісних і промислових середовищах. В IoT-контексті класичний Wi-Fi (802.11b/g/n/ac/ax) використовується для пристроїв із великим обсягом трафіку або постійним живленням: IP-камери, розумні колонки, шлюзи, Smart TV, відеодомофони. Однак висока швидкість і пряма IP-підключеність класичного Wi-Fi мають зворотний бік — відносно велике споживання енергії, що робить його неоптимальним для малопотужних батарейних IoT-сенсорів.

Саме цю прогалину заповнює стандарт IEEE 802.11ah, відомий під комерційною назвою Wi-Fi HaLow (сертифікований Wi-Fi Alliance у 2021 р.). Стандарт розроблений спеціально для IoT: він функціонує в субгігагерцовому діапазоні, підтримує значно більшу кількість пристроїв на одну точку доступу та споживає суттєво менше енергії, ніж класичний Wi-Fi, зберігаючи при цьому ключову перевагу — пряму IP-адресацію.

2.4.1 Класичний Wi-Fi в IoT: переваги та обмеження

Переваги класичного Wi-Fi для IoT-застосувань включають: пряму IP-підключеність — пристрій отримує IP-адресу і безпосередньо взаємодіє з хмарою без необхідності шлюзу; висока пропускна здатність — від 54 Мбіт/с (802.11g) до кількох Гбіт/с (802.11ax/Wi-Fi 6); готова інфраструктура — домашній Wi-Fi-роутер вже є у переважній більшості сучасних помешкань; підтримка TCP/IP, HTTP, MQTT — стандартних протоколів хмарних IoT-платформ (AWS IoT, Azure IoT, Google Cloud IoT).

Серед основних обмежень класичного Wi-Fi для IoT слід виокремити: споживання енергії — 80–250 мА при активному передаванні (802.11n/ac); навіть у режимі Power Save зі DTIM функціонування потребує регулярних прокидань для отримання beacon-фреймів; кількість підключень — стандартний AP підтримує

практично до 100–250 одночасних клієнтів; дальність — у діапазоні 2,4 ГГц реально 30–100 м у приміщенні, у 5 ГГц — 15–50 м.

Для подолання проблеми споживання у класичному Wi-Fi розроблено кілька механізмів. Target Wake Time (TWT) у Wi-Fi 6 (802.11ax) дозволяє AP домовитися з кожним клієнтом про конкретний час пробудження. WPA3-Enhanced Open захищає відкриті мережі від перехоплення. OFDMA дозволяє ефективніше використовувати канал при великій кількості малопотужних клієнтів. Однак навіть із TWT споживання Wi-Fi 6 пристрою на батареї значно перевищує BLE або ZigBee.

Таблиця 2.9 – Стандарти Wi-Fi та їх роль у IoT-застосуваннях

Стандарт Wi-Fi	Діапазон / швидкість	Застосування в IoT
802.11b (Wi-Fi 1)	2,4 ГГц / 11 Мбіт/с	Спадщина, не рекомендовано
802.11g (Wi-Fi 3)	2,4 ГГц / 54 Мбіт/с	Прості камери, шлюзи
802.11n (Wi-Fi 4)	2,4/5 ГГц / 600 Мбіт/с	IP-камери, Smart TV, NAS
802.11ac (Wi-Fi 5)	5 ГГц / 3,5 Гбіт/с	4K-камери, медіашлюзи
802.11ax (Wi-Fi 6/6E)	2,4/5/6 ГГц / 9,6 Гбіт/с	Щільні IoT, TWT, OFDMA
802.11ah (Wi-Fi HaLow)	0,9 ГГц / 78 Мбіт/с	LPWAN IoT: агро, об'єкти, місто

2.4.2 IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow): технічні характеристики

Стандарт IEEE 802.11ah прийнятий у 2016 р. і спеціально розроблений для IoT у субгігагерцовому діапазоні. Частоти відрізняються за регіоном: США — 902–928 МГц (канали 1 МГц, 2 МГц, 4 МГц, 8 МГц, 16 МГц); Європа — 863–868 МГц (вужчі канали через регуляторні обмеження); Японія — 916,5–927,5 МГц; Китай, Корея, Австралія — різні підгрупи.

Wi-Fi HaLow підтримує ширину каналу від 1 до 16 МГц (на відміну від мінімум 20 МГц у класичному Wi-Fi). Найменший канал (1 МГц) забезпечує

найменше споживання та найбільшу дальність, але найнижчу швидкість (~150–650 Кбіт/с MCS0–MCS7). Канал 16 МГц з MIMO 4×4 та MCS9 — до 78 Мбіт/с. Для IoT найактуальніші режими 1–4 МГц, що забезпечують кілька Мбіт/с при помірному споживанні.

Дальність Wi-Fi HaLow у відкритому просторі досягає 1 км — що є революційним показником для Wi-Fi-технологій. В умовах приміщень із перешкодами реальна дальність 200–500 м при каналі 1 МГц. Кількість підтримуваних клієнтів на одну точку доступу — до 8 192, що в десятки разів перевищує класичний Wi-Fi. Це досягається за рахунок механізму RAW (Restricted Access Window) і TWT.

Порівняння дальності та кількості пристроїв:

 Технологія	 Дальність (відкрито)	 Пристроїв на AP/Hub	 Частота
 Wi-Fi 6	50–150 м	~250 (прак.)	2.4 / 5 ГГц
 Wi-Fi HaLow	500–1000 м	до 8 192	~0.9 ГГц
 BLE 5.x	30–100 м (1M)	Сотні (зірка)	2.4 ГГц
 ZigBee mesh	10–30 м/hop (mesh)	До 65 000	2.4 ГГц
 Z-Wave	30–40 м/hop	До 232 (4000LR)	0.9 ГГц

Рисунок 2.8 – Порівняння дальності та місткості для технологій короткого радіусу дії

2.4.3 Механізми масштабованості: TWT та RAW

Target Wake Time (TWT) — механізм, запозичений із Wi-Fi 6 та адаптований у 802.11ah. AP домовляється з кожним клієнтом про конкретні часові вікна пробудження. Наприклад, датчик температури може прокидатися лише раз на 15 хвилин для передачі вимірювань. У решту часу радіомодуль повністю вимкнений. TWT дозволяє суттєво зменшити споживання: при інтервалі пробудження 10 хвилин і часі TX 5 мс середній струм порівнянний із BLE.

RAW (Restricted Access Window) ділить час між передаваннями на слоти, призначені конкретним групам пристроїв. Це запобігає колізіям при великій кількості одночасно «прокинувшись» клієнтів. Комбінація TWT + RAW дозволяє 802.11ah підтримувати 8 192 клієнти на одній точці доступу без деградації продуктивності.

Режим IP-підключеності зберігається повністю: кожен Wi-Fi HaLow пристрій отримує IP-адресу і може напряму взаємодіяти з хмарними IoT-платформами. Це усуває необхідність у MQTT-шлюзах, ZigBee- або Z-Wave-хабах. Wi-Fi HaLow підтримує IPv6, 6LoWPAN, DHCP та стандартні протоколи — що спрощує інтеграцію в існуючу IT-інфраструктуру.

Таблиця 2.10 – Порівняння Wi-Fi 6, Wi-Fi HaLow та BLE 5.0

Параметр	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi HaLow (802.11ah)	BLE 5.0 (для порівняння)
Частота	2,4 / 5 / 6 ГГц	~0,9 ГГц (субГГц)	2,4 ГГц
Мін. ширина каналу	20 МГц	1 МГц	2 МГц (40 каналів)
Макс. швидкість	~9,6 Гбіт/с	78 Мбіт/с (16 МГц)	2 Мбіт/с (LE 2M)
Мін. швидкість	~54 Мбіт/с (MCS0)	~150 Кбіт/с (1МГц, MCS0)	~30 Кбіт/с (Coded S=8)
Дальність	15–150 м	До 1 000 м	До 1 000 м (Coded S=8)
Клієнтів на AP/Hub	~250 (практично)	До 8 192	Сотні (mesh)
IP-підключеність	Так (IPv4/v6)	Так (IPv4/v6)	Ні (потрібен шлюз)
TWT підтримка	Так (Wi-Fi 6)	Так (нативно)	Так (Connection Params)
Споживання TX	80–200 мА	15–30 мА (1 МГц)	5–15 мА

2.4.4 Сценарії застосування Wi-Fi HaLow

Найбільш природним сценарієм для Wi-Fi HaLow є аграрний IoT (AgTech). На фермерських угіддях можна розгорнути єдину точку доступу 802.11ah на висоті 15–

20 м, яка охопить відстань до 1 км. Датчики вологості ґрунту, температури повітря, опади, рівень поливу, сенсори у теплицях — усі вони отримують пряму IP-підключеність до хмарної платформи (AWS, Azure) без ретрансляторів.

Складська та логістична автоматизація є ще одним перспективним сценарієм. Великі склади (50 000+ м²) проблематично покривати класичним Wi-Fi через кількість точок доступу та завади від металевих стелажів. Wi-Fi HaLow з каналом 2 МГц забезпечує кращу проникність і більшу дальність при меншій кількості AP. Штрих-кодові сканери, RFID-зчитувачі, автоматизовані візки AGV можуть підтримувати постійне IP-з'єднання при значно меншому споживанні.

Системи «розумного міста» (Smart City) та інфраструктурного моніторингу також є перспективною нішею. Wi-Fi HaLow з дальністю 1 км і підтримкою 8 192 клієнтів на AP може замінити LoRaWAN у сценаріях, де потрібна двостороння IP-підключеність, вища швидкість (передача зображень, аудіо) або більш надійна інфраструктура на основі Wi-Fi-екосистеми.



Рисунок 2.9 – Застосування Wi-Fi HaLow (802.11ah) для аграрного IoT

2.5 Порівняння технологій WPAN/WLAN для IoT

Після детального розгляду кожної технології короткого радіусу дії — BLE, ZigBee, Z-Wave та Wi-Fi/Wi-Fi HaLow — необхідно провести їх системне порівняння з метою визначення оптимального вибору для конкретних IoT-сценаріїв.

Жодна з технологій не є «кращою» в абсолютному значенні — кожна має власну нішу, визначену сукупністю технічних і економічних характеристик.

Порівняння виконується за шістьма ключовими параметрами: частотний діапазон, максимальна швидкість, дальність, топологія мережі, споживання енергії та типовий сценарій застосування. Крім технічних, розглядаються також організаційні аспекти: необхідність у шлюзі, наявність інфраструктури та вартість модулів.

Таблиця 2.11 – Зведена порівняльна таблиця технологій WPAN/WLAN для IoT

Параметр	BLE 5.x	ZigBee	Z-Wave	Wi-Fi 6	Wi-Fi HaLow
Частота	2,4 ГГц	2,4/0,9 ГГц	0,9 ГГц	2,4/5/6 ГГц	~0,9 ГГц
Макс. швидкість	2 Мбіт/с	250 Кбіт/с	100 Кбіт/с	9,6 Гбіт/с	78 Мбіт/с
Дальність (відкрито)	100–1000 м*	100 м/hop	30–40 м/hop	50–150 м	500–1000 м
Топологія	P2P/Star/Mesh	Star/Tree/Mesh	Mesh (4 хопи)	Star (AP)	Star (AP)
Макс. вузлів	Сотні (mesh)	65 000	232 / 4000	~250	8 192
Споживання TX	5–15 мА	15–30 мА	25–35 мА	80–250 мА	15–30 мА
Споживання (сон)	0,1–2 мкА	<1 мкА	<1 мкА	10–50 мА*	0,5–5 мкА (TWT)
ІР-підключеність	Ні (шлюз)	Ні (шлюз)	Ні (шлюз)	Так	Так
Потрібен шлюз	Ні (смартфон)	Так (Hub)	Так (Hub)	Ні (роутер)	Ні (AP)
Вартість модуля	\$0,5–3	\$2–8	\$5–15	\$2–8 (SoC)	\$5–15
Шифрування	AES-128/CCM	AES-128	AES-128 (S2)	WPA3/AES	WPA3/AES

2.5.1 Порівняльний аналіз за критерієм енергоефективності

Енергоефективність є одним із найважливіших параметрів вибору радіотехнології для IoT. Для батарейних пристроїв, що передають дані рідко (раз на

хвилину або рідше), BLE є беззаперечним лідером: надзвичайно низький стартовий струм (<1 мкА у сплячому режимі) і короткий час TX дозволяють досягати терміну служби батареї до 10 років. ZigBee та Z-Wave також забезпечують тривалу автономну роботу завдяки FLiRS та механізму сну кінцевих пристроїв.

Для пристроїв із постійним або частим підключенням (відеокамери, шлюзи, розумні розетки) споживання у режимі сну не є критичним — тут важлива швидкість і пряма IP-підключеність, тому Wi-Fi є оптимальним. Wi-Fi HaLow займає проміжну позицію: значно ефективніший за класичний Wi-Fi, але дещо більше споживання, ніж BLE/ZigBee. Однак перевага IP-підключеності без шлюзу компенсує цей недолік у багатьох сценаріях.



Рисунок 2.10 – Порівняльна оцінка терміну служби батареї для різних технологій

2.5.2 Матриця вибору технології за сценарієм

Для практичного проектування IoT-систем корисно мати матрицю відповідності між типовими сценаріями та рекомендованими технологіями. Матриця нижче базується на технічних характеристиках та практичному досвіді розгортань реальних IoT-рішень. Слід зазначити, що більшість реальних IoT-систем є гетерогенними — вони поєднують дві або більше технологій для різних підсистем.

Таблиця 2.12 – Матриця вибору технології WPAN/WLAN залежно від IoT-сценарію

Сценарій застосування	Оптимальна технологія	Альтернатива	Причина вибору	Не рекомендується
Носимі/медичні сенсори	BLE 5.x	Wi-Fi HaLow	Смартфон як шлюз, низьке споживання	Wi-Fi (споживання)
Smart Home (датчики)	ZigBee / Z-Wave	BLE Mesh	Mesh, сумісність, низьке споживання	Wi-Fi (споживання)
Smart Home (камери)	Wi-Fi (802.11ac/ax)	Wi-Fi HaLow	Висока швидкість для відео	BLE, ZigBee (швидкість)
Автоматизація будівель	ZigBee / BLE Mesh	Z-Wave	Масштаб, стандарт Matter	Wi-Fi (кількість AP)
IIoT (цех/завод)	ZigBee / Wi-Fi HaLow	Wi-Fi 6	Mesh для сенсорів, IP для актуаторів	Sigfox/LoRa (повільно)
Аграрний IoT (поле)	Wi-Fi HaLow	LoRaWAN	1 км, IP, відносно просто	BLE, ZigBee (дальність)
Retail/позиціонування	BLE (Beacons/AoA)	Wi-Fi (RSSI)	Точність, смартфон-нативна	ZigBee, Z-Wave
Шлюз IoT → Internet	Wi-Fi 6 / LTE/5G	Wi-Fi HaLow	Висока швидкість, пряма IP	BLE, ZigBee, Z-Wave

2.5.3 Гетерогенна архітектура IoT-системи

Практичний досвід розгортання IoT-систем підтверджує, що найефективнішою є гетерогенна архітектура, де різні підсистеми використовують різні радіотехнології відповідно до своїх вимог. Це не є ускладненням системи — навпаки, правильна декомпозиція на підсистеми зменшує загальну вартість, підвищує надійність і дозволяє оптимально використати переваги кожної технології.

Типова гетерогенна IoT-архітектура «розумного будинку» виглядає наступним чином. Мережа датчиків і актуаторів: ZigBee-mesh або Z-Wave для батарейних датчиків, вимикачів, розеток — завдяки надійності та енергоефективності. Інтерфейс користувача: BLE — для первинного налаштування (паринг) нових пристроїв через смартфон і для носимих пристроїв. Відеосистема: Wi-Fi (802.11ac/ax) для IP-камер, відеодомофонів та розумних дисплеїв. Центральний хаб: підключений до роутера via Wi-Fi або Ethernet, обробляє сценарії автоматизації локально. Зв'язок із хмарою: через Wi-Fi/Ethernet роутер — до хмарних IoT-платформ (AWS, Azure, Google Cloud, Tuya).



Рисунок 2.11 – Гетерогенна IoT-архітектура «розумного будинку»

Важливо розуміти, що гетерогенна архітектура не означає складності для кінцевого користувача. Сучасні платформи — Matter/Thread (Apple, Google, Amazon), SmartThings, Home Assistant — забезпечують єдиний інтерфейс управління для пристроїв ZigBee, Z-Wave, BLE та Wi-Fi. Стандарт Matter 1.0 (2022 р.) і Matter 1.3 (2024 р.) уніфікують рівень застосунку для більшості типів Smart Home пристроїв, підтримуючи транспортні рівні Wi-Fi, BLE (для commissioning) та Thread (mesh-протокол поверх IEEE 802.15.4, альтернатива ZigBee).

Таблиця 2.13 – Рекомендовані технології для підсистем гетерогенної IoT-архітектури

Підсистема IoT	Оптимальна технологія	Обґрунтування
Батарейні датчики	BLE / ZigBee / Z-Wave	Роки автономії, low-power protoc.
Відеокамери	Wi-Fi 802.11ac/ax	Висока швидкість для відеопотоку
Аграрні датчики	Wi-Fi HaLow / LoRaWAN	Дальність 500–1000м
Налаштування пристроїв	BLE (provisioning)	Смартфон як шлюз, без інфраструктури
Автоматизація освітлення	ZigBee / BLE Mesh / Thread	Mesh, Matter-сумісність
Охоронна система	Z-Wave / ZigBee	Надійність, затримка <100 мс

2.6 Висновки до розділу 2

Всі розглянуті технології короткого радіусу дії — BLE, ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi та Wi-Fi HaLow — займають власні ніші в екосистемі IoT і доповнюють одна одну. BLE домінує у персональних та носимих пристроях. ZigBee є стандартом де факто для великих сенсорних mesh-мереж у будівлях та промисловості. Z-Wave забезпечує виняткову надійність і сумісність у «розумному будинку» завдяки субгігагерцовому діапазону. Класичний Wi-Fi незамінний для пристроїв із великим трафіком. Wi-Fi HaLow (802.11ah) відкриває новий клас застосувань — поєднання великої дальності, IP-підключеності та відносно низького споживання. Оптимальна IoT-система нерідко поєднує кілька технологій у гетерогенній архітектурі, де кожна виконує функцію, для якої вона найкраще пристосована.

3 РАДІОТЕХНОЛОГІЇ ШИРОКОГО ПОКРИТТЯ (LPWAN)

3.1 LoRaWAN: принцип роботи, діапазони частот, дальність, енергоефективність

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) — одна з найпоширеніших LPWAN-технологій, що об'єднує запатентований фізичний рівень LoRa (Chirp Spread Spectrum модуляція компанії Semtech) та мережевий протокол, специфікований LoRa Alliance. Кількість підключених LoRaWAN-пристроїв перевищила 300 мільйонів одиниць у понад 175 країнах. Ключова перевага — можливість розгортання як публічних (операторських), так і повністю приватних мереж без ліцензійних зборів за спектр, оскільки технологія функціонує у нелінійному ISM-діапазоні.

CSS-модуляція (Chirp Spread Spectrum) є основою фізичного рівня LoRa. Інформація кодується «чирп»-сигналами — лінійно-частотними імпульсами, що зростають або спадають за частотою. Завдяки цьому LoRa-приймач здатний виявляти сигнал на 7–20 дБ нижче рівня теплового шуму, що забезпечує виняткову дальність та завадостійкість. Сигнал LoRa ортогональний до вузькосмугових завад, нечутливий до ефекту Доплера (до 200 км/год) та стійкий до багатопроменевих завад у міському середовищі.

3.1.1 Параметри модуляції: SF, BW, CR та ADR

Три ключових параметри LoRa-модуляції визначають компроміс між швидкістю, дальністю та споживанням. Spreading Factor (SF, від 7 до 12): більший SF — більша дальність і завадостійкість, але менша швидкість і довший ToA (Time on Air). Bandwidth (BW): 125, 250 або 500 кГц (стандарт для Європи — 125 кГц). Coding Rate (CR): 4/5–4/8, визначає надлишкове кодування для захисту від помилок. Механізм ADR (Adaptive Data Rate) автоматично обирає оптимальні SF/BW/TX-потужність для кожного пристрою на основі якості сигналу.

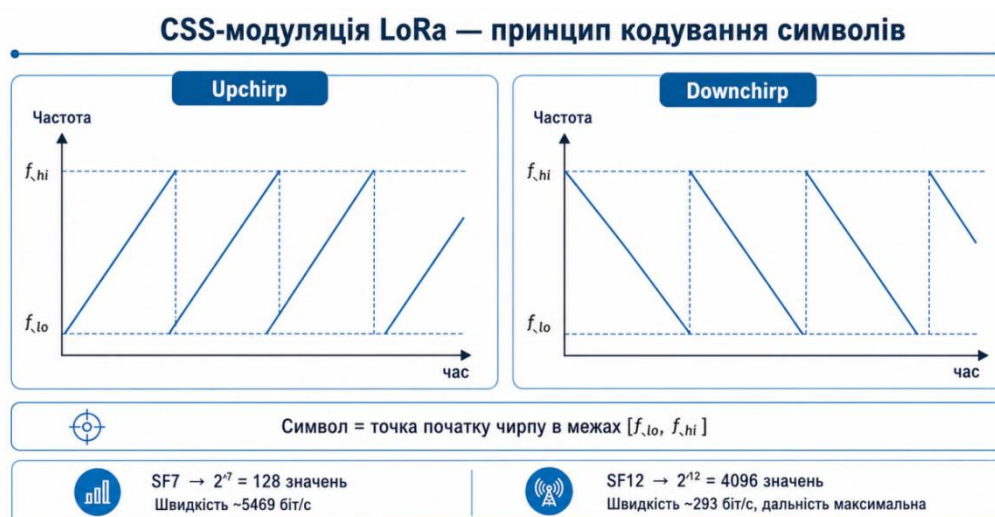


Рисунок 3.1 – Принцип CSS-модуляції LoRa: upchirp та downchirp

Таблиця 3.1 – Залежність швидкості, ToA та чутливості від SF (BW=125 кГц, EU868)

SF	Символьна швидкість	ToA (20 байт, 125кГц)	Чутливість приймача
SF 7	5 469 біт/с	~ 56 мс	-123 дБм
SF 8	3 125 біт/с	~ 103 мс	-126 дБм
SF 9	1 758 біт/с	~ 185 мс	-129 дБм
SF 10	977 біт/с	~ 371 мс	-132 дБм
SF 11	537 біт/с	~ 741 мс	$-134,5$ дБм
SF 12	293 біт/с	$\sim 1\,483$ мс	-137 дБм

3.1.2 Мережева архітектура та класи пристроїв

LoRaWAN використовує топологію «зірка із зірок» (star-of-stars): кінцеві пристрої (ED) передають дані безпосередньо на шлюзи (GW), шлюзи ретранслюють пакети на мережевий сервер (NS) через IP. NS дедублює пакети, керує ADR та безпекою, і передає дані на сервер застосунків (AS). Шлюзи є «прозорими» мостами — жодної логіки застосунку не виконують. Один шлюз може одночасно приймати пакети на 8–16 каналах від сотень і тисяч кінцевих пристроїв.

Специфікація визначає три класи пристроїв. Клас А (All): базовий, двонаправлений — після кожного UL пристрій відкриває два вікна прийому (RX1 через 1 с, RX2 через 2 с). Поза цим — повний сон. Мінімальне споживання. Клас В (Beacon): додатково відкриває синхронізовані вікна прийому за розкладом через Beacon-сигнали. Клас С (Continuous): постійно відкрите вікно RX — мінімальна затримка DL, але вище споживання (для пристроїв із зовнішнім живленням).

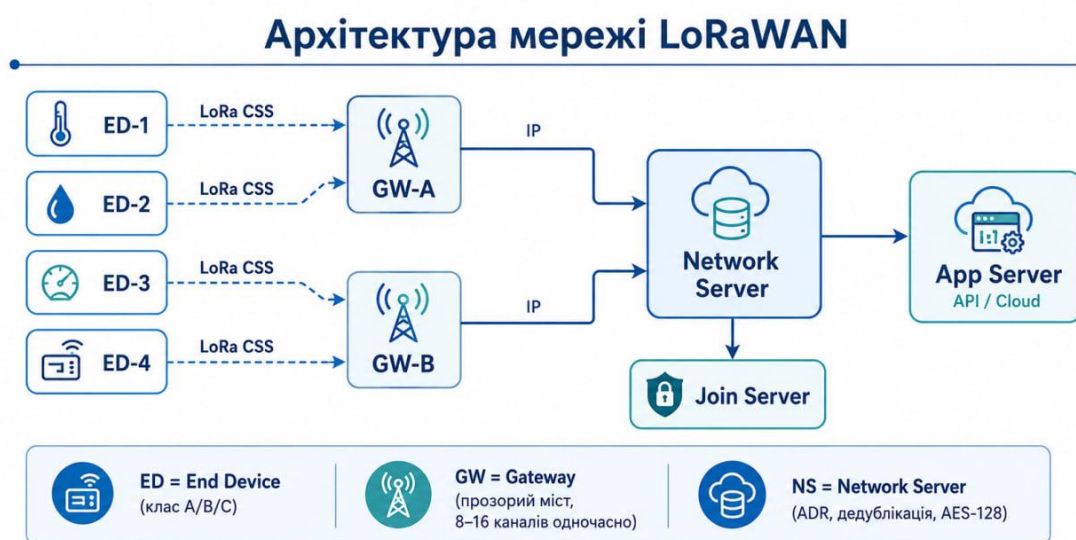


Рисунок 3.2 – Архітектура мережі LoRaWAN (star-of-stars)

3.1.3 Частотні плани та енергоефективність

LoRaWAN функціонує у нелінійних ISM-діапазонах без ліцензії на спектр. Для України та Європи — EU868: канали 868,1 / 868,3 / 868,5 МГц (основні, DC 1%), 867,1–867,9 МГц (додаткові), 869,525 МГц (Rx2, DC 10%). США — US915: 902–928 МГц, 64 UL-канали $\times$ 125 кГц та 8×500 кГц. Регуляторне обмеження Duty Cycle (DC 1% = не більш ніж 1% часу в ефірі) на практиці не є обмеженням для типових IoT-сенсорів, що передають раз на 10–60 хвилин.

Дальність LoRaWAN: у відкритій місцевості при SF12 — 10–30 км (рекордні значення > 100 км зафіксовані при антені на висоті > 100 м); у місті — 2–8 км. Споживання: у режимі сну 0,1–1,5 мкА; при передаванні +14 дБм — 24–44 мА. Для датчика, що надсилає пакет кожні 15 хвилин (SF9), середній струм ≈ 2 –4 мкА, термін служби батарейки AA (2400 мАч) — 5–12 років. Безпека: двоохрівневе AES-

128 (NwkSKey + AppSKey); рекомендований метод приєднання OTAA (Over-the-Air Activation).

Таблиця 3.2 – Ключові характеристики LoRaWAN (EU868)

Параметр	Значення	Примітка
Дальність (місто)	2–8 км	SF9–SF12, щільна забудова
Дальність (відкрито)	10–30 км	SF12, аграрна місцевість
MCL (Link Budget)	~157 дБ (SF12)	Бюджет втрат каналу
Споживання (сон)	0,1–1,5 мкА	Залежить від MCU
Споживання (TX)	24–44 мА	При +14 дБм, короткочасно
Термін служби бат.	5–12 років AA	Пакет кожні 15 хв., SF9
Макс. payload	222 байти (SF7)	Зменшується зі зростанням SF
Безпека	AES-128, OTAA	NwkSKey + AppSKey

3.2 Sigfox: архітектура, вузькосмуговий підхід, переваги та обмеження

Sigfox — LPWAN-технологія французької компанії Sigfox SAS (2009 р., нині UnaBiz), побудована на принципі UNB (Ultra-Narrow Band — ультравузька смуга). Модель «мережа як послуга» (NaaS) означає, що виробнику IoT-пристроїв не потрібна власна інфраструктура — достатньо підключитися до мережі оператора за абонентською платою. Технологія розгорнута у 70+ країнах і залишається однією з найпоширеніших LPWAN у Західній Європі та Латинській Америці.

Ключова технічна особливість Sigfox — D-BPSK-модуляція у смузі 100 Гц (uplink) та GFSK у 600 Гц (downlink). Для порівняння: канал LoRa займає 125 000 Гц, Sigfox — лише 100 Гц (у 1250 разів вузьчий). Ультрависока спектральна щільність потужності забезпечує чутливість приймача -130 – -137 дБм і дальність до 50 км у відкритому просторі. Кожне повідомлення передається тричі на псевдовипадкових частотах (FHSS) для підвищення надійності.

3.2.1 UNB-модуляція та архітектура мережі

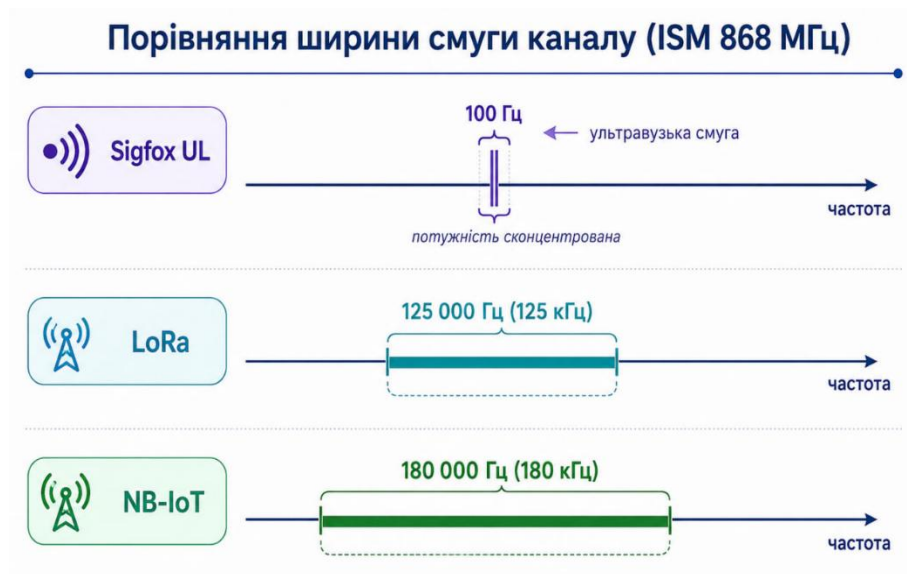


Рисунок 3.3 – Порівняння ширини смуги каналу Sigfox, LoRaWAN та NB-IoT

Архітектура Sigfox: пристрої (Sigfox Objects) → базові станції (BS) → хмара Sigfox → API (webhook/REST) → системи замовника. Базові станції є широкосмуговими приймачами, що прослуховують весь ISM-діапазон одночасно і можуть обслуговувати до мільйона пристроїв. Зона покриття однієї BS: 10 км у місті, 30–50 км у сільській місцевості. Кілька BS зазвичай отримують одне повідомлення (просторове різноманіття), що підвищує надійність і дозволяє геолокацію методом RSSI-триангуляції (точність 100–300 м без GPS).



Рисунок 3.4 – Архітектура мережі Sigfox та потік даних до хмарного API

3.2.2 Обмеження на дані та порівняння переваг/недоліків

Найважливіше обмеження Sigfox — жорсткі ліміти на обсяг і частоту повідомлень: 140 UL-повідомлень на добу (max 12 байт payload), 4 DL-повідомлення на добу (max 8 байт). Ці обмеження зумовлені ISM Duty Cycle та NaaS-моделлю. Швидкість 100 біт/с UL / 600 біт/с DL. Споживання при TX: 10–25 мА; у сні: < 1 мкА. Для пристрою з 4 повідомленнями на добу термін служби батареї AA > 10–15 років.

Таблиця 3.3 – Обмеження на передавання даних у Sigfox (регіон RC1/Європа)

Параметр	Uplink	Downlink	Примітка
Повідомлень/добу	До 140	До 4	Жорстке регуляторне обмеження
Макс. payload	12 байт	8 байт	Фіксований розмір пакету
Швидкість	100 біт/с	600 біт/с	600 біт/с UL у деяких регіонах
Смуга каналу	100 Гц	600 Гц	UNB-підхід

Таблиця 3.4 – Переваги та обмеження технології Sigfox

Критерій	Переваги	Обмеження
Дальність	До 50 км (відкрито)	Залежить від покриття оператора
Вартість	Модуль \$2–5, ~1–5 €/пристр/рік	Зростає при масштабуванні
Обсяг даних	Достатньо для телеметрії	Макс. 12 байт, 140 пакетів/добу
Енергія	Батарея >10 років	Лише при рідкій передачі
Інфраструктура	Нічого розгортати	Немає приватних мереж
Двонаправленість	Підтримується	Лише 4 DL-повідомлення на добу

3.3 NB-IoT (Narrowband IoT): інтеграція з LTE/5G, пропускна здатність, покриття

NB-IoT (Narrowband Internet of Things) — стільникова LPWAN-технологія, стандартизована 3GPP у Release 13 (2016 р.) для масового підключення IoT-пристроїв у ліцензованому LTE-спектрі. NB-IoT є частиною концепції mMTC (Massive Machine Type Communications) у 5G і може розгортатися операторами паралельно з LTE без суттєвої модернізації базових станцій. Фундаментальна відмінність від LoRaWAN та Sigfox — функціонування у ліцензованому спектрі, що гарантує якість обслуговування (QoS), захист від завад та підтримку операторського SLA.

NB-IoT підтримує три режими розгортання. In-band: один PRB шириною 180 кГц всередині стандартного LTE-каналу — найпоширеніший режим. Guard-band: у захисній смузі між LTE-каналами. Standalone: окрема смуга 200 кГц, що може бути виділена з реформованого GSM-спектра (900/1800 МГц) — найкраща ізоляція від завад.

3.3.1 Фізичний рівень та пропускна здатність

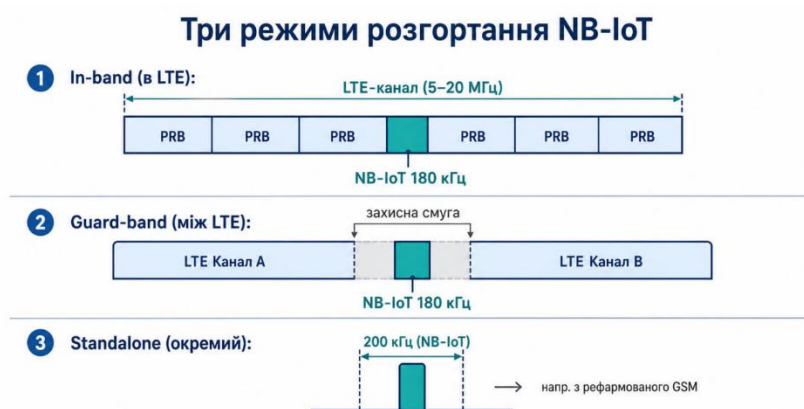


Рисунок 3.5 – Три режими розгортання NB-IoT у LTE-спектрі

Фізичний рівень NB-IoT у DL використовує OFDMA з підносійними 15 кГц (12 підносійних у 180 кГц), аналогічно LTE. У UL — SC-FDMA із підносійними 15 кГц (multi-tone, до 12) або 3,75 кГц (single-tone — максимальна завадостійкість на

межі покриття). Пікові швидкості: DL 26–127 Кбіт/с, UL 66–159 Кбіт/с (залежно від Release). MCL 164 дБ — на 20 дБ краще за GPRS (144 дБ) — дозволяє NB-IoT працювати у підвалах, колодязях та інших ускладнених умовах, де традиційний мобільний зв'язок неможливий.

Таблиця 3.5 – Еволюція характеристик NB-IoT за версіями 3GPP

Параметр	Release 13	Release 14	Release 15+
Пік. швидк. DL	26 Кбіт/с	127 Кбіт/с	~127 Кбіт/с
Пік. швидк. UL	66 Кбіт/с	159 Кбіт/с	~159 Кбіт/с
MCL	164 дБ	164 дБ	164 дБ
TX потужність	23 дБм	20/14 дБм	14 дБм
Дуплекс	Half-FDD	Half/Full	Half-FDD

3.3.2 MCL 164 дБ та механізми PSM/eDRX



Рисунок 3.6 – Порівняння Maximum Coupling Loss (MCL) LPWAN-технологій

PSM (Power Saving Mode): після передавання пристрій переходить у режим глибокого сну, відключаючи RF-блок. Споживання у PSM: 3–15 мкА. Тривалість сну налаштовується (T3412: від 1 хв до 310 год). eDRX (extended Discontinuous Reception): подовжений інтервал перевірки вхідних повідомлень — до 43,69 хвилин

замість стандартних 1,28 с. Комбінація PSM + eDRX дозволяє комунальному лічильнику, що надсилає показання раз на добу, функціонувати від батарейки АА 10–12 років.

Таблиця 3.6 – Порівняння механізмів PSM та eDRX у NB-IoT

Параметр	PSM	eDRX
Принцип	Повний сон між передаваннями	Подовжений цикл прийому
Спожив. (сон)	3–15 мкА	15–80 мкА (під час eDRX-сну)
Макс. час сну	До 310 год (T3412)	До 43,69 хв (Release 13+)
DL-доступність	Тільки після UL	Регулярно, але рідше ніж звичайний DRX
Типовий сценарій	Лічильники, рідкі показання	Охоронні системи, трекери

Типові сценарії NB-IoT: smart metering (комунальні лічильники газу, води, тепла, електроенергії — глибоке покриття MCL 164 дБ у підвалах та колодязях є вирішальною перевагою); моніторинг інфраструктури (рівень повеней, стан мостів, тунелів, резервуарів); «розумне місто» (датчики паркування, рівень заповнення смітників, якість повітря); аграрний IoT (датчики у теплицях, моніторинг водосховищ). NB-IoT та LTE-M включені до стандарту 5G як складові mMTC з Release 15 — оператори з NB-IoT у LTE автоматично надають 5G mMTC-сервіс.

3.4 LTE-M (Cat-M1): особливості, відмінність від NB-IoT

LTE-M (LTE for Machines, eMTC, Cat-M1) — стільникова IoT-технологія 3GPP Release 13, що використовує ширший канал (1,4 МГц = 6 PRB) порівняно з NB-IoT (180 кГц). LTE-M орієнтований на ширший клас IoT-застосувань: пристрої з вищим трафіком, що вимагають мобільності (хендовер), голосового зв'язку (VoLTE) або низьких затримок (10–15 мс). Пікова швидкість Cat-M1: до 1 Мбіт/с DL та UL (Release 13); Cat-M2 (Release 14) — до 4 Мбіт/с DL.

3.4.1 Фізичний рівень та швидкість

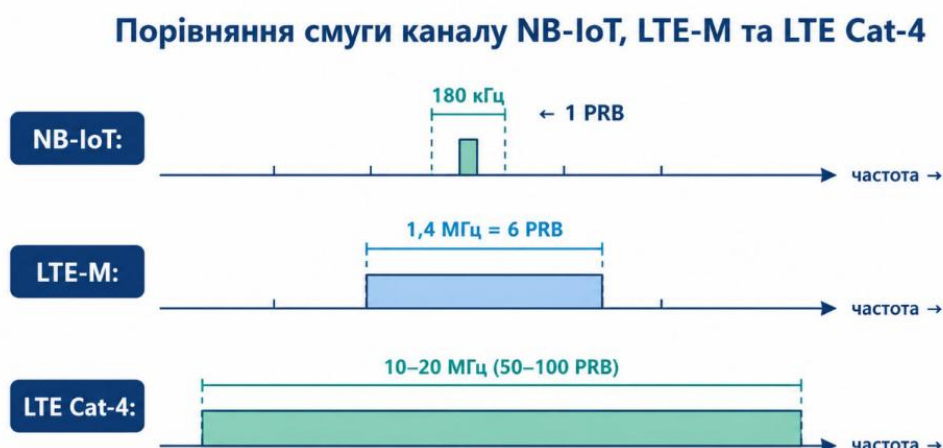


Рисунок 3.7 – Порівняння ширини смуги каналу NB-IoT, LTE-M та LTE Cat-4

LTE-M базується на OFDMA/SC-FDMA фізичному рівні LTE, але обмежує смугу до 1,4 МГц та підтримує QPSK та 16-QAM. MCL LTE-M: 155,7 дБ — на 8 дБ менше, ніж NB-IoT (164 дБ), але на 12 дБ більше від стандартного LTE. Підтримуються PSM та eDRX — аналогічно NB-IoT. Споживання при TX: 180–380 мА (вище через ширший канал). Вартість модуля: \$5–15 (проти \$3–8 для NB-IoT).

3.4.2 Хендовер, VoLTE та відмінності від NB-IoT

Ключова відмінність LTE-M від NB-IoT — повноцінна підтримка мобільності. NB-IoT підтримує лише Cell Reselection у режимі Idle. LTE-M підтримує повний хендовер X2 та S1 між eNodeB при швидкостях до 350 км/год (V2X, Release 14). Це відкриває LTE-M для трекерів транспортних засобів (автомобілі, поїзди, вантажівки), систем відстеження людей, управління автопарком, доставки та логістики.

VoLTE (Voice over LTE) є ще однією перевагою LTE-M. Це дозволяє розробляти: аварійні кнопки з голосовим дзвінком (для медичного персоналу, пацієнтів); дитячі годинники-телефони з GPS; транспортні диспетчерські системи. NB-IoT, LoRaWAN та Sigfox голосовий зв'язок не підтримують. Затримка LTE-M:

10–15 мс (проти кількох сотень мілісекунд у NB-IoT при CE Mode). Це важливо для охоронних систем і дистанційного управління.

Таблиця 3.7 – Порівняння NB-IoT, LTE-M Cat-M1 та LTE Cat-4

Параметр	NB-IoT	LTE-M Cat-M1	LTE Cat-4
Смуга каналу	180 кГц	1,4 МГц	10–20 МГц
Пік. швидк. DL	127 Кбіт/с (R14)	До 1 Мбіт/с	До 150 Мбіт/с
MCL	164 дБ	155,7 дБ	~145 дБ
Хендовер	Cell Resel. (Idle)	Повний (X2,S1)	Повний
VoLTE	Ні	Так	Так
Затримка	Сотні мс (CE)	10–15 мс	5–10 мс
Спожив. TX	120–300 мА	180–380 мА	400–1000 мА
Вартість модуля	\$3–8	\$5–15	\$15–40

Таблиця 3.8 – Типові сценарії застосування LTE-M та обґрунтування вибору

Сценарій	Чому LTE-M	Альтернатива
Трекери транспорту	Хендовер, GPS, мала затримка	LTE Cat-4 (дорожче, більше спожив.)
Медичні тривожні кнопки	VoLTE + GPS + тривала батарея	Wi-Fi+BLE (без покриття поза домом)
FOTA (великі файли)	Висока швидкість DL/UL	NB-IoT (надто повільний)
Охоронні системи	Мала затримка, надійний DL	NB-IoT (менш доступний для DL)
Носимі для дітей	VoLTE + GPS + малий форм-фактор	Wi-Fi (немає покриття поза домом)

3.5 5G Massive IoT: можливості та перспективи

5G стандартизоване 3GPP з Release 15 (2018 р.) та визначає три сценарії: eMBB (Enhanced Mobile Broadband), URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency) та mMTC

(Massive Machine Type Communications). Саме mMTC стосується Massive IoT і передбачає підтримку до 1 мільйона IoT-пристроїв на 1 км² — у ~10–15 разів більше, ніж 4G LTE. Реалізація mMTC відбувається через еволюцію NB-IoT та LTE-M (включені у 5G з Release 15 без змін у специфікації) та нову технологію RedCap (Release 17).

3.5.1 Ієрархія 5G IoT-технологій



Рисунок 3.8 – Ієрархія 5G IoT-технологій від mMTC до eMBB

3.5.2 RedCap (NR-Light) та eRedCap

5G NR RedCap (Reduced Capability, Release 17) — новий клас пристроїв між mMTC та eMBB. Цільові пристрої: промислові бездротові датчики IIoT (< 100 мс затримка), відеоспостереження 720p/1080p, носимі медичні пристрої зі стрімінгом, шлюзи будівель. Технічні характеристики: макс. DL до 150 Мбіт/с, UL до 50 Мбіт/с; макс. ширина смуги 20 МГц (Sub-6 ГГц); 1 Rx антена; QPSK/16-QAM. Вартість модуля: \$10–30.

eRedCap (Enhanced RedCap, Release 18): подальше спрощення для пристроїв 1–10 Мбіт/с — між LTE-M та RedCap. Цільові сценарії: розумні лічильники з дисплеєм, шлюзи «розумної будівлі», компактні IIoT-контролери. Network Slicing: 5G дозволяє створювати логічно ізольовані «мережеві зрізи» на одній фізичній

інфраструктурі — окремий зріз для mMTC (NB-IoT/LTE-M), URLLC (< 1 мс для промислових роботів) та eMBB (відео), кожен з гарантованими параметрами QoS.

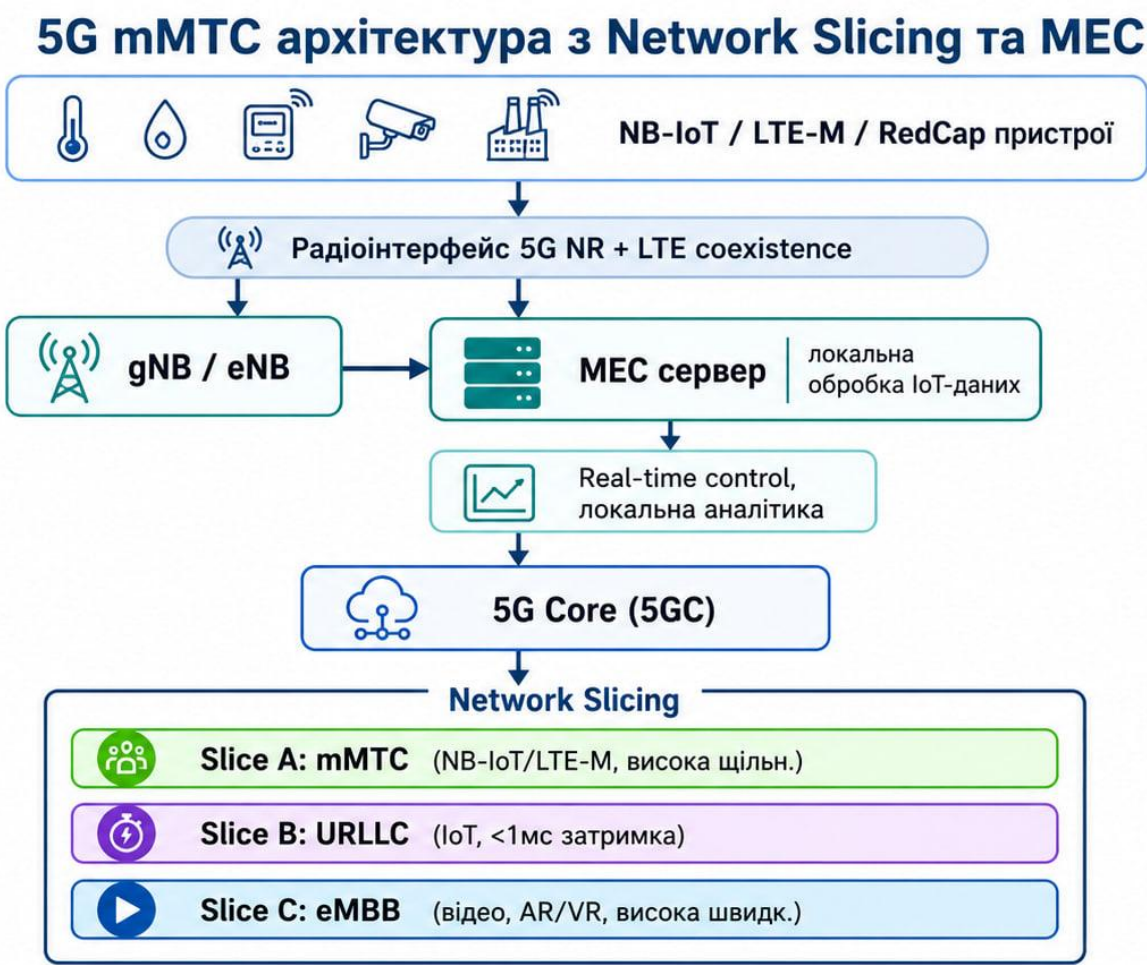


Рисунок 3.9 – Архітектура 5G mMTC з Network Slicing та Multi-access Edge Computing

Таблиця 3.9 – Технології 5G для IoT та їх цільові сценарії

Технологія	Release	Макс. швидкість DL	Цільовий сценарій
NB-IoT	R13–17 (5G mMTC)	127 Кбіт/с	Лічильники, сенсори у підвалах
LTE-M Cat-M1	R13 (5G mMTC)	До 1 Мбіт/с	Трекери, носимі, охоронні
LTE-M Cat-M2	R14	До 4 Мбіт/с	Медичні стрімінги, IoT

Продовження таблиці 3.9

eRedCap (R18)	R18 (в розробці)	До 10 Мбіт/с	Шлюзи, розум. лічильники з дисплеєм
RedCap / NR-Light	R17	До 150 Мбіт/с	ІоТ-датчики, камери, носимі нов.
5G URLLC	R15+	Пр. eMBB	Промавтоматизація, V2X, телемедицина

Виклики 5G mMTC: вартість 5G NR інфраструктури суттєво вища за LTE, тому масове покриття у сільських районах залишатиметься обмеженим ще 5–10 років; вартість RedCap-модулів (\$10–30) обмежує масові розгортання з мільярдами пристроїв; специфічні ІоТ-загрози безпеки (підробка SIM, атаки на Network Slicing) потребують вдосконалення. Перспективи: AI-enabled RAN (автоматична оптимізація параметрів кожного ІоТ-пристрою), інтеграція з edge computing для аналізу даних у реальному часі без хмарної затримки, підтримка Non-Terrestrial Networks (NTN — супутниковий NB-IoT у Release 17) для покриття у районах без наземної інфраструктури.

3.6 Порівняння LPWAN-технологій (швидкість, енергія, дальність, вартість)

Комплексне порівняння LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M та 5G RedCap є необхідним інструментом для вибору оптимальної технології при проектуванні LPWAN-системи. Жодна з технологій не є «найкращою» в абсолютному значенні — кожна оптимальна у власній ніші. Таблиця нижче систематизує ключові параметри для прийняття обґрунтованого рішення.

3.6.1 Зведена технічна порівняльна таблиця

Таблиця 3.10 – Зведена порівняльна таблиця LPWAN-технологій

Параметр	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M	RedCap 5G
Орган стандарт.	LoRa Alliance	Sigfox/UnaBiz	3GPP R13–17	3GPP R13–17	3GPP R17+
Діапазон	ISM 868/915 МГц	ISM 868/915 МГц	LTE ліц.	LTE ліц.	5G NR ліц.
Смуга каналу	125–500 кГц	100 Гц (UNB)	180 кГц	1,4 МГц	5–20 МГц
Макс. DL	~22 Кбіт/с	600 біт/с	127 Кбіт/с	1 Мбіт/с	150 Мбіт/с
Макс. UL	~22 Кбіт/с	100 біт/с	159 Кбіт/с	1 Мбіт/с	50 Мбіт/с
Даль. (місто)	2–8 км	3–10 км	1–10 км	1–10 км	0,5–5 км
Даль. (відкр.)	10–30 км	30–50 км	5–15 км	5–15 км	1–5 км
MCL	~157 дБ	~162 дБ	164 дБ	155,7 дБ	~140–145 дБ
Спожив. TX	24–44 мА	10–25 мА	120–300 мА	180–380 мА	300–600+ мА
Спожив. сон	0,1–1,5 мкА	<1 мкА	3–15 мкА	3–15 мкА	5–30 мкА
Спектр	Нелінійний ISM	Нелінійний ISM	Ліцензований	Ліцензований	Ліцензований
Приватна мережа	Так	Ні	Ні (MNO)	Ні (MNO)	Так (SNPN)
Хендовер	Ні	Ні	Cell Resel.	Повний НО	Повний
VoLTE	Ні	Ні	Ні	Так	Так
Вартість мод.	\$3–10	\$2–5	\$3–8	\$5–15	\$10–30
Абон. плата	Без (привата)/опц .	~1–5€/рік/пристр.	Оператор MNO	Оператор MNO	Оператор MNO

3.6.2 Порівняння за енергоефективністю



Рисунок 3.10 – Порівняльна оцінка терміну служби батарейки AA для LPWAN-технологій

3.6.3 Матриця вибору за сценарієм

Таблиця 3.11 – Матриця вибору LPWAN-технології для типових IoT-сценаріїв

Сценарій	Оптимальна	Причина	Альтернатива	Чому не підходить
Smart Metering (лічильники)	NB-IoT	MCL 164дБ у підвалах, оператор забезпеч. покр.	LoRaWAN	Sigfox: 140 пакетів/добу — замало
Аграрний IoT (відкрите поле)	LoRaWAN	Приватна мережа, велика дальність, мін. витрати	NB-IoT	Sigfox: немає приватних мереж
Трекінг транспорту	LTE-M	Хендовер, GPS, мала затримка, VoLTE	5G RedCap	LoRa/Sigfox: без хендовера
Прості сенсори (рідкі дані)	Sigfox	Найдешевший модуль, без інфраструктури	LoRaWAN	NB-IoT/LTE-M: дорожчий модуль
Smart City (датчики)	LoRaWAN / NB-IoT	LoRa — приватна мережа; NB-IoT — оператор	Sigfox	LTE-M: надлишково потужне рішення
IIoT (цех, завод)	LoRaWAN / RedCap	Приватна мережа; RedCap — висока швидкість	Wi-Fi HaLow	NB-IoT: недостатня швидкість для IIoT
Медичні носимі (стрімінг)	LTE-M	Висока швидкість, VoLTE, мобільність	5G RedCap	NB-IoT: недостатня швидкість
Моніторинг довкілля	LoRaWAN	Приватна мережа, роки від батарейки	NB-IoT	LTE-M/RedCap:

3.6.4 Гетерогенна LPWAN-архітектура

У масштабних IoT-розгортаннях нерідко поєднуються кілька LPWAN-технологій. Наприклад, у системі «розумного міста»: LoRaWAN — для датчиків якості повітря, рівня шуму, заповнення смітників; NB-IoT — для комунальних лічильників у підвалах; LTE-M — для GPS-трекерів комунального транспорту; Sigfox — для простих датчиків освітлення. Всі потоки надходять до єдиної IoT-платформи (AWS IoT, Azure IoT Hub або on-premise), де агрегуються, аналізуються та використовуються для управління.



Рисунок 3.11 – Гетерогенна LPWAN-архітектура системи «розумного міста»

Таблиця 3.12 – Матриця вибору LPWAN-технології за пріоритетним критерієм

Пріоритетний критерій	Оптимальна технологія	Обґрунтування
Приватна мережа	LoRaWAN	Єдина LPWAN з повноцінними приватними мережами
Максимальне покриття (MCL)	NB-IoT	MCL 164 дБ — найкращий показник серед LPWAN
Мобільність / хендовер	LTE-M	Повний НО, підтримка швидкостей до 350 км/год
Мінімальна вартість	Sigfox	Модуль \$2–5, без власної інфраструктури
Висока швидкість	LTE-M / RedCap	До 1–150 Мбіт/с при збереженні PSM/eDRX

Продовження таблиці 3.12

Голосовий зв'язок	LTE-M	Єдина LPWAN з підтримкою VoLTE
Мін. споживання	Sigfox / LoRaWAN	Найнижчий TX-струм; PSM у NB-IoT теж ефективний

3.7 Висновки до розділу 3

LPWAN-технології — LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M та 5G Massive IoT (RedCap) — формують повноцінну екосистему IoT-рішень широкого покриття. Кожна технологія займає власну нішу, визначену унікальним набором технічних і операційних характеристик. LoRaWAN є лідером для приватних мереж без операторської залежності. NB-IoT вирізняється найглибшим покриттям (MCL 164 дБ) для підземних та важкодоступних об'єктів. LTE-M є єдиним LPWAN-рішенням з підтримкою хендвера та VoLTE. Sigfox пропонує найнижчу вартість для масових простих датчиків. 5G RedCap відкриває новий клас IoT-пристроїв із потребою в більшій пропускну здатності. Оптимальна LPWAN-система, як правило, є гетерогенною — поєднує кілька технологій на єдиній платформі агрегації даних.

4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

4.1 Ключові критерії порівняння радіотехнологій IoT

Вибір оптимальної радіотехнології для IoT-системи є стратегічним рішенням, що визначає її технічні та економічні параметри на 5–15 років уперед. Відсутня єдина «найкраща» технологія — кожна оптимальна у власній ніші. Для системного порівняння застосовується структурований набір критеріїв, що охоплює технічні, операційні та економічні аспекти: енергоефективність, пропускна здатність, масштабованість, дальність, CAPEX/OPEX та відповідність сценаріям.

4.1.1 Енергоефективність

Ключові показники: струм передавання (I_{TX}), струм сну (I_{sleep}), тривалість активного режиму та розрахунковий термін служби батарейки. Стандартний тестовий сценарій: 1 пакет 20 байт кожні 60 хвилин, батарейка AA (2400 мАч). Sigfox (I_{TX} 10–25 мА, UNB, ультракороткий TX) та LoRaWAN ($I_{sleep} < 1,5$ мкА) демонструють найдовший термін служби. BLE забезпечує найнижчий $I_{sleep} (< 1$ мкА), що критично для пристроїв із частими пробудженнями.

Таблиця 4.1 – Порівняння енергоефективності IoT-радіотехнологій (* 1 пакет/год, 20 байт, AA 2400 мАч; орієнтовні значення)

Технологія	I_{TX} (мА)	I_{sleep} (мкА)	Термін служби AA*
BLE 5.x	5–15	0,1–2	5–10 років
ZigBee	15–30	< 1	4–8 років
Z-Wave (FLLRS)	25–35	< 1 (250mc int.)	3–7 років
Wi-Fi HaLow	15–30	0,5–5 (TWT)	2–4 роки
LoRaWAN SF9	24–44	0,1–1,5	8–12 років
Sigfox	10–25	< 1	10–15 років
NB-IoT (PSM)	120–300	3–15	8–12 років
LTE-M (PSM)	180–380	3–15	6–10 років

4.1.2 Пропускна здатність та масштабованість

Wi-Fi 6 (ax) забезпечує найвищу пропускну здатність (~1–4 Гбіт/с ефективно), але є надлишковим для більшості IoT-сенсорів. LoRaWAN та Sigfox оптимізовані для кількох байт — не потоків. LTE-M (до 1 Мбіт/с) та Wi-Fi HaLow (до 78 Мбіт/с) займають проміжну нішу. Щодо масштабованості: Sigfox обслуговує до 1 мільйона пристроїв на базову станцію (UNB-підхід); LoRaWAN-шлюз — тисячі; Wi-Fi HaLow — 8 192 на AP; класичний Wi-Fi — лише ~250.



Рисунок 4.1 – Порівняння пропускної здатності IoT-радіотехнологій

Таблиця 4.2 – Масштабованість IoT-технологій (пристроїв на точку підключення)

Технологія	Макс. пристроїв на GW/AP/BS	Примітка
BLE star	50–200	Лімітовано топологією зірки
ZigBee mesh	65 000 (PAN)	Практично 100–500; теор. 65K
Z-Wave	232 / 4000 (ZWLR)	Обмежений стандартом; ZWLR: 4000
Wi-Fi 6	~250 (практично)	Суттєве обмеження для щільного IoT

Продовження таблиці 4.2

Wi-Fi HaLow	До 8 192 на AP	RAW + TWT механізми
LoRaWAN	Тисячі на GW	8–16 каналів одночасно, ADR
Sigfox	До 1 млн на BS	UNB: широкосмуговий приймач
NB-IoT	50–200 тис. на BS	Стільникова інфраструктура оператора

4.1.3 Дальність дії та CAPEX/OPEX

Subгігагерцовий діапазон (Z-Wave 868 МГц, LoRaWAN 868 МГц, Wi-Fi HaLow ~0,9 ГГц) забезпечує суттєво кращу проникність через будівельні матеріали порівняно з 2,4 ГГц. Sigfox (UNB) у відкритому просторі досягає 30–50 км; LoRaWAN SF12 — 10–30 км. NB-IoT та LTE-M дальність визначається розміщенням стільникових BS оператора (1–15 км). BLE та ZigBee — ближній радіус (10–100 м/hop), але mesh дозволяє масштабувати покриття.

Щодо CAPEX/OPEX: LoRaWAN є унікальним — приватна мережа без операторської залежності (шлюз \$100–500, без абонплати). NB-IoT та LTE-M не потребують власних шлюзів, але передбачають абонентську плату оператора (\$1–15/пристр/рік). Sigfox — найдешевший модуль (\$2–5), але операторська залежність та обмеження 140 пакетів/добу. BLE — найдешевший модуль серед короткодіючих (\$0,5–3), смартфон як шлюз без додаткової інфраструктури.

Таблиця 4.3 – Дальність дії та вартісні показники IoT-технологій

Технологія	Дальність LoS / NLoS	Вартість модуля	Інфраструктура / OPEX
BLE 5 (1M)	30–100 м / 10–30 м	\$0,5–3	Смартфон як GW; без абонплати
ZigBee	30–100 м / 10–30 м	\$2–8	Hub \$30–150; без абонплати
Z-Wave	30–100 м / 15–40 м	\$5–15	Hub \$80–300; без абонплати; гарантована сум.
Wi-Fi HaLow	500–1000 м / 200–500 м	\$5–15	AP \$200–800; без абонплати

Продовження таблиці 4.3

LoRaWAN	10–30 км / 2–8 км	\$3–10	GW \$100–500; без абонплати (приватна)
Sigfox	30–50 км / 3–10 км	\$2–5	Без GW; ~1–5 €/пристр/рік
NB-IoT	5–15 км / 1–10 км	\$3–8	Без GW; оператор ~\$1–5/пристр/рік
LTE-M	5–15 км / 1–10 км	\$5–15	Без GW; оператор ~\$2–10/пристр/рік

4.1.4 Зведена матриця відповідності сценаріям

Таблиця 4.4 – Матриця відповідності IoT-технологій сценаріям застосування (✓✓✓=відмінно; ✓✓=добре; ✓=задовільно; X=не підходить)

Технологія	Носимі	Smart Home	IIoT	Smart City	Агро-IoT	Мобільний IoT
BLE 5.x	✓✓✓	✓✓	✓	✓	X	✓
ZigBee	X	✓✓✓	✓✓	✓✓	✓	X
Z-Wave	X	✓✓✓	X	X	X	X
Wi-Fi HaLow	X	✓	✓✓	✓✓	✓✓✓	X
LoRaWAN	X	X	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	X
Sigfox	X	X	✓	✓✓	✓✓	X
NB-IoT	X	✓	✓✓	✓✓✓	✓✓	✓
LTE-M	✓✓	X	✓✓	✓✓	✓	✓✓✓

4.2 Аналіз сильних і слабких сторін BLE, ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT та інших технологій

Комплексний аналіз кожної технології за методологією SWOT (Strengths — сильні сторони, Weaknesses — слабкі сторони, Opportunities — можливості, Threats

— загрози) дозволяє структуровано оцінити потенціал та ризики кожного рішення в контексті ринкової динаміки та довгострокового розвитку IoT-екосистеми.

4.2.1 BLE та ZigBee

BLE. Сильні сторони: нативна підтримка мільярдами споживчих пристроїв без виділеного шлюзу — унікальна властивість; найнижча вартість модулів (\$0,5–3); висока точність позиціонування (AoA/AoD до 0,1–0,3 м у BLE 5.1+); підтримка у Matter. Слабкі сторони: обмежена дальність у стандартному режимі (30–100 м); 2,4 ГГц діапазон — завади від Wi-Fi; складність масштабного BLE Mesh у великих будівлях. Можливості: зростання ринку носимих/медичного IoT; BLE як провізійнування для Matter/Thread. Загрози: Thread конкурує з BLE Mesh для автоматизації будівель.

ZigBee. Сильні сторони: mesh до 65 000 вузлів із самовідновленням; де-факто стандарт для Smart Home середнього класу (Philips Hue, IKEA, SmartThings); AES-128 шифрування. Слабкі сторони: неповна міжвиробнича сумісність (на відміну від Z-Wave); 2,4 ГГц — перекриття з Wi-Fi каналами; відсутність мобільності. Можливості: ZigBee 3.0 та Matter покращили інтероперабельність; промисловий IoT для великих сенсорних мереж. Загрози: Thread (той самий IEEE 802.15.4 + IPv6) розробляється Apple/Google як альтернатива; Z-Wave конкурує у преміум-сегменті.

4.2.2 Z-Wave та Wi-Fi HaLow

Z-Wave. Сильні сторони: гарантована сертифікована сумісність між пристроями різних виробників — унікальна властивість; 868 МГц — відсутність завад від Wi-Fi/BLE; S2-безпека з ECDH — найвищий рівень серед home automation. Слабкі сторони: пропрієтарна технологія (лише Silicon Labs виробляє чіпи) — вища вартість (\$5–15); 232 вузли — обмеження масштабу; непридатна поза Smart Home. Можливості: ZWLR розширює до 4000 пристроїв та 1,6 км; Matter підтримує Z-Wave. Загрози: залежність від єдиного виробника чіпів.

Wi-Fi HaLow (802.11ah). Сильні сторони: пряма IP-підключеність без шлюзу; до 1 км дальності; 8 192 пристроїв на AP (RAW+TWT); ~0,9 ГГц — висока

проникність; повна Wi-Fi-екосистема. Слабкі сторони: молода екосистема (сертифікація Wi-Fi Alliance 2021 р.) — обмежений вибір модулів; вища вартість AP (\$200–800). Можливості: аграрний та промисловий IoT; альтернатива LoRaWAN там, де потрібна IP-підключеність без шлюзу. Загрози: конкуренція з LoRaWAN для аграрного IoT; 5G RedCap у промисловому сегменті.

4.2.3 LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M

LoRaWAN. Сильні сторони: єдина LPWAN з приватними мережами без операторської залежності та без ліцензії на спектр; відкритий стандарт; 10–30 км дальність; 8–12 років від батареї; понад 250 публічних мереж. Слабкі сторони: Duty Cycle 1% (ЄС) обмежує частоту передавань; низький throughput; немає хендовера і голосу. Можливості: аграрний/екологічний моніторинг; супутниковий LoRaWAN (NTN). Загрози: NB-IoT конкурує у smart metering.

Sigfox. Сильні сторони: найдешевший модуль (\$2–5); без власної інфраструктури; MCL ~162 дБ; вбудована RSSI-геолокація. Слабкі сторони: 140 пакетів/добу, 12 байт payload; лише операторська мережа, немає приватних; фінансова нестабільність (банкрутство 2022, UnaBiz). Загрози: LoRaWAN та NB-IoT витісняють Sigfox у нових проєктах. NB-IoT. Сильні сторони: MCL 164 дБ — найглибше покриття; ліцензований спектр; стільникова інфраструктура; 5G mMTC. Слабкі сторони: залежність від оператора; немає хендовера; вище ТХ-споживання. LTE-M. Сильні сторони: повний хендовер; VoLTE; 10–15 мс затримка. Слабкі сторони: вище споживання; MCL 155,7 дБ (менше від NB-IoT).

Таблиця 4.5 – Зведений SWOT-аналіз IoT-радіотехнологій

Технологія	Ключова перевага	Ключовий недолік	Загроза / можливість
BLE	Нативна підтримка смартфонів	Дальність, завади 2,4 ГГц	Розширення у носимих; Thread
ZigBee	Mesh 65K вузлів, стандарт	Неповна міжсумісність	Thread/Matter може замінити

Продовження таблиці 4.5

Z-Wave	Гарантована сумісність, S2-безпека	Пропрієтарний чіп, 232 вузли	Matter підтримує; ZWLR
Wi-Fi HaLow	IP-підключення, 1 км, 8192 пристр.	Молода екосистема, дорожчий AP	Агро/ІоТ; 5G RedCap конкурент
LoRaWAN	Приватна мережа, 10–30 км	Duty Cycle, без хендовера	Аграрний ІоТ; NTN-супутник
Sigfox	Найдешевший модуль, без GW	140 пакетів/добу, нема приват.	LoRa/NB-IoT витісняють у нових проєктах
NB-IoT	MCL 164 дБ, стільн. інфраструктура	Залеж. від оператора, без НО	Smart metering; 5G mMTC
LTE-M	Хендовер, VoLTE, мала затримка	Вище споживання, дорожчий	Трекери, носимі; V2X

4.3 Вибір оптимальної технології для «розумного міста», «розумного дому» та промисловості (ІоТ)

Три найбільш масштабних ІоТ-сценарії — «розумне місто», «розумний будинок» та промисловий ІоТ — мають суттєво різні вимоги, що зумовлює різні оптимальні технологічні рішення. В усіх трьох випадках оптимальна архітектура є апріорі гетерогенною: різні підсистеми використовують різні радіотехнології, а єдина ІоТ-платформа забезпечує агрегацію та управління.

4.3.1 «Розумне місто» (Smart City)

Smart City є найбільш гетерогенним сценарієм: від простих датчиків рівня сміття до камер відеоспостереження 4K та систем управління транспортом. LoRaWAN є оптимальним для датчиків навколишнього середовища (1 шлюз на висоті 30 м покриває 2–5 км у місті, охоплюючи тисячі датчиків). NB-IoT — для

комунальних лічильників у підвалах (MCL 164 дБ незамінний). LTE-M — для трекерів транспорту з хендовером та GPS. Wi-Fi/LTE — для відеоспостереження.

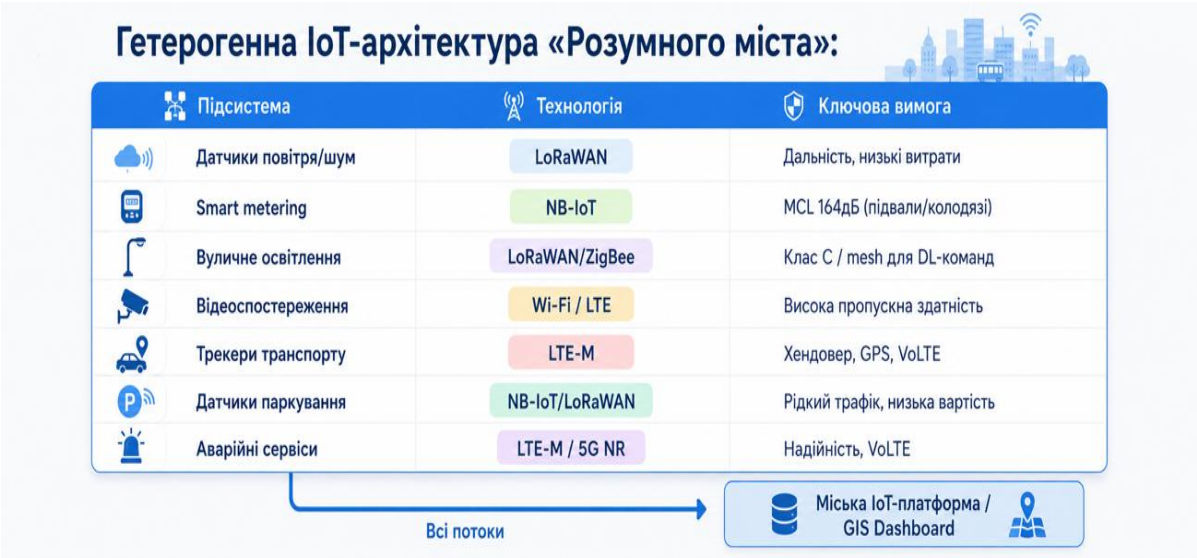


Рисунок 4.2 – Гетерогенна IoT-архітектура «розумного міста»

Таблиця 4.6 – Рекомендовані технології для підсистем «розумного міста»

Підсистема Smart City	Технологія	Альтернатива	Обґрунтування
Екологічний моніторинг	LoRaWAN	NB-IoT	Приватна мережа, рідкий трафік
Smart metering	NB-IoT	LoRaWAN	MCL 164 дБ для підвалів
Управл. освітленням	LoRaWAN/ZigBee	NB-IoT	Клас C/mesh для DL-команд
Відеоспостереження	Wi-Fi/LTE	5G NR	Відеопотік 2–8+ Мбіт/с
Трекери транспорту	LTE-M	5G RedCap	Хендовер, GPS, VoLTE
Датчики паркування	NB-IoT/LoRaWAN	Sigfox	Рідкий трафік, низька вартість

4.3.2 «Розумний будинок» (Smart Home)

Стандарт Matter (2022 р.) суттєво змінив Smart Home ландшафт, уніфікувавши рівень застосунку для BLE (provisioning), Wi-Fi та Thread (mesh на IEEE 802.15.4). Для батарейних датчиків (Т/Н, рух, відкривання): ZigBee, Z-Wave або BLE — оптимальне поєднання низького споживання та надійності. Z-Wave — переважний для преміум-сегменту (гарантована сумісність). Для актуаторів (розетки, вимикачі): Z-Wave/ZigBee з постійним живленням. Для медіа (камери, TV): виключно Wi-Fi.



Рисунок 4.3 – Оптимальна архітектура «розумного будинку» з платформою Matter

Таблиця 4.7 – Рекомендовані технології для підсистем «розумного будинку»

Підсистема Smart Home	Оптимальна технологія	Обґрунтування
Батарейні датчики	ZigBee/Z-Wave/BLE	Низьке спожив., mesh, роки від батарейки
Актуатори/розетки	Z-Wave/ZigBee/Thread	Постійне живлення, надійність, Matter
Освітлення (LED)	ZigBee/BLE Mesh	Philips Hue, IKEA; Matter сумісність

Продовження таблиці 4.7

ІР-камери	Wi-Fi 802.11ac/ax	Відеопотік 2–8 Мбіт/с
Розумний замок	Z-Wave/BLE	Z-Wave: затримка <100мс; BLE: смартфон
Термостат/HVAC	Z-Wave/ZigBee	Надійність, двонаправленість, сценарії

4.3.3 Промисловий IoT (IIoT)

IIoT висуває принципово інші вимоги порівняно зі споживчим IoT: детермінована затримка для синхронізації виробничих процесів, висока надійність (відмова датчика = потенційна аварія), стійкість до промислових завад (ЕМ-перешкоди від двигунів, зварювального обладнання), функціонування у закритих приміщеннях із металевими конструкціями. Рівень цеху (до 200 м): ZigBee з промисловим профілем або WirelessHART; BLE для моніторингу обладнання планшетом персоналу. Рівень підприємства (0,5–5 км): LoRaWAN приватна мережа. Критичне управління (SCADA): 5G URLLC або Wi-Fi TSN.



Рисунок 4.4 – Багаторівнева IoT-архітектура промислового підприємства

Таблиця 4.8 – Рекомендовані IoT-технології для підсистем промислового підприємства

Підсистема IIoT	Технологія	Причина	Вимоги
Вібраційні давачі (обладн.)	BLE 5.x	Прямо до планшета, без GW	Нечасте зчитування
Технолог. параметри (цех)	ZigBee/WirelessHART	Mesh, надійність, промстандарти	Детерм. затримка
Рівень підприємства	LoRaWAN (приватна)	Весь майданчик, мін. витрати	Рідкий трафік
Трекери AGV/навантажувачів	Wi-Fi/LTE-M	Мобільність, висока швидкість	Постійне підкл.
Трубопроводи/розподіл. мережі	LoRaWAN/NB-IoT	Велика дальність, мін. енергія	Роки від батарейки
Критичне SCADA-управління	5G URLLC/Wi-Fi TSN	Детерм. затримка < 1 мс	Надійність 99,999%

4.4 Приклади впровадження IoT в Україні та світі

Розгляд реальних прикладів впровадження демонструє практичну ефективність та економічну доцільність IoT-систем і підтверджує теоретичні висновки про оптимальний вибір технологій.

4.4.1 Впровадження в Україні

Дистанційний облік енергоресурсів (YASNO/ДТЕК). Компанія YASNO у 2020–2023 рр. розгорнула систему AMR (Automatic Meter Reading) для сотень тисяч побутових лічильників електроенергії в містах України на базі NB-IoT та LoRaWAN. Система автоматично збирає показання без обхідників, що суттєво знижує операційні витрати та підвищує точність обліку. Вибір NB-IoT для міських лічильників у підвалах та приміщеннях обумовлений MCL 164 дБ, тоді як LoRaWAN застосовується для більш доступних об'єктів із меншими вимогами до покриття.

LoRaWAN-мережа «Укртелеком». У 2019–2021 рр. «Укртелеком» розгорнув комерційну LoRaWAN-мережу у 12 містах України (Київ, Харків, Дніпро, Одеса, Львів та ін.). Мережа надає послуги підключення для муніципальних та корпоративних клієнтів: моніторинг якості повітря, відстеження транспорту, дистанційний облік. Охоплення у великих містах забезпечується кількома десятками шлюзів, встановлених на телекомунікаційних вишках та будівлях.

Smart City Вінниця. Проєкт «Розумне місто» у Вінниці (з 2016 р.) є одним із найбільш системних в Україні. Впроваджені: бездротова система управління вуличним освітленням (ZigBee mesh + LoRaWAN-шлюзи), онлайн-відстеження міського транспорту (GPS + LTE), система відеоспостереження (Wi-Fi + оптоволокно), «розумні» зупинки з інформаційними табло. Вінниця стала першим містом України з сертифікатом ISO 37120 (стандарти сталого розвитку міста). Система управління освітленням дозволила скоротити споживання електроенергії на ~30%.

Аграрний IoT (Kernel, AgroTech Ukraine). Агрохолдинг «Kernel» використовує LoRaWAN для моніторингу температури та вологості зерна у силосах елеваторів: датчики передають дані кожні 15 хвилин, що дозволяє вчасно виявляти ризик samozаймання. Стартап AgroTech Ukraine розробляє IoT-систему точного землеробства: LoRaWAN-датчики вологості ґрунту та метеостанції управляють системами краплинного зрошення, скорочуючи витрати води на 20–30%. НДІ ТК КПІ ім. Ігоря Сікорського досліджує впровадження LoRaWAN та ZigBee для моніторингу промислових трубопроводів та систем опалення.

IoT-застосування в Україні Технологічний потенціал		
Місто / Організація	Технології	Сценарії
 КИЇВ / ЛУН Управління Smart City Dashboard Sensor to Cloud Агресивна аналітика IoT + AI / RT	 • NB-IoT, LoRaWAN • Wi-Fi 6 • ZigBee, Z-Wave • LTE / 5G • Edge AI	 • Smart Metering • Розумне освітлення • Smart City 360° / 5120 • Моніторинг мереж • Стратегічна аналітика
 Львів / Smart City Business Sensor Layer LoRaWAN, ZigBee IoT & ICT	 • LoRaWAN, ZigBee • NB-IoT • Wi-Fi (Mesh)	 • Розумне середовище • Безпека та моніторинг • Енергоефективність • Якість сервісів
 ОДЕСА / Індустрія, Портова Хімія, логістика, агро Технічна сітка: LoRaWAN -85%, NB-IoT -22%, Wi-Fi -12%, ZigBee -8%	 • LoRaWAN, ZigBee • NB-IoT • Wi-Fi (Industrial)	 • Моніторинг обладнання • Логістика в реальному часі • Контроль умов зберігання • Підвищення ефективності
 ХАРКІВ / Аграрія, Енерго Промисловий IoT LoRaWAN, Private NB-IoT Edge Monitoring	 • LoRaWAN • NB-IoT (Private) • LTE-M	 • Розумне землеробство • Моніторинг енергомереж • Контроль клімату • Оптимізація витрат
 СУМИ / Освіта, Медицина Smart Monitoring Health IoT, Wearables Data to Cloud	 • BLE, ZigBee • NB-IoT, LTE-M • Wi-Fi 6	 • Моніторинг здоров'я • Контроль обладнання • Трекінг персоналу та активів • Аналітика та звітність
 Україна має високий потенціал для масштабування IoT-рішень у містах, промисловості, агро та соціальній сфері з використанням сучасних бездротових технологій та хмарних платформ.		

Рисунок 4.5 – Технологічний розподіл IoT-впроваджень в Україні

4.4.2 Впровадження у світі

Амстердам (Нідерланди). Перша публічна LoRaWAN-мережа у світі — KPN, 2015 р. Понад 3 000 шлюзів The Things Network (TTN) встановлено волонтерами, покриваючи ~90% міста безкоштовно. Застосування: моніторинг рівня води у каналах, відстеження велосипедів, якість повітря, управління освітленням. Проєкт демонструє, що відкрита спільнота може забезпечити повноцінну міську IoT-інфраструктуру.

Барселона (Іспанія). Smart City на базі стільникового IoT: NB-IoT Smart Parking (500+ датчиків) зменшив час пошуку паркомісця і знизив трафік у центрі міста. «Розумне зрошення» вулиць і парків (2 000+ датчиків вологості ґрунту) скоротило споживання води на 25%. Стовідсоткове охоплення комунальних лічильників NB-IoT. Rolls-Royce (Велика Британія). Понад 50 000 датчиків на двигун серії Trent передають телеметрію через супутник та LTE. Система Intelligent Engine Management прогнозує несправності за тиждень до виходу з ладу, суттєво скорочуючи незаплановані ремонти та простої флоту.

EDF Linky (Франція). Понад 35 мільйонів розумних лічильників електроенергії Linky встановлено у домашніх господарствах Франції. Лічильники передають дані через G3-PLC (Power Line Communication) та NB-IoT-шлюзи, забезпечуючи погодинний облік та можливість гнучких тарифів. Проєкт SmartSantander (ЄС). Більше 20 000 IoT-датчиків різних типів (ZigBee, Wi-Fi, RFID,

3G) розміщено у місті Сантандер (Іспанія). Платформа збирає дані про паркування, шум, CO₂, трафік — один із найбільших публічних IoT-розгортань у Європі.

Таблиця 4.9 – Вибрані приклади IoT-впроваджень в Україні та світі

Проект / Компанія	Країна	Технологія	Результат
YASNO Smart Metering	Україна	NB-IoT, LoRaWAN	100 тис.+ лічильників, авт. облік
Smart City Вінниця	Україна	ZigBee, LoRaWAN, LTE	ISO 37120; освітлення - 30% кВт
Укртелеком LoRaWAN	Україна	LoRaWAN	12 міст, корп./муніц. клієнти
Amsterdam IoT	Нідерл.	LoRaWAN (TTN)	3000+ GW, 90% покриття, волонтери
Barcelona Smart City	Іспанія	NB-IoT, ZigBee	-25% води; Smart Parking NB-IoT
Rolls-Royce IIoT	Велик.	Wi-Fi, LTE, супут.	50К датчиків/двигун; предикт. техобсл.
EDF Linky	Франція	G3-PLC + NB-IoT	35 млн лічильників; год. облік
SmartSantander	Іспанія	ZigBee, Wi-Fi, 3G	20 000 датчиків; місто-лабораторія

4.5 Перспективи розвитку: інтеграція IoT з 5G, 6G та edge computing

Три ключові напрями визначатимуть еволюцію IoT у 2025–2035 рр.: інтеграція з 5G Advanced (Release 18–20), підготовка до 6G (IMT-2030, ~2030–2035 рр.) та широке впровадження Edge Computing з TinyML. Кожен суттєво розширює можливості та змінює архітектуру IoT-систем.

4.5.1 5G Advanced та Ambient IoT

5G Advanced (3GPP Release 18–20, 2024–2027 рр.) відкриває нові IoT-можливості. Ambient IoT (Release 18) — підтримка пристроїв із надзвичайно низьким споживанням, що живляться від збирання енергії навколишнього

середовища (RF harvesting, сонце, вібрації). Такі пристрої не потребують заміни батарейок взагалі — революція для масових сенсорних мереж. Non-Terrestrial Networks (NTN, Release 17–18) — підключення NB-IoT та LTE-M через LEO-супутники (Sateliot, Lacuna Space) для морського, авіаційного та арктичного IoT, де наземна інфраструктура недоступна. AI-enabled RAN (Release 18) — базова станція 5G NR самостійно оптимізує параметри кожного IoT-пристрою за допомогою ML без ручного налаштування.

eRedCap (Release 18) заповнює прогалину між LTE-M (1 Мбіт/с) та RedCap (150 Мбіт/с) для пристроїв із потребою 1–10 Мбіт/с: розумні лічильники з дисплеєм, шлюзи будівель, промислові контролери. Time Sensitive Networking (TSN) у поєднанні з 5G URLLC дозволяє досягти детермінованої затримки < 1 мс для промислових IoT-систем, замінюючи традиційні PROFIBUS/PROFINET кабельні мережі у виробництві.



Рисунок 4.6 – Еволюція стільникових IoT-технологій від LTE до 6G (2016–2030)

4.5.2 6G та IoT майбутнього

6G, очікуване до 2030–2035 рр. та визначуване стандартом IMT-2030 (ITU-R), пропонує радикально нові IoT-можливості. Масивна щільність: 10 мільйонів

пристроїв на км² (проти 1 млн у 5G та ~60 тис. у 4G) — кожен предмет розумного міста, кожен болт на заводі. Терагерцовий діапазон (THz, 0,1–10 ТГц) — пікова пропускна здатність > 1 Тбіт/с для промислових роботів, хірургічних систем з телеприсутністю та голографічного зв'язку. Integrated Sensing and Communications (ISAC) — одна хвильова функція одночасно виконує радіозв'язок та радарне зондування з точністю до сантиметрів: базова станція є водночас мережею датчиків без додаткового обладнання. Non-Terrestrial Networks у 6G забезпечать безшовне покриття IoT на поверхні всієї Землі.

4.5.3 Edge Computing та TinyML

Edge Computing вирішує три фундаментальні проблеми IoT: затримка (мілісекунди замість 50–200 мс до хмари), пропускна здатність (локальна обробка зменшує трафік у хмару), конфіденційність (чутливі дані не залишають локальний контур). Триярусна архітектура: Device Edge (TinyML на MCU — класифікація аномалій без TX) → Near Edge (IoT-шлюз, edge server — агрегація + локальний ML) → Far Edge / MEC (на базовій станції 5G — ресурсоємні обчислення).

TinyML (Tiny Machine Learning) — нейронні мережі безпосередньо на MCU (64–512 КБ RAM, < 10 мВт): TensorFlow Lite Micro, Edge Impulse. Застосування: виявлення ключових слів (wake word), розпізнавання жестів, аномалії вібрації, класифікація зображень на embedded-камерах. TinyML переводить частину інтелекту на сам пристрій, зменшуючи кількість і обсяг передавань та ще більше подовжуючи термін служби батарейки.

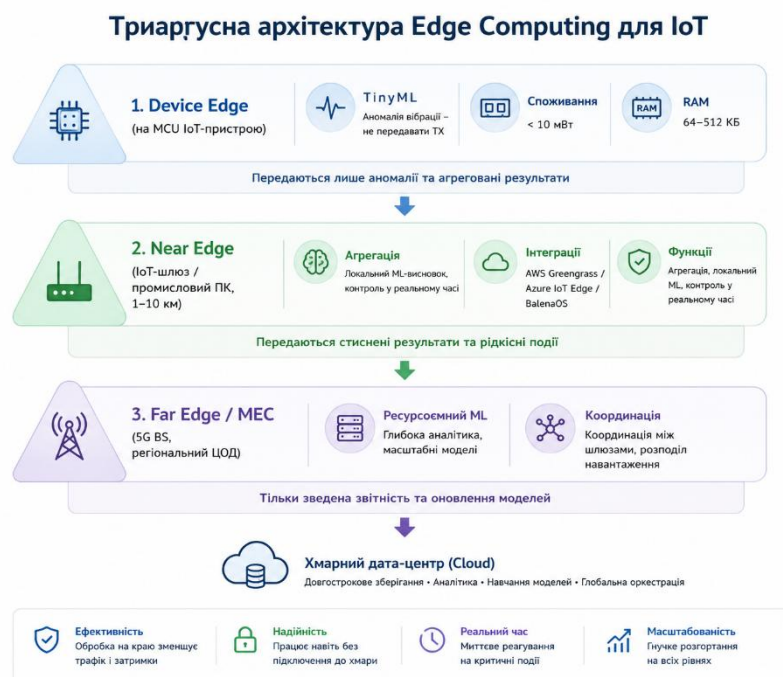


Рисунок 4.7 – Триархусна Edge Computing архітектура для IoT із TinyML

4.5.4 Digital Twin та AI/ML для IoT

Цифровий двійник (Digital Twin) — динамічна модель фізичного об'єкта, що в реальному часі оновлюється IoT-даними. GE Aviation: 50 000+ датчиків на двигун; Siemens: Digital Twin для автоматизованих виробничих ліній; Smart Singapore: Digital Twin всього міста для моделювання транспортних потоків та аварійного реагування. Генеративний AI та LLM відкривають: природномовне управління IoT (Alexa, Google Assistant, Siri); аномальне виявлення на основі аналізу телеметрії; автоматичну інтерпретацію IoT-даних для нетехнічних користувачів. Очікується, що до 2030 р. більшість промислових IoT-систем матимуть вбудовані AI-агенти для автономного аналізу та рутинних рішень.

Таблиця 4.10 – Ключові технологічні тренди розвитку IoT (2024–2035)

Тренд / технологія	Горизонт	Вплив на IoT	Приклади
5G Advanced (R18–20)	2024–2027	Ambient IoT; NTN; AI RAN	Sateliot; Lacuna Space; eRedCap
6G (IMT-2030)	2030–2035	10M пристр./км ² ; ISAC; THz	EU Hexa-X; Японія B5G; Samsung
Edge / MEC	2022–2028	Затримка <5 мс; локальний AI	AWS Greengrass; Azure IoT Edge
TinyML	2021–2027	AI на MCU; менше TX; довша батарея	Edge Impulse; TFLite Micro
Digital Twin	2020–2030	Цифровий аналог кожного об'єкта	GE; Siemens; Smart Singapore
NTN/Satellite IoT	2022–2028	Глобальне LoRa/NB-IoT покриття	Sateliot; Lacuna; SpaceX IoT
Matter/Thread 2.x	2024–2028	Єдина Smart Home екосистема	Apple; Google; Amazon; Samsung
Ambient IoT (R18)	2025–2030	Без батарейок; RF harvesting	3GPP R18; EU 6G programmes

4.5.5 Перспективи IoT в Україні

IoT-технології мають особливу стратегічну значимість для відновлення та модернізації критичної інфраструктури України. Пріоритетні напрями: масштабне розгортання систем AMR (NB-IoT для міських лічильників у підвалах; LoRaWAN для сільської інфраструктури), що автоматизує облік 10+ мільйонів лічильників; AgTech (точне землеробство на базі LoRaWAN), що здатне дати -20–30% витрат води та +15–20% врожайності; Smart Building у рамках відновлення — закладати IoT-інфраструктуру вже при будівництві та реконструкції; моніторинг критичної інфраструктури (водогони, теплотраси, електромережі) через LoRaWAN та NB-IoT.

Орієнтація на євроінтеграцію відкриває доступ до програм ЄС (Horizon Europe, Digital Europe Programme), що активно фінансують IoT-проекти. Гармонізація з нормами ЄС (директива RED, ETSI EN 303 204 для LPWAN), розробка національних IoT-стандартів для критичної інфраструктури та підготовка

кваліфікованих IoT-інженерів через вищу освіту — ключові інституційні завдання для розвитку IoT-сектора в Україні.

Таблиця 4.11 – Пріоритетні напрями розвитку IoT в Україні

Напрямок IoT в Україні	Технології	Потенціал
Smart Metering (лічильники)	NB-IoT, LoRaWAN	Автоматизація 10+ млн лічильників
Точне землеробство	LoRaWAN, Wi-Fi HaLow	-20–30% води; +15–20% врожайності
Smart City 2.0	LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M	Більше міст за прикладом Вінниці
Відновлення промисловості (IIoT)	ZigBee, LoRaWAN, 5G	Предиктивне обслуговування, ефективність
Smart Building (реконструкція)	ZigBee, BLE, Z-Wave	IoT у нових/відновлених будівлях
Моніторинг інфраструктури	LoRaWAN, NB-IoT	Водогони, теплотраси, електромережі

4.6 Висновки до розділу 4

Проведений порівняльний аналіз підтверджує, що оптимальна IoT-система завжди є гетерогенною — поєднує кілька радіотехнологій відповідно до вимог кожної підсистеми. BLE лідирує у носимих та медичних пристроях; ZigBee і Z-Wave — у Smart Home; LoRaWAN — у приватних LPWAN-мережах; NB-IoT — для smart metering із глибоким покриттям; LTE-M — для мобільних та голосових застосунків. Перспективи розвитку пов'язані з 5G Advanced (Ambient IoT, NTN, AI RAN), 6G (ISAC, 10M пристр./км²) та Edge Computing (TinyML, Digital Twin). Для України IoT відкриває значні можливості у сферах енергетики, агровиробництва, «розумних міст» та відновлення інфраструктури.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі виконано порівняльний аналіз бездротових радіотехнологій для мереж Інтернету речей. На підставі проведеного дослідження зроблено такі висновки.

1. У роботі вирішено всі поставлені завдання. Систематизовано теоретичні основи IoT: визначено архітектурні моделі (трирівнева, Edge/Fog/Cloud), кількісні вимоги до бездротових мереж та класифікацію технологій на групи WPAN/WLAN і LPWAN. Детально проаналізовано десять технологій — BLE 5.x, ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi 6, Wi-Fi HaLow, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M та 5G RedCap — та здійснено їх комплексне порівняння за критеріями енергоефективності, дальності, пропускної здатності, масштабованості та вартості.

2. Встановлено, що оптимальна IoT-система завжди є гетерогенною. BLE 5.x домінує у носимих та медичних пристроях завдяки струму сну менше 1 мкА та дальності до 1 км (Coded PHY). ZigBee є стандартом де-факто для великих mesh-мереж у будівлях (до 65 000 вузлів, PDR > 99%). Z-Wave із субгігагерцовим діапазоном 868/908 МГц забезпечує найвищу стійкість до завад і обов'язкову зворотну сумісність між поколіннями. Wi-Fi HaLow (802.11ah) поєднує дальність до 1 км, IP-підключеність і підтримку 8 192 клієнтів на точку доступу. LoRaWAN із CSS-модуляцією досягає MCL 157 дБ і терміну служби батарейки до 15 років при можливості розгортання приватних мереж без операційних витрат. Sigfox із UNB-модуляцією (140 пакетів/добу) забезпечує найнижчу вартість модуля (\$2–5). NB-IoT із рекордним MCL 164 дБ гарантує зв'язок у підвалах і колодязях при PSM-режимі. LTE-M є єдиною LPWAN-технологією з підтримкою хендовера та VoLTE для мобільних застосунків.

3. Сформульовано рекомендації щодо вибору технологій:

— Smart Home / будівля — ZigBee або Z-Wave для сенсорів, BLE для налаштування, Wi-Fi 6 для мультимедійних пристроїв; стандарт Matter v1.3 забезпечує інтероперабельність.

- Smart City — NB-IoT для підземних лічильників (MCL 164 дБ), LoRaWAN для паркувальних та екологічних датчиків, LTE-M для мобільних об'єктів.
- Промисловий IoT — Wi-Fi HaLow або WirelessHART для покриття цехів, BLE для локального збору даних.
- Аграрний IoT — LoRaWAN (дальність 5–15 км у відкритому просторі, нульові операційні витрати).
- Медичні та мобільні пристрої — BLE 5.x для локального зв'язку, LTE-M для широкозонного підключення.

4. Перспективи майбутніх досліджень пов'язані з такими напрямками: впровадження Ambient IoT (3GPP Release 18) з енергозбором для пристроїв без батарей; розвиток 5G Advanced і 6G (IMT-2030) з підтримкою 10 млн пристроїв/км²; інтеграція TinyML та Edge AI безпосередньо у IoT-вузли для зменшення трафіку; практичне тестування стандарту Matter в умовах українських міст у контексті відновлення інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравчук С. О., Афанасьєва О. М. Основи Інтернету речей та бездротових сенсорних мереж : навч. посіб. Київ : ДУТ, 2021. 164 с.
2. Кучерявий А. Є., Прокоп'єв А. В., Кучерявий Є. А. Самоорганізовані мережі та Інтернет речей. Київ : Наукова думка, 2020. 210 с.
3. Нікітюк Л. А. Бездротові технології передавання даних у телекомунікаційних системах : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 176 с.
4. Пулеко І. В. Архітектура та технології Інтернету речей : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 188 с.
5. Войтко В. В., Зінченко С. В. Бездротові мережі наступних поколінь: стандарти та протоколи. Харків : ХНУРЕ, 2020. 196 с.
6. Омельченко М. Т. Порівняльний аналіз технологій LPWAN для систем Інтернету речей. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка». 2022. № 79. С. 31–48.
7. Тимченко О. В., Борець Б. С. Концепція Інтернету речей та напрями її розвитку. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2023. № 1. С. 5–18.
8. Тимченко О. В., Борець Б. С. NB-IoT та LoRaWAN: порівняльний аналіз технологій. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2023. № 1. С. 12–24.
9. Шмігель Б. О. Розгортання приватних мереж LoRaWAN для аграрного IoT. Агроінженерія. 2021. № 4. С. 78–89.
10. Марченко О. В. Системи дистанційного обліку енергоресурсів на базі NB-IoT. Енергетика та електрифікація. 2022. № 5. С. 18–27.
11. Коваль В. О., Сидоренко Р. П. Застосування IoT у «розумних містах» України. Комп'ютерні науки та інженерія. 2023. № 1. С. 67–81.
12. Connectivity Standards Alliance. Matter Specification v1.3. Davis : CSA, 2024.
13. Connectivity Standards Alliance. Zigbee Specification, Revision 22. Davis : CSA, 2023.
14. LoRa Alliance. LoRaWAN Specification v1.0.4. Fremont : LoRa Alliance, 2020. 82 p.

15. LoRa Alliance. A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN. White Paper. Fremont : LoRa Alliance, 2015.
16. 3GPP. TS 36.331 v14: NB-IoT Radio Resource Control. Sophia Antipolis : 3GPP, 2017.
17. 3GPP. TR 38.875 v17: Study on Reduced Capability NR UEs. Sophia Antipolis : 3GPP, 2021.
18. 3GPP. TS 38.300 v17: NR; NR and NG-RAN Overall Description. Sophia Antipolis : 3GPP, 2022.
19. 3GPP. TR 22.989: Study on Ambient IoT in 5G Networks. Release 18. Sophia Antipolis : 3GPP, 2023.
20. Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth Core Specification Version 5.4. Kirkland : Bluetooth SIG, 2023.
21. Bluetooth Mesh Profile Specification v1.0.1. Bluetooth SIG, 2021.
22. IEEE. IEEE 802.15.4-2020: Low-Rate Wireless Networks. New York : IEEE, 2020.
23. IEEE. IEEE 802.11ah-2016: Wi-Fi HaLow. New York : IEEE, 2016.
24. ITU-T. Y.2060: Overview of the Internet of Things. Geneva : ITU, 2012.
25. ITU-R. IMT-2030 Framework Recommendation: ITU-R M.2160-0. Geneva : ITU, 2023.
26. Ericsson. IoT Connections Outlook 2030. Stockholm : Ericsson, 2024.
27. Ericsson. Ericsson Mobility Report, November 2023. Stockholm : Ericsson, 2023.
28. GSMA. Mobile IoT in the 5G Future. White Paper. London : GSMA, 2020.
29. Al-Fuqaha A. et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015. Vol. 17, No. 4. P. 2347–2376.
30. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 855–873.

31. Lin J. et al. A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy. *IEEE Internet of Things Journal*. 2017. Vol. 4, No. 5. P. 1125–1142.
32. Shi W. et al. Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2016. Vol. 3, No. 5. P. 637–646.
33. Mekki K. et al. A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-Scale IoT Deployment. *ICT Express*. 2019. Vol. 5, No. 1. P. 1–7.
34. Sinha R. S., Wei Y., Hwang S.-H. A Survey on LPWA Technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*. 2017. Vol. 3, No. 1. P. 14–21.
35. Haxhibeqiri J. et al. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 11. Art. 3995.
36. Palattella M. R. et al. Standardized Protocol Stack for the Internet of (Important) Things. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2013. Vol. 15, No. 3. P. 1389–1406.
37. Zanella A. et al. Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*. 2014. Vol. 1, No. 1. P. 22–32.
38. Gubbi J. et al. Internet of Things: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. *Future Generation Computer Systems*. 2013. Vol. 29, No. 7. P. 1645–1660.