ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ZIGBEE ТЕХНОЛОГІЇ В МЕРЕЖАХ ІОТ»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми «Комп'ютерна інженерія»
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ *Олександр ФЕДОРЕНКО*
(підпис) *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача*

Виконав: здобувач(ка) вищої освіти гр. КІД-42
Олександр ФЕДОРЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Борис КОНДРАТЮК
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Рецензент: _____
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Комп'ютерної інженерії
_____ Наталія ЛАЩЕВСЬКА
«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Федоренко Олександр Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Енергоефективні ZigBee технології в мережах IoT»
керівник кваліфікаційної роботи: Борис КОНДРАТЮК, викладач кафедри Комп'ютерної інженерії,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «24» лютого 2025р. №56
2. Строк подання кваліфікаційної роботи«05» червня 2025р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: науково-технічна література, стандарти та протоколи ZigBee, архітектура та компоненти мереж IoT, енергоспоживання та ефективність пристроїв, методи вимірювання та аналізу енергоефективності, тестування та порівняльний аналіз.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
    1. Огляд мереж IoT та роль безпровідних технологій
    2. Енергоефективність та архітектура протоколу ZigBee
    3. Методи оптимізації енергоефективності ZigBee
5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
    1. Мета, об'єкт, предмет дослідження
    2. Актуальність роботи
    3. Проблеми традиційних рішень у безпровідних мережах IoT
    4. Переваги ZigBee для енергоефективних мереж IoT
    5. Методи оптимізації енергоспоживання в ZigBee
    6. Методика тестування енергоспоживання кінцевих пристроїв ZigBee
    7. Апаратні та програмні засоби для тестування ZigBee
    8. Структура ZigBee мережі та підключені пристрої в Home Assistant
    9. Тестування енергоспоживання ZigBee та аналіз результатів
    10. Порівняння при тестуванні енергоспоживання Wi-Fi та ZigBee

11. Порівняння енергоспоживання безпровідних технологій
12. Висновки
13. Публікації та апробація роботи

6. Дата видачі завдання «24» лютого 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір даних	25.02-19.03.2025	
2	Обробка матеріалу	20.03-02.04.2025	
3	Розробка теоретичної частини	03.04-07.04.2025	
4	Енергоефективність та архітектура протоколу ZigBee	08.04-27.04.2025	
5	Методи оптимізації енергоефективності ZigBee	28.04-11.05.2025	
6	Висновки за результатами аналізу	12.05-15.05.2025	
7	Розробка презентації	16.05-26.05.2025	
8	Передзахист	27.05-29.05.2025	
9	Здача в деканат	30.05-05.06.2025	

Здобувач(ка) вищої освіти _____ Олександр ФЕДОРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Борис КОНДРАТЮК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 108 стор., 78 рис., 7 табл., 27 джерел.

Мета роботи – оптимізація енергоефективності технології ZigBee в мережах IoT за рахунок використання методів підвищення продуктивності та зниження енергоспоживання.

Об'єкт дослідження – процес функціонування технології ZigBee в мережах IoT.

Предмет дослідження – методи оптимізації енергоспоживання, фактори, що впливають на енергоефективність, та засоби підвищення продуктивності технології ZigBee в IoT-мережах.

Короткий зміст роботи: У роботі розглянуто роль безпровідних технологій у мережах IoT, зокрема місце та переваги ZigBee в порівнянні з іншими технологіями. Проаналізовано архітектуру та протокол ZigBee, визначено основні фактори, що впливають на його енергоефективність.

Проведено дослідження енергоспоживання ZigBee-мереж та методів його оцінки. Запропоновано підходи до оптимізації енергоефективності ZigBee на рівні протоколу та дизайну мережі, розглянуто перспективи розвитку та виклики впровадження цієї технології в майбутніх IoT-системах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: IOT, ZIGBEE, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ПРОТОКОЛ, АРХІТЕКТУРА, БЕЗПРОВІДНИЙ, ОПТИМІЗАЦІЯ, МЕРЕЖА, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, СЕНСОРИ.

ABSTRACT

Text part of the qualification work for obtaining a bachelor's degree: 108 pages, 78 figures, 7 tables, 27 sources.

The purpose of the work is to optimize the energy efficiency of ZigBee technology in IoT networks by using methods to increase productivity and reduce energy consumption.

The object of the study is the process of functioning of ZigBee technology in IoT networks.

The subject of the study is methods for optimizing energy consumption, factors affecting energy efficiency, and means of increasing the productivity of ZigBee technology in IoT networks.

Summary of the work: The work considers the role of wireless technologies in IoT networks, in particular the place and advantages of ZigBee compared to other technologies. The architecture and ZigBee protocol are analyzed, the main factors affecting its energy efficiency are identified.

A study of the energy consumption of ZigBee networks and methods for its assessment is conducted. Approaches to optimizing ZigBee energy efficiency at the protocol and network design levels are proposed, and the development prospects and challenges of implementing this technology in future IoT systems are considered.

KEY WORDS: IOT, ZIGBEE, ENERGY EFFICIENCY, PROTOCOL, ARCHITECTURE, WIRELESS, OPTIMIZATION, NETWORK, ENERGY CONSUMPTION, SENSORS.

ЗМІСТ

ВСТУП..... 9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД МЕРЕЖ ІОТ ТА РОЛЬ БЕЗПРОВІДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ..... 10
1.1 Основи Інтернету речей (IoT) 10
1.2 Розвиток та сфери застосування IoT 17
1.3 Безпровідні технології в архітектурі IoT 27
1.4 Порівняльний аналіз безпровідних технологій IoT 33
1.5 Особливості та переваги ZigBee. 42
РОЗДІЛ 2 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА АРХІТЕКТУРА ПРОТОКОЛУ ZIGBEE……...45
2.1 Архітектура та принципи роботи ZigBee..... 45
2.2 Вплив факторів на енергоефективність ZigBee 51
2.3 Аналіз споживання енергії ZigBee 62
2.4 Практичні експерименти з енергоефективності ZigBee..... 71
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ZIGBEE..... 96
3.1 Оптимізація роботи протоколу ZigBee. 96
3.2 Покращення дизайну мережі 103
3.3 Перспективи розвитку та виклики ZigBee..... 111
ВИСНОВКИ..... 117
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..…… 118
Додаток А. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)…….....121

ВСТУП

Інтернет речей (IoT) трансформує індустрії, створюючи розумні автоматизовані системи, які покладаються на ефективний безпровідний зв'язок. Від розумних будинків до промислової автоматизації та охорони здоров'я, мережі Інтернету речей повинні збалансувати масштабованість, надійність і енергоспоживання. Серед різноманітних безпровідних технологій ZigBee виділяється своїм низьким енергоспоживанням, можливостями сітчастої мережі та придатністю для пристроїв, що працюють від акумулятора, що робить його сильним вибором для енергоефективних додатків IoT.

Різні комунікаційні технології IoT відрізняються діапазоном, швидкістю передачі даних і енергоефективністю. Wi-Fi забезпечує високу швидкість, але споживає надмірну кількість енергії, тоді як Bluetooth є малопотужним, але має обмежений діапазон. LoRaWAN оптимізовано для великих відстаней, але йому бракує можливостей реального часу. ZigBee забезпечує оптимальний баланс між енергоефективністю, підключенням і масштабованістю, що робить критично важливим аналіз його механізмів енергозбереження та порівняння їх з іншими рішеннями.

На ефективність ZigBee впливають архітектура мережі, ролі пристроїв, топологія та методи енергозбереження. Координатори, маршрутизатори та кінцеві пристрої мають різні потреби в енергії, тоді як такі стратегії, як адаптивний цикл навантаження та інтелектуальна маршрутизація, допомагають мінімізувати енергоспоживання.

Оскільки IoT розширюється, оптимізація енергоефективності ZigBee є важливою. Нові рішення, такі як керування живленням на основі штучного інтелекту, збір енергії та вдосконалені напівпровідникові матеріали, пропонують нові способи підвищення екологічності. Вирішення проблем, пов'язаних із масштабованістю та перешкодами, допоможе продовжити термін служби пристрою та покращити продуктивність мережі.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД МЕРЕЖ ІОТ ТА РОЛЬ БЕЗПРОВІДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Основи Інтернету речей (IoT)

Інтернет речей, або ж Internet of Things (IoT), є технологічною парадигмою, яка об’єднує фізичні об’єкти з інтернетом, створюючи єдину мережу, де пристрої можуть взаємодіяти між собою без активного втручання людини. Якщо раніше пристрої функціонували окремо, а інтернет був більше засобом обміну інформацією між людьми, то тепер завдяки розвитку безпровідних технологій усе більше речей отримують можливість підключення до мережі, що дозволяє їм не тільки обмінюватися даними, а й виконувати певні функції в автоматичному режимі, використовуючи сенсори, виконавчі механізми, вбудовані системи й підключене програмне забезпечення. Така інтеграція забезпечує можливість функціонування не просто окремих пристроїв, а повноцінних екосистем, які керуються єдиною системою аналізу й управління даними. Інтернет речей усуває розрив між фізичним та цифровим світом, даючи можливість пристроям відчувати зміни в навколишньому середовищі, обробляти отримані дані й реагувати на них без втручання людини (див. рис. 1.1) [1].

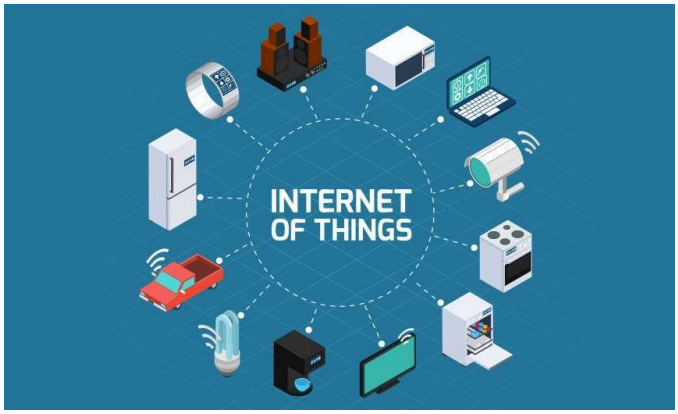


Рисунок 1.1 – Інтелектуальна мережа, що об’єднує пристрої

Ця концепція вже знайшла застосування у різних сферах: від побутових приладів, таких як розумні термостати, що автоматично контролюють температуру в будинку, до промислового обладнання, яке здійснює контроль над виробничими процесами. Завдяки IoT можливе створення розумних міст, де інфраструктура, транспорт і комунальні системи об'єднані в єдину інтелектуальну мережу, яка оптимізує використання ресурсів та підвищує рівень безпеки [2].

Однією з основних причин стрімкого розвитку інтернету речей є прогрес у сфері безпровідного зв'язку, який дозволяє підключати пристрої без використання фізичних кабелів, забезпечуючи мобільність та масштабованість мереж. Провідний зв'язок також відіграє свою роль, особливо у випадках, коли мова йде про хмарні обчислення, обробку великих обсягів даних та використання штучного інтелекту для глибокої аналітики інформації.

Інтернет речей уже змінює індустрію, надаючи можливість централізованого управління пристроями, отримання статистичних даних у реальному часі, автоматизації процесів і підвищення ефективності, що не лише спрощує роботу окремих систем, а й дозволяє значно знизити витрати, підвищити продуктивність та забезпечити новий рівень комфорту як у побуті, так і у промисловості.

Функціонування систем Інтернету речей базується на чотирьох основних процесах, які визначають принципи роботи IoT. Одним із ключових аспектів є об'єднання пристроїв, коли техніка не просто існує окремо, а з'єднується між собою та з навколишнім середовищем, створюючи єдину взаємопов'язану систему. У більшості випадків це відбувається через безпровідні мережі, що забезпечують мобільність та зручність комунікації. Визначаючи основні принципи функціонування IoT, можна виділити кілька ключових процесів, одним із яких є збір даних (див. рис. 1.2) [1-3].

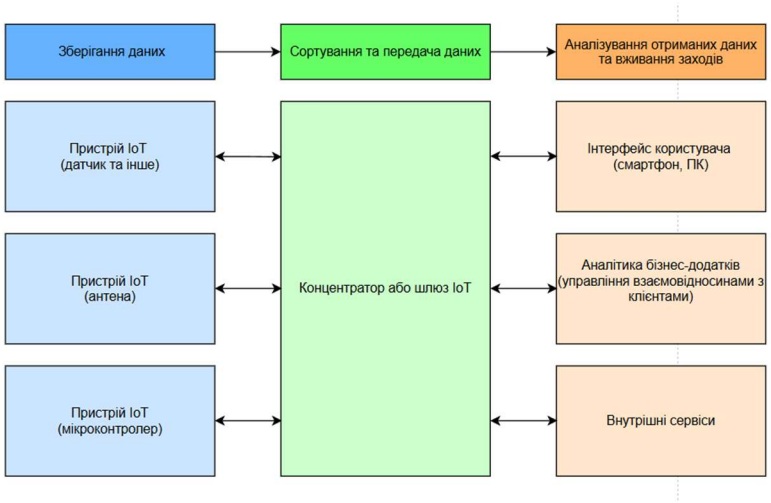


Рисунок 1.2 – Основні принципи функціонування IoT

Основні принципи функціонування IoT – збір даних. Збір даних (див. рис. 1.2) є першим і найважливішим етапом роботи систем Інтернету речей. Пристрої IoT оснащені численними датчиками, які дозволяють їм отримувати інформацію про навколишнє середовище, такі як температура, вологість, тиск, рівень освітлення, рух або навіть місцезнаходження. Датчики відіграють критичну роль у сприйнятті реальності пристроями та взаємодії з нею, надаючи їм здатність аналізувати ситуацію та адаптуватися відповідно до отриманих параметрів, що дозволяє зробити навіть найпростіший пристрій значно функціональнішим, оскільки він отримує можливість не лише виконувати конкретне завдання, а й накопичувати та обробляти інформацію для подальшого використання [2].

Як приклад, можна розглянути розумні термостати, які не просто вимірюють температуру, а й аналізують її зміни, автоматично коригуючи рівень нагріву або охолодження в приміщенні, залежно від отриманих даних. Ще одним прикладом є фітнес-трекери, що використовуються для моніторингу фізичної активності. Вони збирають інформацію про кількість пройдених кроків, спалених калорій, частоту серцевих скорочень і навіть якість сну. Фітнес-трекер фактично є частиною екосистеми IoT, оскільки не лише збирає дані, а й передає їх для подальшого аналізу, що дозволяє користувачам відстежувати свої результати та коригувати тренування [1, 3].

Основні принципи функціонування IoT – передача даних. Функціонування систем Інтернету речей включає кілька основних процесів, одним із яких є передача даних. Після збору інформації пристроями, такими як розумні термостати, фітнес-трекери та інші датчики, необхідно забезпечити передачу цих даних до відповідних систем обробки (див. рис. 1.2). Для цього використовуються різноманітні комунікаційні технології, серед яких безпровідні мережі займають ключове місце.

Передача даних в IoT здійснюється за допомогою кількох основних протоколів (див. рис. 1.3) [1-2, 4]:

1. *Wi-Fi* використовується для високошвидкісного підключення, що забезпечує передачу великого обсягу інформації, наприклад, у системах розумного будинку або для камер відеоспостереження.
2. *Bluetooth* підходить для обміну даними на коротких дистанціях і широко застосовується у фітнес-трекерах та інших носимих пристроях.
3. *Zigbee* є ефективним рішенням для мереж малого радіусу дії, що особливо корисно для інтеграції IoT у розумних будинках або промислових середовищах.
4. *LoRaWAN*, у свою чергу, забезпечує зв’язок на великих відстанях при низькому енергоспоживанні, що робить його ідеальним для розгортання IoT у масштабах міст, моніторингу екологічних параметрів або управління інфраструктурою.



Рисунок 1.3 – Популярні безпровідні протоколи у мережах IoT

Основні принципи функціонування IoT – обробка та аналіз даних. Ще одним важливим етапом функціонування IoT є обробка та аналіз отриманих даних. Після їх передачі інформація підлягає обробці на периферійних пристроях або хмарних сервісах, де застосовуються алгоритми машинного навчання, штучного інтелекту

та прогнозної аналітики, що дозволяє не лише зберігати дані, а й формувати на їх основі корисні висновки [3].

У сільському господарстві IoT-технології можуть аналізувати рівень вологості ґрунту та прогнозувати необхідність поливу. У промисловості аналітичні системи можуть виявляти потенційні несправності обладнання ще до їхнього виникнення, що підвищує ефективність та безпеку виробничих процесів. Прогнозна аналітика дозволяє заздалегідь реагувати на можливі проблеми, зменшуючи ризики аварій та збоїв у роботі систем [2-3].

Основні принципи функціонування IoT – автоматизація та прийняття рішень. Автоматизація та прийняття рішень є фінальним етапом функціонування IoT після збору, передачі, обробки та аналізу даних. На цьому етапі системи Інтернету речей виконують певні дії на основі обробленої інформації або надсилають рекомендації користувачам, що дозволяє оптимізувати роботу пристроїв і мінімізувати втручання людини, підвищуючи ефективність процесів [3].

Системи IoT можуть самостійно запускати необхідні процеси або надавати користувачам рекомендації щодо подальших дій. Наприклад, у сільському господарстві розумна система зрошення активує полив лише тоді, коли вологість ґрунту опускається нижче допустимого рівня, що дозволяє заздалегідь реагувати на зміни стану ґрунту, зберігаючи врожай і запобігаючи пересиханню землі [2-3].

Автоматизовані рішення активно використовуються і в транспорті. Підключені автомобілі можуть проводити діагностику в реальному часі ще до запуску двигуна. Бортовий комп’ютер аналізує стан усіх систем автомобіля, і якщо виявляється несправність, водій отримує повідомлення із зазначенням проблеми, що дозволяє уникнути потенційних аварій або серйозних поломок, запобігаючи небезпечним ситуаціям ще до їх виникнення [2].

Такі автоматизовані процеси зменшують вплив людського фактора, підвищують точність прийняття рішень та покращують ефективність різних сфер застосування IoT. Завдяки аналізу та прогнозуванню можливих проблем можна уникнути критичних ситуацій та значно оптимізувати роботу систем. Масове

впровадження IoT відкриває широкі можливості для розвитку автоматизованих рішень, роблячи технології ще більш адаптивними та корисними в різних галузях.

Роль IoT у цифровій трансформації. Інтернет речей відіграє ключову роль у цифровій трансформації, змінюючи індустрії та забезпечуючи інтелектуальну автоматизацію та прийняття рішень на основі даних. Його широке використання призвело до появи розумних середовищ, де взаємопов'язані системи оптимізують використання енергії, підвищують продуктивність та покращують взаємодію з користувачем (див. рис. 1.4) [1, 4].

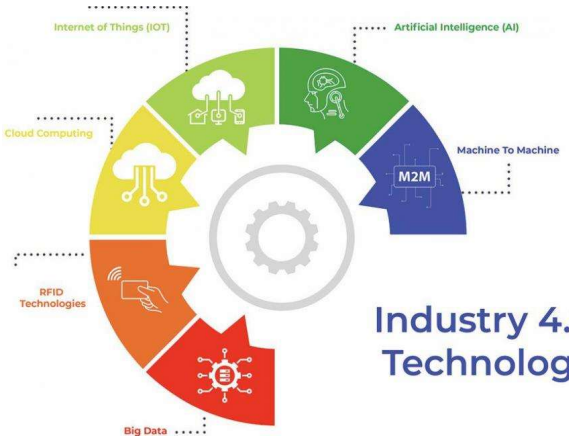


Рисунок 1.4 – IoT як частина «Industry 4.0»

Одним із найпомітніших напрямків впливу IoT є розумні міста. Ці технології трансформують міську інфраструктуру, покращують управління ресурсами, громадську безпеку та ефективність дорожнього руху. Прикладом можуть бути інтелектуальні системи управління трафіком, що використовують датчики для налаштування світлофорів у реальному часі, зменшуючи затори. Також існують інноваційні рішення щодо управління відходами, які оптимізують маршрути збору сміття на основі рівня заповнення баків, що допомагає зменшити витрати та вплив на довкілля. Окрему роль відіграють мережі моніторингу якості повітря, які надають дані про рівень забруднення та допомагають міським планувальникам приймати ефективні рішення.

Промислова автоматизація також активно впроваджує технології IoT. Індустрія 4.0 (див. рис. 1.4) базується на підвищенні ефективності, скороченні часу

простою та оптимізації виробничих процесів. Системи прогнозованого технічного обслуговування контролюють роботу обладнання та виявляють несправності до їх виникнення, зменшуючи ризики аварій та втрати часу. Автоматизовані виробничі лінії керуються в реальному часі, адаптуючись до рівня попиту та рівня запасів. Такі технології сприяли появі розумних фабрик, де роботи та датчики, керовані штучним інтелектом, виконують складні завдання без втручання людини. Прикладом подібної автоматизації є сортувальні термінали Нової Пошти, де пакунки обробляються безперервно 24/7.

У сфері охорони здоров'я та носимих технологій IoT (див. рис. 1.5) сприяє розвитку дистанційного моніторингу та персоналізованого лікування. Розумні пристрої, такі як фітнес-трекери та розумні годинники, відстежують фізичні показники, включаючи пульс, артеріальний тиск і якість сну. Підключені медичні пристрої передають дані лікарям у реальному часі, дозволяючи оперативно реагувати на зміни у стані пацієнтів. У лікарнях використовуються системи моніторингу пацієнтів, які забезпечують безперервний контроль життєвих показників, особливо у реанімаційних відділеннях. Окремо варто згадати розумні дозатори ліків, які нагадують пацієнтам про необхідність прийому препаратів, допомагаючи уникнути проблем, пов'язаних із нерегулярним лікуванням [1-3].



Рисунок 1.5 – Носимі пристрої IoT, що нас оточують

Ще одним важливим напрямком цифрової трансформації є розумні будинки та будівлі (див. рис. 1.6). IoT робить житлові приміщення більш безпечними, комфортними та енергоефективними. Розумні системи освітлення регулюють яскравість залежно від рівня природного освітлення та присутності людей. Камери

безпеки та дверні дзвінки з підтримкою IoT забезпечують контроль доступу та сповіщають власників у реальному часі про незвичайну активність. Розумні термостати оптимізують нагрівання та охолодження будинку на основі вподобань користувача та погодних умов [3-4].

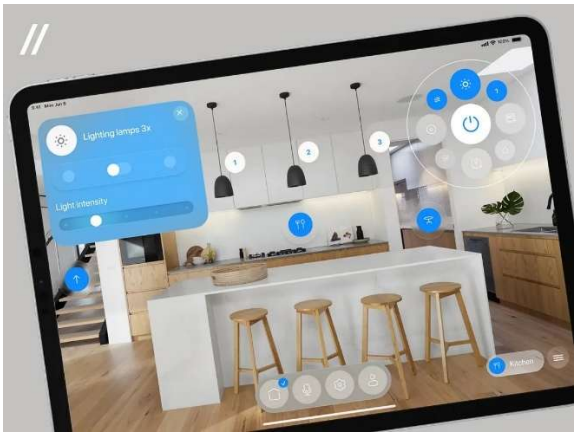


Рисунок 1.6 – Новий погляд у взаємодії між будинком

У сільському господарстві IoT сприяє точному землеробству, яке оптимізує використання ресурсів і підвищує врожайність. Розумні системи поливу активуються лише за потреби, зменшуючи витрати води. Дрони, оснащені IoT-технологіями, контролюють стан врожаю, виявляють шкідників і навіть можуть виконувати запилення. Датчики в ґрунті аналізують рівень вологи та поживних речовин, допомагаючи фермерам своєчасно приймати рішення щодо внесення добрив та збору врожаю [2-3].

1.2 Розвиток та сфери застосування IoT

Інтернет речей революціонізує спосіб взаємодії між пристроями, які обмінюються даними для різних завдань. Він змінює підхід до комунікації не лише між технологічними системами, а й між людьми, компаніями та технологіями загалом. Його стрімкий розвиток зумовлений прогресом у безпровідному зв’язку,

штучному інтелекті, нейронних мережах і хмарних обчисленнях. Саме хмарні обчислення відіграють ключову роль, адже вони дозволяють обробляти величезні обсяги даних, аналізувати інформацію в реальному часі та покращувати функціонування IoT-систем [3, 5].

Тісний зв'язок інтернету речей із сенсорними технологіями дає змогу пристроям не лише передавати інформацію, а й адаптуватися до змін у навколишньому середовищі. Впровадження IoT розширюється, охоплюючи все більше сфер, що призводить до підвищення ефективності, автоматизації процесів та покращення механізмів прийняття рішень.

Динамічний розвиток інтернету речей постійно змінює вплив технологій на різні галузі, включаючи ті, що раніше не використовували такі рішення, що дозволяє багатьом сферам отримувати додаткові переваги, які ще кілька років тому здавалися недосяжними. IoT формує комплексні рішення, що трансформують традиційні підходи та відкривають нові можливості для бізнесу, промисловості, медицини, транспорту, міського планування та багатьох інших сфер [5].

Динаміка розвитку IoT. Динаміка розвитку інтернету речей визначається поєднанням технологічних досягнень і мінливих вимог ринку. Стрімке впровадження IoT зумовлене кількома ключовими факторами, які впливають на його масштабування та адаптацію в різних сферах. Одним із таких факторів є мініатюризація та зниження вартості обладнання. Завдяки розробці менших, потужніших і економічно ефективних датчиків вдалося значно розширити можливості IoT. У минулому висока вартість і великі розміри пристроїв обмежували їхнє розгортання, адже громіздкі конструкції потребували багато енергії та були складними в установці.

Сучасні датчики мікроелектромеханічних систем (MEMS) (див. рис. 1.7), енергоефективні мікропроцесори та компактні комунікаційні модулі зробили пристрої IoT більш доступними та масштабованими, що впливає не лише на промислові рішення, а й на масовий ринок. Наприклад, пристрої розумного будинку, такі як Amazon Echo або Google Nest, використовують недорогі сенсори для моніторингу та автоматизації домашнього середовища. Вони прості у

використанні, швидко налаштовуються і приваблюють нових користувачів, які раніше не мали справи з подібною технікою [6].

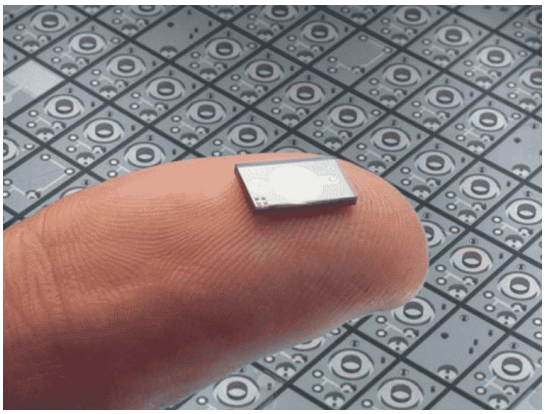


Рисунок 1.7 – Новий погляд у взаємодії між будинком

Ще одним важливим фактором динамічного розвитку IoT є прогрес у сфері безпровідного зв’язку. Саме розвиток безпровідних технологій дозволив IoT розширюватися такими швидкими темпами, адже складно уявити систему, що підключається виключно через кабелі. Провідне з’єднання все ще використовується в деяких випадках, наприклад, коли потрібна максимальна швидкість передачі даних, але в більшості ситуацій безпровідні рішення є значно ефективнішими та зручнішими.

Значний прорив у цій сфері забезпечили мережі 5G, що надають високошвидкісне з’єднання з низькою затримкою – це відкрило можливості для застосування IoT у реальному часі, зокрема в автономних транспортних засобах, розумних заводах і логістичних системах. 5G поєднує в собі високу швидкість, енергоефективність та масштабованість, що робить його ідеальним для IoT-рішень. Окрім 5G, важливу роль відіграють також глобальні мережі з низьким енергоспоживанням, такі як LoRaWAN та NB-IoT. Вони забезпечують зв’язок для пристроїв, що працюють на великих територіях, наприклад, у сільському господарстві, логістиці або промисловому моніторингу, де необхідно збирати дані на розподілених ділянках [2, 4-5].

Для більш локальних застосувань використовуються протоколи Zigbee та Bluetooth Low Energy (BLE), які оптимізовані для роботи в межах приміщень. Вони широко застосовуються в розумних будинках, системах охорони здоров'я та інших рішеннях, де необхідна ефективна взаємодія пристроїв на невеликих відстанях. Використання таких технологій дозволяє зменшити енергоспоживання пристроїв, що, своєю чергою, робить їх більш компактними та автономними [4].

Крім досягнень у технологіях безпровідного зв'язку, важливим чинником розвитку інтернету речей є інтеграція штучного інтелекту та периферійних обчислень. Незважаючи на широке впровадження ШІ, не варто недооцінювати його значення в поєднанні з машинним навчанням і нейронними мережами. Алгоритми ШІ дозволяють пристроям IoT ефективно аналізувати та обробляти великі масиви даних, отриманих від простих датчиків. Самі по собі датчики не є складними, проте їхні дані потребують обробки, яку забезпечують алгоритми штучного інтелекту [6-7].

Граничні обчислення набувають особливого значення, оскільки більшість пристроїв IoT об'єднуються в масштабні мережі для збору та аналізу даних. Щоб уникнути перевантаження серверів і мінімізувати затримки, обробку даних варто здійснювати ближче до джерела – безпосередньо на пристроях або спеціальних шлюзах інтернету речей. Зазвичай такі шлюзи об'єднують кілька пристроїв, а вже потім з'єднуються з маршрутизаторами або іншими вузлами мережі, що не лише зменшує навантаження на сервери, а й знижує залежність від хмарних сервісів, що сприяє підвищенню безпеки, зменшенню затримок і скороченню витрат на платні підписки [7].

Яскравим прикладом застосування ШІ в IoT є прогнозоване технічне обслуговування на виробництвах. За допомогою алгоритмів машинного навчання датчики можуть виявляти ознаки несправності ще на ранніх стадіях, запобігаючи небажаним зупинкам обладнання, що дозволяє скоротити час простою, зменшити експлуатаційні витрати та уникнути незапланованих поломок, які могли б призвести до значних фінансових втрат [1, 2, 7].

Поряд із периферійними обчисленнями хмарні сервіси та аналіз великих даних також відіграють ключову роль у розвитку IoT. У деяких випадках економити на обчислювальних потужностях недоцільно, особливо коли йдеться про обробку даних у великих масштабах. Для таких завдань використовуються хмарні платформи, такі як Amazon Web Services (AWS) IoT, Microsoft Azure IoT та Google Cloud IoT. Ці компанії (див. рис. 1.8) постійно вдосконалюють свої рішення для обробки даних, що дозволяє аналізувати інформацію в масштабах, які неможливо було уявити раніше [1, 7-8].

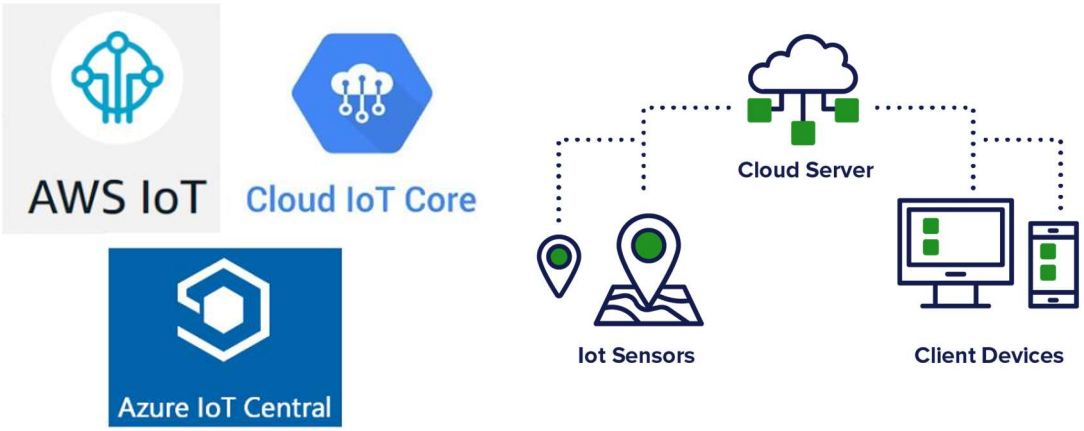


Рисунок 1.8 – Хмарні рішення та їх взаємодія з IoT:
AWS IoT, Cloud IoT Core, Azure IoT Central

Хмарні обчислення (див. рис. 1.8) мають особливе значення для таких сфер, як енергетика. Наприклад, розумні енергетичні мережі використовують IoT для аналізу даних про споживання електроенергії та оптимізації її розподілу – це не лише підвищує ефективність роботи енергетичних систем, а й сприяє зменшенню енергетичних втрат [2, 8].

Ще одним важливим фактором розвитку інтернету речей є зростання попиту на автоматизацію. Уряди та великі організації впроваджують IoT для підвищення ефективності, безпеки та стійкості інфраструктури. Попит на автоматизовані рішення зростає у промисловості, охороні здоров’я та транспорті, де необхідний постійний моніторинг і оперативний аналіз даних. У деяких випадках йдеться про

обробку великих обсягів інформації, а в інших – про контроль навіть незначних показників, що все одно вимагає надійної системи збору та аналізу даних [1-3, 5].

Основні напрямки використання IoT. Основні напрямки використання IoT охоплюють широкий спектр галузей, змінюючи підхід до моніторингу, управління та організації процесів. Інтернет речей стає невід'ємною частиною багатьох сфер, впливаючи на повсякденне життя та масштабні виробничі процеси (див. рис. 1.9) [1-3, 9].

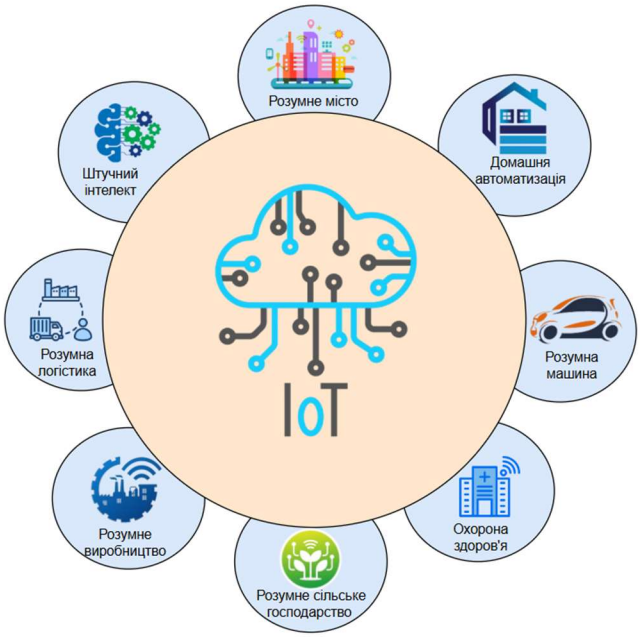


Рисунок 1.9 – Основні напрямки охоплення IoT

Одним із ключових напрямків є промисловий інтернет речей (Industrial IoT). Він охоплює автоматизацію виробництва, логістику та технічне обслуговування на основі датчиків, прогнозуючи можливі несправності обладнання. Моніторинг у реальному часі дозволяє контролювати процеси, аналізувати великі масиви даних та швидко реагувати на зміни. Прогнозоване технічне обслуговування запобігає дорогим поломкам, що особливо важливо для безперервного виробництва [9].

Логістика також інтегрує IoT, використовуючи RFID-відстеження та GPS-моніторинг (див. рис. 1.10-1.11), що забезпечує прозорість та ефективність ланцюгів постачання, що дозволяє контролювати доставку товарів, оптимізувати маршрути та зменшувати втрати [10].



Рисунок 1.10 – RFID-відстеження та GPS-моніторинг
у покращенні логістичних процесів [11]

Автономне виробництво – ще одна складова промислового інтернету речей. Розумні фабрики використовують роботизовані системи, керовані алгоритмами штучного інтелекту, що дозволяє оптимізувати виробничі процеси в реальному часі, підвищуючи продуктивність та якість продукції. Прикладом є компанія General Electric (GE), яка застосовує цифрових близнюків – віртуальні моделі фізичних машин для оптимізації процесів та раннього виявлення збоїв (див. рис. 1.11) [10-11].

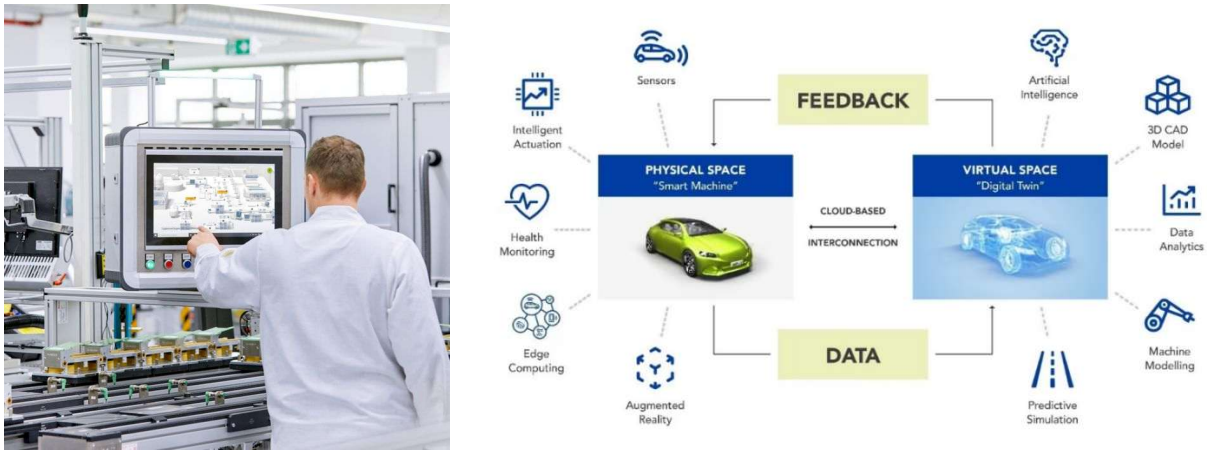


Рисунок 1.11 – Датчики на виробництві та цифрові двійники
General Electric для попереднього уникнення збоїв [11]

Не менш важливим напрямком є розумні будинки, що зосереджуються на енергоефективності та безпеці. Інтернет речей дозволяє автоматизувати управління

будинком, інтегруючи розумні прилади, системи безпеки та енергозберігаючі рішення [1-2, 4-6].



Рисунок 1.12 – Атрибути систем розумного будинку

Домашні системи безпеки включають датчики руху, камери з підтримкою IoT та розумні замки, що підвищують рівень безпеки. Автоматизоване освітлення та керування побутовою технікою дозволяє дистанційно контролювати освітлення та інші пристрої. Розумні лампи та голосові помічники інтегруються в екосистему розумного будинку, забезпечуючи комфорт та зручність (див. рис. 1.12) [5-6].

Ще одним прикладом є автоматизовані системи HVAC (опалення, вентиляція та кондиціонування повітря). Вони регулюють температуру на основі даних про присутність людей у приміщенні, зменшуючи витрати на електроенергію – це враховує не лише мешканців будинку, а й домашніх тварин, створюючи комфортне середовище для всіх (див. рис. 1.13) [2, 5-6, 21].



Рисунок 1.13 – Взаємодія системи HVAC на рівні розумного будинку [21]

Інтернет речей трансформує також галузь охорони здоров'я – медицину, забезпечуючи безперервний контроль за станом пацієнтів, персоналізоване лікування та аналіз даних за допомогою алгоритмів штучного інтелекту. Особливе значення мають носимі пристрої для здоров'я, такі як фітнес-браслети, смарт-годинники (наприклад, Apple Watch, Fitbit), які відстежують життєві показники, рівень активності, режим сну та допомагають формувати загальну картину здоров'я (див. рис. 1.14) [1-2, 5, 7-8, 22].



Рисунок 1.14 – Локальний та хмарний аналіз даних з носимих пристроїв [22]

Дистанційний моніторинг пацієнтів є ще одним важливим напрямком, що дозволяє лікарям стежити за людьми з хронічними захворюваннями навіть вдома. Підключені до IoT пристрої фіксують показники здоров'я та передають дані в медичні центри, що дає змогу лікарям вчасно виявляти можливі ускладнення та приймати рішення, зменшуючи необхідність постійних візитів до лікарні (див. рис. 1.14) [1-2].

Розумне медичне обладнання, таке як лікарняні ліжка, інфузійні насоси та діагностичні інструменти з підтримкою IoT, покращує догляд за пацієнтами та допомагає зменшити вплив людського фактора, а також знижує навантаження на лікарню та робить лікування більш гнучким [1-2, 7-8].

Ще одна важлива сфера застосування IoT — сільське господарство (див. рис. 1.15). Тут технології допомагають оптимізувати ресурси та підвищувати

врожайність через концепцію точного землеробства. Датчики ґрунту здійснюють безперервний моніторинг рівня вологості, температури та поживних речовин, що дає змогу автоматизувати системи поливу та внесення добрив, що сприяє раціональному використанню води та хімічних препаратів, що знижує витрати та мінімізує вплив на довкілля [1-2, 5-7, 12].

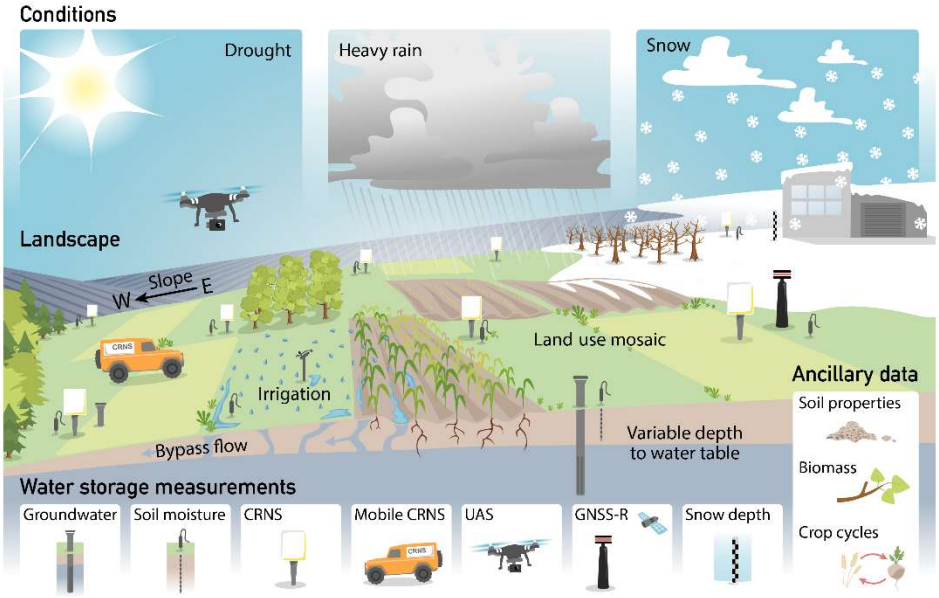


Рисунок 1.15 – Масштаби можливої інтеграції IoT у сільському господарстві [12]

Ще однією значною галуззю впровадження IoT є концепція розумного міста, яка спрямована на підвищення ефективності міської інфраструктури, транспорту, енергозбереження та управління відходами. Дорожній рух можна оптимізувати за допомогою сенсорів, які регулюють світлофори на основі аналізу потоку транспорту, що зменшує затори. Прикладом успішного впровадження IoT у міську інфраструктуру є Барселона, де розумне вуличне освітлення адаптується до руху пішоходів і транспорту, знижуючи енергоспоживання та підвищуючи ефективність використання ресурсів (див. рис. 1.16) [1-8, 13].



Рисунок 1.16 – Впровадження адаптивного освітлення через мережу IoT на рівні цілого міста

У такому ключі, інтернет речей змінює підхід до медицини, сільського господарства та управління містами, створюючи більш ефективне, безпечне та технологічно розвинене середовище для життя [1-13].

1.3 Безпровідні технології в архітектурі IoT

Безпровідні технології є ключовим фактором розвитку архітектури IoT. Вони забезпечують з’єднання пристроїв без потреби у фізичних кабелях, що значно спрощує розгортання та масштабування мереж. Завдяки цьому інтернет речей набуває гнучкості, дозволяючи впроваджувати інноваційні рішення в різних сферах, де раніше неможливо було уявити використання таких технологій.

Важливість безпровідного зв’язку для IoT. Важливість безпровідного зв’язку в IoT зумовлена тим, що всі пристрої, датчики та хмарні системи мають обмінюватися даними в режимі реального часу, що дозволяє не тільки здійснювати моніторинг, але й приймати швидкі та точні рішення, що критично важливо для

автоматизації багатьох процесів. Безпровідний зв'язок забезпечує безперебійну комунікацію, усуваючи обмеження, які накладає фізична інфраструктура [4, 1-3].

Однією з основних переваг безпровідних технологій є гучкість і мобільність. На відміну від провідних рішень, які вимагають прокладання кабелів, безпровідні мережі дозволяють швидко розгортати пристрої IoT у віддалених або важкодоступних місцях, що особливо актуально для таких сфер, як розумне сільське господарство, логістика та розумні міста (див. рис. 1.17). Наприклад, у сільському господарстві безпровідні датчики вологості можуть моніторити стан ґрунту на великих територіях без потреби у складній інфраструктурі. У логістиці та постачанні GPS-трекери дозволяють відстежувати товари в реальному часі, а у розумних містах безпровідні камери, датчики паркування та освітлення підключаються до єдиної мережі, що підвищує ефективність управління міською інфраструктурою [1-3, 4, 12].

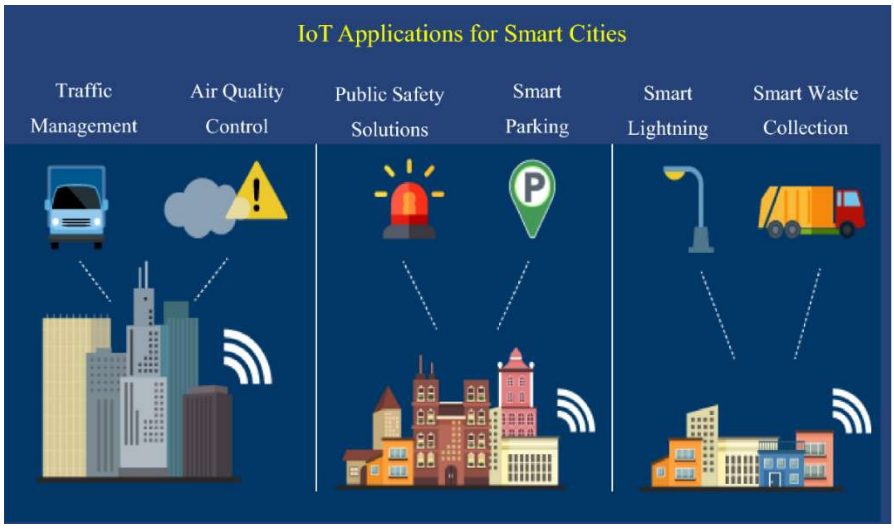


Рисунок 1.17 – Забезпечення мобільності та гнучкості у масштабованому розгортанні шляхом безпровідних IoT-мереж [23]

Ще однією важливою перевагою є масштабованість. Безпровідні IoT-мережі легко розширюються, дозволяючи підключати нові пристрої без значних змін у наявній інфраструктурі, що особливо корисно для промислової автоматизації, де виробничі лінії можуть оновлюватися та доповнюватися новими сенсорами без необхідності складного монтажу. У розумних містах така масштабованість дає

змогу підключати тисячі нових пристроїв, таких як датчики якості повітря або автоматизовані системи регулювання трафіку [2, 4].

Віддалене підключення та можливість роботи в реальному часі – ще одна ключова перевага безпровідного IoT-зв'язку (див. рис. 1.18). Завдяки хмарним технологіям та спеціальним додаткам пристрої IoT можуть працювати не тільки в межах локальних мереж, а й бути доступними для керування та моніторингу з будь-якої точки світу, що критично важливо для таких сфер, як охорона здоров'я, автономні транспортні системи та промисловість. Наприклад, у медицині віддалений моніторинг стану пацієнтів через IoT-пристрої дозволяє передавати дані лікарям у реальному часі, що скорочує потребу у фізичних візитах до лікарень. У транспортному секторі безпровідний зв'язок забезпечує постійний обмін даними між автомобілями та інфраструктурою, що є основою для розвитку автономного транспорту [1-4, 6, 8].



Рисунок 1.18 – Віддалений доступ до IoT мереж

Основні критерії вибору комунікаційної технології. Вибір правильної комунікаційної технології – це не просто вибір між безпровідними чи провідним рішеннями, а ретельний аналіз продуктивності, умов використання та специфіки застосування. Ключові фактори, які впливають на рішення, включають енергоефективність, дальність передачі, швидкість обміну даними, масштабованість і безпеку.

Енергоефективність є одним із головних критеріїв, особливо для пристроїв Інтернету речей, що працюють на батареях. Важливо забезпечити тривалу автономну роботу – не на кілька місяців, а на роки, без необхідності частої підзарядки чи заміни батарей. Технології, оптимізовані для низького енергоспоживання, включають Zigbee та Bluetooth Low Energy (BLE). Вони широко використовуються в розумних будинках, носимих пристроях і навіть у промисловій автоматизації, оскільки мають низьке енергоспоживання та можуть працювати з компактними батареями. Для більшого радіусу дії підходять LoRaWAN та NB-IoT. Вони забезпечують низьке енергоспоживання при передачі даних на значні відстані, що робить їх ідеальними для моніторингу навколишнього середовища, інтелектуального вимірювання та інфраструктурних рішень. Наприклад, LoRaWAN часто використовується в системах розумного паркування, передаючи інформацію про зайнятість місць із мінімальними енергозатратами (див. рис. 1.19).

Дальність передачі даних є ще одним важливим критерієм вибору – технології можна розділити за дальністю дії (див. рис. 1.19) [4]:

1. *Короткий радіус* (до 100 м) охоплює Bluetooth, Zigbee та Wi-Fi. Вони підходять для домашньої автоматизації, носимих пристроїв і короткодистанційної комунікації, наприклад, між смартфоном та фітнес-браслетом. Zigbee ефективний у побудові розумних будинків, а Wi-Fi частіше використовується для систем безпеки, таких як відеоспостереження, де важлива висока швидкість передачі даних.

2. *Середній радіус* (від 100 м до 10 км) охоплює NB-IoT, LTE-M і Wi-Fi HaLow. Ці технології використовуються у промисловості, сільському господарстві та інших сферах, де потрібен баланс між дальністю та енергоспоживанням. Вони застосовуються для моніторингу великих територій, таких як фермерські угіддя чи промислові об’єкти.

3. *Дальній радіус* (від 10 км і більше) включає LoRaWAN і Sigfox. Вони використовуються у рішеннях для розумних міст, віддаленого моніторингу інфраструктури та великих сільськогосподарських об’єктів. Наприклад, у великих

фермах датчики LoRaWAN дозволяють передавати інформацію на відстань понад 10 км без значного енергоспоживання.

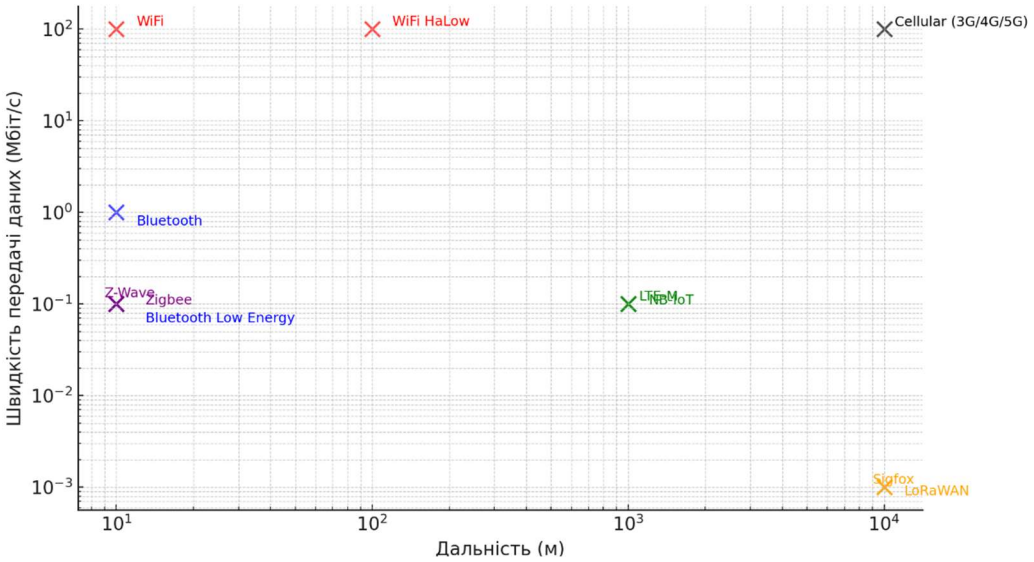


Рисунок 1.19 – Швидкість та дальність передачі популярних безпровідних технологій для IoT мереж

Остаточний вибір технології залежить від конкретних потреб [1-4, 10-12]:

— для домашніх рішень часто достатньо Zigbee або Wi-Fi;

— для промислового та міського моніторингу краще підходять LoRaWAN або NB-IoT.

Важливим фактором є також вартість впровадження – наприклад, організація мережі LoRaWAN потребує дорожчих шлюзів і модулів порівняно з Zigbee.

Коли мова йде про дальність передачі даних, можна сказати, що зі збільшенням радіусу дії безпровідної технології швидкість передачі значно падає. Тобто, чим далі може передаватися сигнал, тим нижчою буде швидкість передачі даних, інколи до менш ніж 1 Мб/с або навіть до рівня кілобітів за секунду, що не завжди підходить, наприклад, для систем відеоспостереження чи інших рішень, де потрібна висока швидкість. В таких випадках більш вигідно використовувати технології на кшталт 5G або Wi-Fi, які забезпечують високу швидкість, але зменшують радіус дії (див. рис. 1.19) [4].

Однак, якщо мова йде про датчики, то вони не потребують великих швидкостей передачі даних. Багато сенсорів здатні працювати навіть із швидкістю 10-30 КБ/с, а середній показник для таких пристроїв становить близько 250 Кбіт/с, і це тому, що інформація, яку вони передають, має інший характер – вона менш об’ємна, більш стиснена, а отже, не потребує високих швидкостей. Саме тому для таких пристроїв підходять протоколи на зразок LoRaWAN чи NB-IoT, які працюють на великих дистанціях, але мають низькі швидкості передачі [4, 6].

Крім швидкості та дальності, важливим фактором при виборі технології для IoT є масштабованість мережі – можливість підключати велику кількість пристроїв. Чим більше пристроїв може одночасно працювати в мережі, тим краще вона підходить для Інтернету речей. Наприклад, Wi-Fi тут програє, оскільки він не призначений для обслуговування тисяч або мільйонів пристроїв. Водночас Zigbee та Bluetooth Mesh мають сітчасту архітектуру, що дозволяє їм ефективно працювати у великих приміщеннях чи навіть у масштабах міста [4].

Якщо ж мова йде про масштабні розгортання на рівні міста або промислових об’єктів, найкращими рішеннями є LoRaWAN та NB-IoT. Вони працюють на великих відстанях, можуть підключати велику кількість пристроїв і при цьому не потребують високих швидкостей передачі даних. Наприклад, розумний будинок може містити сотні датчиків освітлення, замків чи кліматичних систем, які працюють через Zigbee. Вони формують мережу, де пристрої можуть комунікувати між собою, передавати дані без необхідності використовувати Wi-Fi або мобільні мережі (див. рис. 1.20) [4].



Рисунок 1.20 – Популярні датчики у IoT мережах

Ще одним ключовим критерієм вибору технології є безпека та надійність передачі даних. Системи Інтернету речей повинні бути захищені від кібератак, втрати інформації чи несанкціонованого доступу. Технології, такі як Wi-Fi та 5G, забезпечують високу ступінь шифрування, але мають високе енергоспоживання, що не завжди зручно для IoT. У свою чергу, Zigbee та Bluetooth мають базові механізми безпеки, але можуть бути вразливими до перешкод. Для великих мереж, таких як LoRaWAN та NB-IoT, безпека забезпечується наскрізним шифруванням, що дозволяє передавати дані на великі відстані без ризику їх перехоплення. Наприклад, у медичних пристроях, які передають життєво важливі дані пацієнтів, особливо важливо використовувати надійне шифрування для захисту інформації. Тому при виборі технології для IoT важливо враховувати не лише швидкість і дальність, а й масштабованість, безпеку та специфічні вимоги до пристроїв у кожному конкретному випадку [1-6, 8].

1.4 Порівняльний аналіз безпровідних технологій IoT

Інтернет речей є складною екосистемою, що охоплює пристрої з різними вимогами до енергоспоживання, швидкості передачі даних та стабільності з’єднання. Деякі пристрої можуть функціонувати на мінімальному рівні енергоспоживання та передавати невеликі обсяги даних, тоді як інші потребують високої пропускної здатності та швидкої передачі інформації, і це визначає необхідність детального аналізу існуючих безпровідних протоколів, які використовуються у цій сфері.

Характеристики базових безпровідних технологій IoT. Для ефективного використання безпровідних технологій важливо розглянути їхні основні характеристики, переваги та недоліки, а також критерії вибору найбільш прийнятного рішення залежно від конкретних умов застосування. Враховуючи

різноманіття завдань, які вирішує Інтернет речей, правильний вибір технології має вирішальне значення для стабільності та ефективності мережі (див. табл. 1.1) [4].

Таблиця 1.1 – Характеристики базових безпровідних технологій IoT

Технології	**Швидкість передачі даних**	**Діапазон**	**Споживана потужність**	**Топологія**	**Випадки використання**
Wi-Fi	До 9,6 Гбіт/с (Wi-Fi 6)	До 100 м	Високий	Зірка	Розумні будинки, офіси, промислова автоматизація
Bluetooth (BLE)	До 2 Мбіт/с	10-100м	Низький	Точка-точка, сітка	Носимі пристрої, пристрої для розумного дому, промислові датчики
ZigBee	250 Кбіт/с	10-100м	Дуже низький	Сітка	Розумні будинки, промислова автоматизація, охорона здоров’я

Продовження таблиці 1.1 – Характеристики базових безпровідних технологій IoT

Технології	**Швидкість передачі даних**	**Діапазон**	**Споживана потужність**	**Топологія**	**Випадки використання**
LoRaWAN	0,3-50 Кбіт/с	2-15 км (місто), 40 км (село)	Ультранизький	Зірка	Розумні міста, сільське господарство, відстеження активів

Безпровідні технології, що застосовуються в Інтернеті речей (IoT), оптимізовані для різних галузей і сценаріїв використання. Серед найпоширеніших можна виділити Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee та LoRaWAN. Хоча всі ці технології застосовуються у сфері IoT, найбільш пристосованими саме до концепції Інтернету речей є Zigbee та LoRaWAN [4, 1-3].

Wi-Fi – одна з найпоширеніших безпровідних технологій, що забезпечує високу швидкість передачі даних і має добре розвинену інфраструктуру. Працює у діапазонах 2,4 ГГц, 5 ГГц та 6 ГГц, що дозволяє обирати оптимальний варіант залежно від потреб. Wi-Fi 6 може досягати швидкості до 9,6 Гбіт/с, а Wi-Fi 7 – навіть до 40 Гбіт/с, хоча ці показники є теоретичними. У приміщенні дальність дії Wi-Fi сягає до 100 м, однак на неї можуть впливати перешкоди, такі як залізобетонні стіни (див. табл. 1.1). Основним недоліком Wi-Fi є високе енергоспоживання, що робить його непридатним для пристроїв IoT, які працюють на батарейках. Пристрої, що використовують Wi-Fi, швидко розряджаються, що може призвести до витоку хімічних елементів з батарей і виходу обладнання з ладу. Крім того, Wi-Fi-сигнал на високих частотах (5 ГГц, 6 ГГц) має обмежений радіус дії, що може ускладнити покриття великих приміщень. Ще одним недоліком є

перенавантаження мережі у разі підключення великої кількості пристроїв, що критично для розумного будинку (див. рис. 1.21) [4].



Рисунок 1.21 – Безпровідна технологія Wi-Fi у IoT мережах

Попри всі мінуси, Wi-Fi залишається важливим рішенням для розумних будинків, особливо для камер відеоспостереження, які потребують високої пропускної здатності. Проте більшість IoT-пристроїв, таких як розумні розетки та сенсори, використовують діапазон 2,4 ГГц, який уже є значно перевантаженим [4, 1-3, 6].

Ще однією популярною технологією є Bluetooth, що існує у двох варіантах: класичний Bluetooth та Bluetooth Low Energy (BLE). Класичний Bluetooth забезпечує стабільний зв’язок на невеликих відстанях і використовується для навушників, колонок та інших персональних пристроїв. BLE оптимізований для IoT-застосунків завдяки низькому енергоспоживанню. Bluetooth має невеликий радіус дії – у приміщеннях це зазвичай не більше 10 м. Деякі пристрої можуть працювати на відстані до 100 м, але лише у відкритих просторах без перешкод. Bluetooth 5.0 та новіші версії підтримують сітчасту мережу, що покращує його придатність для IoT (див. табл. 1.1). Серед переваг Bluetooth – низьке енергоспоживання, що робить його ідеальним для носимих пристроїв і IoT-сенсорів. Використовується у фітнес-трекерах, смарт-годинниках, медичних

пристроях та розумних будинках. Основні недоліки – обмежений радіус дії та нижча швидкість передачі даних у порівнянні з Wi-Fi (див. рис. 1.22) [4].

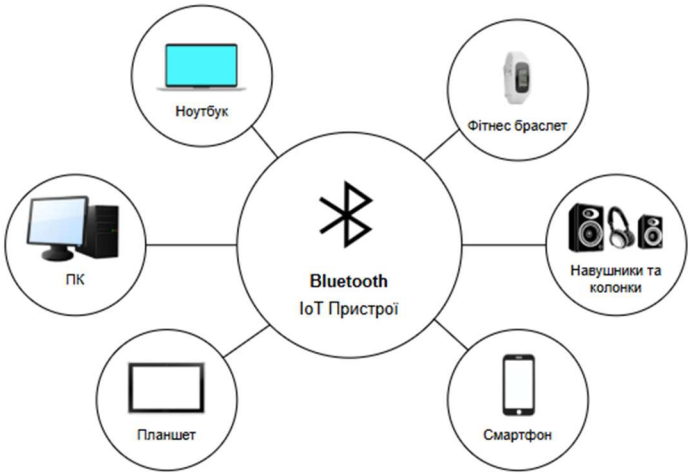


Рисунок 1.22 – Безпровідна технологія Bluetooth у IoT мережах

Попри певні обмеження, Bluetooth широко використовується у сфері IoT, особливо у пристроях, що працюють на батарейках, і в сценаріях, де не потрібна велика швидкість передачі даних [4, 1-3, 6].

Zigbee — це безпровідна технологія, створена спеціально для Інтернету речей. Вона є малопотужним протоколом зв’язку з помірним радіусом дії, але завдяки своїм унікальним можливостям здатна ефективно обходити перешкоди. Гнучкість технології дозволяє використовувати її не тільки в Інтернеті речей, а й у промисловій автоматизації. Zigbee працює в діапазоні 2,4 ГГц, що схоже з Wi-Fi, хоча охоплює вищі частотні канали після 13-го. Основною перевагою Zigbee є можливість формувати сітчасті мережі, в яких пристрої можуть самостійно передавати дані один одному, збільшуючи загальну дальність зв’язку, що дозволяє будувати великі мережі з більшою стабільністю та меншою витратою енергії. У такій мережі кожен додатковий пристрій не зменшує ефективність зв’язку, як це відбувається у Wi-Fi, а навпаки — покращує його. Хоча швидкість передачі даних у Zigbee досить низька (до 250 Кбіт/с), ця технологія й не призначена для високошвидкісного обміну. Вона ідеально підходить для пристроїв, які потребують мінімального енергоспоживання та довготривалої автономної роботи. Зазвичай

пристрої Zigbee працюють від батарейок і передають дані періодично, що дозволяє їм економити заряд та працювати роками без заміни живлення (див. табл. 1.1) (див. рис. 1.23) [4, 1-3].



Рисунок 1.23 – Безпровідна технологія Zigbee у IoT мережах

Завдяки своїй енергоефективності та можливості об’єднувати сотні пристроїв в одну мережу Zigbee широко використовується в розумних будинках, промисловій автоматизації та сфері охорони здоров’я. Наприклад, в інтелектуальних системах освітлення лампи та датчики можуть утворювати сітчасту мережу для оптимальної автоматизації та зниження енергоспоживання [4, 6].

Ще однією важливою безпровідною технологією є LoRaWAN — протокол зв’язку для глобальних мереж великого радіусу дії, створений спеціально для Інтернету речей. Це малопотужна технологія, розрахована на масове розгортання IoT у великих просторах, таких як міста або сільські території. LoRaWAN працює на частотах нижче 1 ГГц — 868 МГц у Європі та 915 МГц у США, що дозволяє передавати дані на великі відстані (до 15 км у місті та до 40 км у сільській місцевості), споживаючи мінімум енергії. Швидкість передачі даних у LoRaWAN ще нижча, ніж у Zigbee (від 0,3 до 50 Кбіт/с), тому ця технологія не підходить для застосувань, що потребують високої пропускної здатності, наприклад, для відеоспостереження (див. табл. 1.1). Однак для пристроїв, що періодично надсилають невеликі обсяги даних, LoRaWAN є ідеальним рішенням. Завдяки

ультранизькому енергоспоживанню пристрої можуть працювати на одній батареї кілька років (див. рис. 1.24) [4, 1-3].

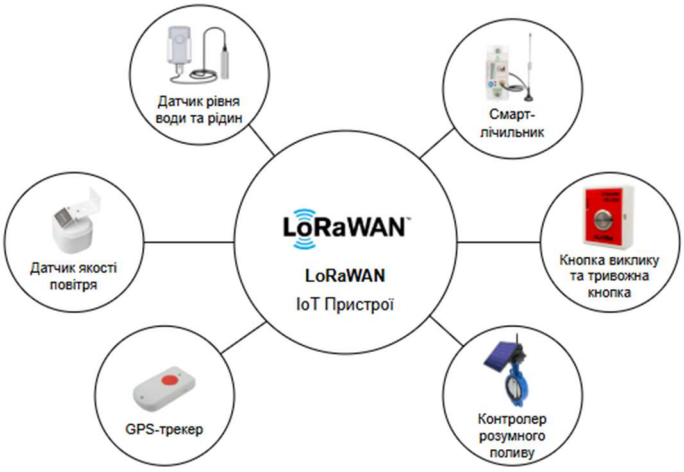


Рисунок 1.24 – Безпровідна технологія LoRaWAN у IoT мережах

На відміну від Zigbee, що використовує сітчасту топологію, LoRaWAN працює за принципом «зірки», де всі пристрої підключаються до центрального шлюзу, що дозволяє ефективно розгортати IoT у масштабах розумного міста або сільськогосподарських угідь [4, 12].

Zigbee та LoRaWAN — дві важливі технології для Інтернету речей, що доповнюють одна одну: Zigbee чудово підходить для локальних мереж із високою щільністю пристроїв, а LoRaWAN — для великих територій, де потрібен дальній зв’язок при мінімальному енергоспоживанні [4].

Переваги та недоліки різних технологій. Кожна технологія для Інтернету речей має свої переваги та обмеження, що визначають її придатність для конкретного використання (див. табл. 1.2) [4].

Таблиця 1.2 – Порівняння основних безпровідних технологій

Технології	**Переваги**	**Недоліки**
Wi-Fi	Високошвидкісне, широкодоступне підключення до Інтернету	Високе енергоспоживання, короткий і середній діапазон, перевантаження мережі

Продовження таблиці 1.2 – Порівняння основних безпровідних технологій

Технології	**Переваги**	**Недоліки**
Bluetooth (BLE)	Низька потужність, підтримує сітчасту мережу, економічно вигідний	Обмежений діапазон, нижча швидкість передачі даних
ZigBee	Низьке енергоспоживання, масштабована підтримка сітки	Нижча швидкість передачі даних, можливі перешкоди для Wi-Fi
LoRaWAN	Великий радіус дії, наднизька потужність, підтримує великі мережі	Низька швидкість передачі даних, висока затримка

Критерії вибору відповідної технології для IoT. Вибір безпровідної технології для Інтернету речей залежить від кількох ключових факторів – один із найважливіших – енергоефективність. Особливо це актуально для пристроїв, що працюють від акумулятора: розумних датчиків, переносних пристроїв, інших елементів IoT. Такі пристрої вимагають протоколів із низьким енергоспоживанням, здатних забезпечити довготривалу роботу на місяці чи навіть роки. У цьому контексті розглядаються Bluetooth, Zigbee та LoRaWAN [1-4, 6].

Bluetooth підходить для коротких відстаней, тоді як Zigbee більше орієнтований на IoT і добре працює в межах закритих приміщень, де будується мережа. LoRaWAN, своєю чергою, краще підходить для відкритих просторів – міст або сільських районів – оскільки дозволяє передавати дані на кілька кілометрів. Якщо пристрої підключені до необмеженого джерела живлення, як-от смарт-телевізори чи маршрутизатори, можна використовувати Wi-Fi, адже він забезпечує високу швидкість передачі даних. Наприклад, камери відеоспостереження зазвичай працюють через Wi-Fi, оскільки їм потрібна висока пропускна здатність [1-3, 4].

При виборі технології важливо враховувати радіус дії: пристрої з малим радіусом, такі як розумні годинники та переносні гаджети, зазвичай використовують Bluetooth або Zigbee. Якщо йдеться про середній масштаб,

наприклад, промислову автоматизацію, Zigbee є кращим вибором, оскільки він ефективніший за Wi-Fi у контексті IoT. Для великого радіусу дії, коли необхідно забезпечити віддалений моніторинг або впровадити розумне сільське господарство, безперечно, найкращим варіантом є LoRaWAN. Як приклад, розумні вуличні ліхтарі використовують саме LoRaWAN для передачі даних до міських систем керування на великі відстані [4, 1-3].

Ще один важливий критерій – потреба в передачі даних: пристрої з високою пропускною здатністю, такі як камери відеоспостереження, працюють на Wi-Fi або LTE/5G. Для помірної пропускної здатності, як-от у системах автоматизації та розумних будинках, підходить Zigbee або, у деяких випадках, Bluetooth. Якщо ж пристрій має низьку пропускну здатність і велику відстань передачі, наприклад, моніторинг навколишнього середовища в містах і сільській місцевості, доцільно використовувати LoRaWAN або NB-IoT, оскільки вони пристосовані до таких умов [4].

Щільність підключених пристроїв також відіграє важливу роль – у масштабованих мережах розумних будинків або промислових IoT-систем Zigbee є оптимальним вибором завдяки своїй сітчастій топології. Чим більше пристроїв у мережі, тим краще її якість та стабільність. LoRaWAN не підходить для таких випадків, оскільки його топологія зоряного типу не забезпечує ефективного підключення великої кількості пристроїв. Наприклад, розумні термостати та датчики на великих промислових об’єктах використовують сітчасту мережу Zigbee для кращого покриття та ефективності [4, 1-3].

Zigbee є однією з найкращих технологій для IoT завдяки енергоефективності та можливості підключення великої кількості пристроїв у сітчастій структурі. Жодна інша безпровідна технологія не може перевершити його у сфері IoT, оскільки Zigbee був спеціально створений для цієї мети і дозволяє ефективно будувати великі мережі пристроїв [1-6].

1.5 Особливості та переваги ZigBee

Переходячи до розгляду протоколу безпровідного зв’язку ZigBee, необхідно зрозуміти його функції, переваги та особливості. Важливо визначити, чому саме ZigBee, а не інші технології, такі як LoRaWAN, використовується в Інтернеті речей. ZigBee є широко розповсюдженим протоколом безпровідного зв’язку, який ідеально підходить для сценаріїв із низьким енергоспоживанням та невисокою швидкістю передачі даних. Його застосування охоплює розумні будинки, промислові об’єкти, а також будь-які середовища, що включають безпровідну комунікацію між великою кількістю пристроїв [1-13, 4, 14].

Однією з ключових переваг ZigBee є підтримка сітчастої топології мережі (див. рис. 1.25), що дозволяє пристроям взаємодіяти безпосередньо один з одним і передавати дані через кілька вузлів, підвищуючи таким чином надійність зв’язку. Низьке енергоспоживання дозволяє пристроям працювати протягом тривалого часу без необхідності частої заміни або підзарядки батарей, що робить ZigBee оптимальним вибором для розумних будинків, промислової автоматизації, охорони здоров’я та сільського господарства [4, 12, 16].

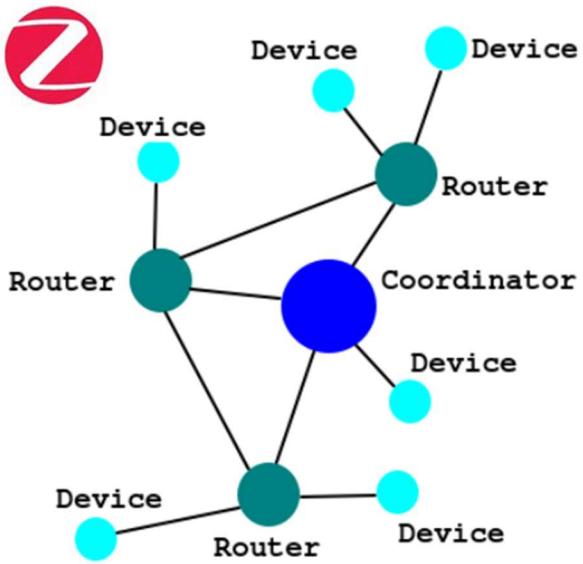


Рисунок 1.25 – Топологія Mesh у мережах Zigbee

Енергоефективність є також ключовим перевагою ZigBee – технологія реалізує кілька механізмів для мінімізації споживання енергії. Один із них – переведення пристроїв у режим сну, коли вони не передають дані, що особливо важливо для кінцевих пристроїв, які працюють від батареї. Додатково використовується режим низької навантаженості, коли пристрої зменшують частоту передачі даних, якщо їхні параметри залишаються незмінними. Також застосовується адаптивне планування передачі, що мінімізує непотрібну активність і знижує витрати енергії. На відміну від Wi-Fi, який безперервно передає дані, споживаючи багато енергії, пристрої ZigBee більшу частину часу перебувають у режимі сну. Вони активуються лише для надсилання чи отримання даних, що значно продовжує термін служби батареї, що дозволяє пристроям працювати місяцями, а іноді й роками без потреби в частій заміні батарей. Уявімо будинок із десятками пристроїв, що працюють на ZigBee. Якби кожні кілька місяців доводилося змінювати батареї в кожному з них, це було б незручно й економічно невигідно. Тому технологія ZigBee розроблена так, щоб споживати мінімум енергії та продовжувати термін автономної роботи пристроїв [4, 14-15].

Ще однією важливою властивістю ZigBee є низька швидкість передачі даних і мінімальні накладні витрати. ZigBee оптимізований для передачі даних на низьких швидкостях, що додатково зменшує споживання енергії – ідеальне рішення для пристроїв, які передають інформацію періодично, наприклад, вимірюють температуру чи вологість. Наприклад, якщо температура не змінюється, немає сенсу постійно надсилати однакові дані. Передача інформації відбувається лише у випадку змін параметрів, що дозволяє значно економити заряд батареї. На відміну від Wi-Fi, ZigBee краще підходить для IoT, де висока пропускна здатність не є необхідністю [1-3, 4, 14-15].

Ще одним фактором, що робить ZigBee енергоефективним, є адаптивна передача даних. Пристрої можуть регулювати потужність передачі залежно від умов мережі, що дозволяє зменшити витрати енергії. Також застосовуються механізми запобігання колізіям даних, що усуває зайві повторні передачі, що особливо важливо для кінцевих пристроїв, які можуть періодично втрачати

з’єднання. Якщо пристрій знаходиться далеко від мережі, він не буде витрачати енергію на постійні невдалі спроби передачі даних, а замість цього використає альтернативні шляхи [15].

Порівняння енергоспоживання ZigBee з іншими безпровідними технологіями підтверджує його ефективність – Wi-Fi має високу потужність споживання та малий термін служби батареї через постійну передачу даних. У пристроїв, що використовують Wi-Fi, автономність може вимірюватися днями чи тижнями, що є неприйнятним для IoT. Bluetooth Low Energy (BLE) має середній рівень споживання енергії та може забезпечити роботу пристроїв протягом кількох місяців, що є значним покращенням у порівнянні з Wi-Fi. Однак навіть BLE поступається ZigBee за рівнем енергоефективності. Пристрої ZigBee можуть працювати на одній батареї рік і більше, що робить їх ідеальним вибором для IoT [4, 14-16].

ZigBee широко використовується у системах розумного будинку, зокрема для керування датчиками та пристроями, які потребують мінімального споживання енергії. Завдяки своїй ефективності ZigBee ідеально підходить для пристроїв, що працюють на батареях, таких як датчики температури, вологості та освітлення. Крім того, у промислових масштабах безпровідні датчики на базі ZigBee можуть контролювати умови навколишнього середовища на фабриках, зменшуючи енергоспоживання та продовжуючи термін служби пристроїв [1-2, 14-15].

Існують й інші технології, наприклад, LoRaWAN, яка ще більш енергоефективна, забезпечуючи автономну роботу пристроїв протягом 5-10 років. Однак LoRaWAN частіше використовується для довготривалого екологічного моніторингу, тоді як ZigBee залишається оптимальним вибором для побутових і промислових IoT-рішень. LoRaWAN також дорожча у впровадженні, оскільки потребує специфічних шлюзів і модулів [4, 14].

РОЗДІЛ 2 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА АРХІТЕКТУРА ПРОТОКОЛУ ZIGBEE

2.1 Архітектура та принципи роботи ZigBee

Протокол Zigbee, заснований на стандарті IEEE 802.15.4, розроблено спеціально для забезпечення максимально низького енергоспоживання, що є критично важливим для пристроїв Інтернету речей (IoT). ZigBee функціонує без провідного з'єднання, використовуючи певний набір пристроїв, серед яких координатор, шлюз або концентратор. Координатор є центральним вузлом мережі, забезпечуючи її стабільність і контроль за передачею даних [1-3, 17].

Основна перевага ZigBee полягає в його енергоефективності, що досягається завдяки мінімальному використанню енергії під час передачі даних. Пристрої, що працюють на цьому протоколі, перебувають у режимі сну більшу частину часу та активуються лише для короткочасної передачі або прийому даних, що робить його ідеальним вибором для пристроїв, які працюють на батарейках, зокрема для датчиків температури, вологості, освітлення тощо [4, 6].

Порівняно з іншими безпровідними технологіями, такими як Wi-Fi або Bluetooth, ZigBee надає пріоритет саме низькому енергоспоживанню, а не високій швидкості передачі даних. Хоча швидкість роботи є відносно низькою, цього достатньо для автоматизації розумних будинків, промислових систем, охорони здоров'я та сільського господарства [4].

Огляд мережевої архітектури ZigBee. Мережа ZigBee складається з трьох основних типів пристроїв, кожен із яких виконує важливу роль у забезпеченні зв'язку, керуванні мережею та оптимізації енергоспоживання.

До них належать (див. рис. 2.1) [17]:

— координатор;

— маршрутизатори;

— кінцеві пристрої.

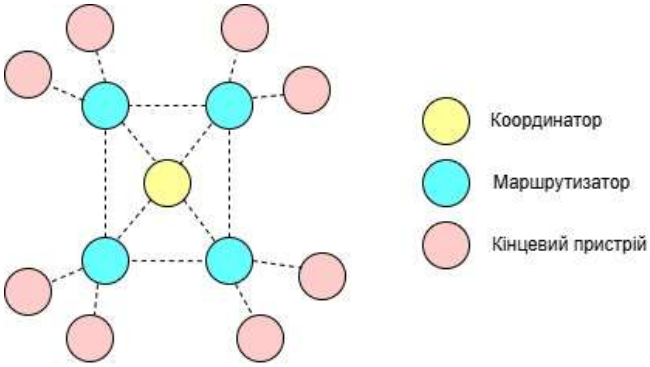


Рисунок 2.1 – Типи пристроїв у Zigbee мережі:
координатор, маршрутизатор, кінцевий пристрій

Координатор (див. рис. 2.2) є центральним вузлом управління мережею, відповідає за її формування, управління підключеними пристроями та забезпечення безпеки. У більшості випадків координатор підключається до маршрутизатора напряму, або до сервера, наприклад, що працює на платформі Home Assistant, і працює безперервно, щоб забезпечити стабільність роботи системи. Він призначає мережеві адреси новим пристроям та синхронізує їхню роботу. Оскільки цей пристрій залишається активним постійно, він потребує стабільного джерела живлення та не переходить у режим сну, що дозволяє миттєво обробляти команди, що критично важливо для застосування в розумному будинку, де своєчасність виконання дій є ключовим фактором [17-18].



Рисунок 2.2 – Координатор Zigbee,
що живиться від зовнішнього джерела та мережею

Маршрутизатори, які зазвичай вбудовані у пристрої на кшталт розумних лампочок чи розеток (див. рис. 2.3), працюють від постійного джерела живлення. Вони не лише виконують свої основні функції, а й розширюють мережу, передаючи сигнали між іншими пристроями, що дозволяє створювати надійні та стабільні з'єднання навіть у великих приміщеннях. Вони пересилають дані між пристроями, забезпечуючи стабільність з'єднання та дозволяючи мережі самовідновлюватися при виході окремих вузлів із ладу. Завдяки такій архітектурі кожен пристрій може знайти альтернативний маршрут для передачі даних, що підвищує надійність зв'язку. [17-18].



Рисунок 2.3 – Маршрутизатори Zigbee (розумні розетки),
що живляться від зовнішнього джерела та розширюють мережу

Кінцеві пристрої, до яких належать датчики руху, витоку води чи температури та вологості (див. рис. 2.4), є найбільш енергоефективними компонентами мережі. Вони активуються лише за необхідності, зменшуючи енергоспоживання та подовжуючи термін служби акумуляторів. Завдяки такій структурі пристрої утворюють цілісну мережу, що не лише забезпечує зв'язок між елементами, а й дозволяє впроваджувати автоматизацію, створюючи ефективну систему управління розумним будинком [17-18].



Рисунок 2.4 – Кінцеві пристрої Zigbee (датчики),
що живляться від одноразових плоских батарей

Топологія мережі ZigBee може бути різною, і кожна з них має свої особливості (див. рис. 2.5). Найпростішою є зіркоподібна топологія, де всі пристрої напряму підключаються до координатора. Такий підхід ефективний лише для невеликих мереж, оскільки координатор швидко перевантажується, а сам зв’язок стає нестабільним при зростанні кількості пристроїв. Тому цей тип топології використовується рідко, оскільки не забезпечує достатньої надійності та енергоефективності.

Найпоширенішою топологією є сітчаста (Mesh) (див. рис. 2.5), де пристрої не лише підключаються до координатора, а й можуть передавати дані через інші вузли, що дозволяє значно розширити зону покриття мережі, покращити її стабільність та забезпечити оптимальне споживання енергії. Пристрої автоматично вибирають найбільш ефективні маршрути передачі даних, що зменшує навантаження на окремі вузли та підвищує загальну надійність системи. Саме тому сітчаста топологія є найбільш оптимальним вибором для розумних будинків і використовується найчастіше [17-18].

Деревоподібна топологія (див. рис. 2.5) також зустрічається, але здебільшого застосовується в промислових системах моніторингу, де важлива ієрархічна структура передачі даних. Вона надає кращу організованість у великих мережах, проте поступається сітчастій топології в плані енергоефективності [17-18].

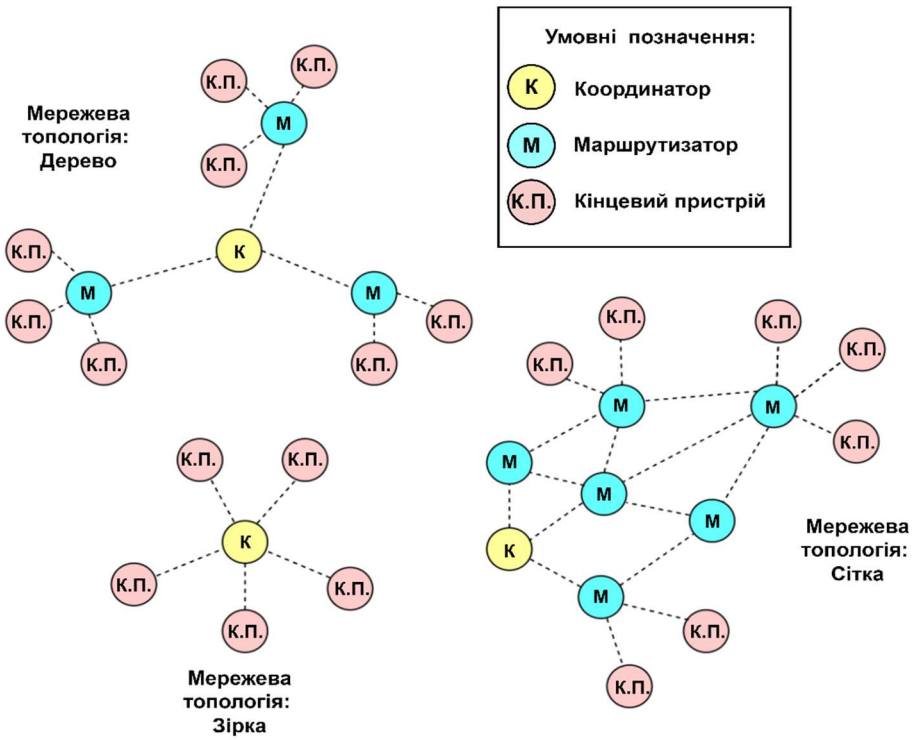


Рисунок 2.5 – Топології мереж Zigbee:
зірка, дерево, сітка

Завдяки використанню сітчастої топології пристрої можуть обмінюватися даними через кілька проміжних вузлів, що дозволяє кінцевим пристроям передавати інформацію на короткі відстані, економлячи заряд батареї. Маршрутизатори беруть на себе функцію пересилання сигналів, зменшуючи навантаження на кінцеві пристрої та підвищуючи загальну енергоефективність мережі, що забезпечує оптимальне використання ресурсів та дозволяє системі працювати стабільно протягом тривалого часу [4, 6, 17-18].

Основні рівні протоколу ZigBee. Протокол ZigBee має чітку архітектуру, що характерна для будь-якої безпровідної мережі. Він складається з кількох рівнів, кожен з яких виконує певні функції, спрямовані на оптимізацію зв’язку, енергоефективність та надійність передачі даних. Загалом, у протоколі ZigBee передбачено чотири основні рівні (див. рис. 2.6) [4, 15, 17-18].



Рисунок 2.6 – Модель OSI у безпровідному протоколі Zigbee

Перший рівень – фізичний (Physical Level) (див. рис. 2.6). Він відповідає за безпосередню передачу та прийом даних у діапазонах частот 2,4 ГГц, 900 МГц і 868 МГц. Останній більш поширений у Європі, тоді як 2,4 ГГц активно використовується у США, Китаї та Україні для розумних пристроїв. Фізичний рівень використовує розширений спектр прямої послідовності (DSS) для підвищення надійності зв'язку та зменшення перешкод. Хоча швидкість передачі даних становить лише 250 кбіт/с, цього цілком достатньо для пристроїв Інтернету речей, оскільки обмеження швидкості сприяє енергозбереженню. Фізичний рівень також оптимізований для мінімального енергоспоживання, що дозволяє пристроям працювати значно довше на батарейному живленні, порівняно з іншими безпровідними технологіями, такими як Wi-Fi [17-18].

Другий рівень – рівень керування доступом до середовища (MAC - Medium Access Control) (див. рис. 2.6). Він відповідає за організацію доступу до каналу зв'язку, запобігаючи конфліктам даних. Використовується механізм множинного доступу із визначенням несучої (CSMA/CA), який забезпечує передачу даних лише за умови, що канал вільний. Таким чином, пристрої не конфліктують між собою при передачі інформації. Крім того, MAC-рівень реалізує кадрове підтвердження та повторну передачу даних, що мінімізує втрати енергії через помилки під час передачі. Важливим аспектом цього рівня є оптимізація роботи пристроїв, що працюють на батареї. Наприклад, якщо пристрій через помилкове з'єднання

постійно передає некоректні дані замість переходу в режим сну, він швидко розряджається. Правильна робота MAC-рівня допомагає уникнути таких проблем [17-18].

Третій рівень – мережевий рівень (Network Level) (див. рис. 2.6). Він забезпечує керування адресацією та маршрутизацією пристроїв у ZigBee-мережі, підтримуючи ефективну доставку даних. Важливою особливістю є підтримка сітчастої (mesh) топології, що дозволяє пристроям автоматично знаходити найкоротший та найефективніший шлях для передачі інформації. Завдяки цьому зменшується затримка зв'язку та оптимізується витрата енергії. Крім того, мережевий рівень реалізує механізм самовідновлення: якщо один з вузлів виходить з ладу, система автоматично знаходить альтернативний маршрут для передачі даних, що особливо важливо для великих мереж, де надійність зв'язку має вирішальне значення [17-18].

Сьомий рівень – рівень прикладної програми (Application Level) (див. рис. 2.6). Він забезпечує взаємодію між пристроями та додатками Інтернету речей, такими як системи розумного будинку, промисловий моніторинг, охорона здоров'я тощо. Цей рівень містить профілі застосування, які визначають стандартизовані методи обміну даними між пристроями. Оптимізація живлення на цьому рівні передбачає зменшення кількості непотрібних пробуджень пристроїв, що сприяє економії енергії та збільшенню терміну служби батарей [17-18].

2.2 Вплив факторів на енергоефективність ZigBee

Здатність мінімізувати енергоспоживання визначає ефективність протоколу Zigbee, адже він забезпечує стабільний зв'язок між пристроями без значних витрат енергії. Однак рівень споживання енергії залежить від різних факторів, які безпосередньо впливають на роботу мережі.

Одним із головних аспектів є ролі пристроїв у мережі. Відповідно до своєї функції, кожен пристрій має певний рівень енергоспоживання, що визначає його загальну ефективність. Наприклад, кінцеві пристрої, які працюють від батарей, потребують мінімального енергоспоживання, тоді як координатори та маршрутизатори витрачають більше енергії через постійну активність.

Також важливу роль відіграє обрана топологія мережі. Вибір певної топології впливає на загальну енергоефективність, особливо для кінцевих пристроїв, які найбільш чутливі до змін у структурі мережі. Крім того, навантаження мережі безпосередньо позначається на споживанні енергії: чим більше передається даних, тим вищі енергозатрати, а отже, знижується ефективність роботи пристроїв.

Ролі пристроїв та їхній вплив на споживання енергії. Ролі пристроїв у мережі ZigBee безпосередньо впливають на рівень енергоспоживання, оскільки кожен із них виконує певні функції, що визначають його енергетичні витрати. Координатори, маршрутизатори та кінцеві пристрої мають різний рівень активності, що формує загальну ефективність роботи мережі.

Координатор є центральним елементом ZigBee-мережі. Він виконує функцію управління мережею, синхронізує пристрої, визначає маршрути передачі даних та здійснює автентифікацію нових вузлів. Через постійну активність координатор має найвище енергоспоживання серед усіх пристроїв мережі. Оптимізація його енергоспоживання недоцільна, оскільки це може вплинути на стабільність та надійність мережі. Зазвичай координатор підключається до постійного джерела живлення, що дозволяє йому функціонувати безперервно [19, 17-18].

Маршрутизатори є проміжними пристроями, які передають дані та розширюють покриття мережі. Вони також потребують безперервного живлення, адже забезпечують зв’язок між пристроями, особливо в сітчастих топологіях, де кожен вузол може передавати дані через кілька проміжних точок. Завдяки цьому досягається висока гнучкість і надійність мережі, проте це також означає підвищене енергоспоживання маршрутизаторів [19, 17-18].

Кінцеві пристрої мають найнижче енергоспоживання, оскільки більшу частину часу перебувають у сплячому режимі. Вони активуються лише для

передачі або отримання даних, що дозволяє значно продовжити термін служби їхніх акумуляторів. Саме для кінцевих пристроїв критично важлива оптимізація енергоспоживання, оскільки їхні батареї не завжди можна замінити або зарядити [19, 17-18].

Прикладом розподілу ролей у реальних системах є розумний будинок. Координатором (див. рис. 2.7) може виступати домашній концентратор на кшталт Google Nest, Amazon Echo або пристрої від Tuya, які поєднують ZigBee з іншими протоколами, такими як Bluetooth і Wi-Fi. Інший варіант – USB-адаптери, що підключаються до сервера, де працюють платформи керування розумним будинком, як Home Assistant. Такі пристрої зазвичай постійно підключені до електромережі, що робить їхню енергетичну оптимізацію недоцільною.



Рисунок 2.7 – Види координаторів Zigbee:
Google Nest, Amazon Echo, Tuya, Sonoff

Маршрутизатори в мережі ZigBee відіграють ключову роль у розширенні покриття та забезпеченні стабільного з’єднання між пристроями. Вони мають помірне енергоспоживання, оскільки працюють у постійному активному режимі, передаючи дані між різними вузлами мережі. На відміну від кінцевих пристроїв, маршрутизатори не переходять у сплячий режим, а тому потребують надійного джерела живлення. Зазвичай вони живляться від постійного струму, що робить оптимізацію їхнього енергоспоживання менш актуальною.

Основне призначення маршрутизаторів – розширення мережі та забезпечення альтернативних маршрутів передачі даних (див. рис. 2.8). Наприклад, у великому будинку або на підприємстві, де координатор не здатний охопити всі

пристрої через обмежену дальність сигналу, маршрутизатори компенсують цей недолік. Вони дозволяють кінцевим пристроям підключатися до мережі через себе, передаючи інформацію до координатора. У сітчастих топологіях такі пристрої критично важливі, оскільки дозволяють створювати резервні маршрути, що підвищує надійність з'єднання.

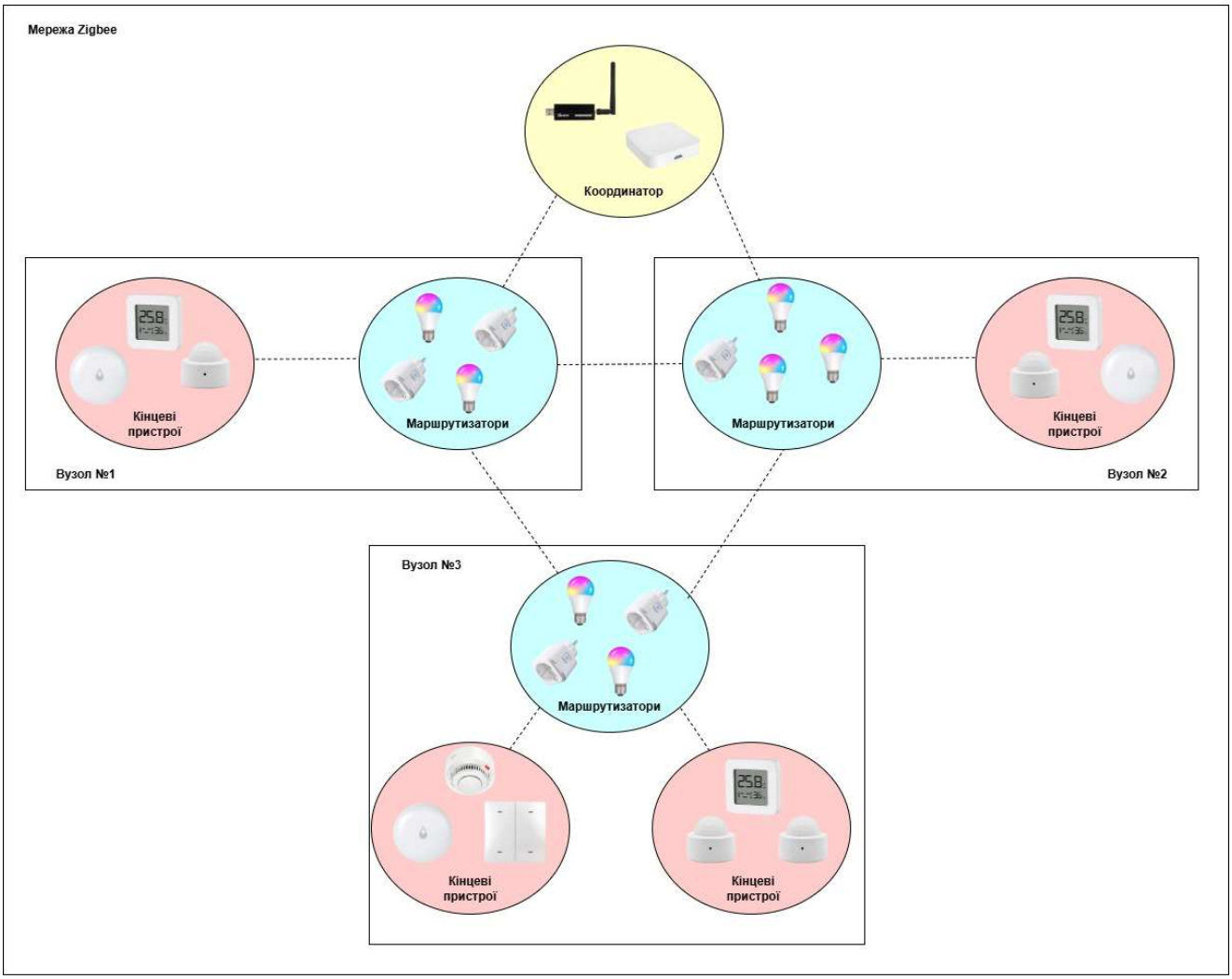


Рисунок 2.8 – Маршрутизатори Zigbee, що розширюють мережу

Попри менше енергоспоживання порівняно з координаторами, маршрутизатори все ж потребують стабільного живлення. Дуже рідко можна зустріти маршрутизатор ZigBee, що працює від батареї, оскільки постійна активність швидко б виснажувала його ресурс. У великих мережах стратегічне розташування маршрутизаторів може оптимізувати витрати енергії, оскільки правильне їх розміщення зменшує відстань передачі даних. Наприклад, якщо

кінцевий пристрій знаходиться на межі покриття координатора, йому доведеться витрачати більше енергії на передачу даних. Натомість встановлення маршрутизатора між ними дозволить значно знизити навантаження на кінцевий пристрій і зменшити ймовірність помилок передачі [17-19].

У промислових мережах маршрутизатори можуть допомагати розширювати зону зв’язку між датчиками без необхідності збільшувати потужність координатора, що особливо важливо на великих підприємствах, де використання низькопотужних вузлів значно економить енергоресурси [12, 18-19].

Кінцеві пристрої, на відміну від маршрутизаторів, повинні мати найнижче енергоспоживання, оскільки працюють від батарей, що мають обмежений ресурс (див. рис. 2.9). Їхня робота оптимізована так, щоб вони більшу частину часу перебували в режимі сну і активувалися лише для передачі або прийому даних. Наприклад, датчики руху, температури або вологості передають інформацію з певною періодичністю, що дозволяє значно продовжити термін служби їхніх батарей [17, 19].



Рисунок 2.9 – Компроміс у використанні обмеженої
одноразової плоскої батареї CR2032 на 3В (ємність 210 mAh)

Виробники зазвичай проєктують кінцеві пристрої так, щоб вони працювали на батареях протягом тривалого часу – від кількох місяців до кількох років. Оптимізація графіка сну, зменшення частоти передачі даних та використання енергоефективних компонентів дозволяють досягати високої автономності. Наприклад, датчик температури в розумному сільському господарстві може

передавати дані раз на 30 хвилин замість 10, що значно подовжує термін служби батареї [12, 18-19].

Топологія мережі та її вплив на енергоефективність. Топологія мережі визначає спосіб підключення пристроїв і впливає на енергоефективність, надійність зв'язку та масштабованість. Вона визначає схему маршрутизації та взаємодії пристроїв у мережі. Вибір топології має забезпечувати енергоефективність, особливо для кінцевих пристроїв, які зазвичай мають обмежений ресурс батареї.

Однією з основних топологій є зіркоподібна топологія (див. рис. 2.10). Вона є досить простою та енергоефективною, оскільки в ній немає маршрутизаторів. Кінцеві пристрої підключаються безпосередньо до одного координатора (шлюза), що зменшує витрати енергії. Така топологія широко використовується в мережах Wi-Fi, де один маршрутизатор забезпечує зв'язок з кінцевими пристроями. Вона є ефективною для невеликих приміщень, таких як квартири чи розумні будинки, де кількість пристроїв обмежена [4, 15, 17-18].

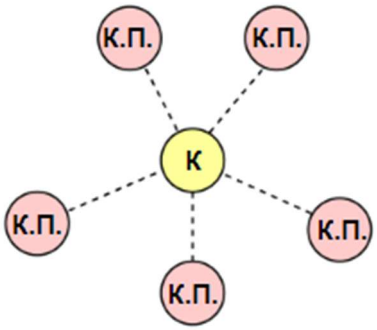


Рисунок 2.10 – Топологія мережі Zigbee: зірка

Однак зіркоподібна топологія має серйозні недоліки. Вона дуже залежна від координатора: якщо він виходить з ладу, вся мережа перестає працювати, а пристрої починають витрачати більше енергії в пошуку мережі, що може значно скоротити час автономної роботи. Також вона має обмежений радіус дії та високу чутливість до перешкод, особливо якщо працює в перевантаженому діапазоні 2,4 ГГц.

Іншою популярною топологією є топологія дерева (див. рис. 2.11). Вона є більш ієрархічною та структурованою, що дозволяє створювати конструктивно складніші мережі. У цій топології маршрутизатори створюють ієрархічну структуру, що дозволяє збільшувати радіус дії мережі. Вона менш енергоефективна порівняно із зіркоподібною топологією, оскільки маршрутизатори залишаються постійно активними. Проте вони живляться від постійного джерела струму, що усуває проблему обмеженого ресурсу батарей [4, 15, 17-18].

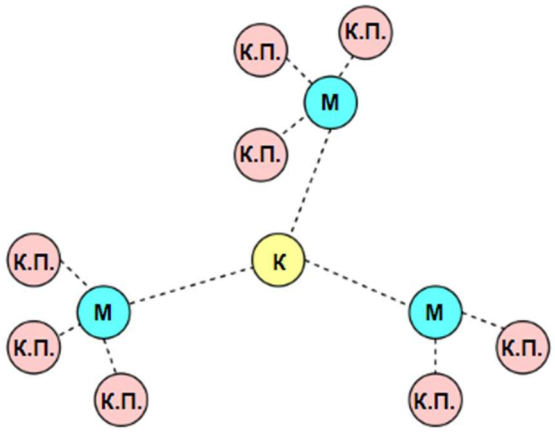


Рисунок 2.11 – Топологія мережі Zigbee: дерево

Використання маршрутизаторів у топології дерева дозволяє розширювати діапазон мережі та покращувати її стабільність, що особливо важливо для середніх за розміром мереж, наприклад, у комерційних будівлях та офісах. Стратегічне розміщення маршрутизаторів допомагає мінімізувати вплив перешкод та покращити якість зв’язку. Крім того, кінцеві пристрої, які раніше могли втрачати зв’язок або збільшувати потужність передавача для передачі даних, тепер отримують стабільний сигнал, що оптимізує їх енергоспоживання.

Найкращою топологією для використання є сітчаста (mesh) мережа (див. рис. 2.12), яка поєднує в собі кілька підходів. Її вважають більш енерговитратною, але вона залишається найнадійнішою серед усіх топологій, що можна назвати не зовсім золотою серединою, але з точки зору ефективності така топологія має значні переваги. Головна її особливість – пристрої можуть спілкуватися кількома шляхами, що дозволяє мережі самовідновлюватися, що вкрай важливо, оскільки

при постійних відключеннях кінцевих пристроїв, особливо тих, що працюють на батареях, можуть виникати втрати даних або необхідність повторної передачі, що збільшує енергоспоживання [4, 15, 17-18].

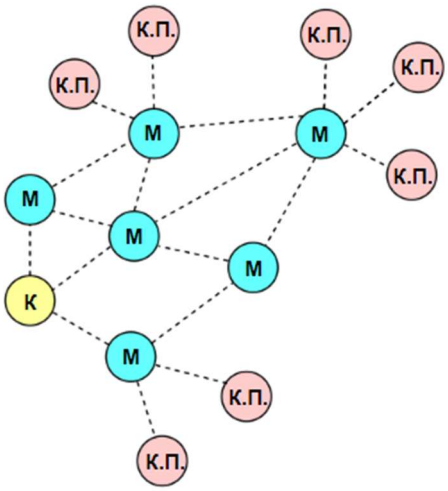


Рисунок 2.12 – Топологія мережі Zigbee: сітка

Незважаючи на твердження про підвищене енергоспоживання сітчастої топології, цей аспект актуальний лише у випадку великої кількості маршрутизаторів, координаторів та концентраторів, які споживають більше енергії. Проте такі пристрої завжди працюють від постійного джерела живлення, а кінцеві пристрої – ні. Саме маршрутизатори та координатори забезпечують стабільність мережі, залишаючись активними постійно, що дозволяє системі швидко адаптуватися до змін. Навіть у разі втрати зв’язку з одним вузлом мережа автоматично перебудовується, передаючи дані через інший, найбільш оптимальний шлях, що забезпечує вищу надійність порівняно з іншими топологіями, наприклад деревоподібною, яка при втраті певної гілки може втратити доступ до цілої групи пристроїв [17-18].

Вищий рівень споживання енергії в сітчастих мережах стосується саме маршрутизаторів, які завжди активні, але це жодним чином не впливає на кінцеві пристрої. У загальному підсумку така топологія є найкращим вибором для масштабованих проєктів, зокрема для розумних будинків, промислової автоматизації, розумного сільського господарства чи міських IoT-мереж. Ба

більше, її можна використовувати навіть у менших приміщеннях, адже вона дозволяє оптимізувати енергоспоживання кінцевих пристроїв, роблячи їх ще більш ефективними [17-18].

Якщо підсумувати, зіркоподібна топологія є найбільш енергоефективною, але має серйозні обмеження, оскільки вся мережа залежить від одного координатора. Якщо він виходить з ладу, система перестає функціонувати. Деревоподібна топологія врівноважує діапазон дії та енергоспоживання, що робить її золотою серединою. Вона вимагає стратегічного розташування маршрутизаторів для стабільності, оскільки їх неправильне розміщення може спричинити перекриття сигналів і погіршення роботи мережі. Сітчаста топологія забезпечує найвищу надійність: попри підвищене споживання енергії маршрутизаторами, вона гарантує безперервну роботу мережі, автоматичне відновлення зв’язку та швидку передачу даних навіть у випадку втрати окремих вузлів. У такій мережі може бути велика кількість маршрутизаторів, що дозволяє швидко адаптуватися до змін та оптимально розподіляти навантаження. У разі втрати з’єднання кінцевий пристрій швидко знаходить новий маршрут передачі даних, що неможливо в інших топологіях[4, 15, 17-19].

Серед усіх варіантів сітчаста топологія є найперспективнішою та найстабільнішою, навіть якщо розглядати її для невеликих приміщень. Хоча вона частіше використовується для великих масштабних проєктів, її можливості дозволяють створювати більш гнучкі та надійні IoT-системи, оптимізуючи енергоспоживання кінцевих пристроїв та забезпечуючи стабільний зв’язок у будь-яких умовах.

Оптимізація передачі даних для енергоефективності. Енергоспоживання будь-якої топології напряму залежить від вдалої передачі даних, яка не призводить до зайвого розрядження батарей кінцевих пристроїв. Оптимізація цієї передачі фактично дорівнює оптимізації енергоспоживання. В цьому контексті варто розглянути кілька алгоритмів, які можуть суттєво зменшити витрати енергії під час обміну інформацією.

Одним із таких методів є *агрегація пакетів*. Її суть полягає в тому, що замість надсилання безлічі дрібних пакетів дані об'єднуються в більші пакети меншої кількості, що дозволяє скоротити кількість звернень до мережі та мінімізувати витрати енергії, оскільки пристрій менше пробуджується для передачі інформації (див. рис. 2.13) [4, 15, 17-18].

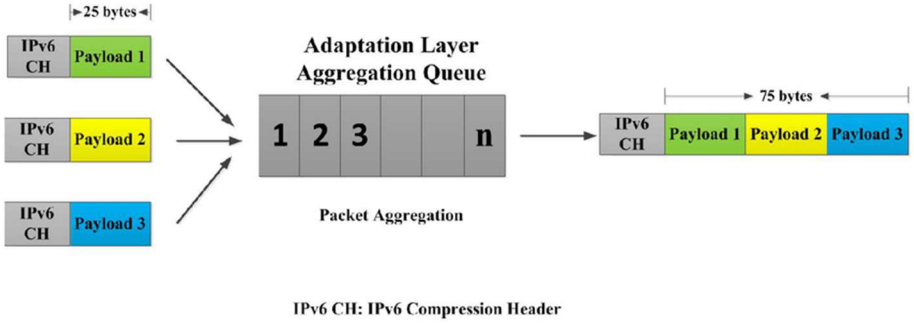


Рисунок 2.13 – Агрегація пакетів у безпровідних мережах [20]

Таким чином, час доступу до каналу зменшується, що позитивно впливає на тривалість служби батареї. Наприклад, термостат, який збирає показники температури, може передавати їх кожні 30 хвилин, а не щохвилини, оскільки за одну хвилину зміни, як правило, незначні, що дозволяє уникнути зайвого витрачання енергії та підтримувати ефективну роботу пристрою.

Ще одним методом є *адаптивна передача даних* , яка передбачає надсилання інформації лише за потреби (див. рис. 2.14). Цей підхід дозволяє пристроям регулювати частоту передачі залежно від стану мережі та показників датчиків. Якщо значення певного параметра не змінюється протягом тривалого часу, то відправка оновлень може бути тимчасово припинена, що значно зменшує навантаження на мережу та продовжує термін роботи батареї. Наприклад, у розумній системі зрошування дані про вологість ґрунту можуть передаватися лише тоді, коли рівень вологи падає нижче критичної межі, а не постійно надсилати оновлення, які не несуть важливої інформації [4, 12, 17-18].

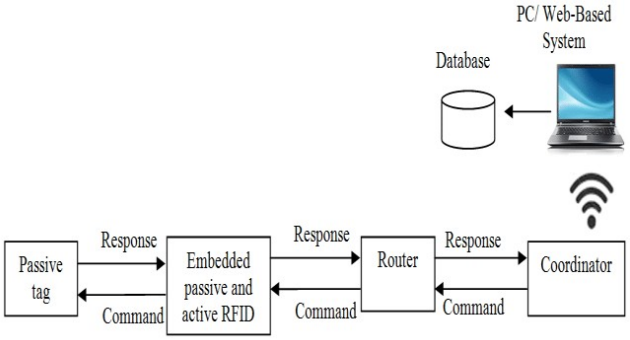


Рисунок 2.14 – Адаптивна передача даних у мережах Zigbee [20]

Ще одним важливим методом є *LPL (Low Power Listening)* – зменшення неактивного прослуховування. Часто пристрої перевіряють наявність нових повідомлень у мережі, залишаючись у постійно ввімкненому стані, що значно витрачає енергію. Використання LPL дозволяє періодично активувати пристрій для перевірки наявності повідомлень замість постійного режиму роботи (див. рис. 2.15) [20], що особливо корисно для систем безпеки, які можуть перевіряти активність кожні 5 секунд замість того, щоб бути ввімкненими постійно. Однак, для датчиків руху, які впливають на сценарії автоматизації, наприклад, увімкнення світла, занадто рідке опитування може бути недоцільним, тому частота перевірок має підбиратися індивідуально.

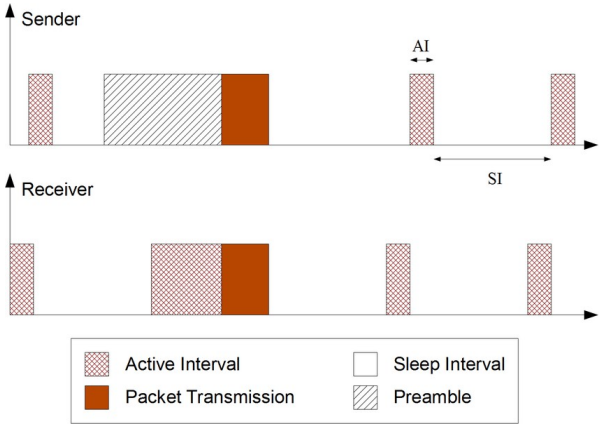


Рисунок 2.15 – Застосування метода зменшення неактивного прослуховування (LPL) [20]

2.3 Аналіз споживання енергії ZigBee

Стандарт безпровідного зв’язку ZigBee визнаний одним із найбільш енергоефективних протоколів. Серед усіх існуючих технологій безпровідного зв’язку, особливо в контексті Інтернету речей (IoT), саме ZigBee вважається оптимальним варіантом завдяки своїй низькій енергозатратності. Проте, щоб оцінити його реальну ефективність, важливо не просто оптимізувати сам протокол, а перед цим порівняти його з іншими схожими безпровідними технологіями.

Аналіз енергоспоживання ZigBee має враховувати ключові фактори, які впливають на ефективність роботи будь-якого протоколу. Тільки через порівняння з іншими технологіями можна отримати об’єктивне уявлення про рівень його енергоефективності. Наприклад, якщо порівнювати ZigBee з Wi-Fi, то останній значно більш енергозатратний, що робить його менш придатним для пристроїв із автономним живленням.

Розгляд цих відмінностей допомагає зрозуміти, чому ZigBee є настільки популярним вибором у сфері IoT і чому саме він використовується для багатьох сценаріїв замість інших протоколів. Аналіз енергоспоживання дозволяє оцінити його сильні сторони та визначити ситуації, в яких він має перевагу або, навпаки, де інші протоколи можуть бути ефективнішими.

Порівняння ZigBee з іншими безпровідними технологіями. Wi-Fi є популярною технологією безпровідного зв’язку, яка має високу споживану потужність, але забезпечує швидкість передачі даних до 1 Гбіт/с. Його діапазон у приміщенні сягає приблизно 50 метрів, а топологія мережі зазвичай будується за схемою «зірка». Ця технологія найбільше підходить для розумних домашніх хабів, потокового відео та промислового Інтернету речей [4, 14].

Bluetooth у класичному варіанті має середній рівень споживання енергії, передає дані зі швидкістю 1–3 Мбіт/с та діє в радіусі близько 10 метрів. Використовується для безпровідного аудіо, підключення смартфонів, фітнес-трекерів. Його версія Bluetooth Low Energy (BLE) є більш енергоефективною,

працює зі швидкістю від 125 Кбіт/с до 2 Мбіт/с і має діапазон до 100 метрів. BLE знаходить застосування у носимих пристроях та медичних датчиках [4, 14].

ZigBee характеризується дуже низьким споживанням потужності, має максимальну швидкість передачі 250 Кбіт/с та працює в радіусі 100 метрів. Основна перевага — підтримка сітчастої топології, яка дозволяє пристроям передавати дані через інші вузли мережі, що робить ZigBee ідеальним рішенням для розумних будинків, промислового моніторингу та сільського господарства [4, 14].

LoRaWAN виділяється ультранизьким рівнем споживання енергії, здатністю передавати дані на швидкості від 0,3 до 50 Кбіт/с та великим діапазоном зв'язку до 10 км. Використовується в інфраструктурі розумних міст, аграрному секторі та у випадках, коли необхідне підключення пристроїв на великих відстанях [4, 14].

Таблиця 2.1 – Порівняння ZigBee з іншими безпровідними технологіями [4]

Технології	**Споживана потужність**	**Швидкість передачі даних**	**Діапазон**	**Топологія**	**Типові програми**
Wi-Fi	Високий	До 1 Гбіт/с	~50 м в приміщенні	Зірка	Розумні домашні хаби, потокове відео, промисловий Інтернет речей
Bluetooth (класичний)	Середній	1–3 Мбіт/с	~10м	Зірка	Безпровідне аудіо, смартфони, фітнес-трекери

Продовження таблиці 2.1 – Порівняння ZigBee з іншими безпровідними технологіями [4]

Технології	**Споживана потужність**	**Швидкість передачі даних**	**Діапазон**	**Топологія**	**Типові програми**
Bluetooth Low Energy (BLE)	Низький	125 Кбіт/с–2 Мбіт/с	~100м	Зірка	Носимі пристрої, медичні датчики
ZigBee	Дуже низький	250 Кбіт/с	~100м	Сітка	Розумні будинки, промисловий моніторинг, сільське господарство
LoRaWAN	Ультра-низький	0,3–50 Кбіт/с	~10 км	Зірка	Розумні міста, сільське господарство, дальній Інтернет речей

При виборі безпровідної технології для Інтернету речей слід враховувати вимоги до енергоефективності та дальності дії. Wi-Fi, хоча й забезпечує високу швидкість передачі даних, має значне енергоспоживання, що робить його неекономічним для автономних пристроїв, які працюють від батарей. Bluetooth у класичному варіанті не є оптимальним для Інтернету речей через обмежений діапазон і відносно високе енергоспоживання. Його варіант BLE є більш придатним для датчиків, але все одно потребує регулярної заміни батарей.

ZigBee є одним із найкращих рішень для побудови енергоефективних IoT-мереж завдяки своїй низькій потужності споживання та підтримці сітчастої топології, що дозволяє збільшувати зону покриття мережі без потреби у потужних передавачах. LoRaWAN, у свою чергу, перевершує ZigBee за дальністю зв'язку, але має нижчу швидкість передачі даних і дорожчі модулі, що робить його доцільним для проєктів, де важлива велика відстань між пристроями.

ZigBee та Wi-Fi найчастіше порівнюються при виборі технології для розумного будинку. Wi-Fi підходить для високошвидкісного з'єднання пристроїв, таких як камери відеоспостереження, але він потребує постійного живлення. ZigBee, навпаки, дозволяє підключати велику кількість датчиків, які можуть працювати від батарей роками, що робить його кращим вибором для розумного освітлення, систем контролю температури, датчиків руху тощо.

Якщо мета — створення масштабованої, надійної та енергоефективної мережі для Інтернету речей, ZigBee виграє у більшості сценаріїв, особливо у випадках розумного будинку та промислових застосувань. Wi-Fi залишається оптимальним для передачі великих обсягів даних, а LoRaWAN — для пристроїв, що розташовані на великих відстанях.

Якщо порівнювати Zigbee з Bluetooth, то варто враховувати, що це два протоколи зв'язку, кожен із яких має свої особливості. Класичний Bluetooth (Bluetooth Classic) створений для швидкого обміну даними між пристроями, які потребують високої пропускної здатності, тоді як Bluetooth Low Energy (BLE) оптимізований для енергоефективності, що робить його більш придатним для Інтернету речей. Проте навіть BLE поступається Zigbee у плані енергоспоживання, оскільки Bluetooth, незалежно від версії, потребує більш безперервного з'єднання, що прискорює розрядку пристроїв [4, 17-18].

Наприклад, фітнес-трекери або смарт-годинники, які постійно передають і отримують дані зі смартфона, швидше витрачають заряд і потребують частішої підзарядки. В середньому, такі пристрої працюють від одного до трьох днів. Чим більше функцій у смарт-годинника, тим швидше він розряджається, оскільки більше даних потребує обробки та передачі. Zigbee ж використовує механізми сну

та енергозбереження, що дозволяє пристроям працювати значно довше—від кількох місяців до кількох років без підзарядки [1-3, 6, 15, 17-18].

Також варто враховувати особливості мережевих топологій. BLE працює за принципом з'єднання «точка-точка» або «зірка», коли є один центральний вузол і кілька периферійних пристроїв. Zigbee, на відміну від цього, підтримує сітчасту мережу, що дозволяє пристроям передавати дані через інші вузли, що забезпечує самовідновлення мережі в разі втрати якогось вузла, зменшує повторні передачі даних і, відповідно, енергоспоживання. Bluetooth не має такої функції, що робить Zigbee більш ефективним у великих мережах [4, 15, 17-18].

Якщо розглядати конкретні сценарії використання, то Zigbee підходить для систем розумного дому, зокрема для освітлення, датчиків руху та інших пристроїв, що можуть працювати в групах. Наприклад, освітлення Zigbee можна з'єднати в одну систему та керувати всіма лампами одночасно. У той же час, деякі інтелектуальні замки використовують Bluetooth Low Energy, але їхня робота потребує частого пробудження для перевірки статусу дверей, що збільшує споживання енергії. Zigbee-замки, навпаки, можуть бути більш енергоефективними [4, 15, 17-19].

Порівнюючи Zigbee з LoRaWAN, слід враховувати, що обидва протоколи призначені для Інтернету речей, але працюють у різних умовах. Zigbee оптимізований для малих радіусів дії та внутрішніх приміщень, тоді як LoRaWAN розрахований на роботу на великих відстанях у відкритому просторі. Наприклад, Zigbee ідеально підходить для розумного будинку або промислової автоматизації, а LoRaWAN – для розумних міст і ферм, де потрібно передавати дані на великі дистанції [4, 14].

Ще один важливий фактор – частота оновлення даних. Zigbee-пристрої оновлюють інформацію значно частіше, ніж LoRaWAN. Наприклад, температурний датчик у розумному будинку може надсилати дані кожні кілька хвилин, тоді як LoRaWAN-датчик для навколишнього середовища може передавати інформацію лише раз на годину або навіть раз на день, що робиться для

максимального енергозбереження, адже LoRaWAN-пристрої можуть працювати до 5 років від однієї батареї [4, 6, 14].

Ключові фактори енергоефективності в ZigBee. ZigBee є одним із найенергоефективніших безпровідних протоколів, що досягається завдяки кільком ключовим факторам (див. рис. 2.16). Одна з основних причин — низька швидкість передачі даних, що безпосередньо зменшує споживання енергії. Також мережа ZigBee побудована за принципом сітчастої топології, яка забезпечує самовідновлення та автоматичний пошук оптимальних шляхів передачі даних, що дозволяє мінімізувати втрати енергії на повторну передачу в разі втрати зв'язку з певним вузлом.



Рисунок 2.16 – Ключові фактори, що утворюють енергоефективність Zigbee

Один із найважливіших параметрів ZigBee — це робочий цикл пристроїв. Він визначає, скільки часу пристрій перебуває в активному стані, порівняно з часом у режимі сну. Більшість пристроїв ZigBee працюють із надзвичайно низьким робочим циклом, зазвичай від 1% до 5%, що означає, що 95-99% часу вони залишаються в режимі сну, що значно продовжує термін служби батареї [17-19].

Користувачі можуть оптимізувати робочий цикл, налаштовуючи частоту надсилання даних. Наприклад, для датчиків температури чи вологості можна встановити періодичність збору даних раз на 30 хвилин чи навіть раз на кілька годин, що зменшить частоту активності пристрою та збільшить час автономної роботи. У порівнянні з Wi-Fi, який завжди підтримує підключення та витрачає

більше енергії на повторне підключення після виходу із режиму сну, ZigBee має значну перевагу [4, 17-19].

Значну роль в енергоефективності відіграє й потужність передачі даних. ZigBee використовує лише 1-10 мВт енергії для передачі, тоді як Wi-Fi споживає від 100 до 200 мВт, що в десятки разів більше. Менша потужність передачі означає менше споживання батареї, а отже, довший термін її роботи [4, 14, 19-20].

Реальні приклади демонструють ефективність ZigBee. Наприклад, датчики відкриття дверей можуть перебувати в режимі сну майже 99% часу, активуючись лише в момент спрацьовування. Завдяки цьому їхні батареї можуть працювати кілька років без заміни. Такі пристрої зазвичай оснащуються енергоефективними батарейками, наприклад, формату CR2032 або навіть AAA, що ще більше продовжує їхню автономну роботу [4, 6, 19-20].

Сітчаста топологія ZigBee дозволяє зменшити кількість повторних передач даних, що також сприяє економії енергії. Наприклад, датчик руху ZigBee використовує лише 2-3 мВт для передачі сигналу, тоді як камера відеоспостереження з Wi-Fi може споживати понад 100 мВт постійно. Через це Wi-Fi є непридатним для автономних IoT-пристроїв, що працюють на батареях [4, 15, 17-19].

Топологія мережі впливає на енергоефективність, оскільки визначає, як пристрої взаємодіють і передають дані. У випадку Zigbee існує три основні топології: зірка, дерево і сітка, кожна з яких має свої особливості у споживанні енергії та найкращі варіанти використання (див. табл. 2.2) [17].

Таблиця 2.2 – Топологія мережі: вплив на споживання енергії

Топологія	**Енергоефективність**	**Найкращий варіант використання**
Зірка	Високий	Малі мережі (розумні будинки)
Дерево	Помірний	Промислові налаштування з кількома маршрутизаторами

Продовження таблиці 2.2 – Топологія мережі: вплив на споживання енергії

Топологія	**Енергоефективність**	**Найкращий варіант використання**
Сітка	Нижній	Масштабний IoT (розумні міста, сільське господарство)

Топологія зірка забезпечує найвищу енергоефективність. У ній є один координатор (концентратор або шлюз), який створює мережу, і кінцеві пристрої, що підключаються до нього. Координатор споживає найбільше енергії, але він завжди підключений до постійного джерела живлення, наприклад, адаптера або USB-порту комп'ютера. Кінцеві пристрої працюють у режимі сну, що значно економить енергію. Така топологія добре підходить для малих мереж, наприклад, у розумних будинках. Однак її ефективність може знижуватися в приміщеннях із залізобетонними стінами та іншими перешкодами [17-18, 20].

Топологія дерево має помірну енергоефективність, оскільки тут з'являються маршрутизатори. Вона складається з одного координатора, маршрутизаторів, які розширюють мережу, та кінцевих пристроїв. Маршрутизатори споживають більше енергії, ніж кінцеві пристрої, але вони необхідні для покращення зв'язку в мережі, особливо у великих приміщеннях із перешкодами. Ця топологія є золотою серединою, оскільки дозволяє збільшувати мережу без значного падіння енергоефективності [17-18, 20].

Топологія сітка має найнижчу енергоефективність, оскільки в ній багато маршрутизаторів, що постійно працюють і споживають енергію. Проте вона забезпечує високу надійність і масштабованість мережі. Якщо один вузол виходить з ладу, дані можуть передаватися іншими маршрутами, що дозволяє кінцевим пристроям економити енергію, оскільки вони автоматично знаходять найкоротший шлях для передачі даних. Така топологія найкраще підходить для великих IoT-рішень, таких як розумні міста або сільське господарство [17-18, 20].

Хоча маршрутизатори та координатори у топологіях дерево та сітка споживають більше енергії, їхнє постійне живлення не є критичним, оскільки

головний акцент у Zigbee робиться на енергоефективності кінцевих пристроїв. Саме кінцеві пристрої потребують оптимізації для зменшення енергоспоживання та продовження терміну роботи від батареї.

Ключовий фактор, що впливає на енергоефективність Zigbee, – це режими сну. Саме вони продовжують термін служби батарей у пристроях, оскільки Zigbee підтримує кілька рівнів низького енергоспоживання, які керуються прошивкою виробника. Основні режими: глибокий сон, низьке енергоспоживання та постійна робота [17-20].

У режимі постійної роботи пристрої не переходять у сон, а залишаються активними, тому їхня споживана потужність є найвищою, а пробудження миттєве. У такому режимі працюють маршрутизатори, шлюзи, концентратори, координатори, які постійно живляться від мережі, тому не потребують енергозбереження [17-18].

Режими реального сну поділяються на глибокий сон та низьке енергоспоживання (див. табл. 2.3). У першому пристрої, наприклад датчики відкриття дверей або руху, більшу частину часу перебувають у неактивному стані та споживають мінімальну енергію (мікровати). Час пробудження найдовший, оскільки пристрій має ініціалізуватися та передати дані, що характерно для кінцевих пристроїв, які працюють на батареях і можуть функціонувати роками завдяки наднизькому енергоспоживанню [17-19].

Таблиця 2.3 – Режими сну: подовження терміну служби батареї

Режим сну	**Споживана потужність**	**Час пробудження**	**Випадок використання**
Режим глибокого сну	Найнижчий (мікроват)	Найдовший	Довгострокові датчики
Режим низького енергоспоживання	Помірний (міліват)	Швидко	Розумні домашні пристрої
Режим постійної роботи	Найвищий	Миттєво	Маршрутизатори, шлюзи

Режим низького енергоспоживання більш типовий для пристроїв, які часто пробуджуються, наприклад, розумних домашніх датчиків температури та вологості. Вони споживають більше енергії (мілівати), але пробуджуються швидко, що дозволяє їм оперативно передавати дані [19].

Кінцеві пристрої виходять із сну лише у разі необхідності, наприклад, коли спрацьовує тригер виявлення руху. Більшу частину часу вони неактивні, надсилаючи дані лише в разі потреби, що дозволяє їм працювати на одній батареї тривалий час. На відміну від Zigbee, Wi-Fi-датчики постійно підключені до мережі, споживають 100-200 мВт і швидко розряджають батареї, що може призводити до витікання хімічної складової та корозії контактів [19-20].

2.4 Практичні експерименти з енергоефективності ZigBee

Оскільки ZigBee є малопотужним і енергоефективним протоколом, постає питання фактичного рівня його енергоефективності, що залежить від конфігурації мережі, типу пристроїв та робочих умов. Для того щоб кількісно визначити споживання енергії в різних умовах, було проведено структурний тест, під час якого вимірювалися показники споживання у різних конфігураціях та з різними пристроями. До тестування також було залучено Wi-Fi пристрій для порівняння, що дозволило визначити оптимальні параметри для мінімізації споживання енергії.

Підготовка до вимірювання енергоспоживання ZigBee – обрані інструменти для проведення контрольних тестів. Для вимірювання енергоспоживання пристроїв ZigBee використовувалися практичні експерименти в різних сценаріях, адже основна мета – оцінити рівень енергоефективності саме кінцевих пристроїв, оскільки саме вони мають працювати максимально довго від одного заряду батареї. Тестування включало три ZigBee пристрої та один Wi-Fi пристрій, а також координатор мережі.

Ключовими параметрами дослідження стали:

— ролі пристроїв;

— топологія мережі;

— частота передачі даних;

— режими сну (роботи).

Перше, що враховувалося, – вибір ролей пристроїв у мережі, тобто координатора та кінцевих пристроїв. У випадку ZigBee використовується координатор та кінцевий пристрій, що створює зіркоподібну топологію мережі – це найенергоефективніший варіант для розумного будинку, який не вимагає додаткових маршрутизаторів. Якщо ж необхідне розширення, можна створити деревоподібну або сітчасту топологію, додавши маршрутизатори.

Ще один параметр дослідження – частота передачі даних. Більшість пристроїв ZigBee працюють на низькій швидкості передачі, оскільки це датчики, яким немає потреби в постійній комунікації. Натомість Wi-Fi пристрій у тестуванні мав вищу швидкість передачі, що значно впливало на його енергоефективність. Оскільки в Wi-Fi кожен пристрій підключається окремо, енергоспоживання зростає, а батарея розряджається швидше.

Важливим фактором у дослідженні став вплив режимів сну на енергоспоживання. Пристрої можуть працювати в активному режимі або переходити у режими сну.

Є три основні режими:

— активний режим роботи;

— режим низького енергоспоживання;

— режим глибокого сну.

Під час тестування використовуються такі компоненти, що формують мережу Zigbee. Перший із них – координатор, а саме Zigbee-адаптер Sonoff Zigbee версії P – це USB-адаптер, який створює, контролює та керує мережею Zigbee. Його можна підключати до сервера, ноутбука або будь-якого іншого пристрою через USB-інтерфейс, де встановлено наступний компонент мережі тестування (див. рис. 2.17).



Рисунок 2.17 – USB Координатор Sonoff Zigbee P для створення Zigbee мережі

Другий компонент – це віртуальна машина на основі VMware Player або VMware Workstation. Вона виконує роль сервера, який контролює процеси в мережі Zigbee, забезпечує глибший рівень керування та налаштувань (див. рис. 2.18). Хоча можливе використання VirtualBox, для тестування обрано саме VMware.

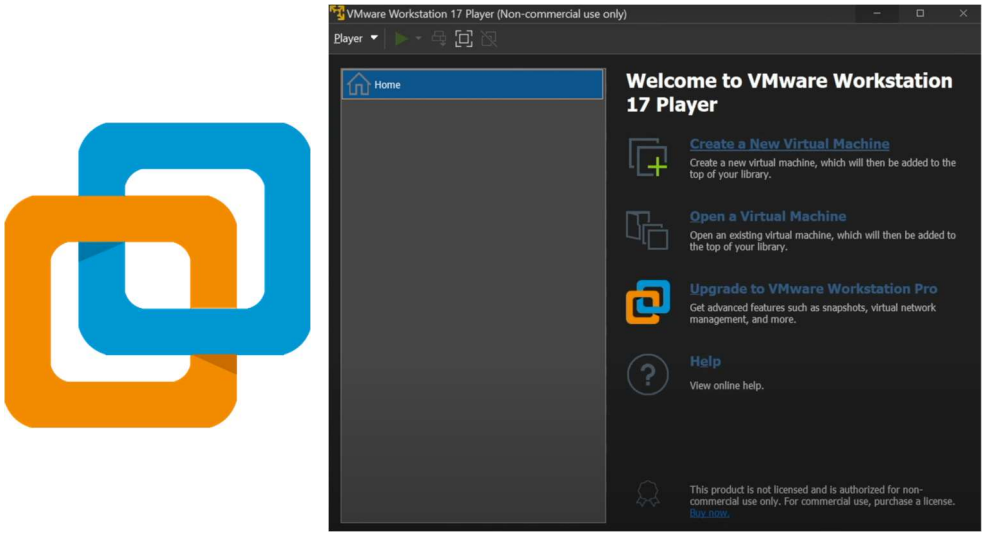


Рисунок 2.18 – ПЗ для віртуалізації: VMware Workstation 17 Player

Щоб забезпечити роботу сервера, використовується платформа Home Assistant OS. Ця операційна система встановлюється у віртуальній машині й дозволяє локально керувати мережею Zigbee без необхідності підключення до

хмарних сервісів (див. рис. 2.19). Для зручного доступу до Home Assistant у локальній мережі використовується маршрутизатор.

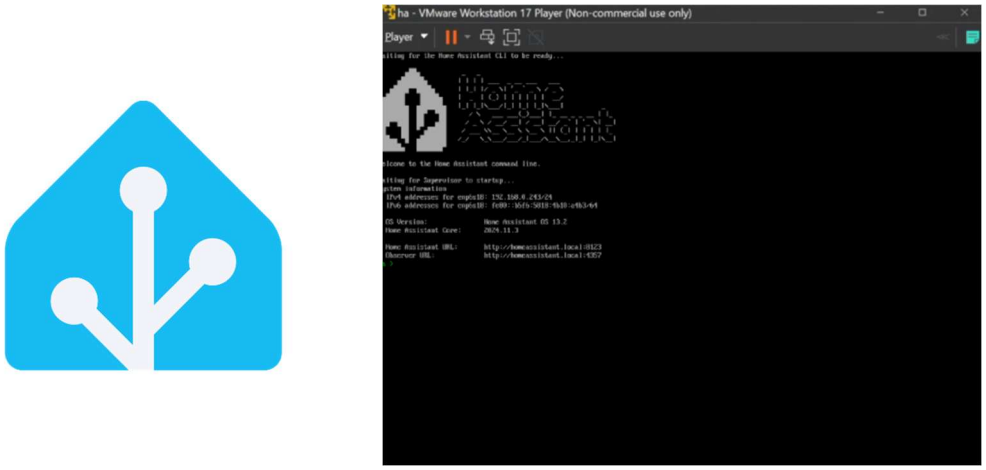


Рисунок 2.19 – Встановлений Home Assistant OS у якості віртуальної машини

До сервера підключається USB-адаптер Sonoff Zigbee P, що працює на мікропроцесорі Texas Instruments. Після його налаштування до мережі підключаються кінцеві пристрої. Для повноцінного функціонування Zigbee в Home Assistant встановлюються додаткові модулі – наприклад, Zigbee Home Automation або більш просунутий Zigbee2MQTT, який забезпечує кращу візуалізацію мережі та розширені можливості керування (див. рис. 2.20).

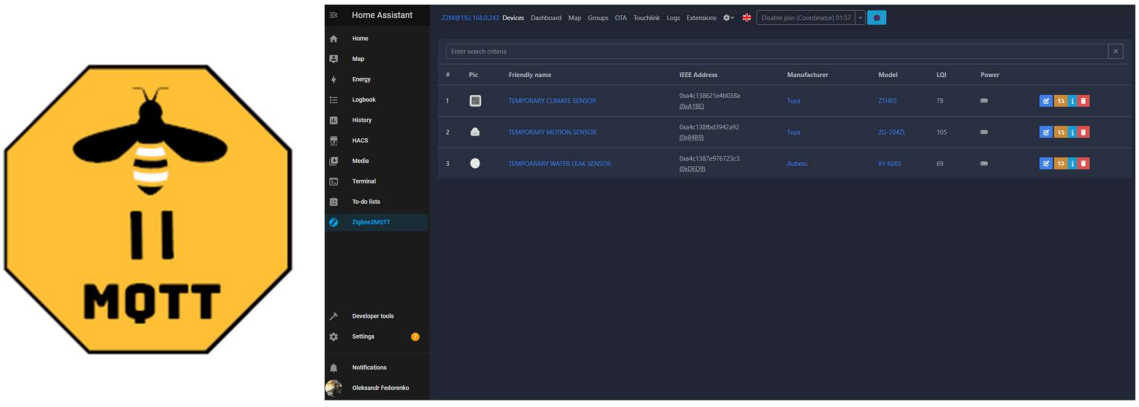


Рисунок 2.20 – Доповнення до Home Assistant: Zigbee2MQTT

У тестуванні використовуються три кінцеві пристрої Zigbee (див. рис. 2.21):

— датчик руху та освітленості, що працює від батарейки CR2032;

— датчик витоку води на батарейці CR2450;

— датчик температури та вологості, що також використовує CR2032.



Рисунок 2.21 – Кінцеві пристрої Zigbee та власне джерело живлення: датчик руху та освітлення, датчик витоку води, датчик температури та вологості

Для порівняння з технологією Wi-Fi у тестуванні задіяно ще один пристрій – Wi-Fi-датчик витоку води, який живиться від двох батарейок AAA (див. рис. 2.22). Вже під час попереднього використання виявлено, що батарейки в цьому пристрої розряджаються за 1-2 тижні та можуть «протікати», що пошкоджує контакти, що свідчить про високе енергоспоживання пристроїв на Wi-Fi у порівнянні з Zigbee.

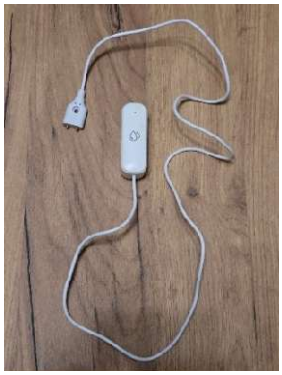


Рисунок 2.22 – Кінцевий пристрій Wi-Fi: датчик витоку води

Для вимірювання енергоспоживання використовуються доступні інструменти. Основний серед них – мультиметр DT-832 (див. рис. 2.23).



Рисунок 2.23 – Цифровий мультиметр DT-832

Також створено простий лабораторний блок живлення, що забезпечує напругу 3,3 В. Для цього використовується (див. рис. 2.24):

— Power Bank Xiaomi 10 000 мАг із режимом зарядки малими струмами;

— USB DC-DC перетворювач (0,3 В - 24 В);

— USB-тестер для контролю напруги та струму;

— саморобні дроти-крокодили для підключення тестованих пристроїв.

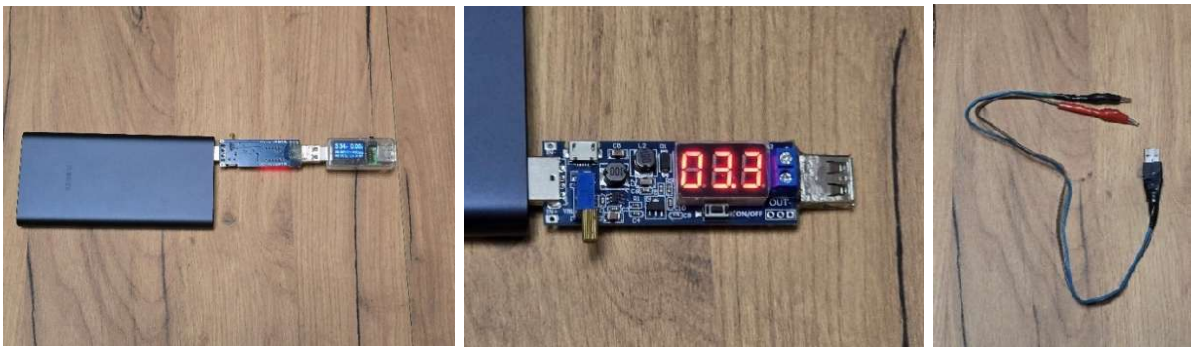


Рисунок 2.24 – DIY лабораторний блок живлення на базі Power Bank Xiaomi, USB DC-DC перетворювача та USB-тестера

Мультиметр налаштовується в режим вимірювання струму (див. рис. 2.25):

— 20 мА для базового аналізу;

— 200 мА для більшого споживання та мікроамперний режим для детальніших вимірювань.

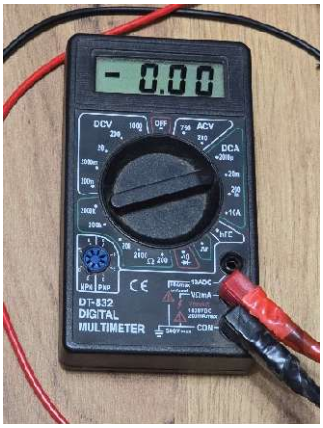


Рисунок 2.25 – Мультиметр виставлено у режим вимірювання мА

Критерії щодо тестування. Проведення тестування та подальший аналіз результатів. Для проведення тестування було підготовлено мініатюрний тимчасовий лабораторний блок живлення, створений на основі павербанка USB, DC-DC перетворювача, USB тестера та USB-крокодилів. Такий портативний блок живлення імітує роботу батареї. На мультиметрі встановлено режим вимірювання сили струму (ампер), з можливістю перемикання між мікро- та міліамперами для точного аналізу споживання.

Кінцеві пристрої попередньо синхронізовано з мережею Zigbee, додано до аддона Zigbee2MQTT у Home Assistant. Для цього було налаштовано віртуальну машину на основі VMware Player із завантаженим образом Home Assistant OS. Доступ до системи здійснюється через IP-адресу у локальній мережі. До ноутбука підключено USB Dongle версії P від Sonoff, додано його у віртуальну машину як USB-пристрій, після чого з’явився доступ до Zigbee2MQTT у Home Assistant (див. рис. 2.26).

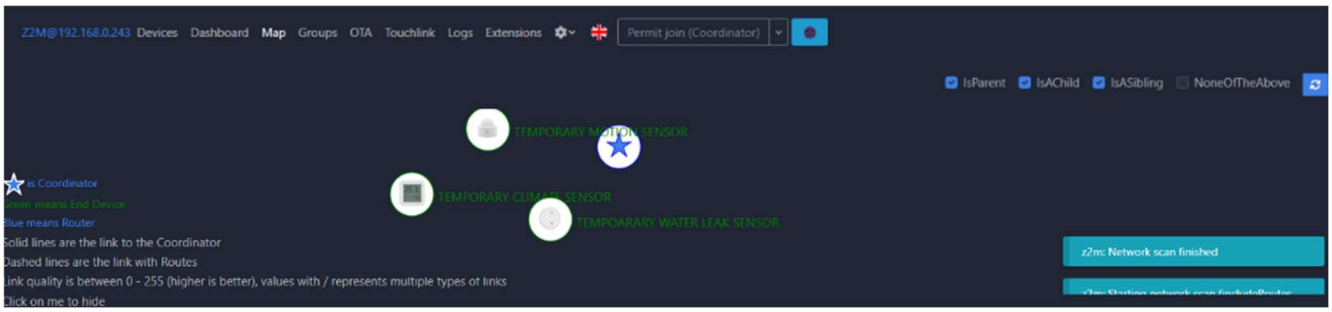


Рисунок 2.26 – Тимчасова Zigbee мережа для
проведення контрольованого тестування

До створеної Zigbee-мережі поступово додано три пристрої (див. рис. 2.27):

— датчик руху та освітленості.

— датчик витоку води;

— датчик температури і вологості.

Попередньо кожен пристрій переведено в режим синхронізації, що активується натисканням кнопки або утриманням скрепки в спеціальному отворі протягом 5-10 секунд. Після цього пристрої автоматично з’являлися у Zigbee2MQTT, де підтверджувалося їхнє підключення, відображалася інформація про прошивку, з’являлася можливість змінити їхню назву та переглянути параметри роботи, включаючи рівень сигналу та зв’язки між пристроями у створеній мережі.

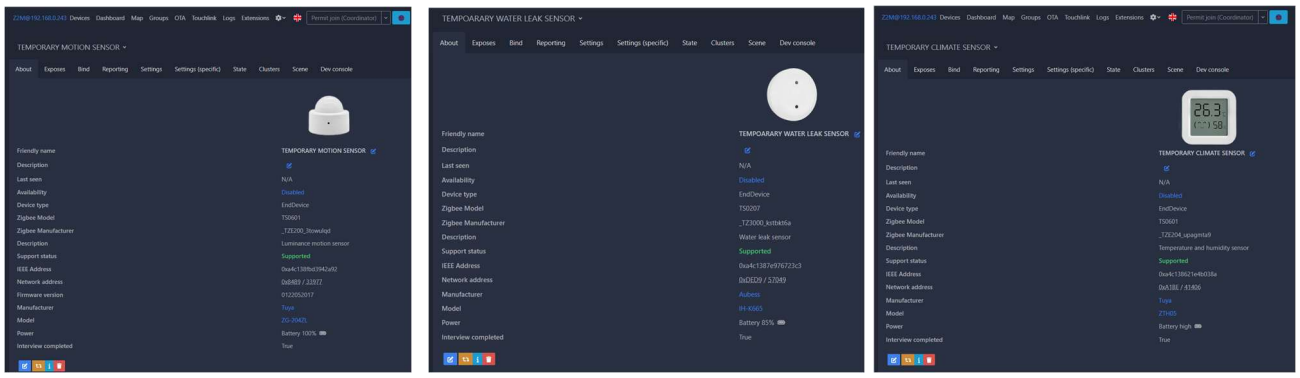


Рисунок 2.27 – Підключені кінцеві пристрої до Zigbee мережі
зі детальним описом параметрів у ZigBee2MQTT

Окремо для порівняння було додано Wi-Fi датчик витоку води. Його інтеграція виконувалася через додаток Smart Life (див. рис. 2.28). Після реєстрації пристрій переведено в режим синхронізації аналогічним способом – утриманням кнопки протягом кількох секунд до початку миготіння індикатора. Далі, у додатку Smart Life сканувалася мережа, вводилися параметри Wi-Fi, і пристрій підключався, що дозволило порівняти споживання енергії пристроїв Zigbee та Wi-Fi за аналогічних умов.

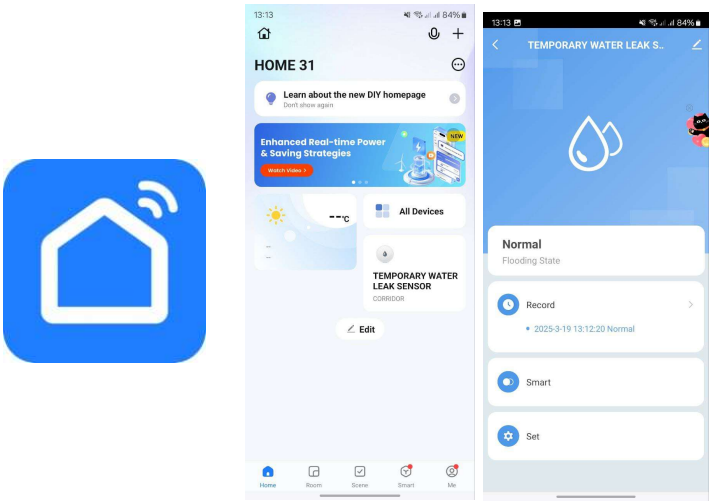


Рисунок 2.28 – Підключений кінцевий пристрії до Wi-Fi мережі через додаток Smart Life

Лабораторний блок живлення побудовано на основі Xiaomi Power Bank 10000 мА·год, переведеного в режим малих навантажень. Напруга виставлена на 3,3 В через DC-DC перетворювач із потенціометром. Для контролю використано USB тестер, який підтверджував правильність налаштувань. Далі через USB-крокодили пристрій підключався до мультиметра, що дозволяло вимірювати силу струму, який споживає кінцевий пристрій (див. рис. 2.29).

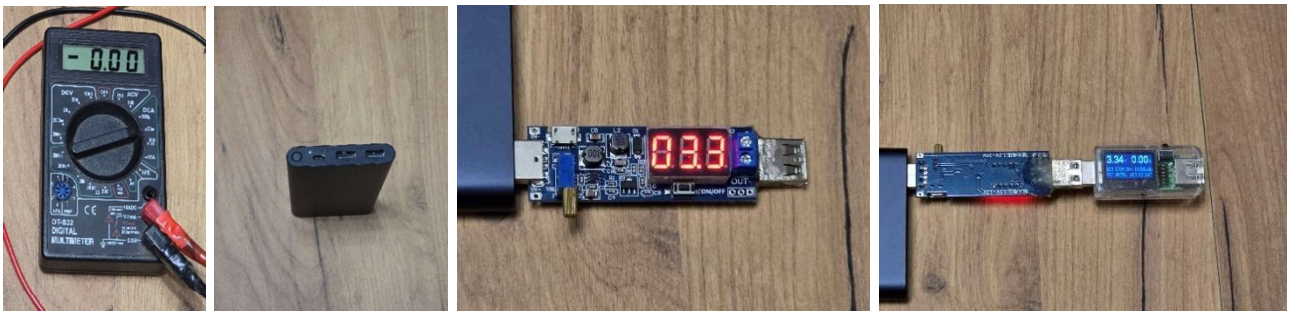


Рисунок 2.29 – Підготування наявних інструментів до тестування

Вимірювання проводилося в різних умовах:

— при розташуванні координатора поруч (коротка відстань);

— за однією стіною (середня відстань);

— та за двома стінами (максимальна відстань).

Аналізувалися режими активної передачі даних і стан очікування, що дозволило оцінити енергоспоживання пристроїв та визначити, чи переходять вони в режим низького енергоспоживання або глибокого сну (див. рис. 2.30).

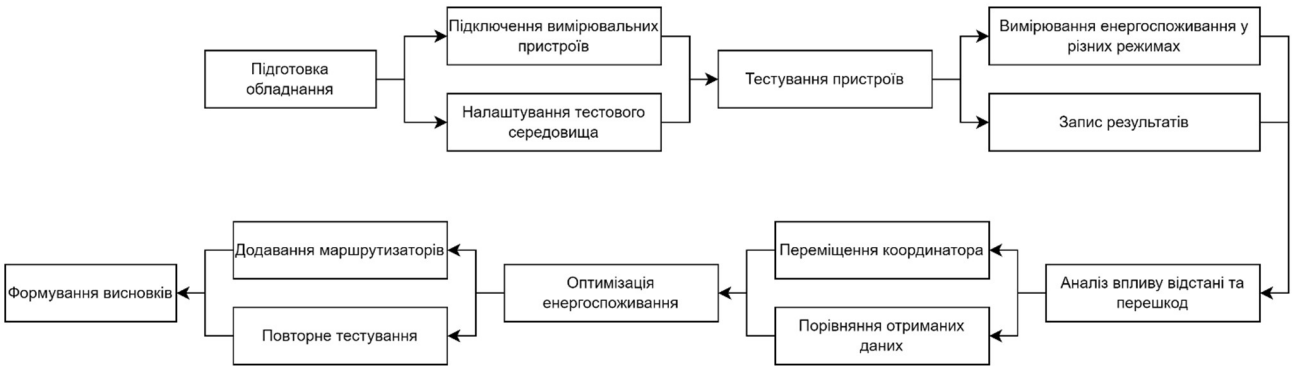


Рисунок 2.30 – Процес тестування Zigbee пристроїв на енергоспоживання

Тестування енергоспоживання – датчик руху та освітленості Zigbee. Перше, що було протестовано, – це споживання енергії кінцевого пристрою, зокрема датчика руху (див. рис. 2.31), який реагує на наявність руху та передає дані тільки при його виявленні. Якщо руху немає, передача не здійснюється, і пристрій очікує наступної події.

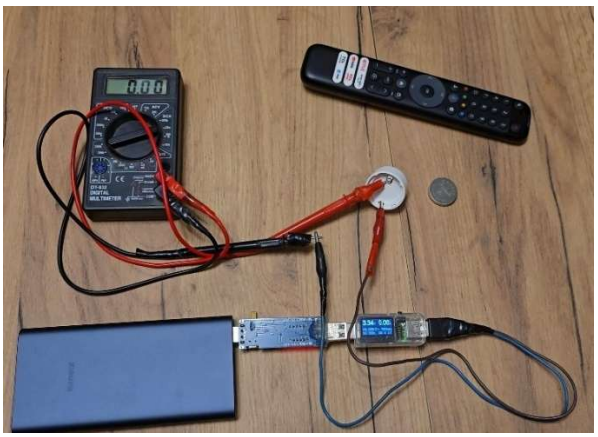


Рисунок 2.31 – Схема підключення зібраного обладнання для тестування: Zigbee датчик руху та освітлення

У першому тестуванні (див. рис. 2.32), на короткій відстані до координатора, в умовах мережі Zigbee, побудованої за топологією «зірка», кінцевий пристрій було синхронізовано з координатором. Під час підключення мультиметра та лабораторного блока живлення зафіксовано, що стрибки сили струму для датчика руху та освітленості коливалися від 0,06 мА до 0,85 мА при напрузі 3,34 В, що відбувалося у активному режимі, коли пристрій передавав дані. Виявлено, що незалежно від тривалості руху, пристрій передавав дані протягом 20 секунд, після чого очікував зміни статусу на «руху немає» і знову надсилав оновлену інформацію. Через 20 секунд після останньої передачі пристрій переходив у режим глибокого сну, де його споживання дорівнювало нулю.

У другому тесті (див. рис. 2.32) координатор було переміщено на середню відстань, тобто за одну стіну від кінцевого пристрою. За тих самих умов, стрибки сили струму при 3,34 В протягом 20 секунд передачі даних коливалися вже в межах від 0,15 мА до 1,65 мА. Після кожного сеансу передачі пристрій знову переходив у стан очікування, а при оновленні статусу на «руху немає» знову передавав дані протягом 20 секунд і потім занурювався у режим глибокого сну.

У третьому тесті (див. рис. 2.32) координатор переміщено на максимальну відстань, тобто за дві стіни від кінцевого пристрою. У цих умовах стрибки сили струму становили від 0,28 мА до 2,06 мА при 3,34 В, але поведінка пристрою

залишилася аналогічною попереднім тестам. Він передавав дані упродовж 20 секунд, а потім переходив у режим глибокого сну, не споживаючи жодної енергії.

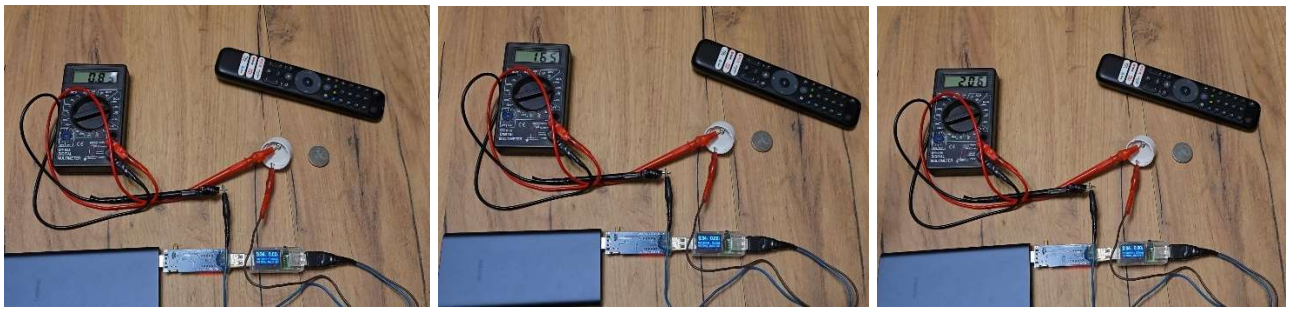


Рисунок 2.32 – Процес тестування Zigbee датчика руху та освітлення

Під час тестування виявлено (див. рис. 2.33), що рівень споживання енергії змінюється залежно від відстані між кінцевим пристроєм і координатором. Хоча різниця у споживанні була незначною, вона чітко простежувалася. Стрибки сили струму на максимальних значеннях фіксувалися лише на короткий проміжок часу, після чого пристрій стабілізувався на середніх показниках. Загалом, незалежно від відстані до координатора, пристрій завжди переходив у режим глибокого сну після 20 секунд активної роботи, під час якого не споживав енергію.

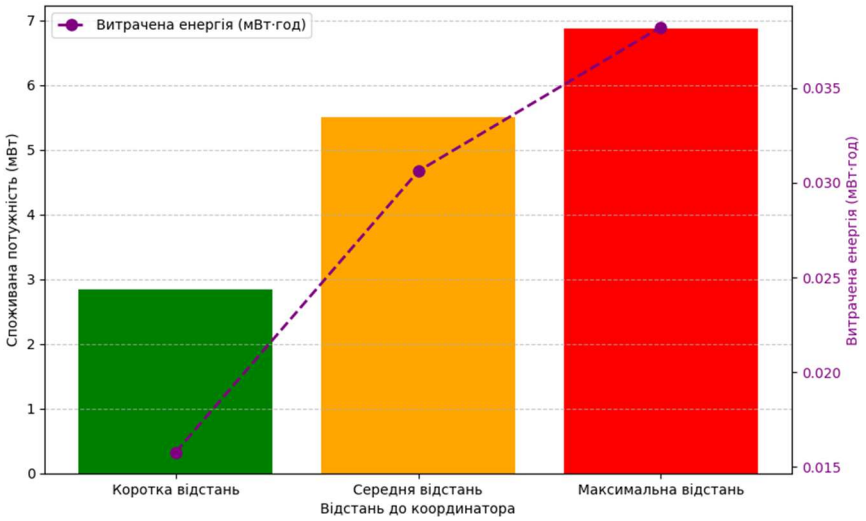


Рисунок 2.33 – Енергоспоживання Zigbee датчика руху та освітлення на час тестування

Тестування енергоспоживання – датчик витоку води Zigbee. Наступним протестованим пристроєм став датчик витоку води, який також пройшов три тестування в різних умовах за тією ж схемою (див. рис. 2.34), що і попередній кінцевий пристрій Zigbee. Для його роботи використовували контактні бази, що при замиканні активують датчик та надсилають сигнал про витік води на координатор. У тестах для імітації витоку застосовувалася вода.

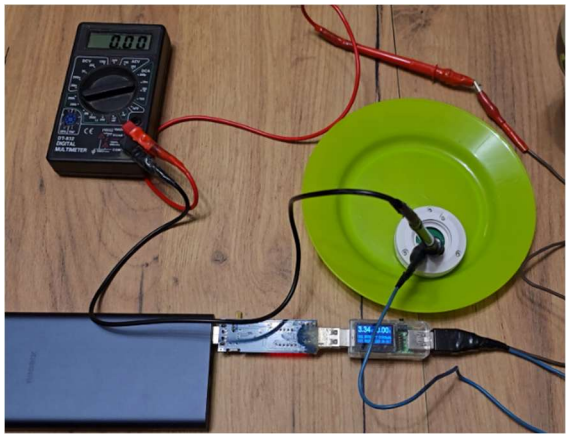


Рисунок 2.34 – Схема підключення зібраного обладнання для тестування: Zigbee датчик витоку води

Перший тест (див. рис. 2.35) проводився на короткій відстані до координатора в мережі Zigbee з топологією «зірка», де пристрій було синхронізовано та підключено до координатора. У цьому випадку споживання енергії було більшим, ніж у попереднього датчика, але тривало не більше 5 секунд. Стрибки сили струму становили від 0,53 мА до 6,05 мА при 3,34 В. Після цього, навіть якщо витік води не був усунений і контактні бази залишалися замкненими, пристрій переходив у режим глибокого сну, де споживання дорівнювало нулю.

Другий тест (див. рис. 2.35) проводився на середній відстані до координатора, за одну стіну. Топологія мережі залишалася тією ж. Стрибки сили струму в цьому випадку були вищими – від 1,02 мА до 7,04 мА при 3,34 В, але також тривали лише 5 секунд. Незалежно від того, залишався витік активним чи вода була усунена, пристрій після передачі даних завжди переходив у режим глибокого сну, в якому не споживав енергію до наступної зміни статусу.

Третій тест (див. рис. 2.35) проводився на максимальній відстані, коли координатор був розміщений за дві стіни від кінцевого пристрою. Пристрій був підключений напряму до координатора, оскільки мережа використовувала топологію «зірка». У цьому випадку споживання під час активації становило від 2,17 мА до 7,42 мА при 3,34 В і тривало ті ж 5 секунд, після чого пристрій знову переходив у режим глибокого сну.

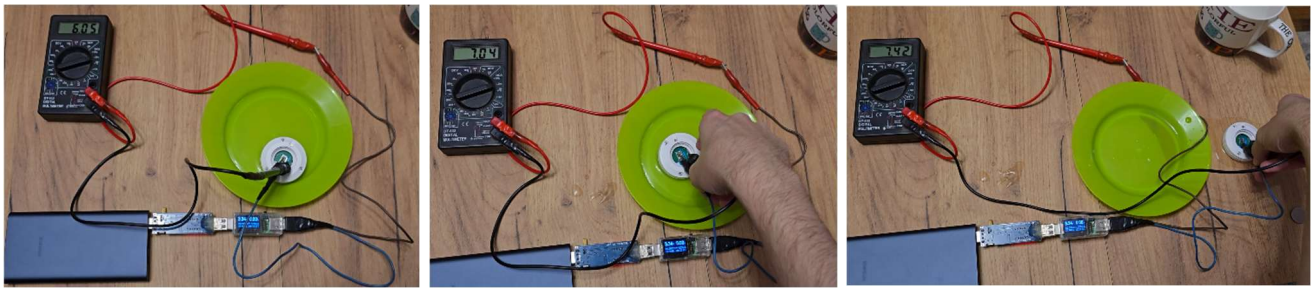


Рисунок 2.35 – Процес тестування Zigbee датчика витоку води

Результати тестування показали (див. рис. 2.36), що хоча датчик витоку води споживає більше енергії, ніж датчик руху та освітленості, він активується значно рідше. Його споживання триває лише 5 секунд, тоді як у датчика руху та освітленості – 20 секунд, що загалом робить його більш енергоефективним у довгостроковій перспективі. При цьому датчик руху та освітленості має більшу батарею CR2450, тоді як датчик витоку води працює на меншій CR2032.

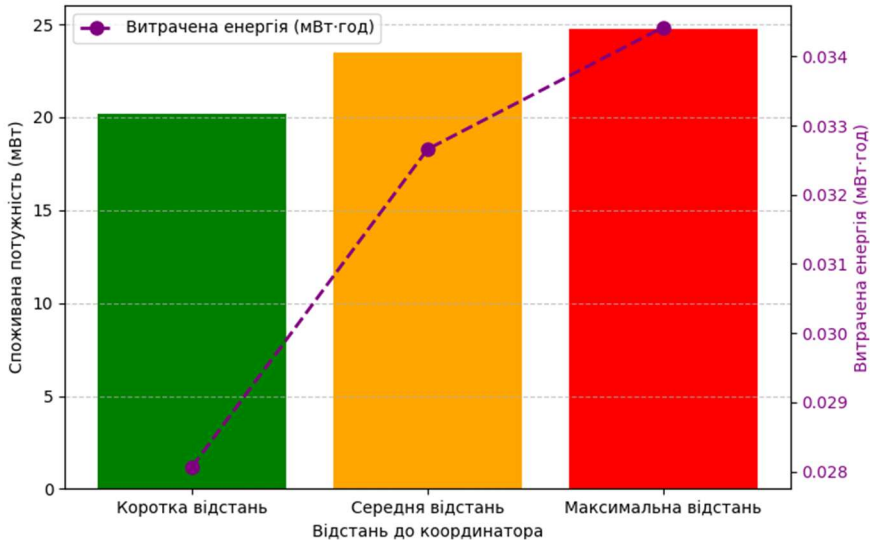


Рисунок 2.36 – Енергоспоживання Zigbee датчика витоку води на час тестування

Так само, як і у випадку з датчиком руху, тестування показало зміну у споживанні при збільшенні відстані до координатора, що ще раз підкреслює важливість правильного розташування кінцевих пристроїв ближче до координатора або маршрутизатора, який може приймати сигнал і передавати його далі. Оскільки в топології «зірка» всі пристрої підключені напряму до координатора, при збільшенні відстані можливі втрати сигналу та похибки у передачі даних, що трапляється рідше у топологіях «сітка» або «дерево».

Тестування енергоспоживання – датчик температури та вологості Zigbee. Наступним протестованим кінцевим пристроєм Zigbee став датчик температури та вологості. Під час тестування виникла необхідність підпаяти один із контактів через проблему з однополярністю, яка заважала правильному підключенню. Після усунення цієї перешкоди пристрій підключили за тією ж схемою, що й попередні пристрої, створивши аналогічні умови тестування (див. рис. 2.37).

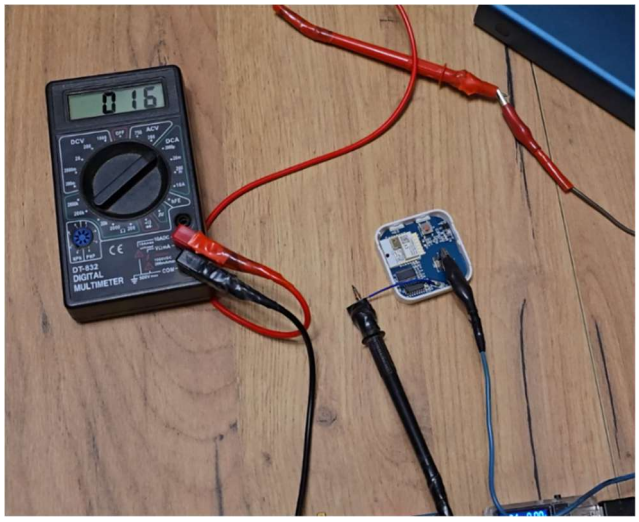


Рисунок 2.37 – Схема підключення зібраного обладнання для тестування: Zigbee датчик температури та вологості

Датчик температури та вологості відрізняється від інших тим, що постійно працює, незалежно від того, передає він дані чи ні, що означає, що споживання енергії у нього відбувається постійно. Під постійним споживанням мається на увазі додатковий вплив на витрати енергії має монохромний екран, який залишається ввімкненим і може змінювати показники. Якби екран був відсутній, термін служби

пристрою значно збільшився б, оскільки батарея розряджалася б повільніше – лише під час передачі даних. Водночас наявність екрану робить пристрій більш зручним у використанні в системах розумного будинку.

У першому тесті (див. рис. 2.38) датчик був розміщений на короткій відстані до координатора. У мережі з топологією «зірка» пристрій було підключено та синхронізовано напряму з координатором. У такому режимі стрибки сили струму коливалися від 0,81 мА до 3,74 мА при 3,34 В протягом 5 секунд. Після цього пристрій переходив у режим низького енергоспоживання, у якому споживання становило 0,01 мА (або 160 мкА) з можливими коливаннями до 240 мкА, що підтверджує постійне, хоч і незначне споживання енергії через наявність екрану. У порівнянні з датчиком витоку води, який у режимі глибокого сну взагалі не споживав енергії, цей пристрій має іншу концепцію роботи, що впливає на термін служби батареї.

Другий тест (див. рис. 2.38) проводився на середній відстані до координатора за тією ж топологією «зірка». Пристрій залишався підключеним напряму, і споживання під час передачі даних зросло. Стрибки сили струму становили від 1,22 мА до 4,73 мА при 3,34 В на протязі 5 секунд. Після цього пристрій знову переходив у режим низького енергоспоживання, де споживання залишалося в межах 0,01-0,02 мА (160-240 мкА).

Третій тест (див. рис. 2.38) проводився на максимальній відстані, коли координатор був за двома стінами від кінцевого пристрою. Як і в попередніх тестах, пристрій підключався напряму до координатора за тією ж схемою. У цьому випадку стрибки сили струму під час активного режиму становили від 1,88 мА до 6,26 мА при 3,34 В на протязі 5 секунд. Після завершення передачі даних пристрій знову повертався до режиму низького енергоспоживання зі споживанням 0,01-0,02 мА (160-240 мкА).

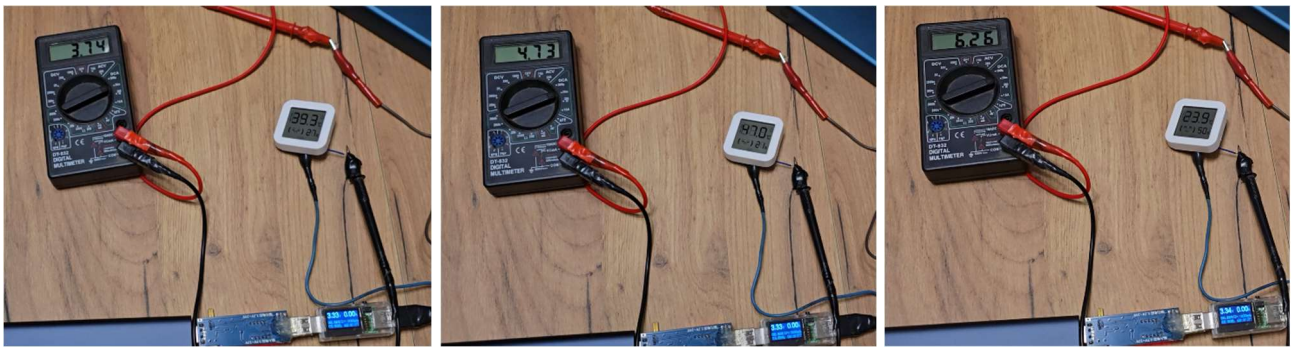


Рисунок 2.38 – Процес тестування Zigbee датчика температури та вологості

Тестування показало (див. рис. 2.39), що датчик змінював свій статус лише тоді, коли відбувалися зміни температури чи вологості. Встановлені налаштування передбачали оновлення даних приблизно раз на 5 хвилин, але цей параметр можна було змінити. Якщо збільшити інтервал оновлення, наприклад, до 1-3 годин, споживання енергії значно зменшиться, що продемонстрували графічні показники тесту – це важливий фактор для енергоефективності, оскільки наявність постійно активного екрану вже впливає на витрати енергії.

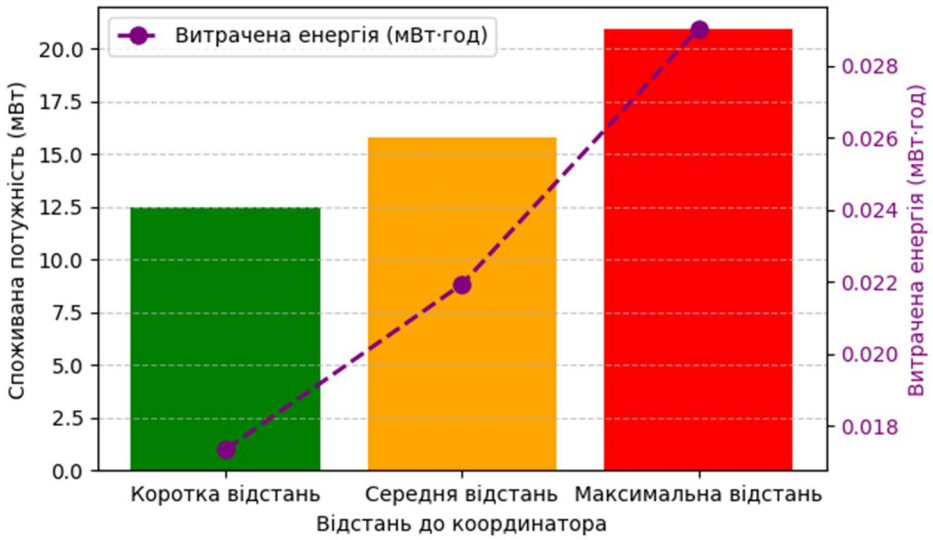


Рисунок 2.39 – Енергоспоживання Zigbee датчика температури та вологості на час тестування

З огляду на всі результати можна зробити висновок, що датчик температури та вологості з екраном, швидше за все, пропрацює близько 6 місяців, тоді як

аналогічний пристрій без екрану може працювати рік і більше, перебуваючи в режимі глибокого сну.

Тестування енергоспоживання – датчик витоку води Wi-Fi. Фінальним протестованим пристроєм, взятим для порівняння, став датчик витоку води, що працює в мережі Wi-Fi, і це вже не Zigbee-пристрій, тому умови тестування були дещо іншими. Положення маршрутизатора Wi-Fi залишилося незмінним, і тест проводився лише один раз. Як і у випадку з датчиком температури та вологості, тут також виникла необхідність підпаяти один із контактів для коректного підключення (див. рис. 2.40).

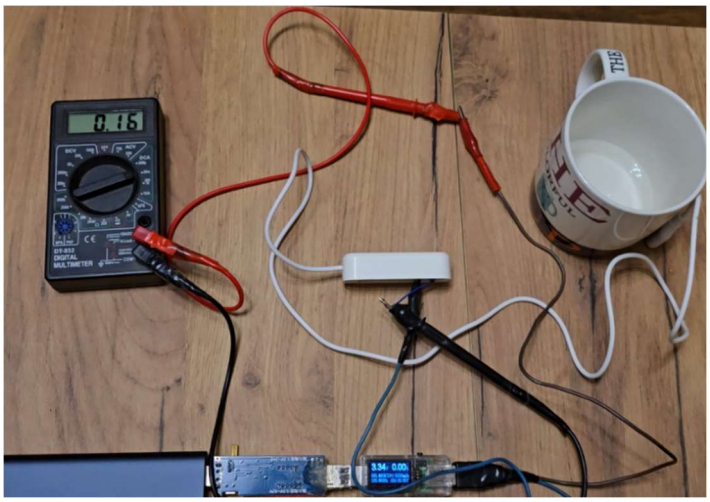


Рисунок 2.40 – Схема підключення зібраного обладнання для тестування: Wi-Fi датчик витоку води

Датчик витоку води, що працює через Wi-Fi, є більш громіздким порівняно з його Zigbee-аналоном. Він має контактну базу на спеціальному кабелі, який використовувався для імітації витоку води шляхом замикання контактів. Мережа Wi-Fi, як і Zigbee, побудована за топологією «зірка», тому сам пристрій був підключений безпосередньо до маршрутизатора. Принципова відмінність Wi-Fi-датчика полягає у значно вищій швидкості передачі даних, яка не обмежується 250 кбіт/с, як у Zigbee, а може бути значно вищою.

Під час тесту, коли змінювався статус пристрою через імітацію витоку води, спостерігалися різкі стрибки сили струму. Найнижче зафіксоване значення

становило 26 мА, а найвище – 78 мА, при цьому середнє значення було приблизно 45 мА. Напруга залишалася незмінною – 3,34 В, а сам сплеск споживання тривав 30 секунд. Після цього пристрій, залишаючись постійно підключеним до Wi-Fi, перейшов у стан, схожий на режим низького енергоспоживання, в якому споживання становило 0,1 мА (або 160 мкА) і залишалося стабільним (див. рис. 2.41).

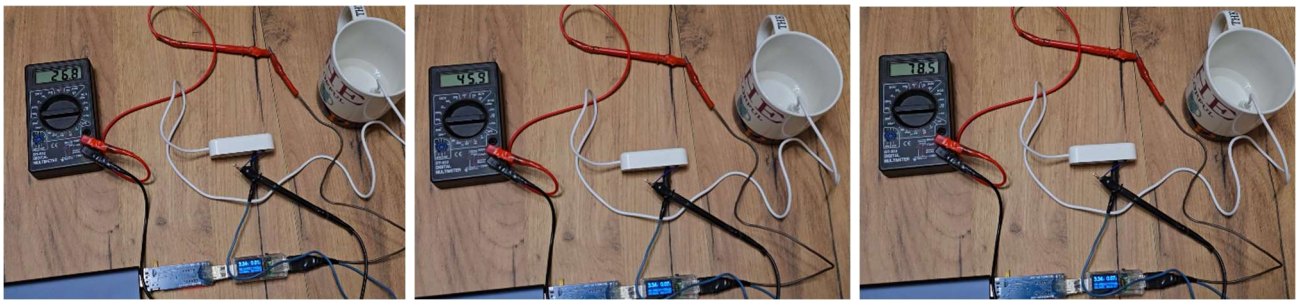


Рисунок 2.41 – Процес тестування Wi-Fi датчика витоку води

Порівняння з Zigbee-датчиком витоку води (див. рис. 2.34-2.36) показало значну різницю в споживанні енергії. У той час як максимальне споживання Zigbee-датчика не перевищувало 7 мА, Wi-Fi-версія споживала до 78 мА (див. рис. 2.42), що суттєво вплинуло на час автономної роботи – Wi-Fi-датчик витратив заряд батареї значно швидше, що призвело до її розрядження всього за 1-1,5 тижня. Після цього відбулася витік хімічних складових із батарейок (формату AAA), що може бути небезпечним та потребує частого контролю рівня заряду (див. рис. 2.22).

З отриманих результатів можна зробити висновок, що Zigbee-датчик витоку води є значно більш енергоефективним, ніж його Wi-Fi-аналог. Він споживає менше енергії, має компактніші розміри та здатен працювати на одному комплекті батарей у рази довше, що ще раз доводить, що пристрої Zigbee є більш економними в контексті споживання енергії та підходять для довготривалого використання без частих змін батарей.

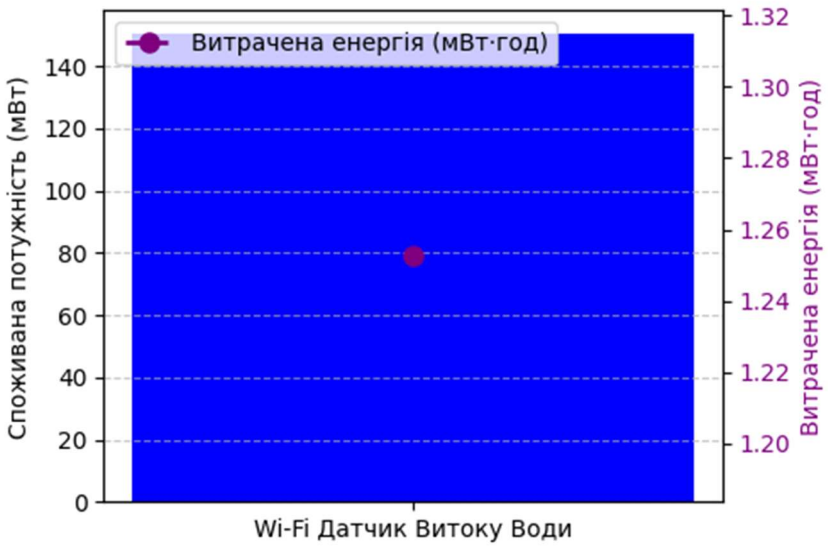


Рисунок 2.42 – Енергоспоживання Wi-Fi датчика витоку води на час тестування

Розрахунок за отриманими результатами. Для оцінки енергоефективності Zigbee та Wi-Fi пристроїв були проведені тести, за якими були складені результати (див. табл. 2.4-2.5). Основні параметри, такі як споживана потужність, фактичне споживання енергії та тривалість роботи від батареї, були визначені на основі експериментальних даних та розраховані за допомогою відповідних формул.

Розрахунок споживаної потужності. Для визначення потужності, яку споживає кожен пристрій, використовується формула:

$$P(\text{мВт}) = U(\text{В}) \times I(\text{мА})$$

де:

U – напруга живлення (В);

I – середнє споживання струму (мА).

Застосовуючи цю формулу, отримані значення споживаної потужності для кожного датчика, які наведені у відповідному рядку (див. табл. 2.4).

Розрахунок фактичного споживання енергії за годину. Оскільки передача даних у пристроях відбувається періодично, визначення реального енергоспоживання базується на тривалості активного режиму:

$$W(\text{мВт} \cdot \text{год}) = P(\text{мВт}) \times \frac{t(\text{с})}{3600}$$

де:

P – споживана потужність (мВт);

t – тривалість передачі даних (с).

Для кожного пристрою були проведені вимірювання середньої тривалості активного режиму, на основі яких розраховані значення фактичного енергоспоживання. Вони наведені у відповідному рядку (див. табл. 2.4).

Розрахунок добового, місячного та річного споживання. Загальне енергоспоживання за певний період визначається за формулою:

$$W_{\text{період}} = W_{\text{факт}} \times N$$

де:

$W_{\text{факт}}$ – фактичне споживання за одну передачу (мВт·год);

N – кількість спрацьовувань за відповідний період (добу, місяць, рік).

Використовуючи середню кількість спрацьовувань за день (24 рази), були розраховані значення енергоспоживання за добу, місяць та рік (див. табл. 2.5).

Розрахунок втрати заряду батареї за рік. Оскільки пристрої працюють на батарейному живленні, важливо оцінити рівень втрати заряду протягом року. Для цього використовується формула:

$$\text{Втрати батареї}(\%) = \frac{W_{\text{рік}}}{\text{Ємність батареї}(\text{мВт} \cdot \text{год})} \times 100$$

де:

$W_{\text{рік}}$ – річне енергоспоживання пристрою (мВт·год);

Ємність батареї – 210 мВт·год для Zigbee та 1080 мВт·год для Wi-Fi.

Оцінка орієнтовного терміну роботи пристрою. Розрахунок терміну служби батареї здійснюється за формулою:

$$T(\text{роки}) = \frac{\text{Ємність батареї(мВт} \cdot \text{год)}}{W_{\text{рік}}} \times 1$$

Використовуючи розраховані значення річного енергоспоживання та ємності батареї, були визначені терміни автономної роботи пристроїв, які представлені у відповідному рядку (див. табл. 2.5).

Таблиця 2.4 – Порівняння енергоефективності Zigbee та Wi-Fi пристроїв на основі проведених тестів

Параметр	**Zigbee Датчик Руху та Освітленості**	**Zigbee Датчик Витоку Води**	**Zigbee Датчик Температури та Вологості**	**Wi-Fi Датчик Витоку Води**
Топологія мережі	Зірка	Зірка	Зірка	Зірка
Напруга живлення (В)	3.34	3.34	3.34	3.34
Частота передачі даних	Одна подія	Одна подія	Одна подія	Одна подія
Тривалість передачі (с)	20	5	5	30
Режим роботи	Активний	Активний	Активний	Активний
Режим сну	Глибокий сон	Глибокий сон	Глибокий сон	Глибокий сон
Споживання струму (мА)	0.15 - 2.06	0.53 - 7.42	0.81 - 6.26	26 - 78 (середнє 45)
Середнє споживання (мА)	1.28	3.98	3.54	45
Споживана потужність (мВт)	4.28	13.29	11.83	150.3

Продовження таблиці 2.4 – Порівняння енергоефективності Zigbee та Wi-Fi пристроїв на основі проведених тестів

Параметр	**Zigbee Датчик Руху та Освітленості**	**Zigbee Датчик Витоку Води**	**Zigbee Датчик Температури та Вологості**	**Wi-Fi Датчик Витоку Води**
Фактичне споживання (мВт/год)	0.0238	0.0182	0.0193 (з урахуванням екрану)	1.2525
Споживання в режимі сну (мкА)	0	0	160 (екран)	160
Споживана потужність в режимі сну (мВт)	0	0	0.53 (екран)	0.53

Таблиця 2.5 – Порівняння енергоспоживання Zigbee та Wi-Fi пристроїв за період часу

Період	**Zigbee Датчик Руху та Освітленості**	**Zigbee Датчик Витоку Води**	**Zigbee Датчик Температури та Вологості**	**Wi-Fi Датчик Витоку Води**
За день (мВт·год)	0.5712	0.4368	0.4632	30.06
За місяць (мВт·год)	17.136	13.104	13.896	901.8
За рік (мВт·год)	208.32	159.12	170.75	10957.5
Втрати батареї за рік (%)	~99.2% (батарея 210 мВт·год)	~75.8% (батарея 210 мВт·год)	~81.3% (батарея 210 мВт·год)	~456.5% (батарея 1080 мВт·год)

Продовження таблиці 2.5 – Порівняння енергоспоживання Zigbee та Wi-Fi пристроїв за період часу

Період	**Zigbee Датчик Руху та Освітленості**	**Zigbee Датчик Витоку Води**	**Zigbee Датчик Температури та Вологості**	**Wi-Fi Датчик Витоку Води**
Орієнтовний термін роботи (роки)	~1.01	~1.32	~1.23	~0.22

Підведення підсумків до проведених тестів. Топологія мережі має значний вплив на енергоспоживання пристроїв. Найбільш енергоефективною є топологія «зірка», оскільки вона зменшує кількість маршрутизаторів, які споживають більше енергії. Проведені тести показали, що правильне розташування кінцевих пристроїв поблизу координаторів або маршрутизаторів суттєво знижує їхнє енергоспоживання. При зміні відстані між кінцевим пристроєм та координатором змінюється і рівень енергоспоживання, що вказує на необхідність встановлення додаткових маршрутизаторів, наприклад, розумних розеток або лампочок, для розширення мережі Zigbee та оптимального підключення пристроїв.

Під час тестів встановлено (див. рис. 2.43), що пристрої Zigbee мають низьке середнє споживання струму. Наприклад, Zigbee Датчик Руху та Освітленості споживає в середньому 1.28 мА, Zigbee Датчик Витоку Води — 3.98 мА, а Zigbee Датчик Температури та Вологості (з урахуванням екрану) — 3.7 мА. Для порівняння, Wi-Fi Датчик Витоку Води має середнє споживання 45 мА, що значно перевищує показники пристроїв Zigbee.

Режим сну відіграє ключову роль у мінімізації енергоспоживання. У глибокому сні пристрої Zigbee споживають від 0 до 160 мкА (у випадку датчика температури з екраном), тоді як Wi-Fi пристрої продовжують споживати значну кількість енергії, що пояснює, чому Zigbee датчики можуть працювати понад рік на одній батареї, тоді як Wi-Fi датчики витрачають заряд за 2-3 місяці.

Аналіз енергоспоживання показав, що за день Zigbee Датчик Руху та Освітленості споживає 0.5712 мВт·год, Zigbee Датчик Витоку Води — 0.4368 мВт·год, а Zigbee Датчик Температури та Вологості — 0.4632 мВт·год. Водночас Wi-Fi Датчик Витоку Води витрачає 30.06 мВт·год, що у десятки разів більше. У річному вимірі Zigbee датчики використовують від 159.12 до 208.32 мВт·год, тоді як Wi-Fi датчик витрачає 10957.5 мВт·год.

Втрата заряду батареї за рік у Zigbee датчиків становить приблизно 75-99%, що дозволяє їм працювати від 1 до 1.32 років на одній батареї (210 мВт·год). Для порівняння, Wi-Fi датчик витрачає 456.5% ємності батареї (1080 мВт·год), що означає, що його батарея розряджається за 2-3 місяці.

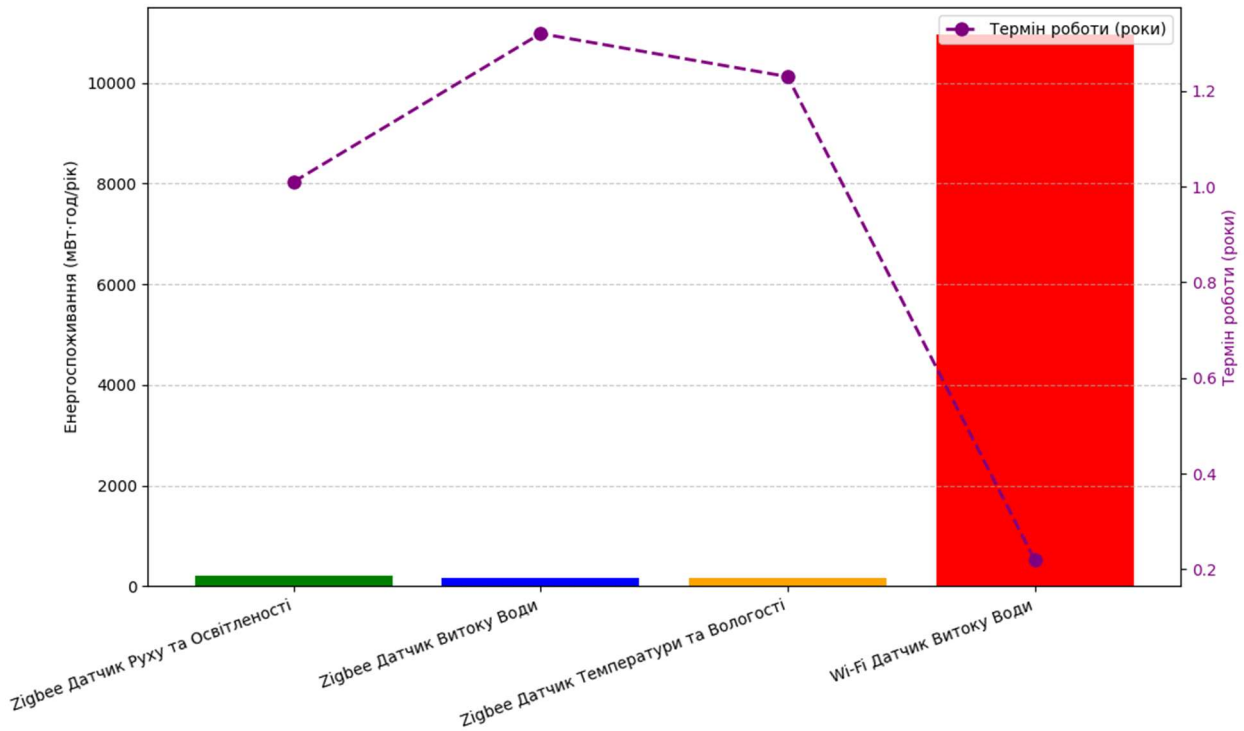


Рисунок 2.43 – Порівняльна діаграма енергоспоживання Zigbee та Wi-Fi пристроїв за рік

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ZIGBEE

3.1 Оптимізація роботи протоколу ZigBee

Протокол ZigBee розроблений для пристроїв Інтернету речей (IoT), де критично важливим є низьке енергоспоживання. Проведені тести з різними кінцевими пристроями ZigBee, а також їх порівняння з аналогами на основі Wi-Fi, продемонстрували значну перевагу ZigBee у споживанні енергії та тривалості автономної роботи.

Пристрої, що використовують ZigBee, працюють значно довше завдяки оптимізованому енергоспоживанню. Їхня робота базується на енергоефективних алгоритмах та механізмах передачі даних. На відміну від Wi-Fi, ZigBee-пристрої знаходяться в режимі глибокого сну і активуються лише у відповідь на певні події, що дозволяє мінімізувати втрати енергії. Наприклад, датчики руху, температури чи витоку води не споживають енергію у неактивному стані, а передають дані лише у момент спрацювання [4, 1-3, 6, 17-19].

Випробування показали, що відстань до приймача має значний вплив на енергоспоживання. Чим далі розташований пристрій, тим більше енергії витрачається на передачу сигналу, що відбувається через необхідність підвищення потужності сигналу, що призводить до експоненційного збільшення споживання енергії. Для коректного аналізу цього процесу було використано відповідні розрахунки та тестові заміри річного енергоспоживання різних типів пристроїв.

Споживання енергії безпосередньо залежить від частоти спрацювання датчиків. Наприклад, датчик руху, що активується десятки разів на день, споживатиме більше енергії, ніж аналогічний пристрій у малопрохідній зоні. Датчик відкриття дверей спрацьовує тільки при їхньому відкритті, а в закритому стані не витрачає енергію. Так само працюють датчики витоку води — вони залишаються у сплячому режимі, поки не буде виявлено витік. Водночас деякі

датчики, такі як сенсори температури, вологості чи газу, працюють у режимі постійного моніторингу, передаючи дані через певні проміжки часу (див. рис. 3.1).

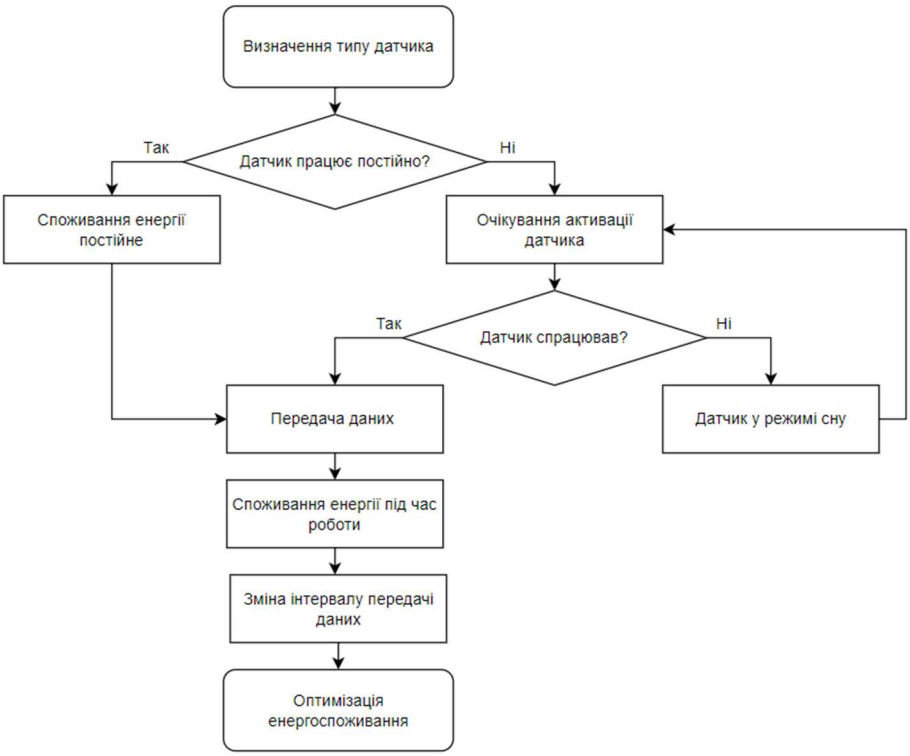


Рисунок 3.1 – Метод оптимізації енергоспоживання кінцевих пристроїв ZigBee шляхом зміни частоти передачі неістотних даних

Частоту перевірки параметрів можна регулювати. Наприклад, датчики температури зазвичай передають дані кожні 5 хвилин, але цей інтервал можна збільшити, щоб зменшити витрати енергії. Подібне налаштування можливе і для датчиків руху — можна змінити затримку повторного спрацьовування, щоб пристрій не активувався надто часто.

Порівняльні тести показали, що Wi-Fi пристрої споживають значно більше енергії, оскільки вони постійно підтримують зв’язок із мережею. Наприклад, Wi-Fi датчик витоку води споживав у середньому 45 мА, тоді як ZigBee-аналоги працювали в межах 1–4 мА. Крім того, Wi-Fi пристрої споживають енергію навіть у неактивному стані.

Тип живлення також впливає на тривалість роботи пристроїв. Датчики ZigBee зазвичай використовують літієві батареї CR2032, які мають невелику ємність, але завдяки низькому енергоспоживанню пристроїв можуть забезпечувати їхню роботу протягом тривалого періоду. У Wi-Fi пристроях частіше застосовуються батареї більшої ємності, проте їхнє високе споживання енергії значно скорочує термін служби.

Під час тестів було помічено, що лужні батарейки у Wi-Fi датчиках швидко виходять з ладу через високе споживання струму. Літієві елементи живлення, хоча і дорожчі, забезпечують стабільнішу роботу та менше піддаються витіканню.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що протокол ZigBee забезпечує високу енергоефективність завдяки оптимізованій схемі передачі даних та механізму переходу в режим сну. Максимальні пікові навантаження, зафіксовані під час тестування, були короткотривалими, тоді як Wi-Fi пристрої демонстрували стабільно високе споживання. Загалом, ZigBee є більш придатним для автономних пристроїв, що працюють на батарейках, забезпечуючи тривалий термін служби без необхідності частих замін елементів живлення.

Динамічне налаштування активного/сплячого режимів шляхом впровадження адаптивного робочого циклу. Адаптивний робочий цикл дозволяє динамічно налаштовувати активний та сплячий режими пристроїв, що впливає на їх енергоспоживання та ефективність роботи (див. рис. 3.2). У випадку Zigbee-пристроїв це особливо важливо, оскільки вони можуть самостійно визначати, коли слід переходити в сплячий режим, щоб мінімізувати витрати енергії. Робочий цикл визначає, скільки часу пристрій залишається активним, а також у якому режимі перебуває – низького енергоспоживання чи глибокого сну [15, 17-19].

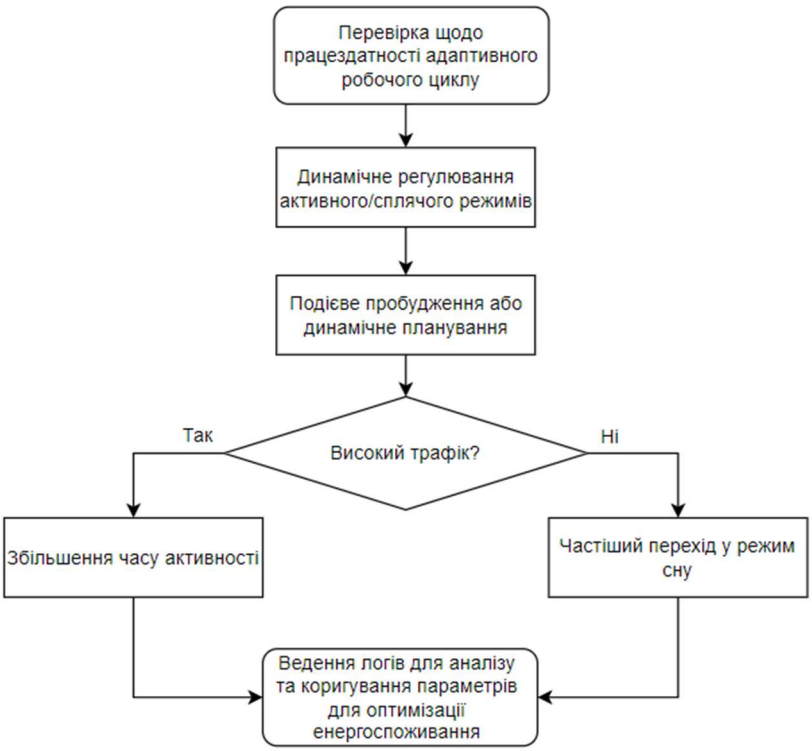


Рисунок 3.2 – Метод оптимізації енергоспоживання кінцевих пристроїв ZigBee шляхом впровадження динамічного робочого циклу

Якщо робочий цикл високий, пристрій залишається активним значно довше, що збільшує споживання енергії, що часто зустрічається у датчиках температури, вологості або руху, які реагують на часті зміни та події. Натомість низький робочий цикл дозволяє пристроям довше залишатися в сплячому режимі, зменшуючи витрати енергії.

На відміну від фіксованого робочого циклу, коли пристрої виходять із сну за заданими інтервалами, адаптивний режим дозволяє налаштовувати активність залежно від стану мережі та необхідності передачі даних. Наприклад, при високому трафіку пристрій може залишатися активним довше, а за низького – частіше переходити в режим сну, що дає змогу економити енергію без шкоди для роботи мережі [15, 17-19].

Для реалізації адаптивного циклу використовують подієве пробудження – пристрій виходить із сну лише у відповідь на конкретну подію, як-от спрацювання датчика руху в системі безпеки. Також можливе динамічне планування – зміна інтервалів пробудження залежно від мережевого трафіку. Наприклад, кінцевий

пристрій може регулювати частоту зв’язку з координатором або маршрутизатором, оптимізуючи енергоспоживання. Ведення логів дозволяє аналізувати активність і коригувати параметри роботи [15, 17-19].

Завдяки адаптивному режиму можна зменшити енергоспоживання до 50% і більше, що суттєво подовжує термін служби батареї. Для пристроїв із постійною активністю (100% робочий цикл) витрати енергії є найвищими, і батарея може розрядитися менш ніж за місяць. При фіксованому циклі (30% активності) споживання зменшується, і пристрій працює кілька місяців. Найефективнішим є адаптивний режим, коли пристрій активний лише 5-20% часу – у такому разі батарея може служити понад рік.

Особливо це важливо для пристроїв, що рідко прокидаються, як-от датчики витоку води. Наприклад, Zigbee-датчик може працювати більше року, тоді як Wi-Fi-версія розряджається набагато швидше. Таким чином, адаптивний робочий цикл є найефективнішою стратегією енергозбереження, адже пристрої споживають енергію лише тоді, коли це необхідно, а в решту часу залишаються у режимі сну.

Продовження терміну служби батареї шляхом впровадження глибокого сну. Впровадження режиму глибокого сну є ключовим фактором для продовження терміну служби батареї Zigbee-пристроїв. Найбільш ефективний спосіб зменшити енергоспоживання – це мінімізувати активний час роботи пристрою та використовувати глибокий сон, коли передача даних не потрібна. Замість звичайного режиму низького енергоспоживання, коли пристрій просто скорочує активність, режим глибокого сну дозволяє значно зменшити витрати енергії, оскільки пристрій перебуває у стані майже повного вимкнення, активуючись лише за необхідності (див. рис. 3.3) [15, 17-19].

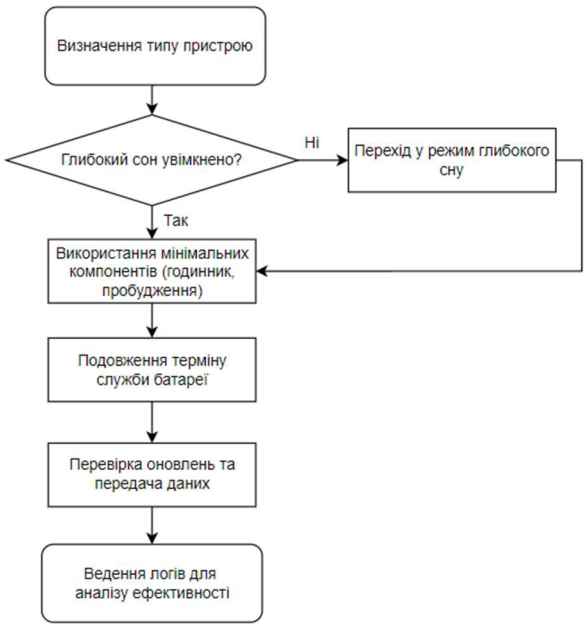


Рисунок 3.3 – Метод оптимізації енергоспоживання кінцевих пристроїв ZigBee шляхом переходу у режим глибокого сну

Більшість Zigbee-пристроїв мають вбудовані режими енергозбереження, що допомагають знизити споживання енергії у моменти, коли передача даних не здійснюється. Як показали тести, вибір відповідного режиму роботи суттєво впливає на термін служби батареї та загальну енергоефективність мережі. У Zigbee можна виділити три основні режими роботи: активний режим, режим низького енергоспоживання та режим глибокого сну.

Активний режим характерний для маршрутизаторів і координаторів, оскільки ці пристрої постійно передають дані та підтримують мережу. Вони споживають у середньому від 10 до 30 мВт, працюють безперервно та забезпечують швидкий відгук. Для кінцевих пристроїв цей режим використовується мінімально, зазвичай не більше 10% загального часу, оскільки він значно скорочує термін служби батареї.

Режим низького енергоспоживання є типовим для кінцевих пристроїв, які не потребують постійного зв’язку з мережею. У такому режимі пристрої споживають від 1 до 5 мВт, можуть швидко прокидатися (менше ніж за секунду) та передавати дані, але основний час перебувають у стані очікування, і це оптимальне рішення

для пристроїв, які періодично передають інформацію, наприклад, датчики температури та вологості.

Режим глибокого сну є найбільш енергоефективним, оскільки пристрій у такому стані майже не споживає енергію (орієнтовно 50 мкВт). Вийти з нього складніше, процес пробудження займає від 1 до 5 секунд, але цей режим ідеально підходить для датчиків, які активуються лише за певних умов, наприклад, датчики руху або датчики витоку води. Під час тестувань було підтверджено, що при використанні режиму глибокого сну Zigbee-пристрої можуть працювати від батарейки CR2032 до 5 років. Якщо пристрій використовує режим низького енергоспоживання – приблизно рік, а в активному режимі – не більше двох-трьох місяців.

Глибокий сон дозволяє пристроям залишатися неактивними більшу частину часу, вмикаючи лише мінімальні елементи, такі як годинник або механізм пробудження, що зменшує навантаження на батарею та продовжує її термін служби. У деяких випадках пристрої можуть періодично виходити зі сну для перевірки оновлень мережі, що характерно для датчиків температури та вологості.

Завдяки використанню глибокого сну та адаптивного керування робочим циклом (див. рис. 3.4) кінцеві пристрої Zigbee можуть економити до 50-80% енергії, забезпечуючи автономну роботу на тривалий період, що критично важливо для пристроїв розумного будинку, систем промислового Інтернету речей та віддаленого моніторингу, наприклад, у сільському господарстві.

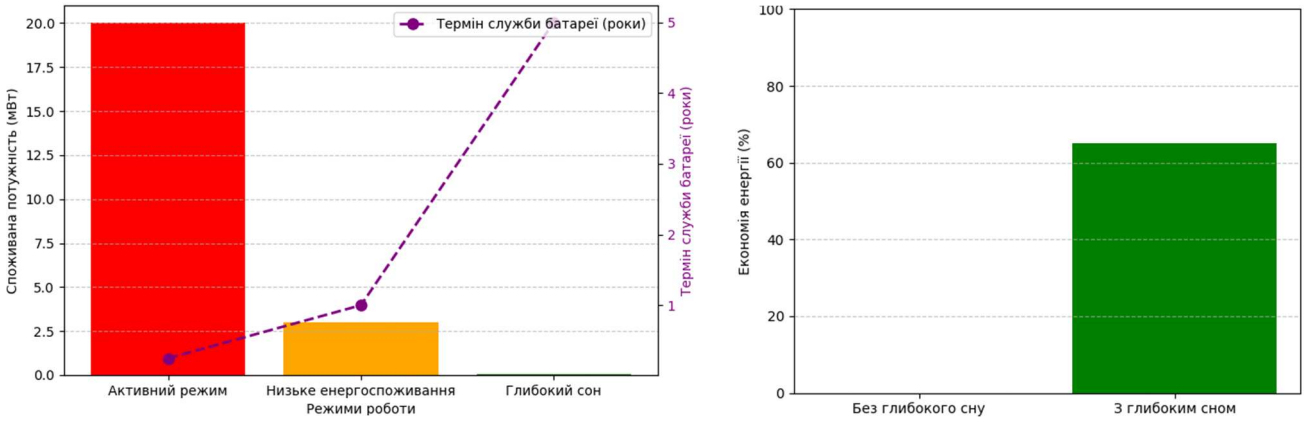


Рисунок 3.4 – Вплив на енергоспоживання вибору режиму роботи

3.2 Покращення дизайну мережі

Як показали тести та методи оптимізації, структура побудови мережі суттєво впливає на її роботу. Оскільки Zigbee дозволяє створювати мережі у різних топологіях, спосіб розміщення пристроїв, наявність перешкод та відстань між вузлами відіграють ключову роль у стабільності з'єднання та рівні енергоспоживання.

Неправильне проектування Zigbee-мережі може призвести до підвищеного споживання енергії, збільшення затримок і частих збоїв у роботі пристроїв. Якщо пристрої не мають стабільного зв’язку між собою, вони можуть постійно намагатися перепідключитися, витрачаючи додаткову енергію на повторні запити та передачу даних, що особливо критично для кінцевих пристроїв, які працюють від батареї та мають обмежені ресурси.

Неефективний дизайн мережі також може спричинити ситуації, коли певні вузли втрачають зв’язок із координатором або маршрутизатором, що робить їх непрацездатними. Якщо пристрій знаходиться занадто далеко від основного вузла або стикається з численними перешкодами, він може не мати можливості стабільно передавати дані, що призводить до частих відключень від мережі, збоїв у роботі системи та необхідності додаткових спроб передачі інформації, що негативно позначається на загальній продуктивності та енергоефективності мережі.

Погано спроектована мережа може створювати постійні проблеми, такі як збільшення часу відгуку пристроїв, втрата пакетів даних і значне зростання споживання енергії. У таких умовах пристроям доводиться витрачати більше енергії на підтримку з'єднання, що особливо відчутно у пристроях, що працюють від батареї. У підсумку це може призвести до скорочення терміну служби пристроїв, зниження ефективності мережі та необхідності частого втручання для виправлення помилок.

Баланс економії енергії та надійності мережі через вибір оптимальної топології. Вибір оптимальної топології Zigbee-мережі впливає на баланс між

економією енергії та надійністю системи (див. рис. 3.5). Під час тестування була використана топологія зірка, оскільки вона забезпечує найвищу енергоефективність. У цій конфігурації є один координатор, який постійно активний і живиться від стаціонарного джерела, та кінцеві пристрої, що працюють на батарейках і більшу частину часу перебувають у сплячому режимі. Основний акцент робився на аналізі енергоспоживання залежно від розташування кінцевих пристроїв відносно координатора, оскільки саме ця характеристика є визначальною незалежно від вибраної топології [4, 15, 17-19].

Загалом існують три основні типи топологій: зірка, дерево та сітка. Вибір тієї чи іншої залежить від поставлених завдань і необхідного рівня стабільності. Топологія зірка є найбільш енергоефективною, оскільки мінімізує кількість пристроїв, що перебувають у постійному активному режимі. Основна роль тут належить координатору, а кінцеві пристрої, такі як датчики, працюють від батарейок і активуються лише під час передачі даних. Однак надійність такої мережі є низькою, оскільки вся система залежить від одного координатора. У разі його відмови або неправильного розміщення можуть виникати значні збої, особливо якщо кінцеві пристрої розташовані на великій відстані або за перешкодами. Відсутність маршрутизаторів у цій топології означає, що мережа не має механізму розширення чи підсилення сигналу, що робить її придатною лише для невеликих приміщень, таких як квартири чи малі офіси [4, 15, 17-19].

Якщо необхідна більша стабільність, доцільно використовувати топологію дерево. Її основна відмінність – наявність маршрутизатора, який може виступати проміжним вузлом між координатором і кінцевими пристроями, що дозволяє розширити покриття мережі та забезпечити надійніше з'єднання в умовах наявності перешкод. Енергоефективність у такій топології загалом знижується через додавання активних вузлів, але споживання кінцевих пристроїв залишається майже незмінним. Оскільки координатор і маршрутизатор живляться від постійного джерела, їхня енерговитратність не є критичною, подібно до звичайного Wi-Fi маршрутизатора, який працює 24/7.

Топологія дерево є оптимальним вибором для середніх мереж, наприклад, у розумних будинках або сенсорних мережах промислового моніторингу. Часто неможливо побудувати мережу таким чином, щоб координатор забезпечував покриття всього приміщення, особливо якщо є перешкоди у вигляді стін або інших пристроїв, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц. Zigbee використовує верхній діапазон цього спектра, але все одно може стикатися з перешкодами від Wi-Fi та інших безпровідних пристроїв. Введення маршрутизатора допомагає стабілізувати роботу мережі, хоча і не підвищує її енергоефективність у глобальному масштабі [4, 15, 17-19].

Пріоритетом залишається забезпечення мінімального енергоспоживання кінцевих пристроїв. Тому вибір топології залежить від конкретних потреб: зірка підходить для невеликих безперешкодних мереж із мінімальною кількістю пристроїв, а дерево є більш універсальним варіантом, що забезпечує баланс між енергоефективністю та надійністю.

Топологія сітки є масштабним рішенням, яке включає велику кількість маршрутизаторів та кінцевих пристроїв, і це вже повноцінна розгалужена мережа Інтернету речей, що охоплює значну територію та забезпечує високу надійність зв’язку. Використання декількох маршрутизаторів дозволяє суттєво розширити мережу, забезпечуючи стабільний сигнал на великій відстані. Кількість таких пристроїв залежить від конкретних потреб: у деяких випадках достатньо двох чи чотирьох, а в інших може знадобитися вісім, дванадцять або більше [4, 15, 17-19].

Енергоефективність топології сітки є нижчою порівняно із зірковою чи деревоподібною структурою, оскільки велика кількість пристроїв, що виступають маршрутизаторами, постійно живляться від мережі. Проте це можна компенсувати, використовуючи пристрої, які поєднують функції маршрутизації та безпосереднього використання, наприклад, розумні лампи. Такі пристрої не потребують додаткових вимикачів і можуть працювати у групах через сервіси автоматизації, такі як Home Assistant або OpenHAB. Завдяки цьому можна отримати централізоване керування, що спрощує взаємодію з мережею [4, 15, 17-19].

Основна перевага топології сітки — висока надійність. Якщо в зірковій схемі точкою відмови є координатор, а в деревоподібній мережі існує обмежена кількість маршрутів передачі даних, то в сітчастій структурі кожен пристрій може мати кілька альтернативних шляхів зв’язку. У разі відмови одного з маршрутизаторів мережа автоматично перебудовується, використовуючи інші пристрої для передачі сигналу, що забезпечує самовідновлення та стійкість до збоїв, що особливо важливо в умовах великої кількості перешкод або при побудові мереж на великій території [4, 15, 17-19].

Під час тестування спостерігалося, що збільшення відстані між кінцевим пристроєм і координатором призводить до зростання затримки передавання даних та підвищеного споживання енергії, оскільки пристрій витрачає більше ресурсів на передачу сигналу. У топології сітки це вирішується шляхом оптимального розташування маршрутизаторів, що дозволяє мінімізувати затримки та зберегти енергоефективність кінцевих пристроїв.

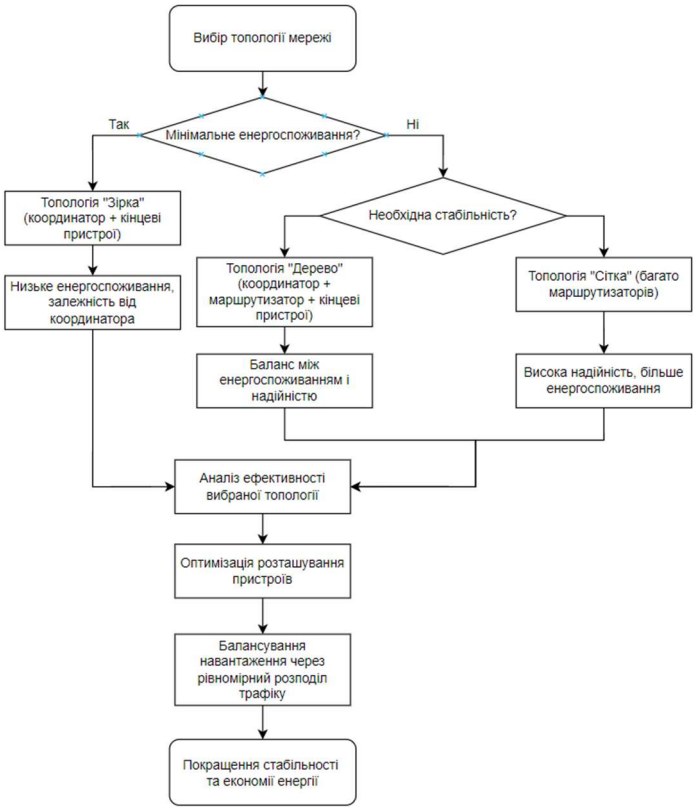


Рисунок 3.5 – Метод оптимізації енергоспоживання шляхом вибору оптимальної топології

Загалом, вибір топології залежить від конкретних потреб. Для невеликих систем, таких як квартири чи невеликі офіси, достатньо топології зірки або дерева. Остання є оптимальним рішенням для розумних будинків, оскільки забезпечує баланс між надійністю та енергоефективністю. У разі великих приміщень або складних умов із численними перешкодами найбільш підходящим варіантом є топологія сітки, яка дозволяє створити розгалужену мережу із високим рівнем відмовостійкості.

Балансування навантаження шляхом рівномірного розподілу трафіку. Балансування навантаження у мережі Zigbee передбачає рівномірний розподіл трафіку для уникнення вузьких місць і забезпечення стабільної та енергоефективної роботи (див. рис. 3.5). Важливим фактором є правильне розташування пристроїв, оскільки їхня ефективність безпосередньо залежить від середовища, в якому вони знаходяться. Наприклад, металеві конструкції можуть екранувати сигнал, створюючи перешкоди для зв’язку між пристроями та координатором чи маршрутизатором. Тому під час налаштування мережі необхідно враховувати мінімальні відстані між координатором, маршрутизаторами та кінцевими пристроями, щоб уникнути втрат сигналу, затримок і підвищеного споживання енергії [4, 15, 17-19].

Оптимальне розташування координатора є ключовим для покриття всієї території мережі (див. рис. 3.5). Якщо координатор розміщено далеко або в місці, де його сигнал ослаблюється, мережа працюватиме нестабільно, і це ж стосується маршрутизаторів, які, подібно до точок доступу Wi-Fi, повинні розташовуватися так, щоб забезпечити стабільний зв’язок із кінцевими пристроями.

Тестові вимірювання показали, що зі збільшенням відстані між пристроєм і точкою прийому сигналу зростає енергоспоживання, а також збільшується ймовірність затримок і втрати зв’язку. У разі розірваного з’єднання кінцевий пристрій може повністю втратити доступ до мережі. Саме тому для великих приміщень і складних топологій доцільно використовувати не лише зіркоподібну схему підключення, а й варіанти на кшталт дерева або сітки. Вони менш

енергоефективні в загальному розрахунку, але дозволяють розширювати мережу, забезпечуючи стабільність роботи кінцевих пристроїв.

Координатор має обмеження за кількістю пристроїв, які можуть до нього підключатися безпосередньо. У більшості випадків цей показник не перевищує 40-50 пристроїв. При перевищенні цього ліміту можливе перевантаження координатора, що негативно впливає на всю мережу. Уникнути цього можна за допомогою маршрутизаторів, які виконують свою основну функцію (наприклад, розумні розетки чи лампи), але водночас слугують вузлами для розширення мережі. Таким чином, кінцеві пристрої можуть підключатися не безпосередньо до координатора, а до маршрутизаторів, що зменшує навантаження на центральний вузол і збільшує ємність мережі.

У разі значної віддаленості кінцевого пристрою доцільно встановити додатковий маршрутизатор, який скоротить шлях передачі даних, що дозволить кінцевому пристрою швидше передавати дані та переходити в режим сну, що зменшить споживання енергії. Маршрутизатор, який працює від постійного джерела живлення, забезпечуватиме безперебійне пересилання даних до координатора.

Топологія «зірка» вважається найенергоефективнішою, якщо враховувати загальне споживання мережі, проте для великих мереж або складних умов більш доцільними є варіанти «дерево» або «сітка». У таких мережах навантаження розподіляється рівномірніше, а кінцеві пристрої, які знаходяться поруч із маршрутизаторами, витрачають менше енергії завдяки швидшому обміну даними та зменшенню потреби у тривалих сеансах зв’язку [4, 15, 17-19].

Якщо в мережі багато пристроїв, а координатор лише один, перевищення допустимого навантаження може призвести до втрати сигналу, збоїв у підключенні та нестабільної роботи всієї системи. Розміщення додаткових маршрутизаторів у зоні дії координатора дозволяє рівномірно розподілити підключення кінцевих пристроїв, що покращує стабільність мережі.

Раціональний підхід до використання ролей пристроїв є ключовим фактором стабільної роботи Zigbee-мережі. У випадку великої кількості підключених

датчиків і пристроїв, доцільно включати маршрутизатори, які можуть одночасно виконувати інші функції. Наприклад, розумна лампа чи розетка, окрім своєї основної задачі, може слугувати додатковим вузлом для передачі сигналу, що дозволяє підключати не 50 пристроїв, а понад 100, залежно від конфігурації мережі. Чим більше таких маршрутизаторів, тим кращим є балансування навантаження, що зменшує кількість збоїв та покращує енергоефективність кінцевих пристроїв.

Завдяки такому підходу кінцеві пристрої можуть швидше переходити в режим сну, витрачати менше енергії та забезпечувати більш стабільну передачу даних. Маршрутизатори ж, отримуючи інформацію від кінцевих пристроїв, самостійно передають її до координатора, що робить мережу більш надійною. Впровадження таких оптимізацій підвищує стабільність та енергоефективність мережі Zigbee, запобігаючи втраті сигналу через погане розташування або перевантаження вузлів.

Збалансоване розташування пристроїв і правильний вибір топології дозволяють уникнути перенавантаження вузлів (див. рис. 3.6), особливо маршрутизаторів та координатора, що мінімізує ризик часткових або повних відмов мережі, роблячи її більш стійкою та ефективною. Zigbee-мережа, побудована за принципами оптимального балансування навантаження, забезпечує рівномірний розподіл трафіку та усуває вузькі місця, що покращує її стабільність, дальність і енергоефективність [4, 15, 17-19].

Оптимізація алгоритму маршрутизації шляхом впровадження енергозалежної маршрутизації. Оптимізація алгоритму маршрутизації може бути досягнута шляхом впровадження енергозалежної маршрутизації. Окрім раціонального розташування пристроїв, що дозволяє збалансувати їхнє навантаження, трафік, затримки та надійність, також необхідно вдосконалювати сам алгоритм маршрутизації в межах протоколу Zigbee, що дозволяє створити більш незалежну та енергоефективну мережу, зменшити непотрібні передачі та оптимізувати споживання енергії (див. рис. 3.6) [4, 15, 17-19].

Маршрутизація визначає, яким чином пакети даних передаються від кінцевого пристрою до координатора чи маршрутизатора. Традиційна

маршрутизація Zigbee має певні недоліки. Наприклад, вибір найкоротшого маршруту не завжди є оптимальним рішенням. Якщо один вузол опиняється в ролі центрального маршрутизатора для великої кількості пристроїв, він може бути перенавантажений, що призведе до затримок, підвищеного енергоспоживання та можливого відмовлення вузла [4, 17].

Ще одна проблема традиційної маршрутизації – використання фіксованих маршрутів, які не враховують рівень енергії кінцевих пристроїв, що може спричиняти додаткові втрати енергії через повторні спроби передачі даних, коли пристрій через слабкий сигнал або затримки змушений надсилати інформацію повторно. Внаслідок цього кінцевий пристрій довше залишається активним і витрачає більше енергії [4, 17-19].

Щоб покращити енергоефективність маршрутизації, доцільно застосовувати стратегії, які дозволять зменшити затримки, уникнути відмов вузлів та оптимізувати розподіл навантаження. Одна з можливих стратегій – вибір маршруту з мінімальним енергоспоживанням. Замість вибору найкоротшого шляху дані передаються через вузли, які витрачають найменше енергії, що продовжує термін служби батарей, хоча може дещо збільшувати затримку.

Інша стратегія – маршрутизація на основі навантаження. Вона дозволяє рівномірно розподілити трафік між кількома вузлами, запобігаючи перевантаженню одного пристрою та продовжуючи термін служби мережі, що особливо актуально для масштабних IoT-мереж та мереж розумного будинку, де велика кількість пристроїв має стабільно передавати дані [1-3, 17-19].

Ще один підхід – маршрутизація з урахуванням режиму сну. У цьому випадку кінцеві пристрої мінімізують активність, зменшуючи навантаження на мережу та продовжуючи власний термін служби, що особливо ефективно для сенсорних мереж із періодичним пробудженням, де пристрої працюють з мінімальними витратами енергії [15, 17-19].

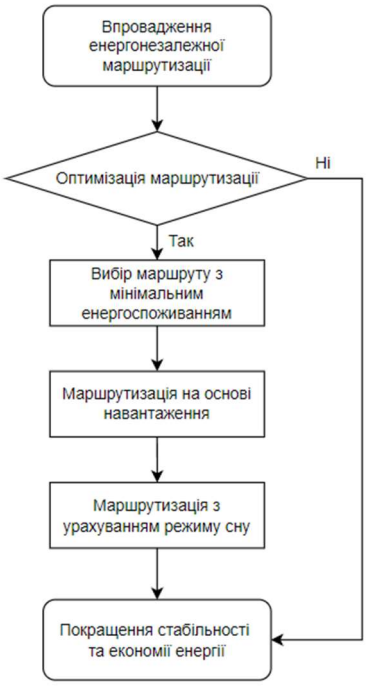


Рисунок 3.6 – Алгоритм оптимізації маршрутизації шляхом впровадження енергозалежної маршрутизації

3.3 Перспективи розвитку та виклики ZigBee

ZigBee добре зарекомендував себе як протокол безпровідного зв’язку з низьким енергоспоживанням, який широко використовується у мережах Інтернету речей. Проте зростання екосистеми IoT та поява нових технологічних досягнень вимагають від ZigBee постійного розвитку. Як і будь-який інший часто використовуваний протокол, він накопичує нові пристрої та має відповідати сучасним вимогам, щоб залишатися конкурентоспроможним. Без постійного вдосконалення з’являться інші безпровідні протоколи, які можуть випередити ZigBee за функціональністю та ефективністю.

Щоб протокол залишався актуальним, необхідно враховувати як перспективи, так і можливі проблеми його розвитку. Оптимізація може відбуватися на рівні самого протоколу, що дозволить покращити енергоефективність,

підвищити надійність та зробити мережу ще більш стабільною. Подальше вдосконалення ZigBee може забезпечити його відповідність сучасним вимогам та утримання позицій серед найефективніших протоколів для безпровідних IoT-мереж.

Інтеграція можливості накопичення енергії. ZigBee широко використовується у різних сценаріях Інтернету речей, де більшість пристроїв живиться від батарей, і це переважно датчики, переносні пристрої та системи розумного будинку. Однак використання батарей створює певні обмеження, що впливають на довговічність мережі та економічну доцільність її підтримки. У масштабних мережах, таких як промислові об’єкти або великі приміщення, часта заміна батарей може спричиняти значні витрати та незручності, особливо при недостатній оптимізації енергоспоживання.

Основна проблема полягає в тому, що більшість пристроїв ZigBee лише споживають енергію, не маючи можливості її накопичувати, що робить їх повністю залежними від батарейного живлення. Одним із можливих рішень є впровадження механізмів збору енергії, які дозволять не лише використовувати, а й накопичувати енергію з доступних джерел (див. рис. 3.7-3.8). Багато пристроїв навколо вже випромінюють або виробляють енергію, яка наразі не використовується, проте може бути ефективно задіяна для живлення ZigBee-пристроїв [15, 17-19, 24].

Сонячна енергія є одним із найбільш доступних джерел для таких потреб. Світло можна перетворювати на електрику за допомогою мініатюрних сонячних панелей, які можна інтегрувати безпосередньо у пристрої, що особливо ефективно для зовнішніх датчиків, наприклад, у сільському господарстві або на відкритих промислових об’єктах. Оскільки пристрої ZigBee зазвичай мають низьке енергоспоживання, навіть невелика сонячна панель може забезпечити достатню підзарядку для продовження роботи без потреби у частій заміні батарей.

Ще одним потенційним джерелом є кінетична енергія, яка базується на перетворенні механічного руху в електрику, яку можна використовувати у місцях, де є постійний рух, наприклад, у промислових середовищах, де працюють двигуни

або механізми. Такі пристрої можуть заряджатися за рахунок руху та вібрацій, що значно зменшить залежність від традиційних батарей.

Крім того, існують методи збору теплової енергії, які використовують різницю температур для генерації електрики, що може бути корисним для промислового моніторингу, де відбувається постійне нагрівання або охолодження обладнання. Однак цей підхід менш ефективний для звичайних розумних будинків або інших сценаріїв із невеликими температурними змінами.

Ще один перспективний варіант – використання радіочастотної енергії. Радіохвилі можуть бути перетворені в електрику, що дозволяє живити малопотужні пристрої. Проте ефективність цього методу обмежується потужністю випромінювачів, тому він поки що залишається більше експериментальним напрямком, ніж практичним рішенням.

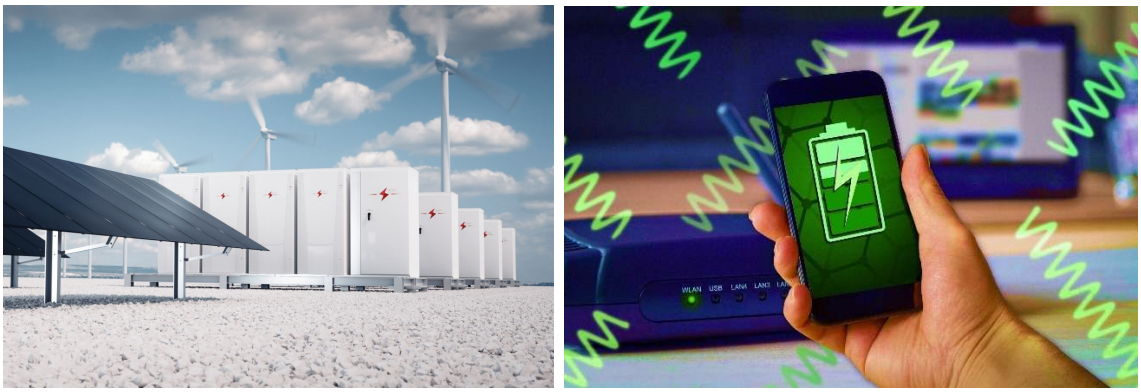


Рисунок 3.7 – Можливість накопичувати енергію для роботи пристроїв IoT

Оскільки жодне з перелічених джерел енергії не є постійним, необхідно впроваджувати енергонакопичувальні елементи. Замість звичайних батарей можна використовувати акумулятори або суперконденсатори. Суперконденсатори мають значно довший термін служби, швидко накопичують енергію та можуть працювати десятки років без заміни. Також варто розглянути літій-залізо-фосфатні акумулятори, які мають довший життєвий цикл, ніж традиційні літій-іонні батареї [24].

Однією з основних проблем упровадження технологій збору енергії є їхня вартість. Додавання нових енергетичних модулів до пристроїв ZigBee може

збільшити їхню ціну, що може бути неприпустимим для бюджетних пристроїв. Однак у довгостроковій перспективі це може зменшити витрати на обслуговування, оскільки не буде потреби в частій заміні батарей (див. рис. 3.8) [24].

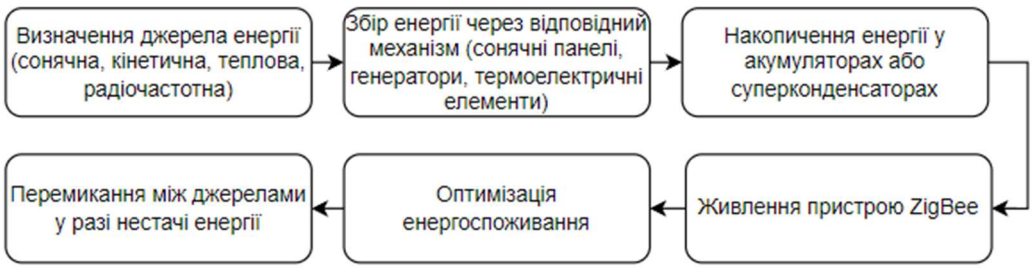


Рисунок 3.8 – Алгоритм застосування накопичення енергії у пристроях ZigBee

Усунення перевантажень і перешкод у маштабованих мережах. Масштабованість у великих мережах Zigbee залежить від усунення перевантажень і перешкод (див. рис. 3.9), а також інтеграції механізмів збору енергії. У великих мережах зростає навантаження на систему, що може спричинити перевантаження, збільшення затримки передавання даних і зниження енергоефективності кінцевих пристроїв. Zigbee працює в діапазоні 2,4 ГГц, який також використовують Wi-Fi, Bluetooth та навіть мікрохвильові печі, що створює радіочастотні перешкоди. Попри те, що Zigbee теоретично підтримує до 65 000 пристроїв, на практиці продуктивність значно знижується після кількох сотень вузлів, що пов’язано з фізичними та радіочастотними перешкодами [4, 15, 17-19].

Для покращення масштабованості застосовуються різні стратегії. Однією з них є динамічне перемикання частот і керування каналами. Якщо мережа працює нестабільно через перешкоди, зміна частоти може зменшити вплив зовнішніх сигналів та покращити енергоефективність. Інший підхід – ієрархічна структура мережі, наприклад, у вигляді топології «дерево», що дозволяє уникнути перевантаження окремих вузлів та забезпечує ефективний розподіл даних.

Балансування навантаження та адаптивна маршрутизація також є ключовими методами покращення масштабованості. Рівномірний розподіл трафіку між вузлами зменшує ризик виникнення «мертвих зон» та підвищує стабільність

мережі. Проте існують компроміси між масштабованістю та продуктивністю. Наприклад, збільшення щільності вузлів покращує покриття, але водночас підвищує енергоспоживання. Зменшення потужності передавання зменшує енергоспоживання, проте скорочує зону покриття сигналу (див. рис. 3.9) [4, 15, 17-19].

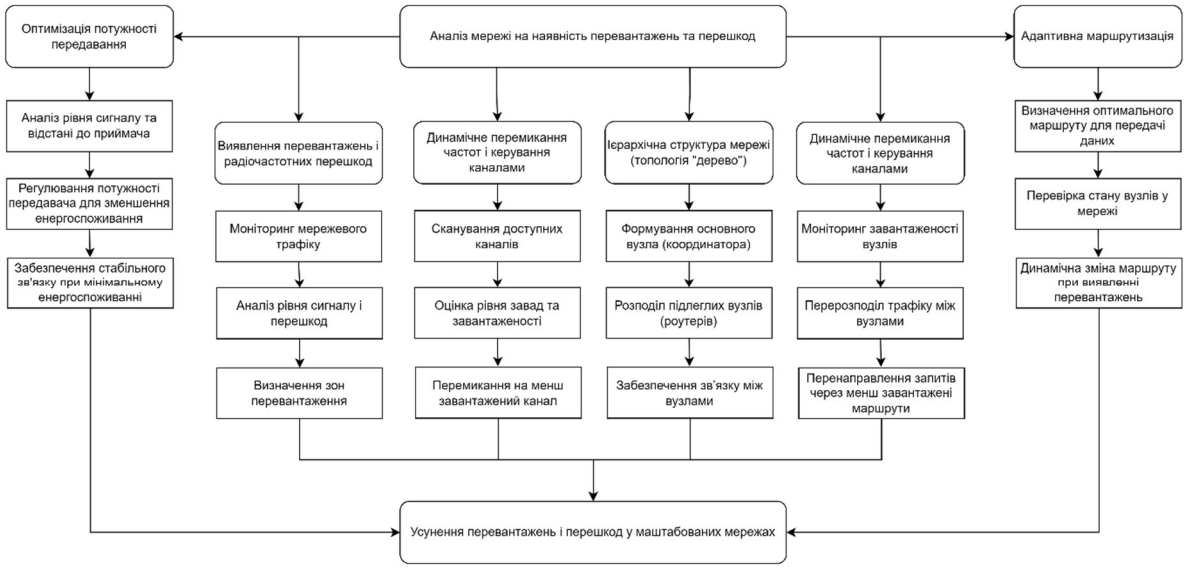


Рисунок 3.9 – Процес усунення перевантажень і перешкод у масштабованих мережах

Перспективи розвитку масштабованих мереж Zigbee включають використання штучного інтелекту та нейронних мереж для прогнозування трафіку та динамічного регулювання потужності передавання даних. Наразі стандарт Zigbee 3.0 забезпечує кращу сумісність і функції самовідновлення мережі, що робить його надійним рішенням для великих розгортань.

Вплив технологічних тенденцій через оцінку ролей ZigBee в IoT на основі штучного інтелекту. Розвиток технологій та їх вплив на роль ZigBee в інтернеті речей у контексті штучного інтелекту стає все більш очевидним. Інтеграція штучного інтелекту та інтернету речей може докорінно змінити спосіб обробки даних (див. рис. 3.10), оптимізувати продуктивність і покращити ухвалення рішень. Однак для цього мережі мають адаптуватися до нових реалій, що супроводжується певними викликами [25].



Рисунок 3.10 – Інтеграція штучного інтелекту для управлівння мережею ZigBee

Вплив штучного інтелекту на продуктивність ZigBee може проявлятися в декількох аспектах. Наприклад, у прогнозованому технічному обслуговуванні, де алгоритми аналізують дані датчиків, щоб передбачати можливі збої ще до їхнього виникнення, що дозволяє скоротити час простою пристроїв. Крім цього, розумна маршрутизація з урахуванням енергії може значно покращити ефективність роботи мережі. Використовуючи алгоритми штучного інтелекту, маршрути можуть динамічно коригуватися відповідно до навантаження, що дозволить зменшити споживання енергії та покращити масштабованість мережі.

Ще одним важливим напрямком є адаптивне керування живленням. Алгоритми штучного інтелекту можуть оптимізувати цикли сну і пробудження пристроїв на основі шаблонів їх використання, що дозволить зменшити енергоспоживання без втрати продуктивності. Також штучний інтелект здатен покращити безпеку мережі, аналізуючи трафік у реальному часі та виявляючи потенційні загрози або аномальну поведінку пристроїв [15, 17-19, 25].

Однак, незважаючи на всі переваги, інтеграція штучного інтелекту в мережі ZigBee супроводжується певними обмеженнями. Одним із головних викликів є обмежена обчислювальна потужність пристроїв ZigBee, що ускладнює реалізацію складних алгоритмів без використання хмарних або периферійних обчислень. Крім того, виникають питання щодо конфіденційності даних, оскільки алгоритми штучного інтелекту потребують постійного збору та аналізу інформації, що може викликати занепокоєння серед користувачів [25].

ВИСНОВКИ

Зростаюче впровадження Інтернету речей (IoT) потребує енергоефективних безпровідних технологій, серед яких ZigBee виділяється низьким енергоспоживанням, сітчастою мережею та масштабованістю. Аналіз підтвердив, що ZigBee забезпечує оптимальний баланс між ефективністю та продуктивністю, що робить його цінним для розумних будинків, промислової автоматизації, охорони здоров’я та сільського господарства.

Дослідження архітектури та енергоспоживання ZigBee показало, що топологія мережі, ролі пристроїв та оптимізація передачі значно впливають на ефективність. Практичні експерименти підтвердили його перевагу над іншими безпровідними технологіями малого радіусу дії в енергозбереженні. Водночас важливо враховувати перевантаження мережі та перешкоди для підтримки стабільної роботи у реальних умовах.

Було досліджено кілька стратегій оптимізації, зокрема адаптивні режими роботи, інтелектуальне маршрутизування та алгоритми енергозбереження. Інтеграція штучного інтелекту може покращити керування живленням та оптимізацію мережевих процесів.

Попри переваги, ZigBee стикається з викликами масштабованості, інтеграції з новими технологіями IoT та конкуренцією з іншими стандартами. Подальші дослідження мають зосередитися на підвищенні безпеки, удосконаленні алгоритмів енергозбереження та впровадженні розумних механізмів самоналаштування для підвищення ефективності та надійності мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IBM. What is the internet of things (iot)? | IBM. IBM - United States. URL: https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things (дата звернення: 28.02.2025).
2. Chen M. Internet of things (iot) 101. Medium. URL: https://medium.com/agileinsider/internet-of-things-iot-101-7588a388ef70 (дата звернення: 28.02.2025).
3. Yasar K., Gillis A. S. What is iot (internet of things)? | definition from techtarget. Search IoT. URL: https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT (дата звернення: 01.03.2025).
4. Lova Raju K., Veeramani V. A Self-Powered, Real-Time, NRF24L01 IoT-Based Cloud-Enabled Service for Smart Agriculture Decision-Making System. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/357822505_A_Self-Powered_Real-Time_NRF24L01_IoT-Based_Cloud-Enabled_Service_for_Smart_Agriculture_Decision-Making_System (дата звернення: 02.03.2025).
5. The influence of iot on modern digital transformation. EnterpriseTalk - News | Editorial insights | Enterprise Updates. URL: https://enterprisetalk.com/featured/the-role-of-iot-in-digital-transformation (дата звернення: 02.03.2025).
6. The Future of MEMs and IoT | IoT For All. IoT For All. URL: https://www.iotforall.com/mems-iot (дата звернення: 06.03.2025).
7. Combining edge computing-assisted internet of things security with artificial intelligence: applications, challenges, and opportunities. MDPI. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/16/7104 (дата звернення: 08.03.2025).
8. The relationship between iot, big data and the cloud. McKenna Consultants. URL: https://www.mckennaconsultants.com/relationship-between-iot-big-data-and-the-cloud/ (дата звернення: 09.03.2025).
9. Liu R., Wang J. Internet of things: application and prospect. ResearchGate. URL:https://www.researchgate.net/publication/314783179_Internet_of_Things_Application_and_Prospect (дата звернення: 12.03.2025).
10. Dirox. IoT in logistics: key benefits, challenges & innovations. Software Outsourcing Company | Dirox Digital Solutions. URL: https://dirox.com/post/iot-in-logistics-key-benefits-challenges-innovations#:~:text=Shipment%20Tracking%20and%20Monitoring&text=IoT,%20through%20technologies%20like%20RFID,management%20and%20ensuring%20accurate%20deliveries. (дата звернення: 14.03.2025).
11. Chokri E. The use of Digital Twins in automotive engineering: a technical overview. LinkedIn: Log In or Sign Up. URL: https://www.linkedin.com/pulse/use-digital-twins-automotive-engineering-technical-overview-chokri-got4f/ (дата звернення: 12.03.2025).

12. Three years of soil moisture observations by a dense cosmic-ray neutron sensing cluster at an agricultural research site in north-east Germany. ESSD - Recent. URL. https://essd.copernicus.org/articles/15/3243/2023/ (дата звернення: 19.03.2025).
13. Top 10: smart cities. Home of Sustainability News | Sustainability Magazine. URL: https://sustainabilitymag.com/top10/top-10-smart-cities (дата звернення: 27.03.2025).
14. Zigbee devices in iot: benefits & differences from other protocols. Kaa IoT platform. URL: https://www.kaaiot.com/iot-knowledge-base/zigbee-devices-in-iot-overview-and-reasons-to-use (дата звернення: 08.04.2025).
15. GeeksforGeeks. Introduction of ZigBee - GeeksforGeeks. GeeksforGeeks. URL: https://www.geeksforgeeks.org/introduction-of-zigbee/ (дата звернення: 14.04.2025).
16. Advantages and disadvantages of zigbee protocol and main application areas of zigbee. Soil sensors_temperature and humidity sensor_PH sensor_NPK sensor_Pyranometer_agricultural weather stations-NiuBoL. URL: https://www.zoko-link.com/Product-knowledge/zigbee-application.html (дата звернення: 18.04.2025).
17. ZigBee technology : architecture, working and its applications. ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students. URL: https://www.elprocus.com/what-is-zigbee-technology-architecture-and-its-applications/ (дата звернення: 19.04.2025).
18. What is zigbee in iot? Complete guide in 2023. Dusun IoT: Embedded Hardware Vendor/Manufacturer | IoT Gateway Expert. URL: https://www.dusuniot.com/blog/the-definitive-guide-for-zigbee-gateway-for-solution-vendors/ (дата звернення: 26.04.2025).
19. Zigbee-Based low power consumption wearables device for voice data transmission / A. S. AlShuhail та ін. MDPI. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/10847 (дата звернення: 26.04.2025).
20. Toscano E., Lo Bello L. Comparative assessments of IEEE 802.15.4/ZigBee and 6LoWPAN for low-power industrial WSNs in realistic scenarios. ResearchGate. URL:https://www.researchgate.net/publication/261203734_Comparative_assessments_of_IEEE_802154ZigBee_and_6LoWPAN_for_low-power_industrial_WSNs_in_realistic_scenarios (дата звернення: 28.04.2025).
21. How has smart technology changed HVAC? - jim the home guy. Jim The Home Guy. URL: https://www.jimthehomeguy.com/2023/06/26/how-has-smart-technology-changed-hvac/ (дата звернення: 28.04.2025).
22. Perumalla C., P. Wright A. Security for bio-medical devices connected to the iot: a survey. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/382912759_Security_for_Bio-medical_Devices_Connected_to_the_IoT_A_Survey (дата звернення: 30.04.2025).
23. Al Moaiad Y. The internet of things as A revolution to enhance the technology of the future. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/366091734_The_Internet_of_Things_as_A_Revolution_to_Enhance_the_Technology_of_the_Future (дата звернення: 02.05.2025).
24. Energy-harvesting design aims to turn high-frequency electromagnetic waves into usable power. MIT News | Massachusetts Institute of Technology. URL:

https://news.mit.edu/2020/energy-harvesting-wi-fi-power-0327 (дата звернення: 02.05.2025).

25. Advantages and Use Cases Of AIoT: Merging AI And IoT technologies. Intuz: AI, IoT, Mobile & Web Development Services Company. URL: https://www.intuz.com/blog/use-cases-and-advantages-of-aiot (дата звернення: 04.05.2025).

26. Федоренко О.О. Дослідження енергоефективності безпровідної технології ZigBee в мережах IoT. «Проблеми комп'ютерної інженерії»: Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.169-172.

27. Федоренко О.О., Кондратюк Б.О. Енергоефективне передавання даних у мережах IoT на основі технології Zigbee. «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» : VI Науково-техн. конф., м.Київ, 15 квітня 2025 р. (подано до публікації).

Додаток А

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра Комп'ютерної інженерії



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

НА ТЕМУ: «ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ZIGBEE ТЕХНОЛОГІЇ В МЕРЕЖАХ ІОТ»

Виконав студент групи КІД-42
Федоренко Олександр Олександрович
Керівник дипломної роботи:
Кондратюк Борис Олександрович,
викладач кафедри КІ

Київ – 2025

Мета, об’єкт, предмет дослідження 2

Мета роботи – оптимізація енергоефективності технології ZigBee в мережах IoT за рахунок використання методів підвищення продуктивності та зниження енергоспоживання

Об’єкт дослідження – процес функціонування технології ZigBee в мережах IoT

Предмет дослідження – методи оптимізації енергоспоживання, фактори, що впливають на енергоефективність, та засоби підвищення продуктивності технології ZigBee в IoT-мережах

Актуальність роботи 3

У роботі розглянуто роль безпровідних технологій у мережах IoT, зокрема місце та переваги ZigBee в порівнянні з іншими технологіями. Проаналізовано архітектуру та протокол ZigBee, визначено основні фактори, що впливають на його енергоефективність.

Проведено дослідження енергоспоживання ZigBee-мереж та методів його оцінки. Запропоновано підходи до оптимізації енергоефективності ZigBee на рівні протоколу та дизайну мережі, розглянуто перспективи розвитку та виклики впровадження цієї технології в майбутніх IoT-системах.

Проблеми традиційних рішень у безпровідних мережах IoT 4



Рис. 1.21 – Безпровідна технологія Wi-Fi у IoT мережах

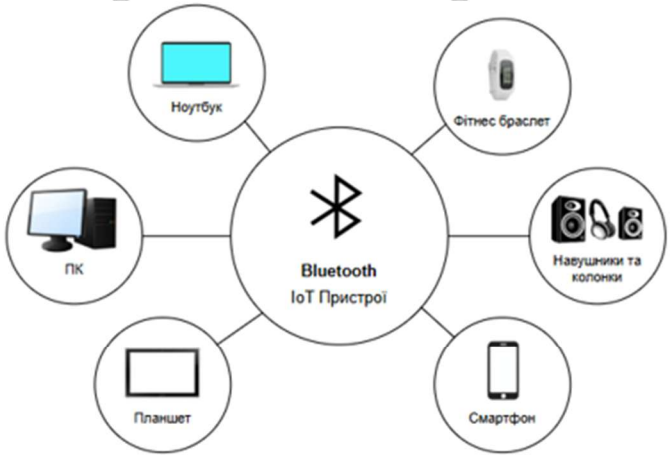


Рис. 1.22 – Безпровідна технологія Bluetooth у IoT мережах

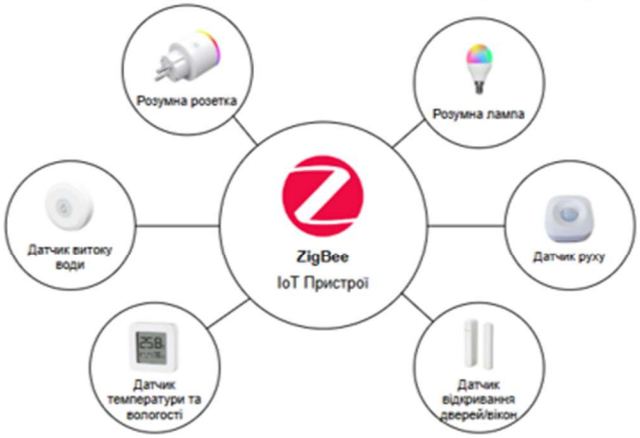


Рис. 1.23 – Безпровідна технологія ZigBee у IoT мережах

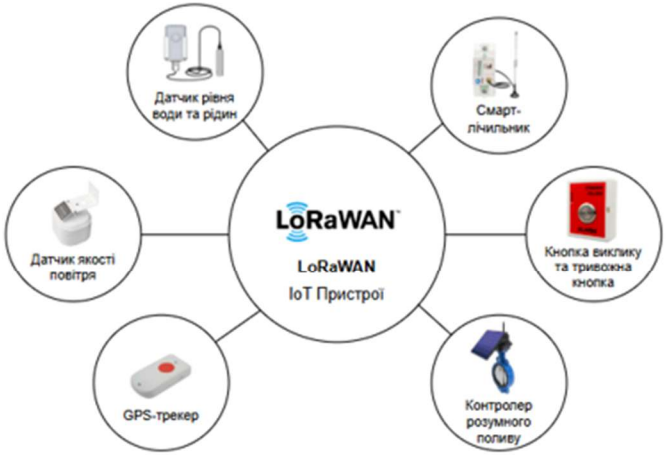


Рис. 1.24 – Безпровідна технологія LoRaWAN у IoT мережах

Переваги ZigBee для енергоефективних мереж IoT 5

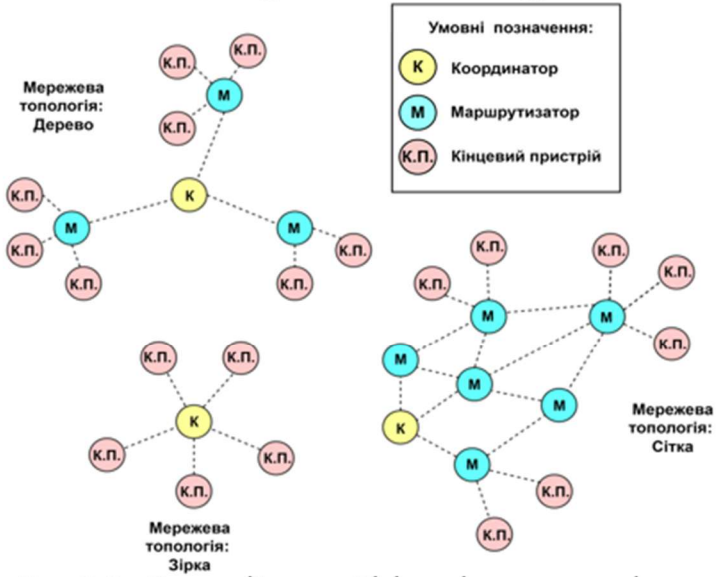


Рис. 2.5 – Топології мереж Zigbee: зірка, дерево, сітка



Рис. 2.16 – Ключові фактори, що утворюють енергоефективність Zigbee

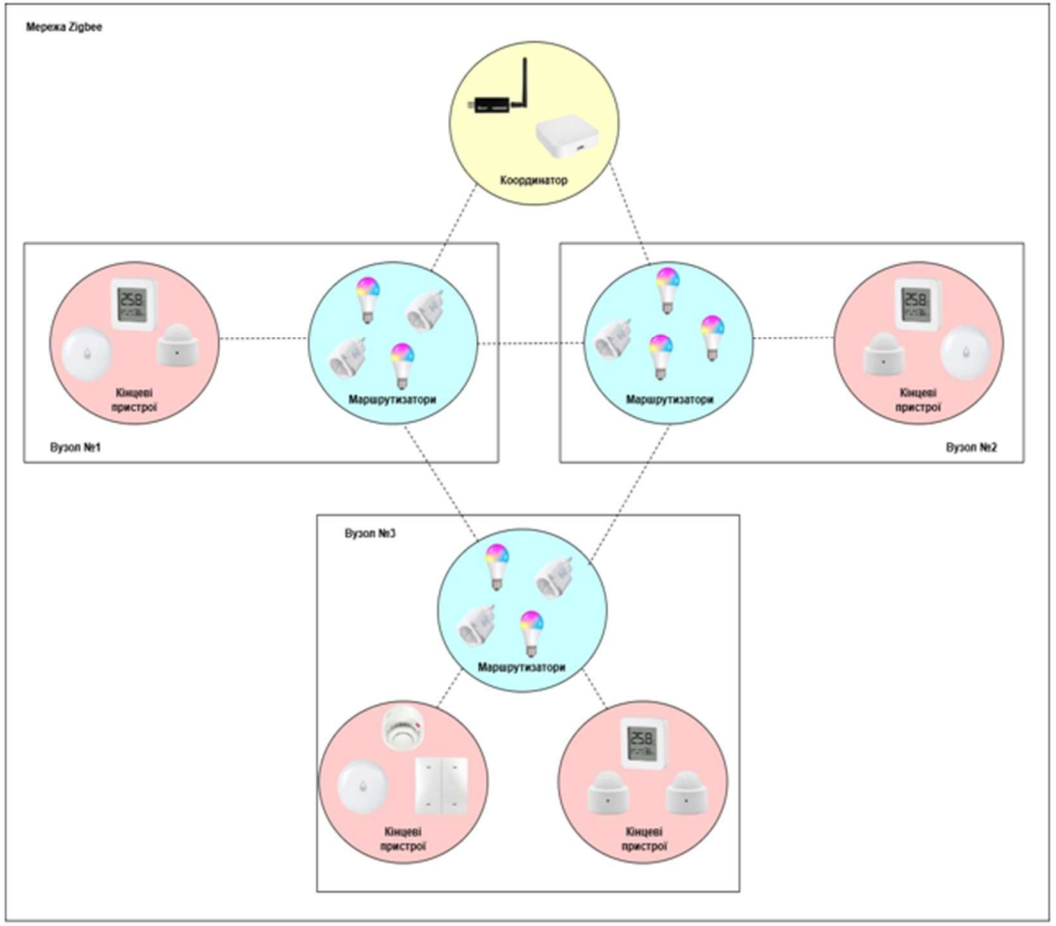


Рис. 2.8 – Маршрутизатори Zigbee, що розширюють мережу

Методи оптимізації енергоспоживання в ZigBee 6

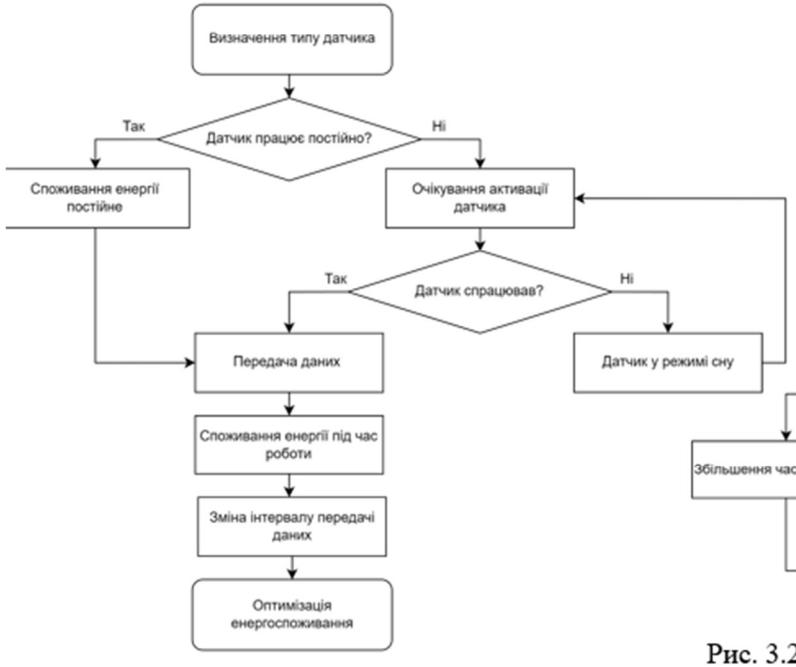


Рис. 3.1 – Метод оптимізації енергоспоживання кінцевих пристроїв ZigBee шляхом зміни частоти передачі неістотних даних

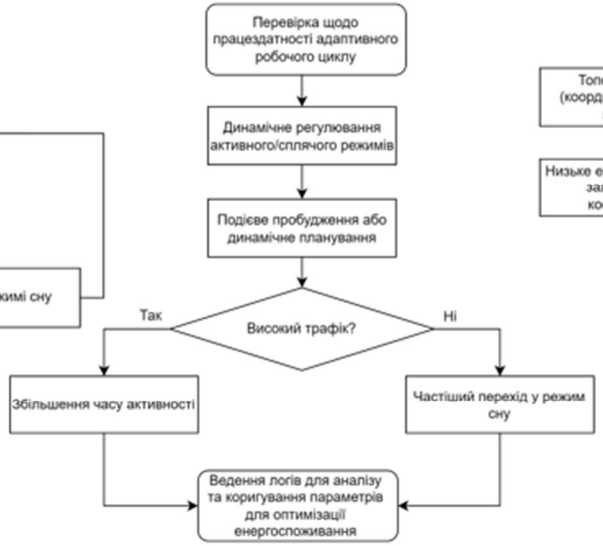


Рис. 3.2 – Метод оптимізації енергоспоживання кінцевих пристроїв ZigBee шляхом впровадження динамічного робочого циклу

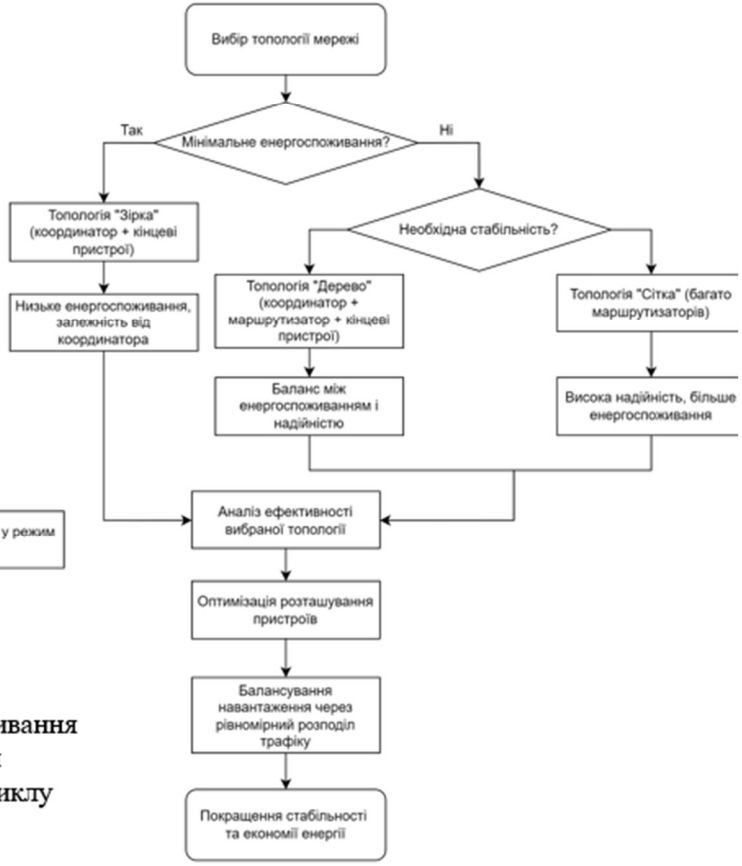


Рис. 3.5 – Метод оптимізації енергоспоживання шляхом вибору оптимальної топології

Методика тестування енергоспоживання кінцевих пристроїв ZigBee 7

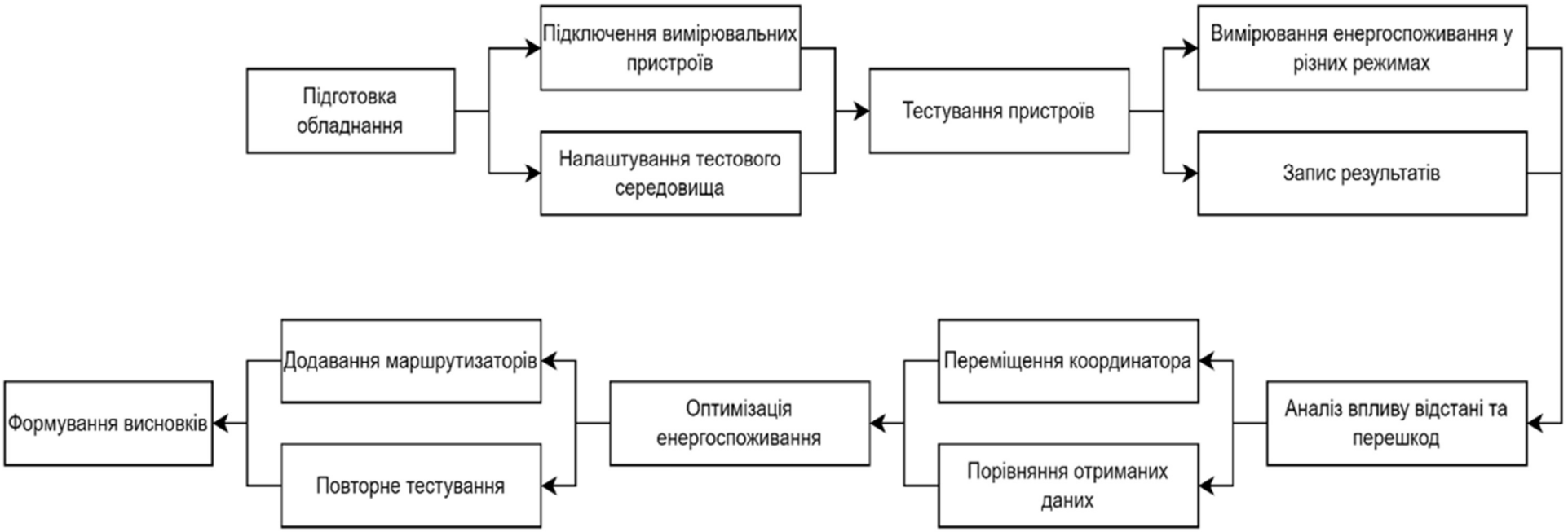


Рис. 2.30 – Процес тестування Zigbee пристроїв на енергоспоживання

Апаратні та програмні засоби для тестування ZigBee 8

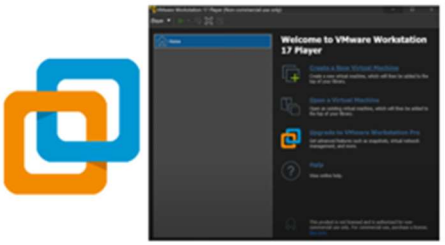


Рис. 2.18 – ПЗ для віртуалізації:
VMware Workstation 17 Player



Рис. 2.19 – Встановлений Home Assistant OS
у якості віртуальної машини

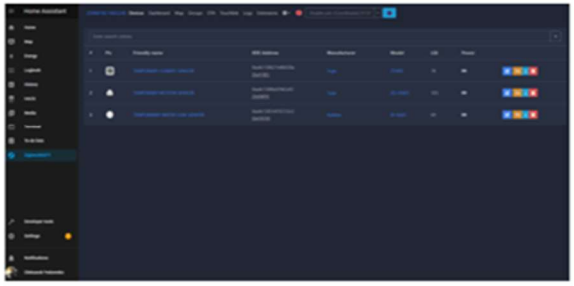


Рис. 2.20 – Доповнення до Home Assistant: Zigbee2MQTT



Рис. 2.17 – USB Координатор Sonoff Zigbee P
для створення Zigbee мережі



Рис. 2.23 – Цифровий мультиметр DT-832



Рис. 2.21 – Кінцеві пристрої Zigbee
та власне джерело живлення:
датчик руху та освітлення, датчик витоку води,
датчик температури та вологості

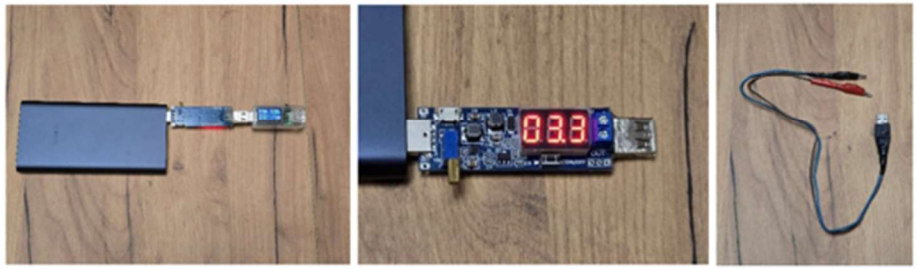


Рис. 2.24 – DIY лабораторний блок живлення на базі Power Bank Xiaomi,
USB DC-DC перетворювача та USB-тестера

Структура ZigBee мережі в Zigbee2MQTT 9

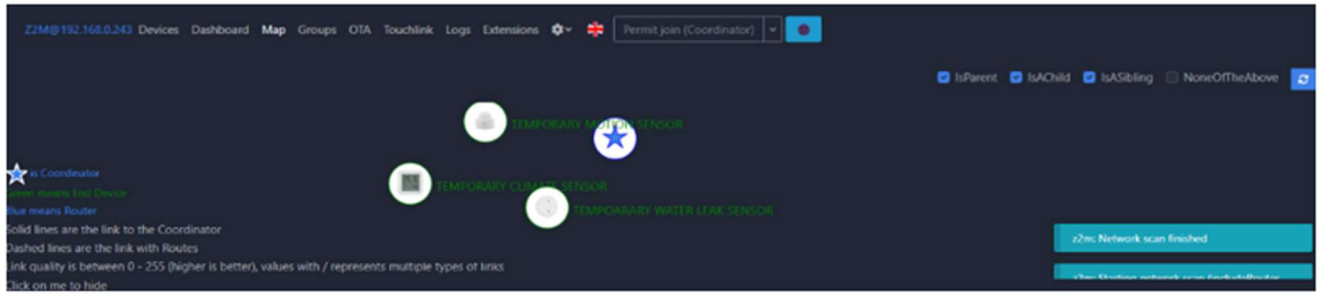


Рис. 2.26 – Тимчасова Zigbee мережа для проведення контрольованого тестування

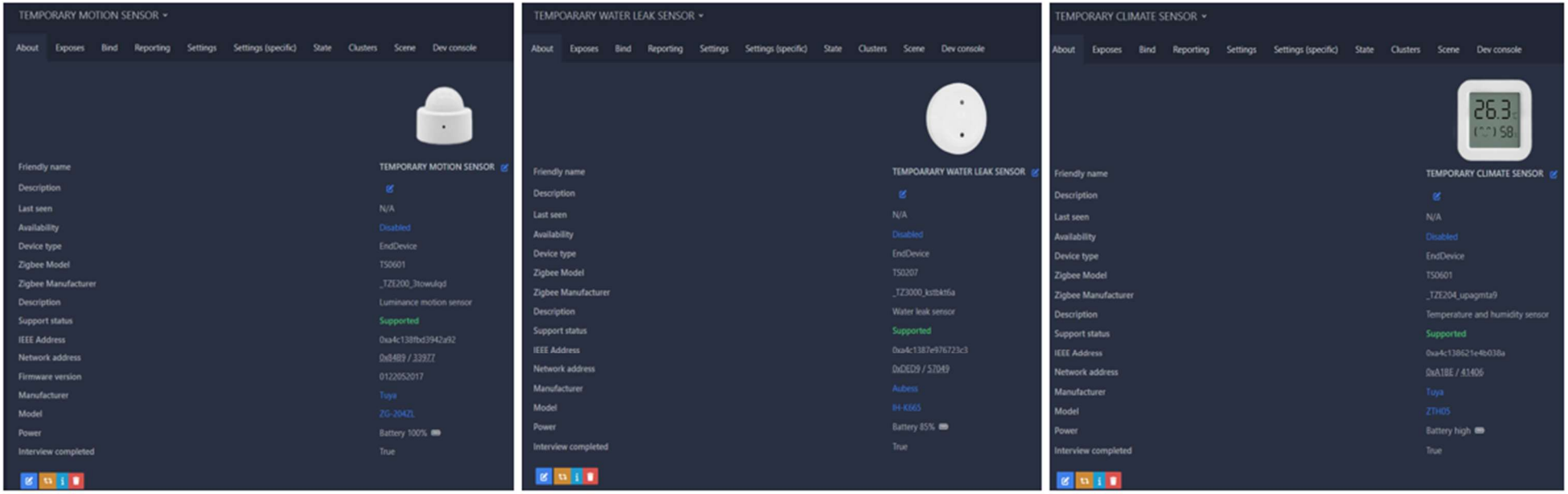


Рис. 2.27 – Підключені кінцеві пристрої до Zigbee мережі зі детальним описом параметрів у ZigBee2MQTT

Тестування енергоспоживання ZigBee та аналіз результатів

10

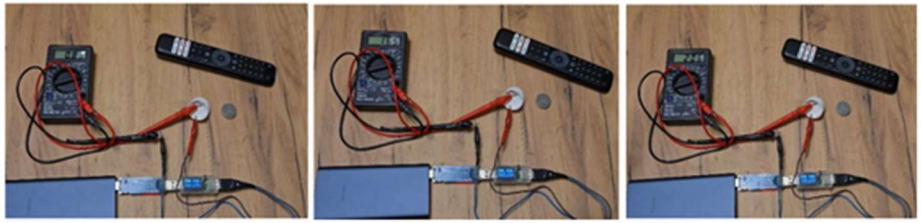


Рис. 2.32 – Процес тестування Zigbee датчика руху та освітлення

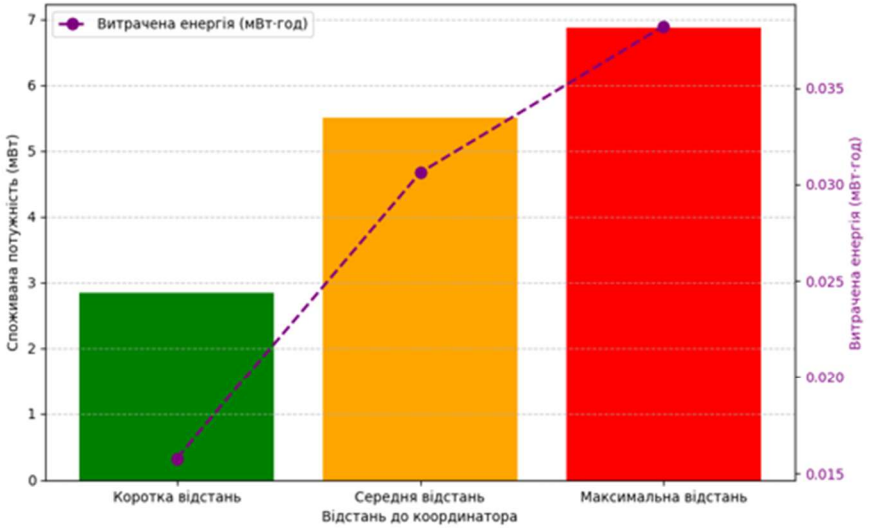


Рис. 2.33 – Енергоспоживання Zigbee датчика руху та освітлення на час тестування

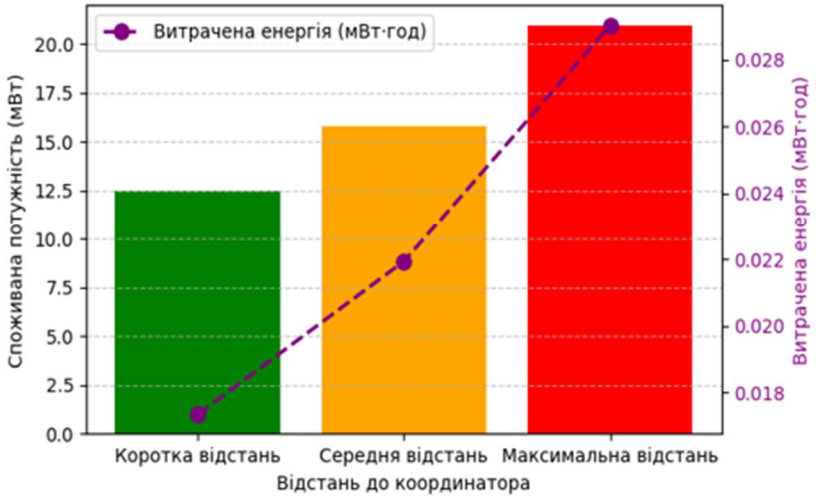


Рис. 2.39 – Енергоспоживання Zigbee датчика температури та вологості на час тестування

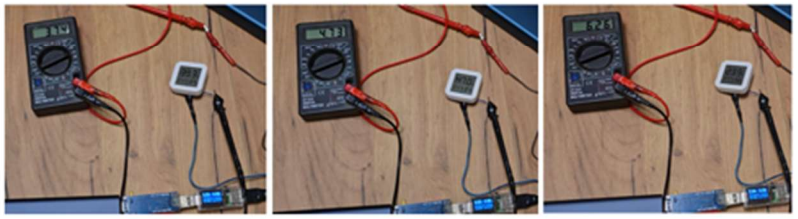


Рис. 2.38 – Процес тестування Zigbee датчика температури та вологості

Порівняння при тестуванні енергоспоживання Wi-Fi та ZigBee

11

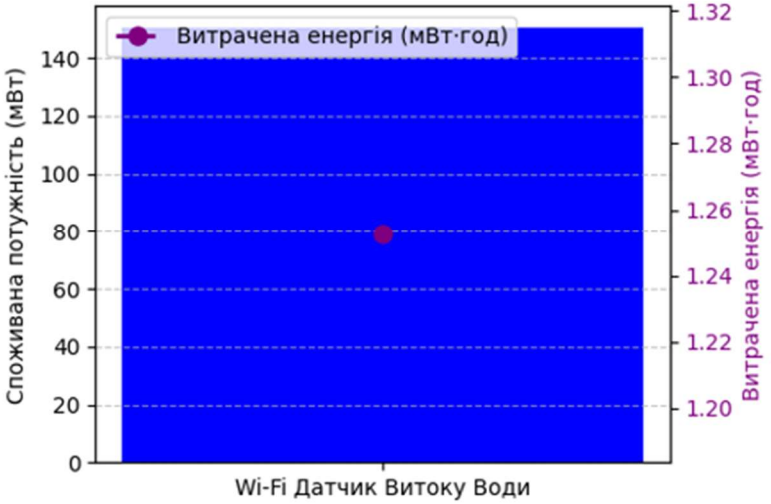


Рис. 2.42 – Енергоспоживання Wi-Fi датчика витоку води на час тестування



Рис. 2.41 – Процес тестування Wi-Fi датчика витоку води

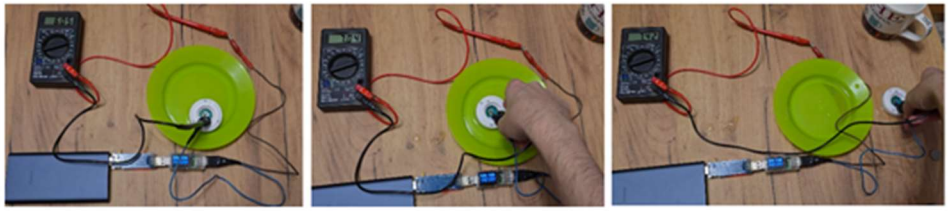


Рис. 2.35 – Процес тестування Zigbee датчика витоку води

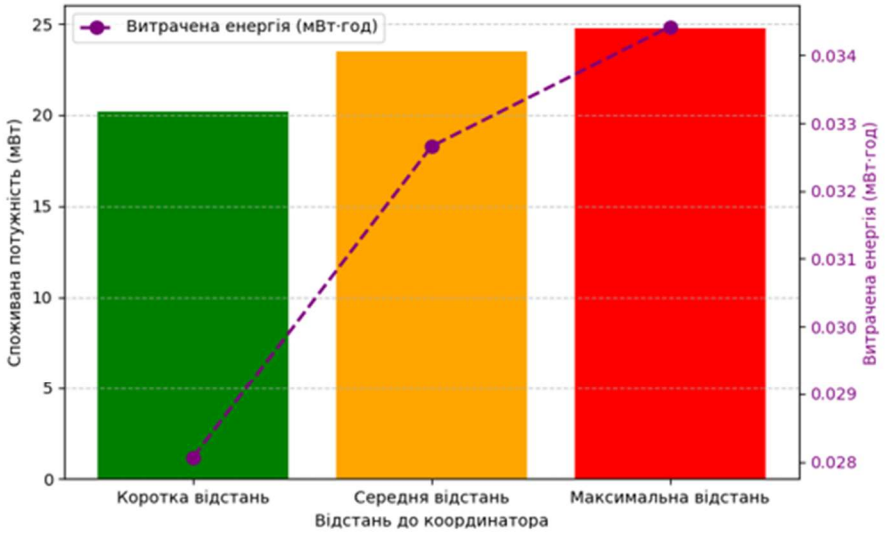


Рис. 2.36 – Енергоспоживання Zigbee датчика витоку води на час тестування

Порівняння енергоспоживання безпровідних технологій 12

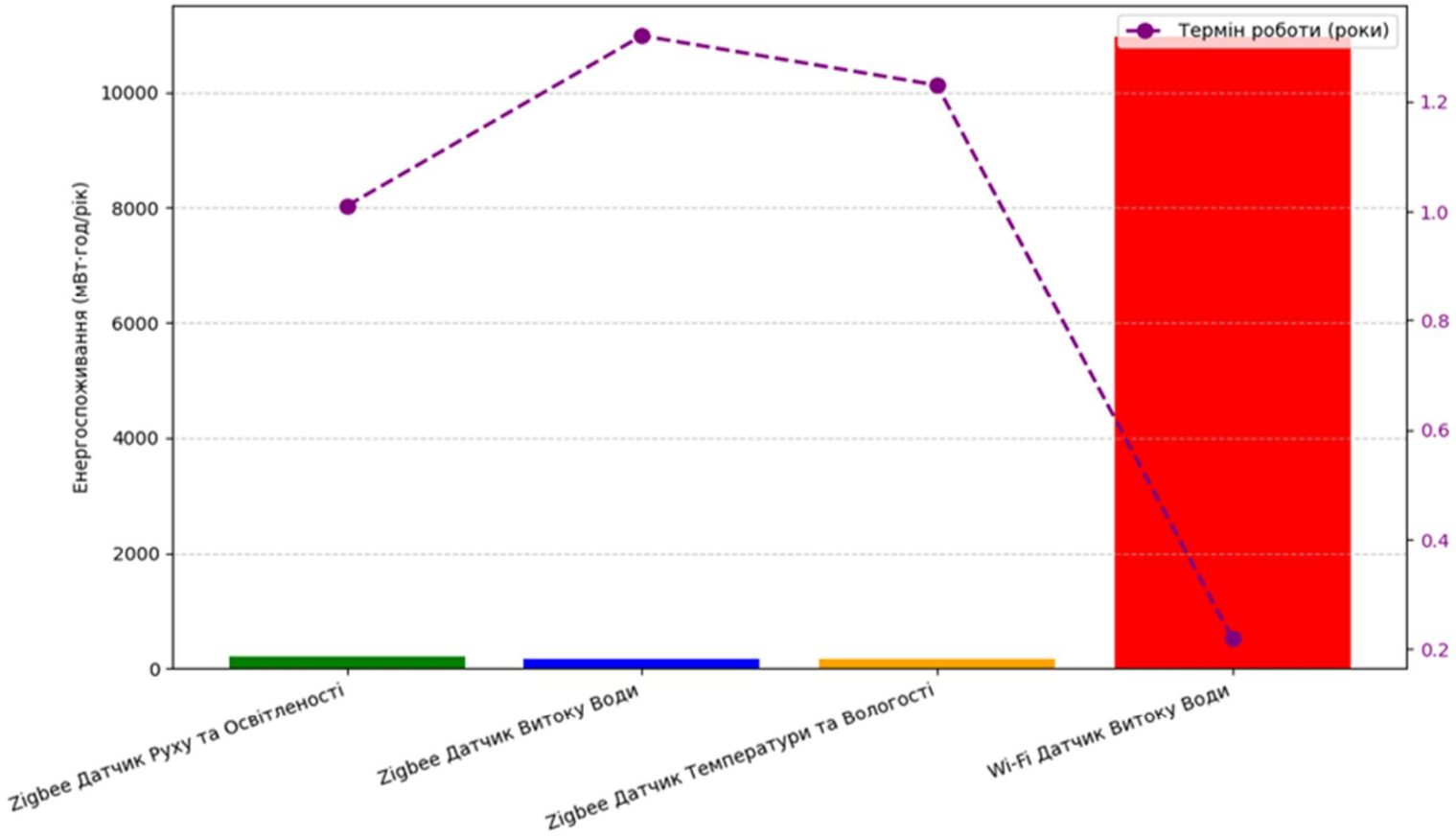


Рис. 2.43 – Порівняльна діаграма енергоспоживання Zigbee та Wi-Fi пристроїв за рік

Порівняння енергоспоживання безпровідних технологій 13

Табл. 2.4 – Порівняння енергоефективності Zigbee та Wi-Fi пристроїв на основі проведених тестів

Параметр	Zigbee Датчик Руху та Освітленості	Zigbee Датчик Витоку Води	Zigbee Датчик Температури та Вологості	Wi-Fi Датчик Витоку Води
Топологія мережі	Зірка	Зірка	Зірка	Зірка
Напруга живлення (В)	3.34	3.34	3.34	3.34
Частота передачі даних	Одна подія	Одна подія	Одна подія	Одна подія
Тривалість передачі (с)	20	5	5	30
Режим роботи	Активний	Активний	Активний	Активний
Режим сну	Глибокий сон	Глибокий сон	Глибокий сон	Глибокий сон
Споживання струму (мА)	0.15 - 2.06	0.53 - 7.42	0.81 - 6.26	26 - 78 (середнє 45)
Середнє споживання (мА)	1.28	3.98	3.54	45
Споживана потужність (мВт)	4.28	13.29	11.83	150.3
Фактичне споживання (мВт/год)	0.0238	0.0182	0.0193 (з урахуванням екрану)	1.2525
Споживання в режимі сну (мкА)	0	0	160 (екран)	160
Споживана потужність в режимі сну (мВт)	0	0	0.53 (екран)	0.53

Табл. 2.5 – Порівняння енергоспоживання Zigbee та Wi-Fi пристроїв за період часу

Період	Zigbee Датчик Руху та Освітленості	Zigbee Датчик Витоку Води	Zigbee Датчик Температури та Вологості	Wi-Fi Датчик Витоку Води
За день (мВт·год)	0.5712	0.4368	0.4632	30.06
За місяць (мВт·год)	17.136	13.104	13.896	901.8
За рік (мВт·год)	208.32	159.12	170.75	10957.5
Втрати батареї за рік (%)	~99.2% (батарея 210 мВт·год)	~75.8% (батарея 210 мВт·год)	~81.3% (батарея 210 мВт·год)	~456.5% (батарея 1080 мВт·год)
Орієнтовний термін роботи (роки)	**~1.01**	**~1.32**	**~1.23**	**~0.22**

14 Висновки

Швидке зростання Інтернету речей (IoT) вимагає енергоефективних безпровідних технологій, і ZigBee демонструє перевагу завдяки низькому споживанню енергії, сітчастій архітектурі та гнучкій масштабованості. Аналіз підтвердив, що ZigBee забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю та енергозбереженням, що робить його перспективним для розумних будинків, промислової автоматизації, охорони здоров'я та сільського господарства. Однак для підтримки стабільної роботи важливо враховувати вплив перевантаження мережі, перешкод і особливостей топології.

Експериментальні дослідження показали, що адаптивні режими роботи, інтелектуальне маршрутизування та алгоритми енергозбереження можуть значно покращити ефективність ZigBee. Використання штучного інтелекту для динамічного керування живленням і оптимізації мережевих процесів відкриває нові можливості для розвитку. Проте ZigBee стикається з викликами масштабованості, інтеграції з новими стандартами IoT та конкуренцією з іншими безпровідними технологіями, що вимагає подальших досліджень у напрямі підвищення безпеки, удосконалення алгоритмів енергозбереження та розробки самоналаштовуваних механізмів оптимізації.

Публікації та апробація роботи 15

1. Федоренко О.О. Дослідження енергоефективності безпровідної технології ZigBee в мережах IoT. «Проблеми комп'ютерної інженерії» : Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.169-172.
2. Федоренко О.О., Кондратюк Б.О. Енергоефективне передавання даних у мережах IoT на основі технології Zigbee. «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» : VI Науково-техн. конф., м.Київ, 15 квітня 2025 р. (подано до публікації).