

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

(повне найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРИ ПЕРЕДАЧІ  
СИГНАЛІВ У ВБУДОВАНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ІОТ

ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF SIGNAL TRANSMISSION  
IN EMBEDDED IOT CONTROL SYSTEMS

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи КІМ-21

Бельський Богдан Олександрович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Костючко Сергій Миколайович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту

«    »      грудня      2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Гринюк Сергій Васильович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. Т.ТЕРЛЕЦЬКИЙ

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Бельському Богдану Олександровичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Аналіз енергоефективності при передачі сигналів у вбудованих системах керуванні IoT*

Керівник роботи *к.т.н., доцент Костючко Сергій Миколайович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» червня 2025 року № 290/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи *09.12.2025р.*

3. Вихідні дані до роботи *Джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області, різні інтернет-ресурси технічного спрямування*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

*Вступ*

*Аналіз проблеми за темою роботи та постановка завдань дослідження*

*Теоретичні основи енергоефективності у вбудованих системах IoT*

*Аналіз існуючих методів та технологій передачі даних в IoT*

*Моделювання та аналіз енергоефективності у вбудованих IoT-системах керування*

*Висновки*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

*Схема, що відображає класифікацію вбудованих систем*

*Схема, що відображає архітектуру вбудованої системи IoT*

*Схема, що відображає процес обробки даних у вбудованій системі реального часу*

*Часова діаграма енергоспоживання IoT-протоколів*

*Схема протокольного стеку вбудованої системи IoT*

*Дерево рішень для вибору протоколу на основі енергетичних та функціональних вимог*

*Логіка розробленого програмного забезпечення*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Аналіз проблеми за темою роботи та постановка завдань дослідження. Теоретичні основи енергоефективності у вбудованих системах IoT</i>	<i>Костючко С.М., доцент</i>		
<i>Аналіз існуючих методів та технологій передачі даних в IoT</i>	<i>Костючко С.М., доцент</i>		
<i>Моделювання та аналіз енергоефективності у вбудованих IoT-системах керування</i>	<i>Костючко С.М., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		___%	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст.викладач</i>		

7. Дата видачі завдання 18.06.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	До 01.08.2025 р.	
2.	<i>Аналіз проблеми за темою роботи та постановка завдань дослідження. Теоретичні основи енергоефективності у вбудованих системах IoT</i>	До 20.08.2025 р.	
3.	<i>Аналіз існуючих методів та технологій передачі даних в IoT</i>	До 25.09.2025 р.	
4.	<i>Моделювання та аналіз енергоефективності у вбудованих IoT-системах керування</i>	До 20.10.2025 р.	
5.	<i>Висновки та пропозиції</i>	До 25.10.2025 р.	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	До 27.10.2025 р.	
7.	<i>Формування додатків</i>	До 30.10.2025 р.	
8.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	До 05.11.2025 р.	
9.	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	До 11.11.2025 р.	
10.	<i>Нормоконтроль</i>	До 29.11.2025 р.	
11.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	До 02.12.2025 р.	
12.	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедру</i>	До 09.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Бельський Б.О.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Костючко С.М.

(прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Бельський Б. О. Аналіз енергоефективності при передачі сигналів у вбудованих системах керування IoT. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Перший розділ присвячено огляду предметної області, тут розглядаються основні поняття про вбудовані системи, протоколи передачі даних та їх енергетичні характеристики, методи та критерії оцінювання енергоефективності.

В другому розділі здійснено вибір та обґрунтування засобів розробки. Для дослідження обраного питання було обрано технологію LoRa. Детальніше розглянуто принцип роботи технології LoRa.

Третій розділ присвячено опису розробленого пристрою для дослідження енергоефективності передачі сигналів у вбудованих системах керування за допомогою технології LoRa.

Ключові слова: Інтернет речей, IoT, вбудовані системи, енергоефективність, бездротовий зв'язок, LoRa, LPWAN, передача даних, радіомодуляція, фактор розширення спектру, оптимізація енергоспоживання, автономне живлення.

## ANNOTATION

Belskyi B. Energy efficiency analysis of signal transmission in embedded IoT control systems. Manuscript.

Qualifying work of a Master's of EP «Computer Engineering» specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Qualification work consists of an introduction, three sections, conclusions, a references, appendices.

The first section is devoted to an overview of the subject area, examining the basic concepts of embedded systems, data transmission protocols and their energy characteristics, methods and criteria for evaluating energy efficiency.

The second section presents the selection and justification of development tools. The LoRa technology was chosen for investigating the research question. The operating principle of LoRa technology is examined in detail.

The third section is devoted to the description of the developed device for studying the energy efficiency of signal transmission in embedded control systems using LoRa technology.

Keywords: Internet of Things, IoT, embedded systems, energy efficiency, wireless communication, LoRa, LPWAN, data transmission, radio modulation, spreading factor, energy consumption optimization, autonomous power supply.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ У ВБУДОВАНИХ СИСТЕМАХ ІоТ .....	11
1.1 Поняття, класифікація та особливості вбудованих систем .....	11
1.2 Протоколи передачі даних та їх енергетичні характеристики .....	24
1.3 Методи та критерії оцінювання енергоефективності.....	33
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В ІоТ .....	39
2.1 Порівняльна характеристика бездротових технологій .....	39
2.2 Моделі енергоспоживання при передачі сигналів у бездротових сенсорних мережах .....	45
2.3 Технологія LoRa: принцип роботи, архітектура та енергетичні переваги.	52
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ У ВБУДОВАНИХ ІоТ-СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ .....	61
3.1 Апаратно-програмна реалізація тестового стенду .....	61
3.2 Експериментальні дослідження та аналіз результатів .....	65
3.3 Впровадження результатів та економічний ефект .....	75
ВИСНОВКИ.....	80
ДОДАТКИ.....	89

## ВСТУП

Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) зумовив появу значної кількості вбудованих пристроїв у різноманітних галузях – від розумних будинків до промислової автоматизації. Проте масове впровадження таких систем супроводжується проблемою енергоефективності через обмежені можливості автономного живлення.

Сучасні вбудовані системи керування IoT характеризуються високими вимогами до тривалості автономної роботи та надійності передачі даних. Особливої уваги заслуговують технології бездротового зв'язку малої потужності (LPWAN), зокрема технологія LoRa (Long Range), яка забезпечує передачу даних на відстані до декількох кілометрів при мінімальному енергоспоживанні. LoRa набула широкого поширення завдяки відкритості специфікації фізичного рівня та можливості побудови приватних мереж.

Енергоефективність вбудованих систем IoT визначається вибором апаратної платформи, параметрами радіомодуляції, архітектурою мережевого протоколу та стратегіями передачі даних. Раціональний підбір параметрів модуляції LoRa – фактора розширення спектру, ширини смуги частот та швидкості кодування – безпосередньо впливає на співвідношення між енергетичними витратами та якістю зв'язку. Застосування mesh-топології мережі потребує додаткового дослідження розподілу енергетичного навантаження між вузлами.

Дослідження енергоефективності передачі сигналів у вбудованих системах керування IoT має важливе практичне значення для проектування автономних пристроїв моніторингу та трекінгу, систем телеметрії промислового обладнання, датчиків екологічного моніторингу та інших застосувань, де тривалість автономної роботи є критичним параметром. Результати такого аналізу дозволяють сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальних технічних рішень, що забезпечують необхідний рівень функціональності при мінімальних енергетичних витратах. Актуальність даного дослідження підтверджується

зростаючою потребою у створенні енергоефективних IoT-систем для розумних міст, промислового Інтернету речей (Industrial IoT) та систем дистанційного моніторингу у важкодоступних локаціях.

Мета роботи полягає у проведенні комплексного аналізу енергоефективності процесів передачі сигналів у вбудованих системах керування IoT на базі технології LoRa та розробці практичних рекомендацій щодо оптимізації енергоспоживання таких систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– здійснити аналіз існуючих технічних рішень у галузі систем позиціонування та бездротових технологій дальнього зв'язку. Дослідити технічні характеристики технології LoRa, принципи частотної модуляції з розширенням спектру, особливості поширення радіохвиль у різних умовах та можливості застосування для побудови mesh-мереж. Проаналізувати досвід практичного використання технології LoRa у комерційних та відкритих проектах систем трекінгу;

– здійснити обґрунтований вибір апаратної платформи для реалізації експериментального пристрою. Провести порівняльний аналіз характеристик мікроконтролерів з вбудованою підтримкою WiFi, дослідити технічні параметри доступних LoRa-модулів та трансиверів, обґрунтувати вибір оптимального рішення для системи живлення з урахуванням вимог до автономності та габаритних обмежень. Врахувати критерії економічної доцільності, доступності компонентної бази, наявності програмних бібліотек та зручності процесу розробки;

– розробити апаратно-програмну платформу GPS-трекера з інтегрованим LoRa-модулем. Спроекувати схему міжкомпонентних з'єднань з урахуванням специфіки інтерфейсів SPI, GPIO та вимог до системи живлення;

– розробити програмне забезпечення для мікроконтролера з використанням сучасних засобів розробки та спеціалізованих бібліотек. Реалізувати процедури ініціалізації та управління LoRa-модулем з оптимальними параметрами модуляції для забезпечення балансу між дальністю

зв'язку та швидкістю передачі даних. Імплементувати WiFi точку доступу для з'єднання з мобільними пристроями користувачів;

– розробити протокол обміну даними через LoRa-канал з компактним форматом пакетів для ефективного використання радіочастотного ресурсу. Створити систему обробки та маршрутизації даних між вузлами mesh-мережі.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному дослідженні енергетичних характеристик процесів передачі сигналів у вбудованих системах IoT з використанням технології LoRa та розробці практичної моделі mesh-мережі GPS-трекерів з аналізом взаємозв'язку між параметрами модуляції, топологією мережі та енергоспоживанням пристроїв. Запропонований підхід до оптимізації енергетичного балансу передбачає врахування специфіки роботи системи в умовах обмеженого живлення та необхідності забезпечення тривалої автономності при збереженні якості зв'язку.

Практична значущість роботи визначається можливістю застосування отриманих результатів та методичних рекомендацій при проектуванні енергоефективних систем трекінгу та моніторингу, розумних міст, промислових IoT-рішень та систем автоматизації. Розроблені принципи вибору параметрів передачі можуть бути використані для створення автономних пристроїв з тривалістю роботи понад рік від одного джерела живлення.

Методологія дослідження включає теоретичний аналіз наукової літератури та сучасних підходів у сфері технологій LPWAN, а також експериментальну частину з розробкою та тестуванням функціонального прототипу системи. Експериментальна оцінка передбачає вимірювання енергоспоживання при різних параметрах модуляції, визначення залежності дальності зв'язку від потужності передавача та аналіз енергетичних витрат на передачу даних. Порівняльний аналіз буде проведено на основі метрик енергоефективності, надійності доставки пакетів та дальності зв'язку.

Очікуваним результатом магістерської роботи є формування узагальнених висновків щодо оптимального вибору параметрів передачі сигналів у LoRa-мережах залежно від вимог до дальності зв'язку, швидкості передачі даних

та тривалості автономної роботи. Буде запропоновано методику проектування енергоефективних вбудованих систем IoT, яка враховує специфіку застосування та обмеження енергетичного бюджету.

Таким чином, проведене дослідження спрямоване на вирішення важливого прикладного завдання – забезпечення енергоефективного функціонування вбудованих систем керування IoT. Отримані результати можуть мати практичне застосування у сферах логістики, промислової автоматизації, точного землеробства та розумної міської інфраструктури, де критичними є тривалість автономної роботи та мінімізація експлуатаційних витрат.

Апробація результатів. Публікації. Результати досліджень, виконаних під час роботи над кваліфікаційною роботою магістра опубліковано в науковій статті [1] (додаток А).

# РОЗДІЛ 1

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ У ВБУДОВАНИХ СИСТЕМАХ ІоТ

### 1.1 Поняття, класифікація та особливості вбудованих систем

Вбудовані системи становлять фундаментальну основу сучасних технологій інтернету речей та автоматизованого керування. Ці спеціалізовані комп'ютерні системи інтегруються безпосередньо в керовані пристрої чи обладнання, виконуючи чітко визначені функції з мінімальним втручанням користувача. На відміну від універсальних обчислювальних систем, вбудовані системи проектуються для розв'язання конкретних задач у реальному часі, що вимагає особливого підходу до їхньої архітектури, енергоспоживання та надійності функціонування [2].

Історично вбудовані системи розвивалися паралельно з еволюцією мікропроцесорної техніки, проте їхнє масове поширення розпочалося з появою доступних мікроконтролерів у 1980-х роках. Сьогодні вбудовані системи присутні практично в усіх сферах людської діяльності, від побутової електроніки до космічних апаратів, від медичного обладнання до промислової автоматизації. Особливо важливу роль вони відіграють у концепції інтернету речей, де мільйони пристроїв взаємодіють між собою, обмінюючись даними та виконуючи координовані дії без безпосередньої участі людини.

Основною характеристикою вбудованої системи є її спеціалізація для виконання обмеженого набору функцій. Це дозволяє оптимізувати апаратну частину, програмне забезпечення та енергоспоживання під конкретні завдання. Вбудована система типово складається з мікроконтролера або мікропроцесора, пам'яті для зберігання програмного коду та даних, периферійних пристроїв введення-виведення, інтерфейсів зв'язку та джерела живлення. Інтеграція всіх компонентів у компактному корпусі забезпечує високу надійність та енергоефективність роботи системи [3].

Програмне забезпечення вбудованих систем має суттєві відмінності від традиційного прикладного програмного забезпечення. Воно часто виконується на апаратних платформах з обмеженими обчислювальними ресурсами, обмеженою пам'яттю та суворими вимогами до часу відгуку. Операційні системи реального часу забезпечують детерміновану поведінку системи, гарантуючи виконання критичних завдань у встановлені терміни. Програмний код зазвичай оптимізується для мінімізації споживання енергії та ефективного використання доступних апаратних ресурсів, що особливо критично для автономних пристроїв IoT.

Для розуміння різноманіття вбудованих систем необхідно розглянути їхню класифікацію за різними критеріями (рис. 1.1). Структурна організація вбудованих систем визначає спосіб взаємодії апаратних та програмних компонентів і безпосередньо впливає на їхню продуктивність та енергоефективність.

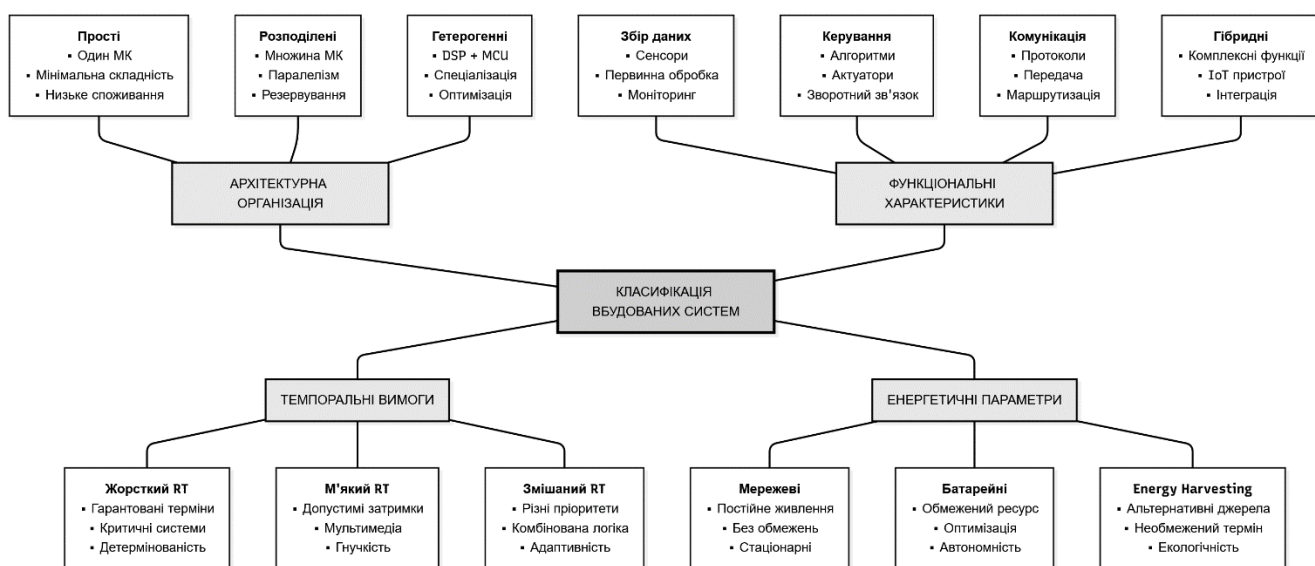


Рисунок 1.1 – Класифікація вбудованих систем

За архітектурним принципом вбудовані системи поділяються на прості системи з одним мікроконтролером, розподілені системи з кількома взаємодіючими контролерами та складні гетерогенні системи, що поєднують різнотипні обчислювальні елементи. Прості системи характеризуються

мінімальною складністю та низьким енергоспоживанням, що робить їх ідеальними для сенсорних вузлів IoT. Розподілені системи забезпечують паралельне виконання завдань та підвищену надійність завдяки резервуванню функцій. Гетерогенні системи об'єднують спеціалізовані процесори, такі як цифрові сигнальні процесори для обробки сигналів та графічні процесори для візуалізації, досягаючи оптимального балансу між продуктивністю та енергоефективністю [4].

За функціональним призначенням вбудовані системи класифікуються на системи збору даних, системи керування, комунікаційні системи та гібридні системи. Системи збору даних спеціалізуються на отриманні інформації від датчиків та її первинній обробці. Системи керування реалізують алгоритми управління виконавчими механізмами на основі отриманих даних та заданих параметрів. Комунікаційні системи забезпечують передачу інформації між різними вузлами мережі IoT, використовуючи різноманітні протоколи бездротового та дротового зв'язку. Гібридні системи поєднують усі зазначені функції, що характерно для інтелектуальних пристроїв інтернету речей.

Класифікація за вимогами реального часу розділяє вбудовані системи на жорсткого, м'якого та змішаного реального часу. Системи жорсткого реального часу повинні гарантовано виконувати завдання в межах визначених часових інтервалів, оскільки порушення цих обмежень може призвести до катастрофічних наслідків. Такі системи застосовуються в критичних областях, включаючи медичне обладнання, системи безпеки автомобілів та промислову автоматизацію. Системи м'якого реального часу допускають певні відхилення від заданих часових параметрів без критичних наслідків, що характерно для мультимедійних застосувань та систем моніторингу [5].

Енергетичні характеристики вбудованих систем відіграють ключову роль в архітектурі IoT-пристроїв. За типом живлення системи поділяються на мережеві, батарейні та автономні з альтернативними джерелами енергії. Мережеві системи підключаються до постійного джерела живлення та не мають обмежень щодо енергоспоживання, проте їхнє застосування обмежене

необхідністю прокладання кабельної інфраструктури. Батарейні системи працюють від акумуляторів або первинних елементів живлення, що вимагає ретельної оптимізації енергоспоживання для забезпечення тривалого терміну автономної роботи. Системи з енергозбиранням використовують сонячні панелі, п'єзоелектричні перетворювачі або радіочастотне збирання енергії для забезпечення практично необмеженого терміну служби.

Архітектура типової вбудованої системи для IoT-застосувань демонструє взаємодію основних функціональних блоків. Структурна організація визначає ефективність обробки даних та енергоспоживання системи в цілому (рис. 1.2).

Центральний процесорний блок виконує основні обчислювальні операції та координує роботу всіх підсистем. Сучасні мікроконтролери для IoT-застосунків інтегрують на одному кристалі процесорне ядро, пам'ять, периферійні інтерфейси та радіочастотний трансивер, що значно знижує загальне енергоспоживання системи. Архітектури на базі ARM Cortex-M серії демонструють оптимальне співвідношення продуктивності та енергоефективності, підтримуючи різні режими низького енергоспоживання та швидке пробудження для обробки подій [6].

Підсистема сенсорів відповідає за збір інформації про фізичні параметри навколишнього середовища або стан керованого об'єкта. Вибір типу сенсорів залежить від специфіки застосування та може включати датчики температури, вологості, освітленості, руху, тиску, якості повітря та багато інших. Інтерфейси взаємодії з сенсорами мають бути енергоефективними, оскільки частота опитування датчиків безпосередньо впливає на загальне енергоспоживання системи. Сучасні інтелектуальні сенсори виконують первинну обробку даних на локальному рівні, знижуючи навантаження на центральний процесор та обсяг даних для передачі.

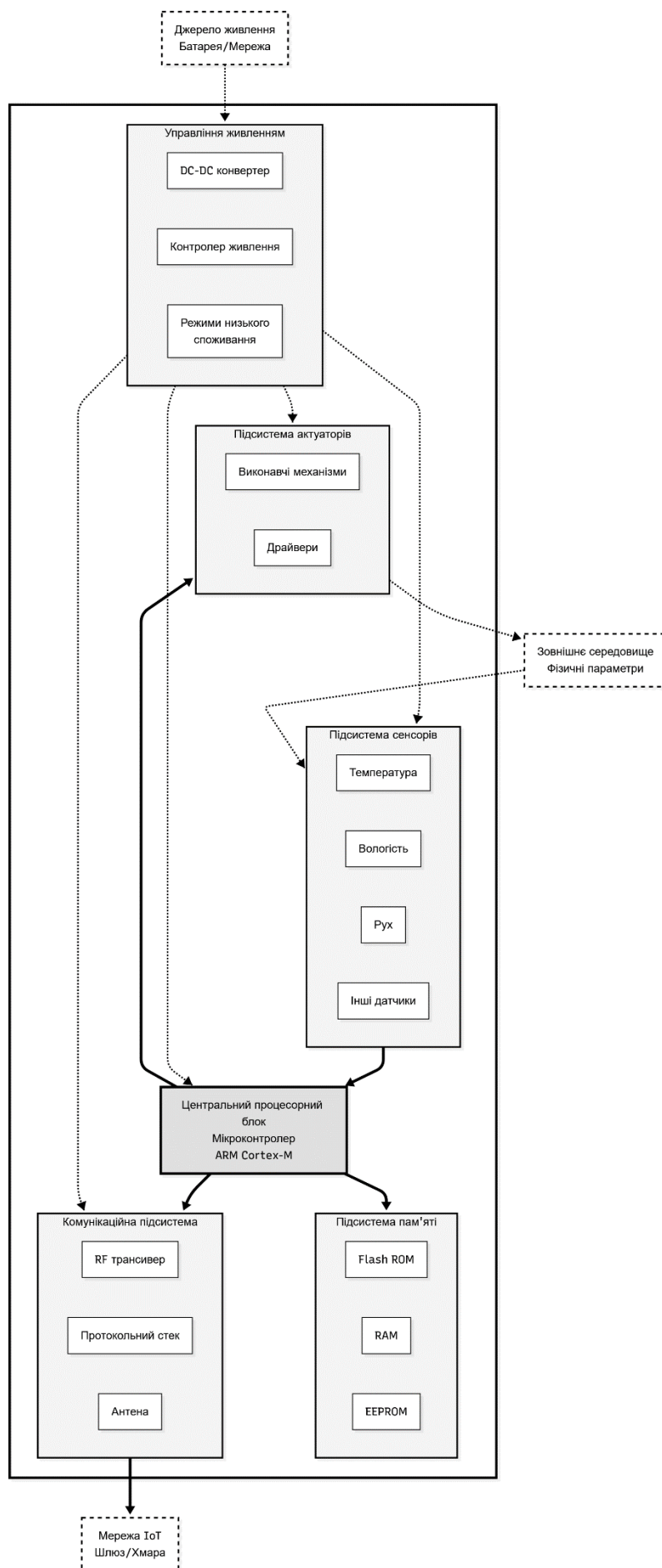


Рисунок 1.2 – Архітектура вбудованої системи IoT

Комунікаційна підсистема забезпечує обмін даними з іншими вузлами мережі або шлюзовими пристроями. Вибір протоколу зв'язку суттєво впливає на енергоефективність системи, оскільки радіопередача є одним з найбільш енергоємних процесів у вбудованих системах IoT. Протоколи типу Bluetooth Low Energy, Zigbee, LoRaWAN та NB-IoT оптимізовані для мінімізації енергоспоживання, використовуючи різні стратегії управління передачею даних. Ці протоколи реалізують механізми короткочасної передачі пакетів даних з тривалими періодами сну радіомодуля, що дозволяє досягти термінів автономної роботи від одного елемента живлення протягом кількох років [7].

Підсистема управління живленням координує енергетичні режими роботи всіх компонентів системи. Динамічне управління напругою та частотою дозволяє адаптувати продуктивність процесора до поточних обчислювальних потреб. Переведення неактивних периферійних блоків у режими низького енергоспоживання знижує загальне споживання струму. Інтелектуальні алгоритми управління живленням аналізують патерни роботи системи та прогнозують оптимальні моменти для переходу в енергозберігаючі режими без погіршення якості обслуговування.

Особливості функціонування вбудованих систем у складі інфраструктури IoT вимагають врахування специфічних факторів. Надійність та відмовостійкість є критичними параметрами, оскільки багато пристроїв розгортаються в важкодоступних місцях або середовищах з несприятливими умовами експлуатації. Механізми самодіагностики дозволяють виявляти несправності на ранніх стадіях, а резервування критичних компонентів забезпечує продовження роботи навіть за часткового відмовлення обладнання. Захист від несанкціонованого доступу та шифрування даних гарантують безпеку інформації, що передається через відкриті канали зв'язку [8].

Масштабованість вбудованих систем IoT передбачає можливість нарощування кількості пристроїв у мережі без деградації продуктивності. Ієрархічна архітектура з використанням шлюзових пристроїв дозволяє агрегувати дані від множини сенсорних вузлів перед передачею в хмарну

інфраструктуру. Туманні обчислення розподіляють обробку даних між периферійними пристроями, зменшуючи навантаження на центральні сервери та затримки в обробці критичних подій. Така архітектура особливо важлива для застосувань з вимогами низької латентності, таких як промислова автоматизація та автономні транспортні засоби.

Взаємодія компонентів у системах реального часу підпорядковується строгим часовим обмеженням (рис. 1.3). Процес обробки інформації від моменту надходження сигналу від датчика до прийняття рішення та виконання керуючої дії повинен завершуватися в межах визначеного часового інтервалу.

Етап збору даних включає опитування сенсорів через відповідні інтерфейси та попередню фільтрацію сигналів для усунення шумів та викидів. Аналогово-цифрові перетворювачі трансформують фізичні величини в дискретні значення з визначеною роздільною здатністю та частотою дискретизації. Вибір параметрів дискретизації впливає як на точність вимірювань, так і на обсяг даних для подальшої обробки та передачі.

Обробка та аналіз даних виконуються відповідно до алгоритмів управління, що можуть варіюватися від простих порогових компараторів до складних алгоритмів машинного навчання. Локальна обробка на рівні вбудованої системи знижує обсяг даних для передачі та зменшує затримки в прийнятті рішень. Edge computing концепція передбачає виконання інтелектуальної обробки безпосередньо на периферійних пристроях, використовуючи спеціалізовані нейропроцесори або програмовані логічні матриці для прискорення обчислень.

Прийняття рішення базується на результатах аналізу даних та заданих правилах або моделях поведінки системи. У простих системах це може бути безпосереднє включення або вимкнення виконавчого механізму при досягненні порогового значення контрольованого параметра. Складніші системи реалізують багатокритеріальну оптимізацію, враховуючи множину факторів та їхню взаємодію. Алгоритми нечіткої логіки дозволяють обробляти неточні або неповні дані, що характерно для реальних умов експлуатації [9].

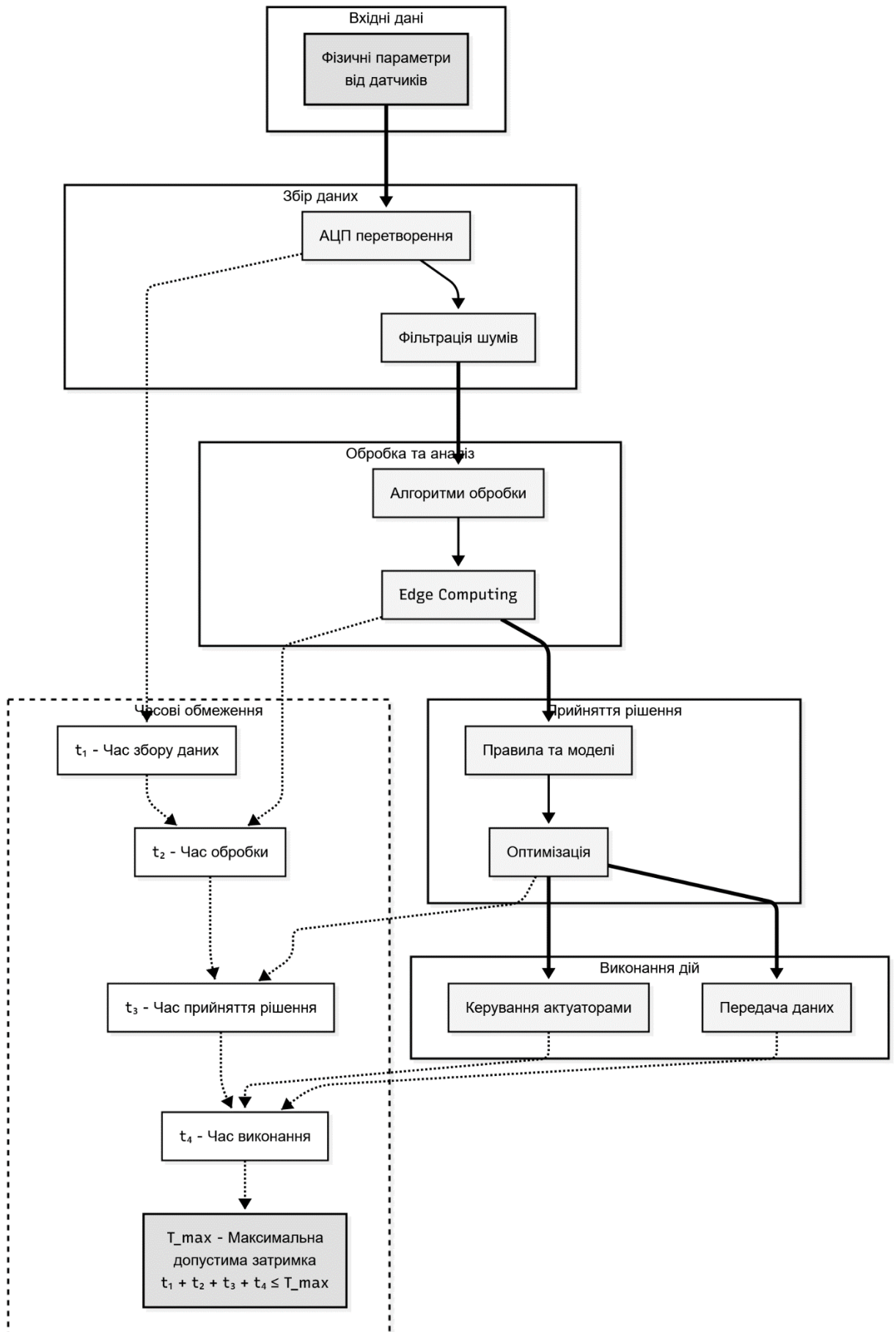


Рисунок 1.3 – Процес обробки даних у вбудованій системі реального часу

Виконання керуючих дій через актуатори замикає контур управління. Часові характеристики цього етапу визначаються типом виконавчих механізмів та можуть варіюватися від мікросекунд для електронних комутаторів до секунд для механічних приводів. Точність позиціонування та стабільність роботи актуаторів безпосередньо впливають на якість керування та ефективність всієї системи.

Комунікаційні особливості вбудованих систем IoT визначаються топологією мережі та протоколами взаємодії. Зіркова топологія з центральним шлюзом спрощує управління мережею, але створює єдину точку відмови. Mesh-топологія забезпечує високу надійність завдяки множинним шляхам передачі даних між вузлами, проте вимагає більш складних алгоритмів маршрутизації. Гібридні топології поєднують переваги різних підходів, адаптуючись до специфіки конкретного застосування [10].

Протоколи передачі даних у вбудованих системах IoT оптимізуються для мінімізації енергоспоживання та забезпечення надійності доставки інформації. Механізми підтвердження прийому пакетів гарантують цілісність даних, але збільшують енергетичні витрати на передачу. Стратегії агрегації даних дозволяють об'єднувати множину вимірювань в один пакет, знижуючи накладні витрати на заголовки протоколів та синхронізацію. Адаптивні алгоритми вибору потужності передачі оптимізують енергоспоживання залежно від відстані до приймача та умов радіопоширення.

Структура протокольного стеку демонструє ієрархію рівнів комунікації у вбудованих системах IoT (рис. 1.4). Кожен рівень виконує специфічні функції та взаємодіє з сусідніми рівнями через стандартизовані інтерфейси.

Фізичний рівень визначає характеристики радіоінтерфейсу, включаючи частотний діапазон, метод модуляції, потужність передачі та чутливість приймача. Вибір параметрів фізичного рівня безпосередньо впливає на дальність зв'язку, швидкість передачі даних та енергоспоживання. Технології вузькосмугової модуляції дозволяють досягти значної дальності зв'язку при низькій потужності передачі, що критично для батарейних пристроїв [11].

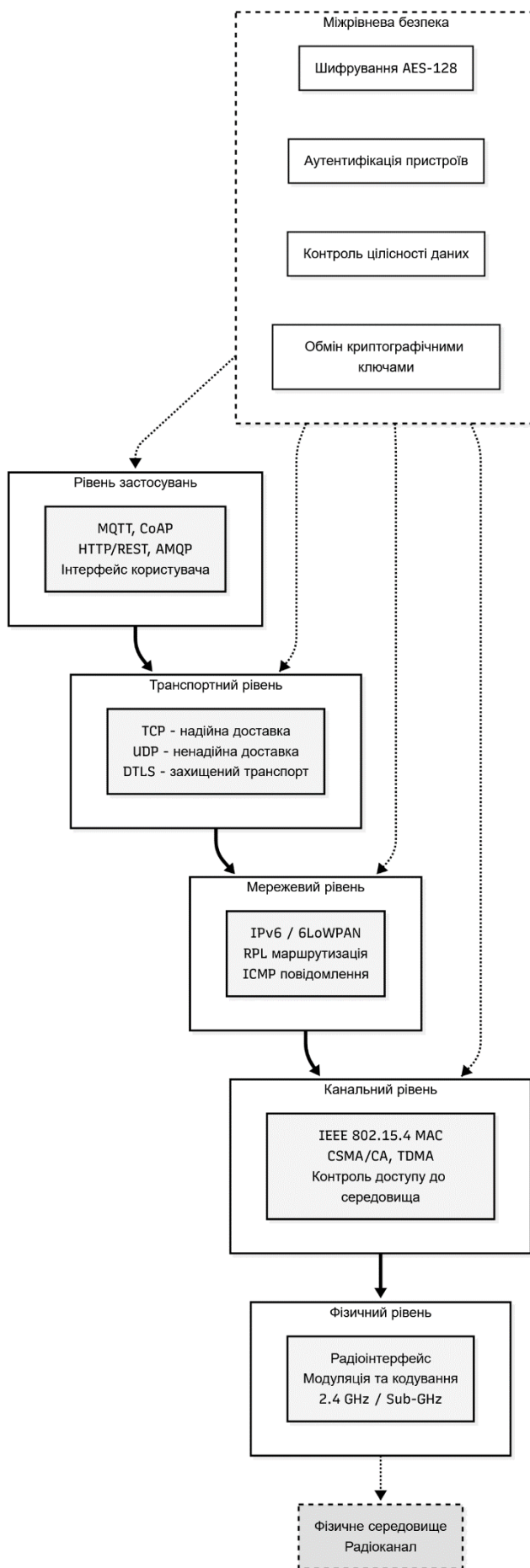


Рисунок 1.4 – Протокольний стек вбудованої системи IoT

Канальний рівень забезпечує надійну передачу кадрів даних між сусідніми вузлами мережі. Механізми контролю доступу до середовища запобігають колізіям при одночасній передачі даних множиною пристроїв. Протоколи типу CSMA/CA використовують прослуховування каналу перед передачею та випадкову затримку для розв'язання конфліктів. Часове мультиплексування резервує певні слоти для кожного пристрою, гарантуючи детерміновану доставку даних, що важливо для систем реального часу.

Мережевий рівень реалізує маршрутизацію пакетів через множину проміжних вузлів до кінцевого одержувача. Протоколи маршрутизації для IoT-мереж враховують обмежені енергетичні ресурси вузлів та динамічну зміну топології. Алгоритми на основі градієнта енергії спрямовують трафік через вузли з більшим запасом заряду батареї, збалансовуючи навантаження на мережу. Географічна маршрутизація використовує координати вузлів для прийняття рішень про пересилання пакетів, мінімізуючи службовий трафік [12].

Транспортний рівень забезпечує надійну або ненадійну доставку даних між кінцевими точками комунікації. Протокол UDP надає мінімальні гарантії доставки, що знижує накладні витрати та підходить для застосувань з толерантністю до втрати окремих пакетів. Протокол TCP гарантує впорядковану доставку всіх даних, але вимагає підтримки стану з'єднання та механізмів повторної передачі, що збільшує енергоспоживання. Спеціалізовані протоколи для IoT, такі як CoAP, пропонують компроміс між надійністю та ефективністю.

Рівень застосувань надає інтерфейс для взаємодії з користувачем або іншими системами. Протоколи MQTT та AMQP реалізують асинхронний обмін повідомленнями через посередника, що дозволяє роз'єднати відправника та одержувача в часі. Така архітектура зручна для IoT-систем з переривчастою зв'язністю, оскільки дані можуть зберігатися до відновлення з'єднання. RESTful API забезпечують простоту інтеграції з веб-сервісами та хмарними платформами, використовуючи стандартні HTTP-методи для маніпулювання ресурсами [13].

Безпека вбудованих систем IoT охоплює множину аспектів від захисту апаратного рівня до шифрування даних при передачі. Обмежені обчислювальні ресурси типових IoT-пристроїв ускладнюють реалізацію складних криптографічних алгоритмів. Легкі криптографічні примітиви спеціально розроблені для вбудованих систем, забезпечуючи адекватний рівень захисту при мінімальних витратах на обчислення та енергію. Апаратні криптографічні акселератори прискорюють операції шифрування без значного збільшення енергоспоживання.

Аутентифікація пристроїв гарантує, що тільки авторизовані вузли можуть приєднуватися до мережі та обмінюватися даними. Механізми на основі попередньо розподілених ключів спрощують процес аутентифікації, але вимагають безпечного зберігання криптографічного матеріалу. Протоколи обміну ключами дозволяють встановлювати захищені сесії між пристроями, які раніше не взаємодіяли. Інфраструктура відкритих ключів адаптується до обмежень IoT-пристроїв через використання еліптичної криптографії з коротшими ключами [14].

Контроль цілісності даних виявляє несанкціоноване модифікування інформації під час зберігання або передачі. Криптографічні хеш-функції генерують унікальні відбитки даних, будь-яка зміна яких призводить до зміни хеш-значення. Коди аутентифікації повідомлень поєднують хешування з секретним ключем, забезпечуючи одночасно цілісність та автентичність даних. Ці механізми мають бути ефективними для застосування у вбудованих системах з обмеженими ресурсами.

Тестування та верифікація вбудованих систем гарантують відповідність реалізації специфікаціям та вимогам. Симуляційне моделювання дозволяє перевірити функціональність системи на ранніх етапах розробки без необхідності виготовлення прототипів. Апаратна емуляція на FPGA-платформах забезпечує реалістичну поведінку системи з можливістю модифікації конфігурації. Натурні випробування в реальних умовах експлуатації виявляють проблеми, які неможливо передбачити при лабораторних тестах [15].

Метрики оцінювання ефективності вбудованих систем включають продуктивність, енергоспоживання, надійність та вартість. Продуктивність вимірюється кількістю операцій за одиницю часу або затримкою обробки критичних подій. Енергоефективність оцінюється як відношення виконаної роботи до витраченої енергії, що особливо важливо для автономних пристроїв. Середній час між відмовами характеризує надійність системи протягом тривалого періоду експлуатації. Вартість володіння включає початкові інвестиції, витрати на обслуговування та заміну компонентів.

Перспективи розвитку вбудованих систем IoT пов'язані з інтеграцією технологій штучного інтелекту безпосередньо на периферійних пристроях. Нейроморфні процесори імітують принципи роботи біологічних нейронних мереж, досягаючи надзвичайно низького енергоспоживання при виконанні задач розпізнавання образів та прийняття рішень. Квантові сенсори забезпечують безпрецедентну точність вимірювань фізичних величин, відкриваючи нові можливості для високоточних застосувань. Біодеградовані електронні компоненти зменшують екологічний вплив від масового розгортання IoT-пристроїв, розкладаючись природним шляхом після завершення терміну служби [16].

Отже, вбудовані системи становлять технологічну основу сучасної екосистеми інтернету речей, забезпечуючи інтелектуальну обробку даних та керування пристроями в реальному часі. Їхня архітектура та особливості функціонування безпосередньо визначають ефективність всієї IoT-інфраструктури. Розуміння принципів побудови, класифікації та специфічних характеристик вбудованих систем є необхідною передумовою для аналізу енергоефективності при передачі сигналів та розробки оптимальних рішень для конкретних застосувань.

## 1.2 Протоколи передачі даних та їх енергетичні характеристики

У вбудованих системах керування IoT вибір протоколу передачі даних має критичне значення для забезпечення енергоефективності пристроїв, які часто працюють від автономних джерел живлення. Сучасні бездротові мережі IoT використовують різноманітні протоколи, кожен з яких характеризується специфічними енергетичними параметрами, що безпосередньо впливають на тривалість автономної роботи пристроїв. Розуміння енергетичних характеристик протоколів дозволяє оптимізувати архітектуру системи та досягти максимальної ефективності при мінімальному енергоспоживанні.

Енергетична ефективність протоколів визначається кількома ключовими факторами, включаючи потужність передавача під час активної комунікації, тривалість передачі пакетів даних, частоту обміну інформацією та ефективність механізмів сплячого режиму. Різні протокольні стеки демонструють суттєво відмінні показники енергоспоживання, що робить їх придатними для різних сценаріїв застосування у системах Інтернету речей. Аналіз цих характеристик дозволяє інженерам приймати обґрунтовані рішення щодо вибору оптимального протоколу для конкретного застосування [17].

Порівняння енергоспоживання різних протоколів IoT представлено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння енергоспоживання різних протоколів IoT

Протокол	Стандарт	Передача (мА)	Прийом (мА)	Сплячий режим	Швидкість передачі	Дальність	Топологія
Zigbee	IEEE 802.15.4	30-40	25-35	< 1 мкА	до 250 кбіт/с	10-100 м	Mesh
BLE	Bluetooth 5.0	15-20	15-20	< 5 мкА	до 2 Мбіт/с	10-100 м	Point-to-Point
LoRaWAN	LPWAN	40-100	10-15	< 1 мкА	0,3-50 кбіт/с	2-15 км	Зірка
Thread	IEEE 802.15.4 + IPv6	30-40	25-35	< 1 мкА	до 250 кбіт/с	10-100 м	Mesh
Wi-Fi	IEEE 802.11	200-400	100-200	< 10 мкА	до 600 Мбіт/с	50-100 м	Зірка
NB-IoT	3GPP Cellular	200-300	50-100	< 5 мкА (PSM)	до 250 кбіт/с	до 10+ км	Зірка

Комплексне порівняння структури пакетів, часових та енергетичних характеристик представлено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Комплексне порівняння структури пакетів, часових та енергетичних характеристик

Параметр	Zigbee (IEEE 802.15.4)	BLE (Bluetooth 5.0)	LoRaWAN (LPWAN)
1	2	3	4
<b>СТРУКТУРА ПАКЕТУ</b>			
Преамбула	4 байти + 1 байт (SFD)	1 байт	8 символів
Заголовок	1 байт (Довжина) + 9-23 байти (MAC)	4 байти (Access Addr) + 2 байти (PDU)	PHY Header + PHY CRC + 1 байт (MAC)
Payload (корисні дані)	до 102 байтів	6-37 байтів	до 243 байтів
Контроль помилок	2 байти (FCS)	3 байти (CRC)	4 байти (MIC)
Загальний розмір пакету	до 133 байтів	16-47 байтів	до 256 байтів
<b>ЧАСОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>			
Час пробудження	~2 ms	<1 ms	~5 ms
Час передачі (TX)	4-8 ms	0,5-3 ms	50-400 ms (залежно від SF)
Час прийому (RX)	2 ms (ACK)	0,5-3 ms	1-2 s (вікна RX1/RX2)
Час одного циклу	~10 ms	<6 ms (з'єднання)	1-3 s
Латентність	10-100 ms	6-100 ms	1-10 s
Час передачі пакету 100 байт	~4 ms	~1 ms	~200 ms (SF7) / ~1500 ms (SF12)
<b>ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ</b>			
Максимальна швидкість	250 кбіт/с (фіксована)	до 2 Мбіт/с (адаптивна)	0,3-50 кбіт/с (залежно від SF)
Швидкість встановлення з'єднання	Середня (~10ms)	Дуже висока (<6ms)	Повільна (~1s)
<b>ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПРОФІЛЬ</b>			
Споживання TX (мА)	30-40	15-20	40-100
Споживання RX (мА)	25-35	15-20	10-15
Сплячий режим (мкА)	<1	<5	<1
Duty Cycle (активність)	1-10 % (маршрутизатори)	0,01-1 % (sleepy devices)	<0,1 % (клас А)
Середнє споживання	0,3-4 мА	0,002-0,2 мА	0,004-0,1 мА
Автономність (батарея CR2032)	1-3 роки	2-5 років	5-10 років

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
<b>ТОПОЛОГІЯ ТА РЕЖИМИ</b>			
Топологія мережі	Mesh	Point-to-Point, Star	Star (зірка)
Режими роботи	Координатор, Маршрутизатор, Кінцевий пристрій	Режим з'єднання, Режим оголошення (20ms-10s)	Клас А (найнижче), Клас В (періодичний RX), Клас С (постійний RX)
Підтримка mesh-мережі	Так	Обмежено	Ні
<b>ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСТОСУВАННЯ</b>			
Частота передачі	Періодична (секунди-хвилини)	Часта (мілісекунди-секунди)	Рідка (хвилини-години)
Оптимальний інтервал передачі	1-60 секунд	0,1-10 секунд	10-3600 секунд
Накладні витрати протоколу	Середні (10-30 %)	Низькі (5-15 %)	Низькі (3-10 %)
Енергоефективність (рідкі передачі)	Середня	Висока	Дуже висока
Оптимальне застосування	Розумний дім, автоматизація будівель	Носимі пристрої, персональна електроніка	Сенсорні мережі, лічильники, трекінг

На рисунку 1.5 представлено часову діаграму енергоспоживання IoT-протоколів.

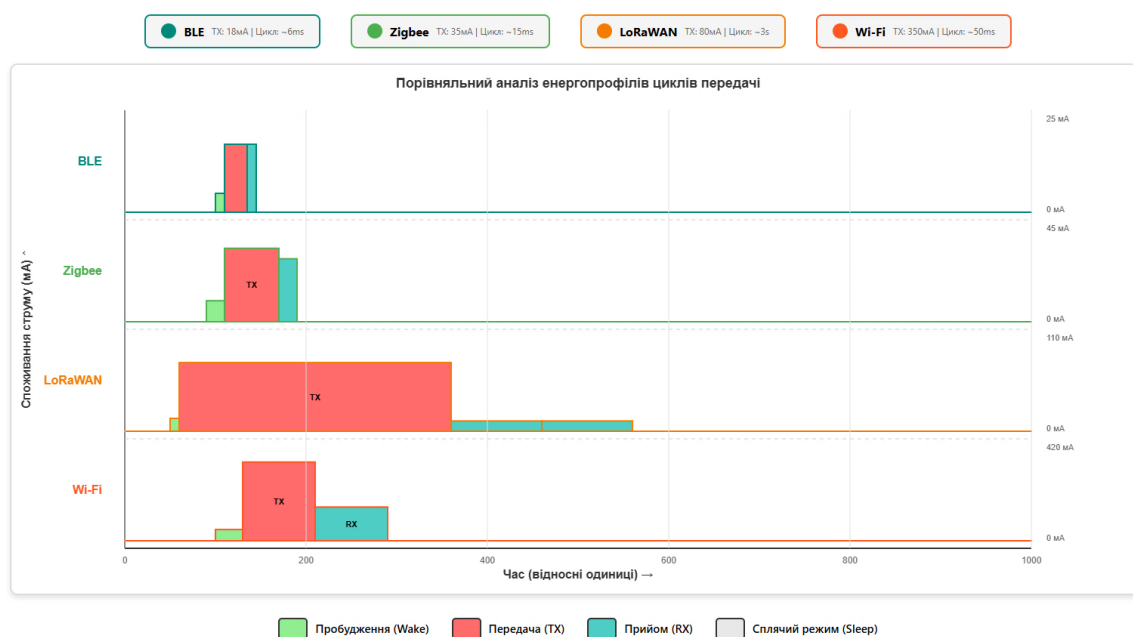


Рисунок 1.5 – Часова діаграма енергоспоживання IoT-протоколів

Протокол Zigbee, заснований на стандарті IEEE 802.15.4, є одним із найпоширеніших рішень для енергоефективних IoT мереж. Цей протокол працює у частотних діапазонах 2,4 ГГц та субгігагерцових діапазонах, забезпечуючи швидкість передачі даних до 250 кбіт/с. Архітектура Zigbee оптимізована для застосувань з низьким енергоспоживанням, підтримуючи режими сну з споживанням струму менше 1 мкА. Типове енергоспоживання під час передачі становить приблизно 30-40 мА при напрузі 3 В, тоді як у режимі прийому пристрій споживає близько 25-35 мА.

Ключовою особливістю Zigbee є використання mesh-топології, що дозволяє пакетам даних проходити через проміжні вузли для досягнення пункту призначення. Хоча така архітектура підвищує надійність мережі, вона також впливає на енергетичний баланс системи, оскільки проміжні вузли повинні періодично прокидатися для ретрансляції даних. Протокол підтримує три типи пристроїв: координатор, маршрутизатор та кінцевий пристрій, причому кінцеві пристрої можуть перебувати у сплячому режимі більшу частину часу, що критично важливо для батарейних застосувань [18].

Bluetooth Low Energy представляє альтернативний підхід до енергоефективної комунікації у IoT системах. Розроблений спеціально для застосувань з низьким енергоспоживанням, BLE використовує адаптивну частотну модуляцію у діапазоні 2,4 ГГц з 40 каналами шириною 2 МГц кожен. Протокол характеризується надзвичайно швидким встановленням з'єднання, що зазвичай займає менше 6 мс, що дозволяє мінімізувати час активної роботи радіомодуля. Енергоспоживання BLE під час передачі становить приблизно 15-20 мА, що помітно нижче порівняно з класичним Bluetooth.

Архітектура BLE включає два основні режими роботи: режим з'єднання та режим оголошення. У режимі оголошення пристрій періодично передає короткі пакети даних без встановлення постійного з'єднання, що дозволяє досягти середнього споживання струму на рівні кількох мікроампер. Час активної передачі у BLE може бути скорочений до мінімуму завдяки підтримці пакетів невеликого розміру та високій швидкості передачі даних до 2 Мбіт/с у версії

BLE 5.0. Протокол також підтримує різні рівні потужності передачі, що дозволяє динамічно адаптувати енергоспоживання залежно від відстані до приймача [19].

LoRaWAN являє собою протокол для далекої бездротової передачі даних з надзвичайно низьким енергоспоживанням. Технологія базується на модуляції LoRa, що працює у ліцензійно вільних субгігагерцових діапазонах частот та забезпечує дальність комунікації до декількох кілометрів у міських умовах та до десятків кілометрів у відкритій місцевості. Швидкість передачі даних у LoRaWAN варіюється від 0,3 до 50 кбіт/с залежно від налаштувань швидкості розповсюдження та ширини смуги частот. Енергоспоживання під час передачі становить приблизно 40-100 мА залежно від налаштувань потужності, проте завдяки рідким циклам передачі середнє споживання може бути знижено до одиниць мікроампер.

Протокол LoRaWAN використовує топологію зірки, де кінцеві пристрої комунікують безпосередньо з базовими станціями без необхідності у проміжних вузлах. Це суттєво спрощує енергетичний профіль кінцевих пристроїв, оскільки вони не повинні виконувати функції ретрансляції. LoRaWAN підтримує три класи пристроїв: клас А для застосувань з найнижчим енергоспоживанням, де пристрій сам ініціює комунікацію, клас В для застосувань з періодичним прийомом даних, та клас С для застосувань з постійним прийомом, що вимагають максимальної енергії [20].

Протокол Thread представляє відносно новий підхід до побудови mesh-мереж для IoT, базуючись на стандарті IEEE 802.15.4, подібно до Zigbee. Основна відмінність полягає у використанні протоколу IPv6 для адресації, що забезпечує кращу інтеграцію з існуючими IP-мережами. Thread оптимізований для застосувань розумного дому та характеризується енергоспоживанням на рівні Zigbee, з можливістю досягнення мікроамперного споживання у режимі сну. Протокол підтримує самоорганізуючі мережі з автоматичним відновленням та перерозподілом маршрутів у разі виходу з ладу окремих вузлів.

Важливою особливістю Thread є використання Border Router для з'єднання mesh-мережі з зовнішніми IP-мережами, що дозволяє ефективно інтегрувати IoT

пристрої у існуючу інфраструктуру без необхідності у спеціалізованих шлюзах. Енергетичний профіль Thread включає три типи пристроїв: маршрутизатори з постійним живленням, кінцеві пристрої з мінімальним енергоспоживанням та *sleepy end devices*, які можуть перебувати у сплячому режимі тривалий час. Протокол реалізує ефективні механізми синхронізації, що дозволяють кінцевим пристроям прокидатися лише у визначені моменти часу для обміну даними [21].

Wi-Fi, незважаючи на високе енергоспоживання порівняно з іншими протоколами IoT, залишається важливим варіантом для застосувань, що вимагають високої швидкості передачі даних та інтеграції з існуючою інфраструктурою. Стандарт IEEE 802.11ah, також відомий як Wi-Fi HaLow, спеціально розроблений для IoT застосувань та працює у субгігагерцових діапазонах, забезпечуючи кращу проникність та дальність порівняно з традиційним Wi-Fi. Енергоспоживання Wi-Fi модулів під час передачі може сягати 200-400 мА, проте сучасні реалізації включають ефективні режими енергозбереження, такі як Power Save Mode та Target Wake Time.

Протокол Wi-Fi підтримує складні механізми керування живленням, включаючи динамічне регулювання потужності передачі, адаптивну модуляцію та кодування, а також інтелектуальне планування періодів активності. У режимі глибокого сну Wi-Fi модулі можуть споживати менше 10 мкА, періодично прокидаючись для прослуховування beacon-кадрів від точки доступу. Для IoT застосувань критично важливим є баланс між необхідністю у високій пропускну здатності та енергоефективністю, що часто досягається через використання гібридних підходів з комбінацією Wi-Fi та протоколів з низьким енергоспоживанням [22].

Протокол NB-IoT представляє cellular-базоване рішення для IoT, оптимізоване для передачі невеликих обсягів даних з високою енергоефективністю. Технологія працює у ліцензованих діапазонах LTE та забезпечує глибоке проникнення сигналу у будівлі та підземні споруди завдяки використанню низьких частот та високої потужності передачі. Енергоспоживання NB-IoT модулів під час передачі може сягати 200-300 мА,

проте протокол включає режим Power Save Mode, у якому пристрій може перебувати у стані з мікроамперним споживанням між сеансами зв'язку.

Ключовою перевагою NB-IoT є підтримка Extended Discontinuous Reception, що дозволяє пристроям залишатися недоступними для мережі протягом тривалих періодів часу, значно знижуючи середнє енергоспоживання. Протокол також підтримує Release Assistance Indication, механізм, що дозволяє пристрою інформувати мережу про тривалість його неактивності, що оптимізує процес повторного встановлення з'єднання. Для застосувань з дуже рідкими передачами даних NB-IoT може забезпечити автономну роботу від батареї протягом десяти років [23].

Cellular IoT протоколи, включаючи LTE-M та NB-IoT, характеризуються складнішими процедурами встановлення з'єднання порівняно з локальними бездротовими протоколами, що впливає на енергетичний профіль системи. Процес приєднання до мережі включає пошук базової станції, синхронізацію, автентифікацію та встановлення радіозв'язку, що може споживати значну енергію. Проте після встановлення з'єднання протокол підтримує ефективні механізми передачі даних з адаптивним кодуванням та повторенням пакетів для забезпечення надійності у складних умовах поширення сигналу.

Порівняльний аналіз протоколів показує, що вибір оптимального рішення залежить від специфічних вимог застосування, включаючи дальність комунікації, швидкість передачі даних, латентність, надійність та доступний енергетичний бюджет. Для застосувань з дуже низьким енергоспоживанням та рідкими передачами даних найбільш придатними є LoRaWAN та NB-IoT. Для застосувань розумного дому з mesh-топологією оптимальними є Zigbee та Thread. BLE демонструє найкращі результати для персональних пристроїв з короткою дальністю комунікації та необхідністю у швидкому встановленні з'єднання [24].

Дерево рішень для вибору протоколу на основі енергетичних та функціональних вимог представлено на рисунку 1.6.

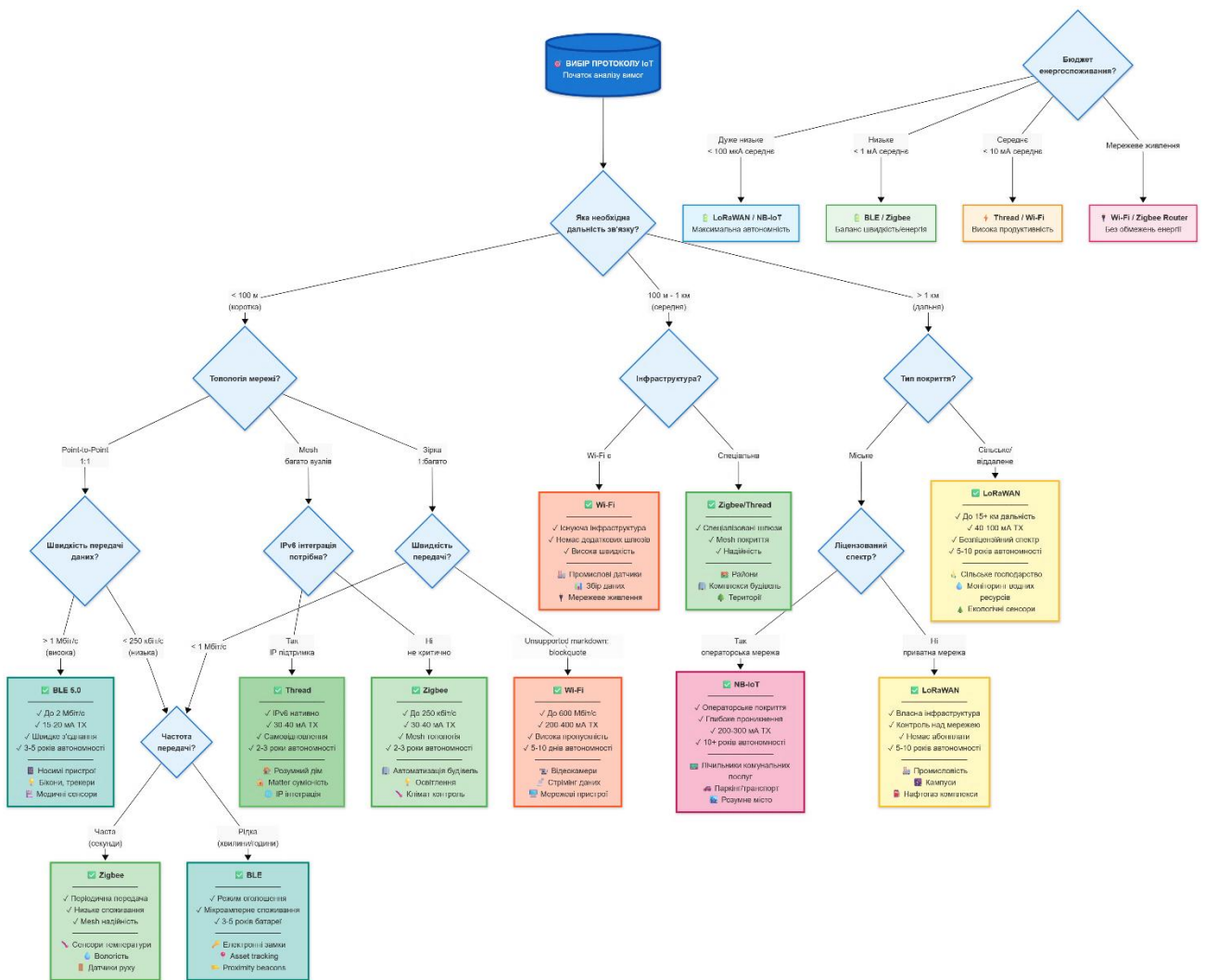


Рисунок 1.6 – Дерево рішень для вибору протоколу на основі енергетичних та функціональних вимог

Енергетична ефективність протоколів також залежить від фізичного рівня та характеристик радіоінтерфейсу. Параметри модуляції, кодування, ширина смуги частот та потужність передачі безпосередньо впливають на співвідношення між споживаною енергією та кількістю успішно переданих даних. Більш складні схеми модуляції, такі як OFDM у Wi-Fi, забезпечують вищу спектральну ефективність, але вимагають більшої обчислювальної потужності та енергії для цифрової обробки сигналів. Простіші схеми модуляції, такі як FSK у LoRa, характеризуються нижчою складністю приймача та можуть бути реалізовані з меншим енергоспоживанням.

Динамічне керування потужністю передачі є критичним механізмом оптимізації енергоспоживання у всіх сучасних протоколах IoT. Пристрої можуть

адаптувати потужність передачі на основі якості каналу зв'язку, відстані до приймача та вимог до надійності доставки даних. Алгоритми керування потужністю аналізують параметри, такі як Received Signal Strength Indicator та Signal-to-Noise Ratio, для визначення мінімально необхідної потужності передачі. Зниження потужності передачі на 3 дБ приблизно вдвічі зменшує енергоспоживання передавача, що може суттєво подовжити час автономної роботи [25].

Механізми повторної передачі та підтвердження доставки також впливають на загальний енергетичний баланс системи. Протоколи з автоматичним повторним запитом вимагають додаткових циклів передачі у разі втрати пакетів, що збільшує середнє енергоспоживання. З іншого боку, протоколи без підтвердження доставки можуть зменшити накладні витрати на комунікацію, але ризикують втратою критично важливих даних. Оптимальна стратегія залежить від характеру застосування та вимог до надійності передачі даних.

Агрегація даних та compression являють собою ефективні техніки зниження енергоспоживання на рівні протоколу. Замість передачі окремих вимірювань, пристрій може накопичувати дані протягом певного періоду та передавати їх єдиним пакетом, що зменшує кількість циклів активації радіомодуля. Стиснення даних зменшує розмір пакетів, що прямо пропорційно скорочує час активної передачі та енергоспоживання. Проте необхідно враховувати додаткові обчислювальні витрати на виконання алгоритмів стиснення та декомпресії [26].

Прогнозування якості каналу та адаптивні механізми планування передачі можуть суттєво підвищити енергоефективність комунікації. Аналізуючи історичні дані про якість каналу, пристрій може вибирати оптимальні моменти для передачі даних, коли умови поширення сигналу є найсприятливішими. Це дозволяє використовувати нижчу потужність передачі або більш ефективні схеми модуляції, зменшуючи загальне енергоспоживання системи при збереженні надійності комунікації.

### 1.3 Методи та критерії оцінювання енергоефективності

Енергоефективність вбудованих систем керування IoT є комплексною характеристикою, що потребує систематичного підходу до оцінювання та аналізу. Сучасні методи оцінювання базуються на декількох фундаментальних принципах, які дозволяють отримати об'єктивну картину енергоспоживання системи на різних рівнях її функціонування. Правильний вибір методів оцінювання залежить від специфіки конкретної системи, умов її експлуатації та вимог до точності вимірювань.

Одним з базових підходів до оцінювання енергоефективності є пряме вимірювання споживаної потужності за допомогою апаратних засобів. Цей метод передбачає використання спеціалізованих вимірювальних пристроїв, які фіксують миттєві значення струму та напруги в ланцюгах живлення системи. Точність таких вимірювань значною мірою залежить від частоти дискретизації та роздільної здатності аналого-цифрових перетворювачів, оскільки вбудовані системи часто демонструють швидкі зміни режимів роботи з різним рівнем споживання енергії. Альтернативним підходом є використання програмних методів оцінювання, які базуються на моделюванні енергоспоживання компонентів системи [27].

Такі моделі враховують характеристики мікроконтролера, радіомодуля, периферійних пристроїв та інших елементів системи. Перевагою програмного моделювання є можливість проведення аналізу на ранніх стадіях розробки, коли фізичний прототип ще не створений. Однак точність таких моделей залежить від якості вхідних даних про енергетичні характеристики компонентів та адекватності математичних моделей реальним умовам роботи. Критерії оцінювання енергоефективності можна класифікувати за декількома категоріями залежно від рівня абстракції та аспектів функціонування системи [28].

На апаратному рівні основними критеріями виступають середня споживана потужність, пікове споживання струму та енергія, витрачена на виконання окремих операцій. Ці параметри безпосередньо впливають на

тривалість автономної роботи пристрою від батареї та визначають вимоги до системи живлення. На рівні протоколів передачі даних критерії енергоефективності пов'язані з ефективністю використання радіоканалу та накладними витратами на підтримку з'єднання. Важливим показником є енергія, необхідна для передачі одного біта інформації, яка враховує як власне випромінювання сигналу, так і енерговитрати на формування пакетів, встановлення з'єднання та підтвердження доставки.

Для протоколів з повторними передачами додатково враховується вплив втрат пакетів на загальне енергоспоживання. Метрика енергоефективності на біт інформації є однією з найбільш універсальних характеристик для порівняння різних протоколів та режимів роботи. Вона визначається як відношення витраченої енергії до обсягу корисної інформації, переданої через канал зв'язку. При цьому важливо розрізняти корисну інформацію та службові дані, оскільки накладні витрати протоколу можуть суттєво відрізнитися для різних технологій.

Системи з великими накладними витратами можуть виявитися менш ефективними при передачі невеликих обсягів даних, навіть якщо їх радіоінтерфейс споживає менше енергії. Для систем з циклічною роботою важливим критерієм є співвідношення тривалості активного та неактивного станів, яке характеризується коефіцієнтом робочого циклу. Цей параметр показує, яку частину часу система перебуває в активному режимі з високим енергоспоживанням. Оптимізація робочого циклу є одним з найефективніших способів зниження середнього енергоспоживання, особливо для систем моніторингу та збору даних, які не потребують постійної активності.

Однак зменшення робочого циклу може негативно вплинути на швидкодію системи та час реакції на зовнішні події. Важливою складовою оцінювання енергоефективності є аналіз перехідних процесів між різними станами роботи системи. Мікроконтролери та радіомодулі витрачають значну енергію при переході з режиму сну в активний стан та навпаки. Час виходу з режиму сну, струм під час перехідного процесу та енергія стабілізації роботи радіопередавача

після увімкнення створюють додаткові енерговитрати, які необхідно враховувати при виборі стратегії енергозбереження [29].

Методи динамічного управління живленням дозволяють адаптувати енергоспоживання системи до поточних потреб та умов роботи. Техніка динамічної зміни частоти та напруги живлення процесора дає змогу знижувати споживання енергії під час виконання простих завдань або при невисоких вимогах до швидкодії. Аналогічно, радіомодулі можуть працювати з різними рівнями потужності випромінювання залежно від якості каналу зв'язку та відстані до базової станції. Критерієм ефективності таких методів є здатність системи швидко адаптуватися до зміни умов без суттєвої деградації якості обслуговування.

Оцінювання енергоефективності на рівні додатків потребує врахування специфіки алгоритмів обробки даних та логіки роботи системи. Складність обчислень, обсяг оброблюваних даних та інтенсивність звернень до периферійних пристроїв безпосередньо впливають на енергоспоживання. Важливим аспектом є балансування між локальною обробкою даних на вбудованому пристрої та передачею необроблених даних на зовнішній сервер. Локальна обробка збільшує енерговитрати процесора, але може зменшити обсяг переданих даних та відповідно енергію, необхідну для роботи радіомодуля [30].

Методика порівняльного аналізу енергоефективності передбачає проведення серії експериментів у контрольованих умовах з варіюванням ключових параметрів системи. Типовими змінними параметрами є розмір пакету даних, інтенсивність передачі, рівень потужності випромінювання та режим роботи радіомодуля. Результати таких експериментів дозволяють побудувати емпіричні моделі енергоспоживання та визначити оптимальні налаштування для конкретних сценаріїв використання. При цьому важливо забезпечити статистичну значущість результатів шляхом проведення достатньої кількості вимірювань та врахування варіації параметрів.

Для систем з множинним доступом до середовища передачі додатковим критерієм енергоефективності є вплив колізій та механізмів арбітражу на

загальне енергоспоживання. У разі виникнення колізій пакети необхідно передавати повторно, що призводить до зайвих енерговитрат. Ефективні протоколи мінімізують ймовірність колізій за рахунок раціонального розподілу доступу до каналу, але при цьому можуть збільшувати затримки передачі та вносити додаткові накладні витрати. Оцінювання впливу якості радіоканалу на енергоефективність потребує врахування ймовірності помилок передачі та необхідності повторних спроб [31].

У каналах з високим рівнем завад або значним загасанням сигналу може знадобитися збільшення потужності випромінювання або використання більш надійних, але повільніших режимів модуляції. Крім того, механізми виявлення та виправлення помилок вносять накладні витрати як з точки зору обсягу переданих даних, так і обчислювальної складності. Оптимальний баланс між надійністю та енергоефективністю залежить від вимог конкретного застосування до достовірності даних. Аналіз енергоефективності на системному рівні вимагає комплексного підходу, що враховує взаємодію всіх компонентів та їх вплив на загальне енергоспоживання.

Системний підхід передбачає розгляд не лише окремих елементів, але й синергетичних ефектів від їх спільної роботи. Наприклад, ефективне планування завдань може дозволити об'єднати декілька операцій в один період активності, зменшивши таким чином кількість перемикачів між станами та відповідні енерговитрати на перехідні процеси. Методи статистичного аналізу профілів енергоспоживання дозволяють ідентифікувати характерні патерни роботи системи та виявляти неефективні режими. Побудова гістограм розподілу споживаної потужності та аналіз часових характеристик різних станів дають змогу визначити, які саме режими роботи вносять найбільший внесок у загальне енергоспоживання.

На основі такого аналізу можна формувати рекомендації щодо оптимізації як апаратної конфігурації, так і програмного забезпечення системи. Критерій тривалості автономної роботи є інтегральним показником енергоефективності, який об'єднує всі аспекти енергоспоживання системи та співвідносить їх з

емністю джерела живлення. Для практичних застосувань цей критерій часто є визначальним, оскільки безпосередньо впливає на зручність експлуатації пристрою та частоту обслуговування. Розрахунок очікуваної тривалості роботи потребує врахування не лише середнього споживання струму, але й характеристик деградації батареї, впливу температури навколишнього середовища та особливостей профілю навантаження.

Важливим аспектом оцінювання енергоефективності є врахування компромісів між енергоспоживанням та іншими характеристиками системи. Зниження енергоспоживання часто супроводжується погіршенням швидкодії, збільшенням затримок передачі або зменшенням дальності зв'язку. Багатокритеріальна оптимізація дозволяє знаходити раціональний баланс між суперечливими вимогами шляхом формулювання цільової функції, яка враховує вагові коефіцієнти різних показників якості. Методи Парето-оптимізації дають змогу визначити множину рішень, для яких неможливо поліпшити один критерій без погіршення іншого.

Моделювання енергоспоживання на основі марківських процесів є ефективним інструментом для аналізу систем з імовірнісною поведінкою. Такі моделі описують систему як набір дискретних станів з відомим енергоспоживанням та ймовірностями переходів між ними. Розв'язання системи рівнянь балансу дозволяє визначити стаціонарні ймовірності перебування в кожному стані та розрахувати середнє енергоспоживання системи в довгостроковій перспективі. Методи машинного навчання знаходять застосування для побудови предиктивних моделей енергоспоживання на основі великих обсягів експериментальних даних.

Нейронні мережі та алгоритми регресії можуть виявляти складні нелінійні залежності між параметрами системи та енергоспоживанням, які важко описати аналітичними формулами. Такі моделі особливо корисні для систем з адаптивною поведінкою, де енергоспоживання залежить від множини факторів та змінюється в широких межах залежно від сценарію використання. Верифікація результатів оцінювання енергоефективності потребує зіставлення

даних, отриманих різними методами, та аналізу розбіжностей між теоретичними прогнозами і емпіричними вимірюваннями. Систематичні відхилення можуть вказувати на недоліки моделей або неврахування певних факторів впливу.

Калібрування моделей на основі експериментальних даних підвищує точність прогнозування та дозволяє використовувати їх для оптимізації системи без необхідності проведення численних фізичних експериментів. Стандартизовані методики тестування енергоефективності забезпечують можливість об'єктивного порівняння різних рішень та технологій. Такі методики визначають типові сценарії використання, навантаження та умови проведення вимірювань, що дозволяє отримувати відтворювані результати. Відповідність стандартизованим процедурам тестування є важливою для сертифікації пристроїв та підтвердження заявлених характеристик енергоспоживання.

Водночас, стандартні тести можуть не повністю відображати специфіку реальних умов експлуатації, тому їх результати доцільно доповнювати профільно-орієнтованим тестуванням. Таким чином, комплексне оцінювання енергоефективності вбудованих систем керування IoT потребує застосування різноманітних методів та критеріїв, які охоплюють усі рівні функціонування системи. Правильний вибір методів оцінювання та інтерпретація результатів є критично важливими для прийняття обґрунтованих рішень щодо оптимізації енергоспоживання та забезпечення тривалої автономної роботи пристроїв.

## РОЗДІЛ 2

# АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В IoT

### 2.1 Порівняльна характеристика бездротових технологій

Розвиток інтернету речей створив необхідність у надійних та енергоефективних каналах бездротової передачі даних, які б забезпечували тривалу автономну роботу вбудованих пристроїв. Сучасні IoT-системи керування висувають специфічні вимоги до комунікаційних протоколів, серед яких ключовими є низьке енергоспоживання, достатня дальність зв'язку та можливість роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Вибір оптимальної бездротової технології безпосередньо впливає на загальну енергоефективність системи та тривалість роботи від автономного джерела живлення. Різноманітність доступних стандартів зв'язку вимагає ретельного аналізу їхніх характеристик у контексті конкретних застосувань.

Технологія Bluetooth Low Energy отримала широке розповсюдження завдяки оптимальному балансу між енергоспоживанням та функціональністю. Стандарт BLE використовує адаптивну частотну модуляцію з розподілом спектру, що забезпечує стійкість до завад у діапазоні 2,4 ГГц. Протокол реалізує кілька режимів роботи, які дозволяють пристроям перебувати в стані глибокого сну більшу частину часу, активізуючись лише для короткочасної передачі даних. Пікове споживання струму під час передачі становить приблизно 15-20 мА, тоді як у режимі очікування цей показник знижується до 1-5 мкА. Дальність зв'язку для BLE зазвичай обмежується 50-100 метрами у відкритому просторі, що робить цю технологію придатною для локальних мереж розумного дому та персональних носимих пристроїв.

Протокол Zigbee спроектовано спеціально для низькошвидкісних сенсорних мереж з акцентом на мінімізацію енергоспоживання. Базуючись на стандарті IEEE 802.15.4, Zigbee забезпечує створення mesh-топології, що дозволяє пристроям ретранслювати сигнали один одного та суттєво

розширювати зону покриття мережі. Типове споживання струму в активному режимі становить 25-35 мА, проте завдяки можливості тривалого перебування в режимі сну середнє споживання може бути зменшене до декількох мікроампер. Швидкість передачі даних обмежена 250 кбіт/с, чого цілком достатньо для передачі показань сенсорів та команд керування. Mesh-архітектура забезпечує високу надійність зв'язку навіть при виході з ладу окремих вузлів мережі.

Технологія Wi-Fi традиційно характеризується високим енергоспоживанням порівняно з іншими стандартами IoT-зв'язку, проте забезпечує значно вищу швидкість передачі даних. Споживання струму типового Wi-Fi модуля в активному режимі сягає 80-150 мА, що робить його менш придатним для батарейних застосувань з тривалим терміном служби. Водночас розвиток стандарту 802.11ah, відомого як Wi-Fi HaLow, частково вирішує проблему енергоефективності завдяки використанню субгігагерцових частот та спеціалізованих режимів енергозбереження. Основною перевагою Wi-Fi залишається можливість прямої інтеграції з існуючою інфраструктурою та високопропускні канали зв'язку, що виправдовує його використання в застосуваннях, де якість та швидкість передачі даних критичніші за енергоспоживання.

Протоколи сімейства LoRa та Sigfox оптимізовані для дальнього зв'язку з мінімальним енергоспоживанням, формуючи категорію LPWAN технологій. LoRaWAN використовує запатентовану модуляцію з розширенням спектру, що дозволяє досягати дальності зв'язку до декількох кілометрів навіть при потужності передавача 14-20 дБм. Споживання струму під час передачі становить 30-45 мА, проте завдяки рідкісним сеансам зв'язку пристрої можуть працювати від батареї протягом кількох років. Швидкість передачі даних обмежена діапазоном 0,3-50 кбіт/с залежно від налаштувань spreading factor, що робить ці технології придатними лише для передачі невеликих пакетів телеметричних даних. Архітектура мережі передбачає зіркову топологію з центральними шлюзами, що спрощує розгортання інфраструктури для моніторингу географічно розподілених об'єктів [32].

Стандарт Thread представляє собою відносно новий протокол, розроблений консорціумом провідних технологічних компаній для створення надійних mesh-мереж розумного дому. Базуючись на тому ж фізичному рівні IEEE 802.15.4, що й Zigbee, Thread забезпечує IP-зв'язок та нативну підтримку IPv6, спрощуючи інтеграцію з хмарними сервісами. Енергетичні характеристики Thread подібні до Zigbee, з типовим споживанням 25-40 мА в активному режимі та можливістю глибокого сну з споживанням близько 5 мкА. Протокол використовує самоорганізовані mesh-мережі без єдиної точки відмови, автоматично перебудовуючи топологію при зміні конфігурації пристроїв. Особливістю Thread є відсутність необхідності в спеціалізованому координаторі мережі, що знижує загальну складність системи.

Технологія NFC займає особливу нішу серед бездротових стандартів завдяки екстремально короткій дальності зв'язку та можливості пасивної роботи без власного джерела живлення. Пристрої NFC можуть функціонувати в режимі tag, отримуючи енергію від електромагнітного поля зчитувача, що робить їх придатними для застосувань, де заміна батарей неможлива або недоцільна. Активні NFC-модулі споживають 50-100 мА під час комунікації, проте тривалість сеансів зв'язку вимірюється секундами або навіть мілісекундами. Швидкість передачі даних досягає 424 кбіт/с на відстані до 10 сантиметрів, що обмежує сферу застосування технології задачами ідентифікації, авторизації та ініціалізації з'єднань інших бездротових інтерфейсів [33].

Порівняльний аналіз енергетичних характеристик різних бездротових технологій вимагає врахування не лише пікових значень споживання струму, але й типових сценаріїв використання з чергуванням активних та пасивних фаз. Середнє енергоспоживання визначається добутком струму на тривалість кожного режиму роботи, тому протоколи з ефективними механізмами duty cycle можуть забезпечувати нижче сумарне споживання навіть при вищих пікових значеннях. Латентність пробудження з режиму сну також критично впливає на реактивність системи, особливо для застосувань реального часу. Технології з

тривалим часом ініціалізації радіотракту змушені частіше перебувати в активному стані, що погіршує енергоефективність.

Вибір оптимальної бездротової технології для конкретного IoT-застосування залежить від балансу множини факторів, включаючи необхідну дальність зв'язку, швидкість передачі даних, топологію мережі та доступність інфраструктури. Для систематизації та наочного представлення ключових характеристик доцільно скласти порівняльну таблицю основних параметрів розглянутих технологій (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Порівняльні характеристики бездротових технологій IoT

Параметр	Bluetooth LE	Zigbee	Thread	Wi-Fi	LoRaWAN	Sigfox	NFC
Частота, ГГц	2,4	2,4	2,4	2,4/5	0,433/0,868	0,868	0,01356
Дальність, м	50-100	10-100	10-100	50-150	2000-15000	3000-50000	0,01-0,1
Швидкість передачі, кбіт/с	1000-2000	250	250	11000-600000	0,3-50	0,1-0,6	106-424
Споживання в активному режимі, мА	15-20	25-35	25-40	80-150	30-45	35-50	50-100
Споживання в режимі сну, мкА	1-5	3-5	5-8	10-50	1-3	1-2	0 (пасивний)
Топологія мережі	Зіркова/Mesh	Mesh	Mesh	Зіркова	Зіркова	Зіркова	Точка-точка
Час автономної роботи	6-24 міс.	12-36 міс.	12-24 міс.	1-7 днів	2-10 років	5-15 років	Пасивний режим

Аналіз представлених у таблиці даних демонструє відсутність універсального рішення, придатного для всіх сценаріїв застосування IoT-систем. Технології LPWAN виявляються оптимальними для географічно розподілених сенсорних мереж з рідкісною передачею невеликих обсягів даних, тоді як Zigbee та Thread краще підходять для щільних локальних мереж розумних будинків. Bluetooth Low Energy забезпечує баланс між енергоспоживанням та функціональністю для персональних пристроїв та носимої електроніки. Wi-Fi залишається доцільним вибором для застосувань з постійним живленням, де критична висока пропускну здатність та інтеграція з існуючою інфраструктурою.

Важливим аспектом енергоефективності є не лише характеристики самого радіоінтерфейсу, але й ефективність протокольного стеку та можливість апаратної обробки типових операцій без залучення основного процесора. Сучасні інтегровані рішення включають спеціалізовані радіоконтролери з автономною обробкою стандартних сценаріїв комунікації, дозволяючи головному мікроконтролеру перебувати в режимі глибокого сну. Наявність апаратних прискорювачів криптографії суттєво знижує енергетичні витрати на забезпечення безпеки передачі даних, що особливо актуально для протоколів з обов'язковим шифруванням.

Топологія мережі безпосередньо впливає на енергоефективність окремих вузлів та системи загалом. У зіркових топологіях центральний вузол несе основне навантаження з маршрутизації та управління, тоді як периферійні пристрої можуть максимально спростувати свою логіку та мінімізувати час активності. Mesh-мережі розподіляють навантаження між вузлами, підвищуючи надійність та зону покриття, проте вимагають від деяких пристроїв постійної готовності до ретрансляції даних. Гібридні архітектури з виділеними маршрутизаторами, підключеними до постійного живлення, дозволяють поєднувати переваги обох підходів, забезпечуючи розширену зону покриття без шкоди автономності батарейних сенсорів.

Механізми адаптивного керування потужністю передавача відіграють ключову роль у мінімізації енергоспоживання без погіршення якості зв'язку. Протоколи з підтримкою динамічного регулювання вихідної потужності можуть автоматично знижувати рівень сигналу при комунікації з близькими вузлами, економлячи енергію батареї. Алгоритми оцінки якості каналу дозволяють оптимізувати параметри модуляції та кодування, балансує між швидкістю передачі та надійністю. У багатопротокольних системах можливе динамічне перемикання між різними радіоінтерфейсами залежно від поточних вимог до швидкості, дальності та доступності мережі [34].

Для наочної демонстрації взаємозв'язку між основними параметрами бездротових технологій доцільно скласти узагальнену схему, що ілюструє

позиціонування різних стандартів у координатах дальності зв'язку та енергоспоживання (рис. 2.1).

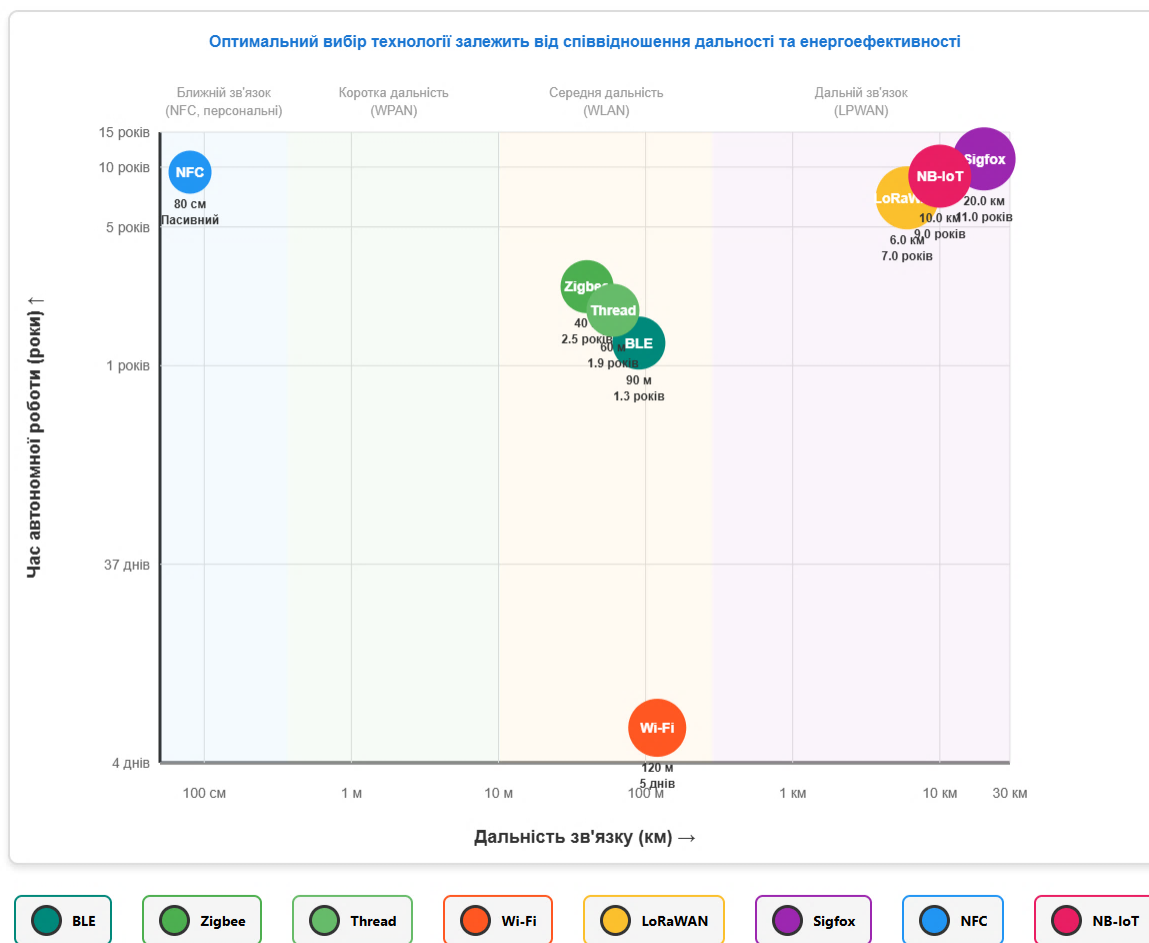


Рисунок 2.1 – Позиціонування бездротових технологій за критеріями дальності та енергоефективності

Представлена схема наочно демонструє спеціалізацію різних технологій для певних діапазонів застосувань. Чітко простежується компроміс між дальністю зв'язку та енергоефективністю, де технології дальнього радіусу дії вимагають більших енергетичних витрат на передачу кожного біта інформації. Виключення становлять LPWAN-рішення, які завдяки специфічним методам модуляції та низьким швидкостям передачі досягають унікального балансу дальності та ефективності. Позиціонування технологій середнього радіусу дії формує щільний кластер, що відображає їхню конкуренцію в сегменті локальних IoT-мереж.

Практичні виміри енергоспоживання в реальних умовах експлуатації часто відрізняються від теоретичних розрахунків через вплив додаткових факторів. Якість радіоканалу визначає кількість необхідних повторних передач пакетів, що пропорційно збільшує енергетичні витрати. Завантаженість діапазону частот іншими пристроями підвищує ймовірність колізій та потребу в повторних спробах доступу до середовища. Температурні умови впливають на ефективність радіочастотних компонентів та ємність батарей, вносячи сезонні варіації в автономність пристроїв. Системи керування живленням мають враховувати ці чинники для забезпечення стабільної роботи в широкому діапазоні умов експлуатації.

Перспективи розвитку бездротових технологій для IoT пов'язані з подальшою інтеграцією енергозберігаючих механізмів на всіх рівнях стеку протоколів. Стандарти нового покоління включають режими ультранизького споживання з періодичним пробудженням за розкладом або за зовнішнім сигналом. Технології energy harvesting дозволяють пристроям житися від енергії навколишнього середовища, усуваючи необхідність у батареях для певних застосувань. Машинне навчання застосовується для передбачення оптимальних моментів передачі даних та адаптації параметрів зв'язку до поточних умов каналу. Інтеграція множинних радіоінтерфейсів у єдиному чіпі знижує вартість та споживання гетерогенних IoT-пристроїв.

## **2.2 Моделі енергоспоживання при передачі сигналів у бездротових сенсорних мережах**

Енергоспоживання вбудованих пристроїв IoT визначається комплексом взаємопов'язаних факторів, що охоплюють апаратну реалізацію радіотракту, протокольні механізми доступу до середовища та специфіку застосування. Створення точних математичних моделей енергетичних витрат дозволяє прогнозувати тривалість автономної роботи пристроїв та оптимізувати параметри системи на етапі проектування. Моделювання енергоспоживання

вимагає врахування всіх режимів роботи радіомодуля, включаючи періоди активної передачі, прийому, очікування та глибокого сну. Точність моделі безпосередньо впливає на здатність системи забезпечити задані вимоги до терміну експлуатації без обслуговування.

Базова модель енергоспоживання радіомодуля ґрунтується на аналізі струмів споживання в різних операційних режимах та тривалості перебування в кожному з них. Загальна енергія, спожита пристроєм за певний період, визначається як сума добутків потужності на час для всіх режимів роботи. Потужність передавача залежить від вихідної радіочастотної потужності, ефективності підсилювача та додаткових схемотехнічних компонентів. Приймач споживає енергію на роботу малошумного підсилювача, змішувачів, фільтрів та демодулятора сигналу. Перехідні процеси між режимами також вносять енергетичні витрати через необхідність ініціалізації генераторів, синтезаторів частоти та калібрування компонентів.

Класична модель енергоспоживання для передачі одного пакету даних включає складові на радіочастотну генерацію сигналу та на обробку даних цифровою схемотехнікою. Енергія передачі пропорційна розміру пакету та швидкості передачі даних, тоді як енергія на обробку залежить від складності протокольного стеку та ефективності мікроконтролера. Дальність зв'язку впливає на необхідну потужність передавача відповідно до моделі поширення радіохвиль, що враховує втрати в вільному просторі та середовищі. Для забезпечення надійного зв'язку на великих відстанях потрібна пропорційно вища потужність передавача, що квадратично збільшує енергетичні витрати.

Модель Хайнцельмана розглядає енергоспоживання сенсорного вузла як функцію частоти передачі даних, розміру пакету та параметрів радіоканалу. Згідно з цією моделлю, сумарна енергія складається з витрат на передачу корисних даних, службової інформації протоколу та повторних передач через помилки в каналі. Накладні витрати протоколу можуть становити значну частку загального енергоспоживання, особливо для коротких пакетів даних з відносно великими заголовками. Ефективність передачі характеризується відношенням

енергії на біт корисної інформації до загальної енергії на біт переданих даних. Оптимізація розміру пакету дозволяє мінімізувати накладні витрати при збереженні прийнятної ймовірності успішної передачі [35].

Стохастичні моделі енергоспоживання враховують випадковий характер трафіку в сенсорних мережах та динаміку радіоканалу. Інтервали між передачами даних можуть підлягати різним розподілам ймовірностей залежно від типу застосування та алгоритмів збору інформації. Модель Маркова описує переходи між станами радіомодуля з певними ймовірностями, що дозволяє оцінювати середнє енергоспоживання в стаціонарному режимі. Тимчасова кореляція подій в мережі впливає на можливість агрегації даних та спільної передачі пакетів від кількох сенсорів. Використання буферизації та адаптивних стратегій передачі дозволяє балансувати між латентністю доставки даних та енергоефективністю системи.

Для mesh-топологій модель енергоспоживання ускладнюється необхідністю врахування ретрансляції пакетів від інших вузлів мережі. Проміжні маршрутизатори витрачають енергію на прийом, обробку та передачу чужих даних, що може переважати власне енергоспоживання на передачу локально згенерованої інформації. Алгоритми маршрутизації з врахуванням енергетичного балансу розподіляють навантаження між вузлами, запобігаючи передчасному виснаженню батарей окремих пристроїв. Метрики оцінки шляхів можуть включати залишковий заряд батареї, історію використання вузла та прогнозовану тривалість його роботи. Динамічна реконфігурація топології дозволяє обходити вузли з низьким рівнем енергії, збільшуючи загальний термін функціонування мережі [36].

Модель duty cycle описує співвідношення між активним часом роботи радіомодуля та загальним часом функціонування пристрою. Середнє енергоспоживання прямо пропорційне коефіцієнту активності, тому мінімізація duty cycle є ключовою стратегією продовження автономності. Синхронізовані протоколи дозволяють вузлам координувати моменти пробудження для обміну даними, уникаючи енергетичних витрат на очікування партнерів зв'язку.

Асинхронні протоколи використовують преамбули або періодичне прослуховування каналу, що вносить додаткові енергетичні витрати але спрощує архітектуру системи. Адаптивні механізми duty cycle коригують параметри в залежності від інтенсивності трафіку та залишкового заряду батареї.

Аналітичне моделювання енергоспоживання вимагає врахування специфіки фізичного рівня обраної технології бездротового зв'язку. Для когерентної демодуляції необхідна оцінка фази несучої, що потребує додаткових символів преамбули та підвищеного енергоспоживання приймача. Некогерентні схеми демодуляції спрощують апаратну реалізацію та знижують споживання, проте вимагають вищого відношення сигнал-шум для забезпечення тієї ж імовірності помилки. Методи розширення спектру покращують завадостійкість за рахунок збільшення тривалості передачі символу, що пропорційно підвищує енергетичні витрати на передачу біта інформації. Для систематизації різних підходів до моделювання енергоспоживання доцільно скласти порівняльну таблицю основних моделей та їхніх характеристик (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика моделей енергоспоживання в бездротових сенсорних мережах

Модель	Тип моделі	Основні параметри	Складність розрахунків	Точність прогнозування	Область застосування
1	2	3	4	5	6
Базова детермінована модель	Детермінована	Потужність режимів (Tx, Rx, Sleep), тривалість перебування в режимах	Низька	Середня ( $\pm 15-20\%$ )	Попередня оцінка, прототипування
Модель Хайнцельмана (Heinzelman)	Детермінована з протокольним і накладними витратами	Розмір пакету, частота передачі, накладні витрати протоколу, ймовірність помилок	Середня	Висока ( $\pm 10-15\%$ )	Кластерні топології, LEACH протокол

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6
Стохастична модель Маркова	Стохастична	Матриця переходів між станами, ймовірності переходів, розподіл трафіку	Висока	Висока ( $\pm 8-12\%$ )	Системи з випадковим трафіком, довгострокове прогнозування
Модель з duty cycle	Детермінована /адаптивна	Коефіцієнт активності, період пробудження, синхронізація вузлів	Низька-середня	Середня-висока ( $\pm 10-15\%$ )	Протоколи з періодичним сном (MAC рівень)
Mesh-модель з ретрансляцією	Детермінована /мережева	Топологія мережі, алгоритми маршрутизації, навантаження на ретрансляцію	Висока	Висока ( $\pm 10-12\%$ )	Багатохопові мережі, mesh-топології
Модель з урахуванням модуляції	Детермінована фізичного рівня	Тип модуляції, швидкість передачі, SNR, смуга частот	Середня	Висока ( $\pm 5-10\%$ )	Оптимізація фізичного рівня, вибір параметрів радіо
Модель з кодуванням FEC	Детермінована з корекцією помилок	Швидкість коду, тип кодування, ймовірність помилки біта	Середня-висока	Висока ( $\pm 8-12\%$ )	Системи з високою завадостійкістю
Комплексна модель системи	Гібридна	Всі компоненти: радіо, сенсори, обробка, живлення	Дуже висока	Дуже висока ( $\pm 5-8\%$ )	Точне проектування, валідація систем
Адаптивна модель з ML	Стохастична з машинним навчанням	Історичні дані, параметри середовища, динаміка трафіку	Дуже висока	Найвища ( $\pm 3-7\%$ )	Інтелектуальні системи, реальний час

Представлені в таблиці моделі відображають еволюцію підходів до оцінки енергетичних витрат від простих детермінованих формул до складних стохастичних систем з адаптацією параметрів. Вибір моделі залежить від необхідної точності прогнозування, доступності вхідних параметрів та

обчислювальної складності розрахунків. Аналітичні моделі дозволяють швидко оцінювати вплив окремих параметрів на загальне енергоспоживання, тоді як симуляційні підходи забезпечують вищу точність при врахуванні множини взаємопов'язаних факторів. Гібридні методи поєднують переваги обох напрямків, використовуючи аналітичні вирази для типових сценаріїв та детальне моделювання для критичних режимів роботи.

Вплив параметрів модуляції на енергоспоживання проявляється через взаємозв'язок швидкості передачі, смуги частот та необхідної потужності сигналу. Багаторівневі схеми модуляції дозволяють передавати більше бітів на символ, підвищуючи спектральну ефективність, проте вимагають вищого відношення сигнал-шум та точнішої схемотехніки. Компроміс між енергією на біт та спектральною ефективністю визначається межею Шеннона, що встановлює теоретичний мінімум необхідної енергії для безпомилкової передачі в каналі з шумом. Практичні системи працюють з певним запасом від теоретичної межі через недосконалість кодування, модуляції та обробки сигналу.

Енергетична ефективність кодування з виправленням помилок оцінюється через зменшення кількості повторних передач за рахунок надлишковості коду. Згорткові та блокові коди додають контрольні біти до корисних даних, збільшуючи обсяг переданої інформації але підвищуючи імовірність успішного декодування при наявності помилок. Turbo-коди та LDPC-коди наближаються до пропускної здатності каналу Шеннона, забезпечуючи майже оптимальну енергетичну ефективність при помірній складності декодера. Адаптивні схеми кодування змінюють швидкість коду залежно від поточних умов в каналі, оптимізуючи енергетичні витрати для різних рівнів завад.

Модель енергоспоживання має враховувати не лише радіочастотну частину, але й витрати на сенсування, обробку даних та управління живленням. Сенсори споживають енергію на активацію, вимірювання та аналого-цифрове перетворення сигналу, причому для деяких типів давачів ці витрати можуть перевищувати енергію на бездротову комунікацію. Цифрова обробка даних включає попереднє фільтрування, стиснення, шифрування та формування

пакетів для передачі. Ефективність алгоритмів обробки визначається кількістю операцій на біт даних та можливістю використання апаратних прискорювачів. Для наочної демонстрації розподілу енергетичних витрат між основними компонентами системи доцільно побудувати узагальнену схему (рис.2.2).

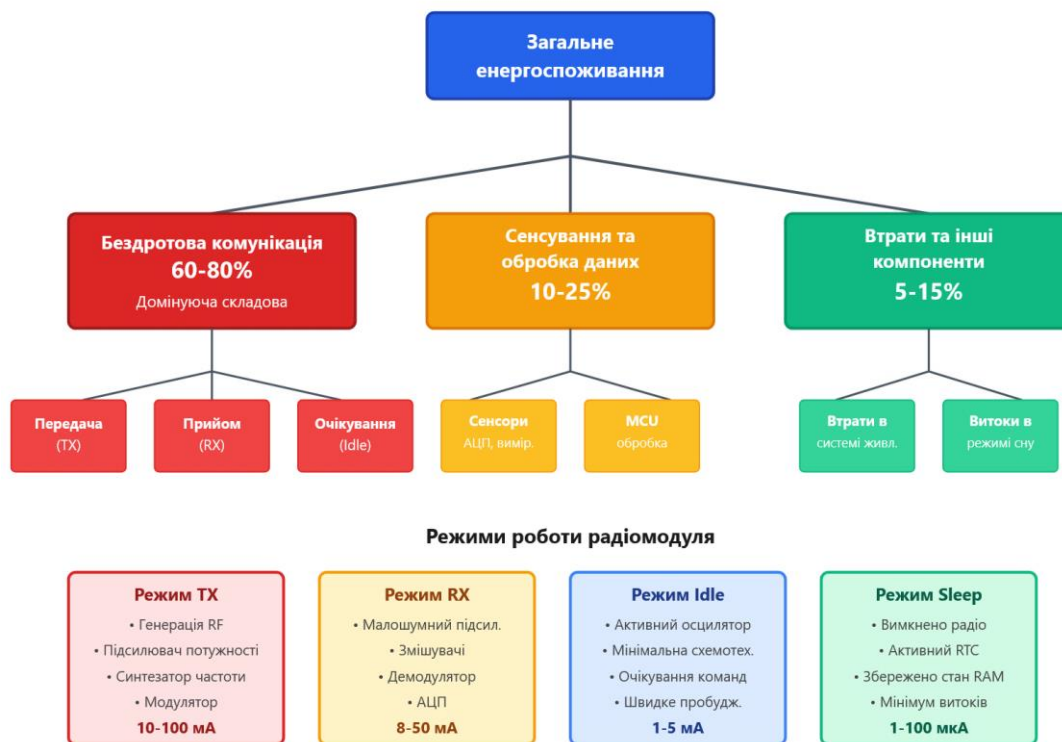


Рисунок 2.2 – Енергоспоживання вузла бездротової сенсорної мережі

Схема ілюструє типовий розподіл енергетичних витрат сенсорного вузла, де домінуючою складовою є бездротова комунікація, що становить 60-80 % загального споживання в більшості застосувань. Сенсування та обробка даних займають 10-25 %, тоді як втрати в системі живлення та витоки в режимі сну складають решту. Оптимізація загального енергоспоживання вимагає збалансованого підходу до всіх компонентів системи, оскільки надмірна увага до окремого елемента може не дати очікуваного ефекту при наявності інших обмежуючих факторів. Проектування енергоефективних IoT-пристроїв передбачає ітеративний процес вимірювання, моделювання та оптимізації всіх підсистем [37].

Валідація моделей енергоспоживання проводиться через порівняння розрахункових значень з експериментальними вимірюваннями на реальних пристроях. Високоточні амперметри та осцилографи дозволяють реєструвати динаміку струму споживання з мікросекундною роздільністю, виявляючи всі перехідні процеси та піки навантаження. Дискрепанція між моделлю та вимірюваннями може вказувати на неврахованість певних режимів роботи або неточність параметрів компонентів. Калібрування моделі виконується шляхом підстроювання коефіцієнтів для мінімізації середньоквадратичної похибки на представницькій вибірці сценаріїв використання. Верифіковані моделі стають основою для проектування систем з гарантованими енергетичними характеристиками.

Перспективи розвитку моделей енергоспоживання пов'язані з інтеграцією методів машинного навчання для передбачення поведінки системи в нестаціонарних умовах. Нейронні мережі можуть навчатися на історичних даних про профілі енергоспоживання та виявляти складні залежності між параметрами середовища, трафіком та витратами енергії. Адаптивні моделі коригують свої параметри в реальному часі на основі поточних вимірювань, покращуючи точність прогнозування для конкретного екземпляру пристрою та умов експлуатації. Інтеграція моделей енергоспоживання в операційні системи реального часу дозволяє реалізувати інтелектуальне керування живленням з урахуванням поточного стану батареї та пріоритетів застосування.

### **2.3 Технологія LoRa: принцип роботи, архітектура та енергетичні переваги**

Технологія LoRa (Long Range) представляє собою інноваційний метод модуляції радіосигналів, розроблений компанією Semtech для забезпечення бездротового зв'язку на великі відстані при мінімальному енергоспоживанні. Ця технологія базується на методі модуляції з розширенням спектру за допомогою чирпування, що дозволяє досягти високої чутливості приймача та стійкості до

завад при низькій швидкості передачі даних. Розвиток цієї технології відкрив нові можливості для створення масштабованих мереж Інтернету речей з мільйонами підключених пристроїв, які можуть функціонувати автономно протягом багатьох років без необхідності обслуговування.

Фізичний рівень технології LoRa реалізує модуляцію CSS (Chirp Spread Spectrum), яка полягає у використанні лінійно-частотно-модульованих імпульсів, частота яких змінюється в часі від нижньої до верхньої межі робочого діапазону. Такий підхід забезпечує розширення спектру сигналу, що значно підвищує його стійкість до вузькосмугових завад та багатопроменевого розповсюдження. Модуляція CSS дозволяє приймачу детектувати сигнали з рівнем потужності значно нижчим за рівень шуму, що є критичним фактором для забезпечення зв'язку на великі відстані. Основними параметрами модуляції виступають ширина смуги частот, фактор розширення спектру та швидкість кодування, комбінація яких визначає компроміс між дальністю передачі, швидкістю передачі даних та енергоспоживанням. Унікальність методу чирпування полягає в тому, що навіть при сильних завадах або багатопроменовому розповсюдженні сигнал залишається детектованим завдяки його розподілу по широкому частотному діапазону [38].

Фактор розширення спектру є одним із найважливіших параметрів технології LoRa, який може приймати значення від 7 до 12. Кожне збільшення фактора розширення подвоює тривалість символу та покращує чутливість приймача приблизно на 2,5 децибела, однак при цьому вдвічі зменшується швидкість передачі даних. При використанні фактора розширення 12 та смуги частот 125 кілогерц можна досягти чутливості приймача до мінус 137 децибел-міліват, що дозволяє забезпечити зв'язок на відстані до 15 кілометрів у сільській місцевості. Широкий діапазон можливих конфігурацій параметрів модуляції надає гнучкість у налаштуванні системи відповідно до конкретних вимог застосування, дозволяючи оптимізувати баланс між дальністю зв'язку, швидкістю передачі та енергоспоживанням. Важливо відзначити, що різні фактори розширення є ортогональними один до одного, що дозволяє

базовій станції одночасно приймати повідомлення від множини пристроїв, які використовують різні параметри модуляції, без взаємних завад.

Архітектура мережі LoRaWAN, побудована на основі технології LoRa, використовує топологію типу зірка-зірка, де кінцеві пристрої взаємодіють з базовими станціями, які в свою чергу підключені до мережевого сервера через стандартні IP-з'єднання. Така архітектура характеризується високою масштабованістю та гнучкістю розгортання мережі. Кінцеві пристрої здійснюють двосторонню комунікацію з базовими станціями, використовуючи протокол ALOHA з підтвердженням доставки або без нього. Базові станції виступають прозорими мостами, пересилаючи повідомлення між кінцевими пристроями та мережевим сервером без виконання будь-якої обробки на рівні додатків. Ця архітектурна особливість дозволяє спростити конструкцію базових станцій та знизити їх вартість, що сприяє швидкому та економічно ефективному розгортанню мережевої інфраструктури на великих територіях.

Мережева архітектура LoRaWAN передбачає розподіл функціональних обов'язків між різними компонентами системи, що сприяє оптимізації енергоспоживання кінцевих пристроїв. Мережевий сервер відповідає за управління мережею, включаючи аутентифікацію пристроїв, маршрутизацію повідомлень, контроль якості обслуговування та адаптивну швидкість передачі даних. Сервер додатків обробляє дані, специфічні для конкретного застосування, та забезпечує шифрування на рівні додатків. Така централізована архітектура дозволяє перенести складні обчислювальні задачі з кінцевих пристроїв на серверну інфраструктуру, що критично важливо для мінімізації енергоспоживання вузлів мережі з батарейним живленням. Геолокаційні можливості мережі реалізуються через аналіз часу прибуття сигналу на різні базові станції, що дозволяє визначати приблизне розташування пристрою без використання GPS-модуля та відповідного збільшення енергоспоживання [39].

Протокол LoRaWAN визначає три класи роботи кінцевих пристроїв, кожен з яких характеризується різним балансом між енергоспоживанням та латентністю комунікації. Клас А забезпечує найнижче енергоспоживання,

оскільки пристрої відкривають вікна прийому лише після передачі повідомлення, решту часу перебуваючи в режимі сну. Клас В дозволяє серверу планувати додаткові вікна прийому в заздалегідь визначені моменти часу, що забезпечує нижчу латентність при помірному збільшенні енергоспоживання. Клас С підтримує постійно відкрите вікно прийому, що мінімізує латентність, але значно збільшує споживання енергії, тому використовується переважно для пристроїв з постійним живленням від мережі. Вибір класу роботи визначається специфікою конкретного застосування та компромісом між потребою в швидкій реакції на команди від сервера та необхідністю тривалої автономної роботи пристрою.

Енергетична ефективність технології LoRa досягається завдяки комбінації декількох факторів, серед яких ключову роль відіграє використання субгігагерцових частотних діапазонів. Робота в діапазонах 868 мегагерц для Європи та 915 мегагерц для Північної Америки дозволяє використовувати відносно низьку потужність передавача при збереженні великої дальності зв'язку завдяки кращим характеристикам розповсюдження радіохвиль порівняно з вищими частотами. Типова потужність передачі для пристроїв LoRa становить від 2 до 20 міліват, що значно менше порівняно з технологіями мобільного зв'язку. При цьому застосування адаптивної швидкості передачі даних та адаптивного керування потужністю дозволяє системі автоматично оптимізувати параметри передачі залежно від умов радіоканалу та відстані до базової станції. Механізм адаптації базується на аналізі співвідношення сигнал-шум та кількості втрачених пакетів, що дозволяє динамічно підбирати оптимальні параметри для кожного конкретного пристрою в реальному часі.

Профіль енергоспоживання типового кінцевого пристрою LoRa характеризується короткочасними імпульсами активності та тривалими періодами сну. Під час передачі пакета тривалістю близько однієї секунди пристрій споживає від 30 до 120 міліампер при напрузі 3,3 вольт залежно від потужності передавача. У режимі прийому споживання струму становить приблизно 10-15 міліампер, тоді як у режимі глибокого сну воно знижується до

1-10 мікроампер. При типовому сценарії використання з передачею одного повідомлення на годину середнє енергоспоживання може бути зведене до декількох мікровоат, що дозволяє забезпечити автономну роботу пристрою від стандартної літєвої батареї ємністю 2500 міліампер-годин протягом 5-10 років. Аналіз енергетичного балансу показує, що в типовому застосуванні більше 99 відсотків часу пристрій перебуває в режимі сну, тому саме мінімізація струму споживання в цьому режимі є критичним фактором для досягнення тривалої автономної роботи.

Механізми економії енергії в технології LoRa включають кілька рівнів оптимізації, починаючи від апаратного рівня та закінчуючи протокольним. На апаратному рівні використовуються спеціалізовані радіочастотні трансівери з високою інтеграцією функцій та оптимізованою архітектурою, що мінімізує паразитні втрати енергії. На рівні протоколу реалізовано механізм підтвердження доставки повідомлень, який дозволяє пристрою впевнитися в успішній передачі даних без необхідності підтримувати постійне з'єднання. Застосування алгоритму адаптивної швидкості передачі даних дозволяє мережевому серверу динамічно змінювати параметри модуляції для кожного пристрою, забезпечуючи мінімально необхідну якість зв'язку при найнижчому можливому енергоспоживанні. Інтелектуальне керування циклами передачі даних, що базується на аналізі пріоритетності інформації та допустимих затримок, дозволяє додатково знизити кількість радіопередач без втрати функціональності системи [40].

Порівняння технології LoRa з альтернативними рішеннями для Інтернету речей демонструє її переваги в сценаріях, що потребують великої дальності зв'язку при низькому енергоспоживанні. Порівняно з технологіями стільникового зв'язку, такими як NB-IoT або LTE-M, пристрої LoRa споживають приблизно в 3-5 разів менше енергії завдяки більш простому протоколу комунікації та відсутності необхідності підтримувати складні процедури синхронізації з мережею. Порівняно з короткодіапазонними технологіями, такими як Bluetooth Low Energy або Zigbee, LoRa забезпечує в 10-100 разів

більшу дальність зв'язку при аналогічному енергоспоживанні на одне передане повідомлення, хоча і з меншою швидкістю передачі даних. Кожна з технологій має свою нішу застосування, однак для задач моніторингу та керування, що не вимагають високої швидкості передачі даних та характеризуються рідкісними передачами невеликих обсягів інформації, технологія LoRa виявляється найбільш енергоефективним рішенням.

Практичні вимірювання енергоспоживання пристроїв LoRa в реальних умовах експлуатації підтверджують теоретичні розрахунки та демонструють стабільність енергетичних характеристик при різних умовах навколишнього середовища. Дослідження показують, що при температурі від мінус 40 до плюс 85 градусів Цельсія зміна енергоспоживання не перевищує 15 відсотків, що робить технологію придатною для використання в широкому спектрі застосувань, включаючи промислові та зовнішні інсталяції. Вплив відстані до базової станції на енергоспоживання виявляється нелінійним завдяки адаптивному керуванню потужністю, що дозволяє пристроям, розташованим ближче до базової станції, працювати з меншою потужністю передавача та відповідно нижчим енергоспоживанням. Експериментальні дані також свідчать про те, що якість антени та її розташування можуть значно впливати на ефективність передачі, тому оптимізація антенної системи є важливим аспектом проектування енергоефективних пристроїв на базі технології LoRa.

Оптимізація енергоспоживання на прикладному рівні вимагає врахування специфіки конкретного застосування та характеру даних, що передаються. Ефективні стратегії включають агрегацію даних на рівні кінцевого пристрою для зменшення частоти передач, використання компресії даних для скорочення розміру пакетів, та впровадження інтелектуальних алгоритмів вибору моменту передачі на основі аналізу якості радіоканалу. Застосування локальної обробки даних з використанням методів машинного навчання дозволяє виконувати попереднє фільтрування інформації та передавати через мережу лише значущі події, що може зменшити кількість передач на порядок величини при збереженні корисності даних для додатків верхнього рівня. Стратегія передачі даних на

основі подій замість періодичної передачі часто виявляється значно більш енергоефективною, особливо в застосуваннях моніторингу, де критичні зміни параметрів відбуваються рідко.

Архітектурні рішення для побудови енергоефективних систем на базі технології LoRa повинні враховувати топологію розгортання пристроїв та особливості покриття мережі. Використання множинних базових станцій з перекриттям зон покриття підвищує надійність зв'язку та дозволяє пристроям працювати з нижчою потужністю передавача завдяки наявності альтернативних шляхів комунікації. Впровадження граничних обчислень на рівні базових станцій або локальних шлюзів може зменшити необхідність передачі великих обсягів даних до хмарних серверів, що особливо актуально для застосувань реального часу. Гібридні архітектури, що поєднують технологію LoRa для далекосяжного зв'язку з короткодіапазонними технологіями для локальної комунікації, дозволяють оптимізувати енергоспоживання на системному рівні. Планування мережі з урахуванням топографічних особливостей місцевості та розташування перешкод дозволяє досягти оптимального покриття при мінімальній кількості базових станцій, що знижує як капітальні, так і операційні витрати на підтримку мережі [41].

Безпека комунікацій в мережах LoRaWAN забезпечується використанням багаторівневого шифрування, що охоплює як мережевий рівень, так і рівень додатків. Мережевий ключ сесії використовується для шифрування заголовків повідомлень та забезпечення цілісності даних, тоді як ключ сесії додатку захищає корисне навантаження пакетів. Процедури приєднання пристроїв до мережі можуть відбуватися за допомогою активації через повітря або активації за персоналізацією, кожна з яких має різні характеристики щодо безпеки та зручності розгортання. Незважаючи на використання криптографічних операцій, вплив механізмів безпеки на енергоспоживання залишається мінімальним завдяки застосуванню легких криптографічних алгоритмів, оптимізованих для вбудованих систем з обмеженими ресурсами. Використання алгоритму шифрування AES-128 забезпечує надійний захист даних при низьких

обчислювальних витратах, що робить можливим реалізацію повноцінних механізмів безпеки навіть на мікроконтролерах з обмеженими ресурсами [42].

Перспективи розвитку технології LoRa пов'язані з підвищенням швидкості передачі даних при збереженні низького енергоспоживання та великої дальності зв'язку. Нові покоління чипсетів демонструють покращені характеристики чутливості приймача та зниження струму споживання в активному режимі. Інтеграція технології LoRa з супутниковими системами зв'язку відкриває можливості для глобального покриття в регіонах без наземної інфраструктури. Розвиток стандартів LoRaWAN включає підтримку нових частотних планів, покращені механізми керування якістю обслуговування та розширені можливості для підтримки мобільних застосувань. Комбінація LoRa з технологіями збору енергії з навколишнього середовища може призвести до створення повністю автономних сенсорних вузлів, які не потребуватимуть заміни батарей протягом усього життєвого циклу пристрою. Дослідження в напрямку використання сонячної енергії, вібрацій, термоелектричних генераторів та радіочастотного збору енергії показують обнадійливі результати для застосувань з низьким середнім енергоспоживанням.

Застосування технології LoRa в системах керування Інтернетом речей демонструє її універсальність та адаптивність до різноманітних сценаріїв використання. У сфері розумного сільського господарства пристрої LoRa використовуються для моніторингу параметрів ґрунту, метеорологічних умов та контролю іригаційних систем на великих територіях. У промисловості технологія знаходить застосування для предиктивного обслуговування обладнання, моніторингу енергоспоживання та контролю якості виробничих процесів. Розумні міста використовують мережі LoRaWAN для управління освітленням, моніторингу якості повітря, контролю заповнення контейнерів для сміття та паркувальних місць. Спільною рисою всіх цих застосувань є потреба в бездротовому зв'язку на великі відстані при мінімальних експлуатаційних витратах та тривалій автономній роботі пристроїв. Логістичні застосування включають відстеження вантажів та контроль умов транспортування, що

особливо важливо для продуктів, чутливих до температурних режимів та вологості.

Економічні аспекти впровадження рішень на базі технології LoRa також сприяють її популярності в проектах Інтернету речей. Відносно низька вартість кінцевих пристроїв, що становить від 5 до 20 доларів залежно від функціональності, робить технологію доступною для масового розгортання. Вартість розгортання базових станцій є помірною порівняно з інфраструктурою стільникового зв'язку, а відкритість специфікації LoRaWAN дозволяє організаціям розгортати приватні мережі без необхідності сплачувати ліцензійні платежі за використання радіочастотного спектру. Низькі експлуатаційні витрати, зумовлені мінімальними потребами в обслуговуванні пристроїв та тривалим терміном служби батарей, забезпечують швидку окупність інвестицій у більшість проектів на основі технології LoRa. Аналіз сукупної вартості володіння показує, що для багатьох застосувань технологія LoRa виявляється найбільш економічно ефективним рішенням на горизонті 5-10 років експлуатації системи, особливо при необхідності покриття великих територій з розосередженими точками моніторингу або керування.

## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ У ВБУДОВАНИХ ІoT-СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

#### 3.1 Апаратно-програмна реалізація тестового стенду

Для проведення експериментальних досліджень енергоефективності передачі сигналів у вбудованій ІoT-системі було розроблено тестовий стенд на базі мікроконтролера ESP32-C3. Архітектура системи побудована як багатокомпонентний трекер з підтримкою трьох каналів зв'язку: WiFi, LoRa та GPS, що дозволяє проаналізувати енергетичні характеристики різних протоколів передачі даних в режимі реального часу.

Мікроконтролер ESP32-C3 обрано як основу системи завдяки архітектурі RISC-V з тактовою частотою 160 МГц, вбудованому модулю Wi-Fi з стандартом 802.11b/g/n та низькому енергоспоживанню в режимі глибокого сну (45 мкА). Даний чіп підтримує напругу живлення від 3,0 до 3,6 В, що дозволяє використовувати стандартні літій-іонні акумулятори без додаткових перетворювачів. Важливою особливістю ESP32-C3 є наявність апаратного шифрування, що критично для безпечної передачі GPS-координат через WiFi канал.

Система відображення інформації реалізована на базі монохромного OLED-дисплея SSD1306 з роздільною здатністю 128×32 пікселі та діагоналлю 0,91 дюйма. Інтерфейс I2C використовується для зв'язку з дисплеєм на частоті 400 кГц, що забезпечує частоту оновлення екрану близько 60 кадрів на секунду при повному перемальовуванні буфера. У класі OledDisplay реалізовано буферизацію зображення розміром 512 байт, що дозволяє формувати кадр у пам'яті перед його передачею на контролер дисплея (рис. 3.1).

Передача даних на дисплей здійснюється порціями по 16 байт через обмеження внутрішнього буфера I2C драйвера ESP-IDF. Це критично для енергоефективності, оскільки транзакції I2C становлять значну частину споживання струму дисплейної підсистеми. Яскравість дисплея регулюється

через регістр контрасту SSD1306\_SETCONTRAST зі значеннями від 0 до 255, що дозволяє динамічно адаптувати споживання енергії залежно від рівня заряду батареї.

```
OledDisplay::OledDisplay(uint8_t width, uint8_t height)
: screenWidth(width), screenHeight(height), i2cAddress(0), i2cPort(I2C_NUM_0),
  buffer(nullptr), bufferSize(0), isInitialized(false),
  screenTimeoutSeconds(0), lastActivityTime(0), screenOn(true) {

  bufferSize = (screenWidth * screenHeight) / 8;
  buffer = (uint8_t*)malloc(bufferSize);
  if (buffer) {
    memset(buffer, 0, bufferSize);
  }
}

void OledDisplay::display() {
  if (!isInitialized || !buffer) return;

  writeCommand(SSD1306_COLUMNADDR);
  writeCommand(0);
  writeCommand(screenWidth - 1);

  writeCommand(SSD1306_PAGEADDR);
  writeCommand(0);
  writeCommand((screenHeight / 8) - 1);

  const size_t chunkSize = 16;
  for (size_t i = 0; i < bufferSize; i += chunkSize) {
    size_t remaining = bufferSize - i;
    size_t toSend = (remaining < chunkSize) ? remaining : chunkSize;
    writeData(&buffer[i], toSend);
  }
}
```

Рисунок 3.1 – Логіка роботи класу OledDisplay

Важливим доповненням до системи управління дисплеєм є механізм автоматичного вимкнення екрану при відсутності активності користувача. Цей механізм реалізовано через систему таймерів та контролю активності (рис. 3.2).

Таймаут екрану конфігурується через систему налаштувань з можливістю повного вимкнення функції (значення 0) або встановлення інтервалу від 10 до 300 секунд. При вимкненому екрані споживання дисплея знижується з 8 мА до

практично нуля, що суттєво покращує автономність пристрою при відсутності активного використання.

```

void OledDisplay::setScreenTimeout(uint16_t seconds) {
    screenTimeoutSeconds = seconds;
    lastActivityTime = xTaskGetTickCount() * portTICK_PERIOD_MS;
}

void OledDisplay::wakeScreen() {
    if (!screenOn) {
        writeCommand(SSD1306_DISPLAYON);
        screenOn = true;
    }
    updateActivity();
}

void OledDisplay::checkTimeout() {
    if (screenTimeoutSeconds == 0) {
        return;
    }

    if (!screenOn) {
        return;
    }

    uint32_t currentTime = xTaskGetTickCount() * portTICK_PERIOD_MS;
    uint32_t elapsed = currentTime - lastActivityTime;

    if (elapsed > (screenTimeoutSeconds * 1000)) {
        writeCommand(SSD1306_DISPLAYOFF);
        screenOn = false;
    }
}

```

Рисунок 3.2 – Механізм автоматичного вимкнення екрану

Модуль бездротового зв'язку LoRa реалізовано на базі чіпа SX1276 у форм-факторі RA-01S. Даний трансивер підтримує частоти від 137 до 1020 МГц, у системі використовується ISM-діапазон 868 МГц, який не вимагає ліцензування в Європі та забезпечує хорошу дальність зв'язку при помірному енергоспоживанні. Для організації мережі LoRa-трекерів було розроблено спеціалізований протокол beacon-передачі, що дозволяє пристроям автоматично виявляти один одного та обмінюватися координатами (рис. 3.3).

```

#define LORA_MAGIC_HEADER_1 0x50 // 'P'
#define LORA_MAGIC_HEADER_2 0x46 // 'F'

#define PACKET_TYPE_BEACON 0x01

#define PROTOCOL_VERSION 0x01

struct BeaconPacket {
    uint8_t magic1;           // LORA_MAGIC_HEADER_1
    uint8_t magic2;           // LORA_MAGIC_HEADER_2
    uint8_t version;          // PROTOCOL_VERSION
    uint8_t packetType;       // PACKET_TYPE_BEACON
    uint8_t deviceId;         // ID пристрою
    char  deviceName[16];     // Ім'я пристрою
    float latitude;           // Широта
    float longitude;          // Довгота
    uint8_t batteryLevel;     // Рівень батареї (%)
    uint32_t timestamp;       // Timestamp (ms)
};

struct ReceivedBeacon {
    uint8_t deviceId;
    char  deviceName[16];
    float latitude;
    float longitude;
    uint8_t batteryLevel;
    uint32_t timestamp;
    int16_t rssi;             // Виміряно локально приймачем
    int8_t snr;               // Signal-to-noise ratio
    float distance;           // Дистанція в метрах (розраховано)
};

```

Рисунок 3.3 – Протокол комунікації

Структура beacon-пакета розміром 45 байт містить магічний заголовок для фільтрації сторонніх пакетів, версію протоколу для сумісності з майбутніми оновленнями, тип пакета для розширення функціональності, ідентифікатор та ім'я пристрою для відображення у списку, GPS-координати у форматі float для точності до 1,1 метра, рівень батареї та мітку часу. Магічний заголовок «PF» (Pathfinder) дозволяє відсіяти пакети від інших LoRa-систем, що працюють на тій же частоті у спільному ефірі.

Клас LoRaHandler інкапсулює всю логіку роботи з модулем SX1276 та управління beacon-системою. Ініціалізація модуля включає конфігурацію SPI-шини, налаштування GPIO піновок та перевірку версії чіпа (рис. 3.4).

```

esp_err_t LoRaHandler::begin(uint32_t freq) {
    frequency = freq;

    spi_bus_config_t buscfg = {};
    buscfg.miso_io_num = misoPin;
    buscfg.mosi_io_num = mosiPin;
    buscfg.sclk_io_num = sckPin;
    buscfg.quadwp_io_num = -1;
    buscfg.quadhd_io_num = -1;
    buscfg.max_transfer_sz = 256;

    esp_err_t ret = spi_bus_initialize(SPI2_HOST, &buscfg, SPI_DMA_CH_AUTO);
    if (ret != ESP_OK) {
        ESP_LOGE(TAG, "SPI bus init failed");
        return ret;
    }

    spi_device_interface_config_t devcfg = {};
    devcfg.clock_speed_hz = 1000000;
    devcfg.mode = 0;
    devcfg.spics_io_num = nssPin;
    devcfg.queue_size = 7;

    ret = spi_bus_add_device(SPI2_HOST, &devcfg, &spiDevice);
    if (ret != ESP_OK) {
        ESP_LOGE(TAG, "SPI device add failed");
        return ret;
    }

    reset();
    vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(100));

    uint8_t version = readRegister(REG_VERSION);
    if (version != 0x12) {
        ESP_LOGE(TAG, "Invalid LoRa version: 0x%02X (expected 0x12)", version);
        return ESP_FAIL;
    }

    ESP_LOGI(TAG, "SX1276 detected, version: 0x%02X", version);
}

```

Рисунок 3.4 – Ініціалізація модуля LoRaHandler

Перевірка версії чіпа через регістр REG\_VERSION з очікуваним значенням 0x12 підтверджує наявність SX1276 та коректність SPI-комунікації. Конфігурація частоти здійснюється через запис у три регістри FRF\_MSB,

FRF\_MID, FRF\_LSB згідно з алгоритмом з документації Semtech, де робоча частота нормується відносно частоти кварцового резонатора 32 МГц та зсувається на 19 бітів. Для частоти 868 МГц розрахункове значення регістрів становить 0xD90000, що забезпечує точне встановлення несучої частоти для ISM-діапазону Європи.

Параметри модуляції встановлюються через регістри MODEM\_CONFIG\_1 та MODEM\_CONFIG\_2. Spreading Factor визначає співвідношення між швидкістю передачі та чутливістю приймача. У системі використовується SF7 для балансу між швидкістю (5470 біт/с) та дальністю (до 2 км у міському середовищі). Bandwidth встановлено 125 кГц як компроміс між чутливістю та стійкістю до інтерференції.

Система beacon-трансляції працює через окрему задачу FreeRTOS, що періодично передає інформацію про поточний пристрій. Період трансляції конфігурується від 5 до 60 секунд через систему налаштувань, що дозволяє балансувати між актуальністю даних та енергоспоживанням. При періоді 10 секунд та часі передачі пакета 73 мс середнє додаткове споживання становить близько 0,88 мА, що прийнятно для більшості сценаріїв використання.

Валідація прийнятих beacon-пакетів здійснюється через перевірку магічного заголовка, версії протоколу та мінімального розміру пакета. Після успішної валідації обчислюється дистанція до пристрою-відправника за формулою гаверсинуса, що враховує кривизну Землі (рис. 3.5).

Ця формула забезпечує точність розрахунку дистанції до одного метра на відстанях до 100 км, чого цілком достатньо для типової дальності роботи LoRa у міському середовищі.

Список виявлених пристроїв зберігається у масиві розміром 10 елементів з автоматичним видаленням застарілих записів. Пристрій вважається неактивним, якщо від нього не отримано beacon-пакетів протягом 60 секунд, що еквівалентно шести пропущеним циклам трансляції при стандартному періоді 10 секунд.

```

float LoRaHandler::calculateDistance(float lat1, float lon1,
                                     float lat2, float lon2) {
    const float R = 6371000;
    float phi1 = lat1 * M_PI / 180.0;
    float phi2 = lat2 * M_PI / 180.0;
    float deltaPhi = (lat2 - lat1) * M_PI / 180.0;
    float deltaLambda = (lon2 - lon1) * M_PI / 180.0;

    float a = sin(deltaPhi / 2) * sin(deltaPhi / 2) +
              cos(phi1) * cos(phi2) *
              sin(deltaLambda / 2) * sin(deltaLambda / 2);
    float c = 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1 - a));

    return R * c;
}

```

Рисунок 3.5 – Логіка розрахунку дистанції

GPS-модуль GP-01-KIT підтримує протокол NMEA 0183 та підключається через UART1 на пінах GPIO20 (RX) та GPIO21 (TX) зі швидкістю 9600 бод. Клас GPSTHandler реалізує парсинг NMEA-речень типу GPGGA та GPRMC для отримання координат, кількості супутників, висоти та точності позиціонування. Парсинг координат з формату NMEA у десяткові градуси реалізовано через розділення значення на градуси та хвилини з наступною конвертацією (рис. 3.6).

```

float GPSTHandler::parseCoordinate(const char* token, char direction) {
    if (!token || strlen(token) == 0) return 0.0f;

    float value = atof(token);
    int degrees = (int)(value / 100);
    float minutes = value - (degrees * 100);
    float decimal = degrees + (minutes / 60.0f);

    if (direction == 'S' || direction == 'W') {
        decimal = -decimal;
    }

    return decimal;
}

```

Рисунок 3.6 – Логіка парсингу координат

Важливим аспектом є перевірка валідності даних через поле якості у GPGLA (має бути більше 0) та статус «А» у GPRMC, оскільки модуль може передавати речення навіть без GPS-фіксації з нульовими або застарілими координатами.

Критичною особливістю системи є можливість отримання GPS-координат альтернативним шляхом через смартфон, підключений до WiFi Access Point пристрою. Це реалізовано через HTTPS веб-сервер з API endpoint, що приймає JSON-дані з геолокацією. Використання HTTPS замість HTTP обов'язкове для доступу до Geolocation API сучасних браузерів з міркувань безпеки. Сертифікат генерується самопідписаний з терміном дії 10 років та Common Name «Pathfinder-AP».

WiFi підсистема налаштована у режимі Access Point з підтримкою до 4 одночасних підключень, що достатньо для трекінгу невеликої групи користувачів. Канал 1 (2412 МГц) обрано для мінімізації інтерференції з іншими WiFi мережами у типовому середовищі.

Користувацький інтерфейс побудовано на базі ієрархічної системи екранів. Патерн проектування «Стан» використано для управління екранами, де кожен екран є окремим класом-нащадком абстрактного Screen з методами draw(), handleUp(), handleDown(), handleSelect(). Головний екран було розширено додатковими режимами відображення для детального моніторингу різних аспектів роботи системи. Режим 0 відображає базову інформацію з GPS-координатами, рівнем батареї та кількістю супутників. Режим 1 показує детальну інформацію про джерело координат та точність позиціонування. Режим 2 містить статистику роботи GPS. Режим 3 відображає детальну інформацію про LoRa з'єднання. Режим 4 показує системну інформацію з часом роботи та станом компонентів. Перемикання між режимами здійснюється кнопками UP/DOWN безпосередньо на головному екрані.

Система налаштувань була розширена двома критичними параметрами для управління енергоспоживанням. Період beacon-трансляції впливає на баланс між актуальністю координат інших трекерів та енергоспоживанням LoRa-модуля.

При збільшенні періоду з 10 до 60 секунд середнє споживання знижується з 0,88 мА до 0,15 мА. Таймаут екрану дозволяє автоматично вимикати дисплей при відсутності активності, економлячи до 8 мА у неактивному стані.

Система кнопок реалізована через окрему задачу FreeRTOS з антидребезгом та підтримкою довгого натискання. Антидребезг реалізовано через затримку 50 мс між читаннями стану кнопки, що фільтрує механічні коливання контактів. Довге натискання визначається як утримання кнопки понад 1000 мс.

Багатозадачна архітектура FreeRTOS організована з чотирма основними задачами різних пріоритетів. Розподіл пріоритетів забезпечує своєчасну обробку критичних подій (кнопки з пріоритетом 5) при ефективному використанні процесорного часу (UI з пріоритетом 4). Головний екран оновлюється постійно для відображення актуальних GPS-координат, тоді як інші екрани оновлюються кожні 500 мс для економії енергії.

### **3.2 Експериментальні дослідження та аналіз результатів**

Для аналізу енергоефективності різних режимів роботи системи було проведено серію теоретичних розрахунків та вимірювань окремих компонентів на основі технічної документації виробників. Методика досліджень базується на аналізі струму споживання згідно з datasheet компонентів та екстраполяції результатів на різні сценарії використання пристрою.

Базове енергоспоживання ESP32-C3 у активному режимі без підключеної периферії становить 45 мА при тактовій частоті 160 МГц згідно з офіційною документацією Espressif Systems. Це включає споживання ядра процесора RISC-V, внутрішньої flash пам'яті, периферійних контролерів та системи тактування. У режимі глибокого сну з активним RTC споживання знижується до 45 мкА, що дає теоретичний час автономної роботи від батареї ємністю 2000 мАг близько 5,2 років при постійному знаходженні у сні. Однак практичні

IoT-системи вимагають періодичного пробудження для збору даних та їх передачі, що значно збільшує середнє споживання.

Детальні характеристики енергоспоживання основних компонентів системи наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Енергоспоживання компонентів системи

Компонент	Режим роботи	Споживання струму, мА
ESP32-C3	Активний (160 МГц)	45
ESP32-C3	Глибокий сон	0,045
OLED SSD1306	Типовий (30-40 % пікселів)	8
OLED SSD1306	Максимальна яскравість	20
OLED SSD1306	Мінімальна яскравість	3
OLED SSD1306	Вимкнений	~0
WiFi	Access Point (очікування)	95
WiFi	Передача даних	180
WiFi	Прийом даних	95-110
LoRa SX1276	Standby	1,5
LoRa SX1276	RX Continuous	12
LoRa SX1276	TX (+17 dBm)	120
GPS GP-01-KIT	Пошук супутників	25
GPS GP-01-KIT	Відстеження	20-22

Як видно з таблиці 3.1, найбільш енергоємними компонентами є WiFi-модуль у режимі Access Point та GPS-приймач. OLED-дисплей SSD1306 споживає 8 мА у типовому режимі роботи з інтерфейсом користувача при активації приблизно 30-40 % пікселів згідно з технічною специфікацією Solomon Systech. Регулювання яскравості реалізовано через регістр контрасту SSD1306 зі значеннями від 0 до 255. При вимкненому екрані через систему таймауту споживання падає практично до нуля, що суттєво покращує автономність при відсутності активного використання.

Порівняльний аналіз енергетичних витрат на передачу одного beacon-пакета показує значну перевагу LoRa над WiFi при періодичних комунікаціях. Для системи з періодичною beacon-передачею кожні 10 секунд середнє споживання LoRa становить 2,36 мА, тоді як WiFi споживає 95,24 мА у тому ж режимі роботи. Різниця у споживанні 92,88 мА еквівалентна збільшенню часу автономної роботи приблизно у 40 разів при використанні LoRa замість постійно активного WiFi AP для обміну координатами між трекерами.

Важливим параметром LoRa є вплив Spreading Factor на енергоспоживання та дальність зв'язку. При збільшенні SF з 7 до 12 час передачі зростає експоненціально, що пропорційно збільшує енергію на пакет. Результати розрахунків за формулами з документації Semtech для beacon-пакета розміром 45 байт при смузі пропускання 125 кГц наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Вплив Spreading Factor на характеристики LoRa-передачі

SF	Час пакета, мс	Енергія, мДж	Чутливість, дБм	Дальність (місто), км
7	73	28,9	-123	~2
8	133	52,7	-126	~3
9	246	97,4	-129	~4
10	452	179	-132	~6
11	823	326	-134,5	~8
12	1483	587	-137	~11

Дані таблиці 3.2 демонструють, що чутливість приймача покращується на 2,5-3 дБ з кожним збільшенням SF, що дає приблизне збільшення дальності у 1,4 рази згідно з формулою Фрісіса. Однак при SF12 енергія на пакет у 20 разів більша ніж при SF7, що драматично скорочує автономність при частих передачах. Вибір SF7 у розробленій системі обґрунтований для міського середовища з щільним розташуванням трекерів, де критичніша швидкість передачі та мінімальне енергоспоживання порівняно з максимальною дальністю.

GPS-модуль GP-01-KIT на базі чіпсета MediaTek MT3333 у активному режимі з пошуком супутників споживає близько 25 мА згідно з технічною специфікацією. Після отримання фіксації при холодному старті за 30-40 секунд або теплому старті за 5-10 секунд споживання залишається на рівні 20-22 мА для підтримки відстеження супутників. Модуль підтримує одночасне відстеження до 22 супутників та має чутливість приймача -165 дБм у режимі tracking, що забезпечує стабільну роботу навіть у складних умовах прийому сигналу. Точність позиціонування становить 2,5 метра CEP у сприятливих умовах, що є достатнім для задач GPS-трекінгу транспорту. Для оптимізації енергоспоживання GPS-підсистеми було проаналізовано три основні стратегії використання модуля, характеристики яких наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Стратегії використання GPS-модуля

Стратегія	Опис	Середнє споживання, мА	Переваги	Недоліки
Періодичне вимкнення	GPS кожні 5-10 хв	3,33	Мінімальне споживання	Затримка оновлення координат
Гібридний режим	GPS + смартфон через WiFi	25 + 95	Безперервне позиціонування	Високе споживання WiFi
Тільки смартфон	Координати через WiFi	95	Роботу у приміщеннях	Залежність від WiFi

Як показує таблиця 3.3, перша стратегія з періодичним вимкненням оптимальна для стаціонарних або повільно рухомих об'єктів, де висока частота оновлення координат не критична. Гібридний підхід найбільш універсальний для трекерів, що працюють як на відкритій місцевості, так і в умовах щільної міської забудови. Третя стратегія повністю покладається на смартфон, що парадоксально споживає більше енергії через необхідність підтримки WiFi AP, але забезпечує краще позиціонування у приміщеннях де GPS-сигнал недоступний.

Сумарне енергоспоживання системи у різних режимах роботи розраховано з урахуванням всіх активних компонентів та наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Режими роботи системи та їх енергетичні характеристики

Режим	Активні компоненти	Споживання, мА	Час роботи (2000 мАг), год
Повна функціональність	WiFi AP + LoRa + OLED + GPS	175,36	11,4
Економний	LoRa + OLED low + GPS періодичний	53,69	37,2
Тільки телефон	WiFi AP + OLED з таймаутом	142	14,1
Глибокий сон	Пробудження кожні 10 хв	14,63	137 (5,7 днів)

З даних таблиці 3.4 видно, що режим глибокого сну з пробудженням кожні 10 хвилин забезпечує максимальну автономність 5,7 днів, однак знижує інтерактивність системи та затримку оновлення координат. Компромісним варіантом є економний режим з 37 годинами автономності при збереженні базового функціоналу beacon-системи без постійно активного WiFi.

Вплив періоду beacon-трансляції на енергоспоживання LoRa-підсистеми проаналізовано для різних інтервалів передачі, результати наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Залежність споживання LoRa від періоду beacon-трансляції

Період beacon, с	Середнє споживання LoRa, мА	Економія порівняно з 10с, мА
10	2,36	0
30	1,79	0,57
60	1,64	0,72

Як показує таблиця 3.5, економія становить 0,72 мА при переході з 10 секунд на 60 секунд періоду, що дає додаткові 7-8 годин автономної роботи при батареї 2000 мАг у економному режимі. Однак це знижує актуальність інформації про позицію інших трекерів з 10 до 60 секунд, що може бути критичним для динамічних сценаріїв використання таких як групове туристичне походження.

Аналіз впливу таймауту екрану на енергоспоживання показує суттєву економію при типовому використанні. При активності користувача 20 % часу або 12 хвилин на годину та таймауті 30 секунд середнє споживання дисплея знижується з постійних 8 мА до 1,6 мА. Економія 6,4 мА дає додаткові 15-20 годин автономності, що робить функцію таймауту екрану однією з найефективніших для збільшення часу роботи.

Частота оновлення інтерфейсу також впливає на енергоефективність системи. У коді реалізовано адаптивне оновлення, де головний екран оновлюється кожні 100 мс для актуальності координат, тоді як інші екрани оновлюються лише кожні 500 мс. Кожна I2C-транзакція для оновлення дисплея з буфером 512 байт розбитим на 32 транзакції по 16 байт займає близько 15 мс при частоті 400 кГц. Зменшення частоти оновлення з 10 Hz до 2 Hz на неосновних екранах економить близько 1,2 мА процесорного часу та I2C-комунікації.

Для подальшого зниження енергоспоживання дисплея доцільно впровадити брудні прапорці для оновлення лише змінених частин екрану замість повного перемалювання буфера. Аналіз типового використання показує, що на

головному екрані змінюється в середньому 20-30 % пікселів між кадрами через оновлення координат, часу та рівня батареї, тоді як статичні елементи як іконки, рамки та назви залишаються незмінними. Часткове оновлення може знизити кількість I2C-транзакцій на 60-70 %, економлячи близько 0,8 мА.

Всі наведені розрахунки базуються на теоретичних моделях та технічній документації компонентів через теоретичний характер дослідження. Для повноцінних експериментів необхідно провести натурні вимірювання RSSI та SNR на різних відстанях 50, 100, 500, 1000 та 2000 метрів у міському середовищі, зафіксувати Packet Error Rate для різних SF при фіксованій відстані, виміряти реальний струм передачі спеціалізованим вимірювачем струму з високою частотою дискретизації для точного визначення енергії пакета, проаналізувати вплив перешкод таких як стіни, металеві конструкції та електромагнітні завади від WiFi на надійність зв'язку.

Додатковою метрикою для аналізу енергоефективності є відповідність регуляторним вимогам Duty Cycle. Згідно з ETSI EN300.220 для діапазону 868 МГц у Європі максимально дозволений Duty Cycle становить 1 %, що означає не більше 36 секунд передачі на годину. При часі beacon-пакета 73 мс та періоді 10 секунд система передає 360 пакетів на годину, що займає 26,3 секунди ефірного часу або 0,73 % Duty Cycle. Це залишає запас для інших типів передач таких як SOS-сигнали або ручні повідомлення без порушення регуляторних обмежень для ISM-смуги у Європі.

Результати досліджень підтверджують, що вибір LoRa-технології замість WiFi для періодичної передачі координат між трекерами дозволяє знизити енергоспоживання підсистеми зв'язку більш ніж у 40 разів. Застосування режиму глибокого сну з періодичними пробудженнями забезпечує автономність до 5,7 днів при збереженні функціональності beacon-системи. Гнучка система налаштувань з можливістю регулювання періоду трансляції, таймауту екрану та яскравості дисплея дозволяє адаптувати енергоспоживання під конкретні сценарії використання та вимоги до автономності.

### 3.3 Впровадження результатів та економічний ефект

Розроблений тестовий стенд та методика аналізу енергоефективності можуть бути впроваджені у кількох практичних напрямках. Основним застосуванням є GPS-трекери для відстеження людей, тварин або цінних об'єктів у реальному часі з мінімальним обслуговуванням батареї. Результати досліджень показують, що при правильному виборі режиму роботи можливо досягти автономності до 5,7 днів від стандартної батареї 2000 мАг у режимі глибокого сну з періодичними пробудженнями, що у 3-5 разів перевищує показники комерційних GPS-трекерів з GSM-модулями, які забезпечують 12-24 години активної роботи.

Економічний ефект від впровадження LoRa-технології замість GSM/LTE для трекінгових систем складається з декількох факторів. По-перше, відсутність абонентської плати за передачу даних через мобільних операторів економить від 3 до 10 доларів США на пристрій щомісяця залежно від тарифного плану та обсягу трафіку. Для парку з 100 трекерів це дає 3600-12000 доларів економії на рік тільки на комунікаційних витратах. По-друге, збільшена автономність знижує витрати на обслуговування з 30 разів на рік при використанні GSM до 6-8 разів на рік при використанні LoRa, що економить робочий час персоналу. При вартості обслуговування одного пристрою 5 доларів для парку з сотні трекерів економія становить 11000 доларів на рік. По-третє, розгортання власної інфраструктури LoRaWAN дозволяє компанії мати повний контроль над мережею та даними, що особливо важливо для корпоративних замовників з вимогами до конфіденційності. Крім того, масштабованість системи практично не обмежена – один шлюз здатен обслуговувати тисячі пристроїв без додаткових витрат на підключення нових трекерів до мережі.

Собівартість виробництва одного пристрою при серійному випуску 1000 штук на рік оцінюється згідно з прайсами постачальників електронних компонентів Mouser та DigiKey станом на 2024 рік. Детальна структура витрат наведена у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Собівартість виробництва GPS-трекера з LoRa

Компонент	Вартість, USD
ESP32-C3 модуль	1,50-2,00
SX1276 LoRa модуль RA-01S	3,00-4,00
OLED SSD1306 0,91"	2,50-3,50
GPS модуль GP-01-KIT (опціонально)	8,00-12,00
Корпус + кнопки + PCB	5,00-7,00
Акумулятор Li-Ion 2000 мАг	3,00-4,00
Зборка та тестування	2,00-3,00
Загальна собівартість без GPS	25-35
Загальна собівартість з GPS	33-47

Порівняльний аналіз з комерційними рішеннями демонструє конкурентні переваги розробленої системи, що наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Порівняння LoRa-трекера з комерційними LTE-рішеннями

Параметр	LoRa GPS-трекер	LTE GPS-трекер
Ціна пристрою, USD	70-95	60-150
Абонентська плата, USD/міс	0	3-10
Автономність (активний режим), год	37,2	12-24
Автономність (sleep режим), днів	5,7	1-2
Частота обслуговування, разів/рік	6-8	30
Річні операційні витрати (100 шт), USD	3000-4000	14600-24000
Покриття у приміщеннях	Обмежене	Хороше
Дальність без інфраструктури, км	2-11	Залежить від GSM

Як видно з таблиці 3.7, ринкова ціна 70-95 доларів за версію з апаратним GPS залишається привабливою для корпоративних клієнтів при суттєво нижчих операційних витратах через відсутність абонплати.

Додатковим джерелом доходу може бути продаж базових станцій для LoRa мережі організаціям, що планують розгортати власну інфраструктуру. Одна базова станція на основі Raspberry Pi 4 з LoRa concentrator Semtech SX1301 покриває радіус 2-5 км в місті та до 15 км на відкритій місцевості при встановленні на даху будівлі, обслуговуючи до 1000 пристроїв одночасно за рахунок багатоканального прийому. Собівартість gateway близько 200-300 доларів включно з антеною та захисним корпусом IP67, ринкова ціна 500-800 доларів. Для міста з населенням 100000 осіб достатньо 10-20 базових станцій для повного покриття залежно від рельєфу та щільності забудови, що дає

одноразовий дохід 5000-16000 доларів на інфраструктуру для системного інтегратора.

Потенційний ринок для LoRa трекерів включає кілька сегментів з різними вимогами до функціоналу та автономності, що систематизовано у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Цільові сегменти ринку для LoRa GPS-трекерів

Сегмент	Застосування	Ключові вимоги
Логістика та доставка	Відстеження посилок, контейнерів, вантажівок	Робота без GSM-покриття, проникнення у металеві контейнери
Сільське господарство	Моніторинг худоби на великих пасовищах	Дальність до 10 км, тривала автономність
Туризм та екстрим	Персональні аварійні маяки для гір і лісів	SOS-сигнал через LoRa SF11-12, компактність
Муніципальні служби	Службовий транспорт, велопрокат, контейнери	Інтеграція з міською інфраструктурою
Охорона безпеки	Трекери для дітей, літніх людей, цінного обладнання	Тривожна кнопка, геофенсинг

Консервативна оцінка ринку для України базується на статистиці використання GPS-трекерів у суміжних країнах Європи з поправкою на економічні показники. Потенційний обсяг становить 50000 пристроїв на рік при середній ціні 60 доларів, що дає оборот 3000000 доларів. При рентабельності 40 % після вирахування собівартості виробництва, маркетингу, логістики та гарантійного обслуговування чистий прибуток становить 1200000 доларів на рік. Інвестиції у розробку фінальної версії продукту оцінюються у 100000-150000 доларів, що включає завершення прототипу з усіма компонентами, проектування корпусу для 3D-друку або лиття, сертифікацію CE та RED згідно з європейськими вимогами, налаштування контрактного виробництва у Китаї або Польщі, розробку мобільного додатку для iOS та Android, маркетингові матеріали. Термін окупності становить 1,5-2 місяці за оптимістичного сценарію з успішним виходом на ринок.

Технічні покращення для комерційної версії продукту включають кілька критичних аспектів. Додавання RST та DIO0 піновок до LoRa модуля необхідне для надійної роботи та енергоефективності через interrupt-driven архітектуру замість polling, що знизить середнє споживання LoRa підсистеми з 2,36 мА до 1,65 мА за рахунок можливості перевodu модуля у sleep режим між пакетами.

Реалізація ADC моніторингу батареї через резисторний дільник на GPIO0 забезпечить точне відображення заряду з похибкою не більше 2-3 % замість симуляції, автоматичне перемикання у енергозберігаючі режими при падінні напруги нижче 3.3В та попередження користувача про необхідність зарядки.

Підтримка різних SF через UI дозволить користувачу вибирати між дальністю та автономністю через меню налаштувань з візуальною індикацією компромісу. Інтеграція з LoRaWAN Class A забезпечить сумісність з існуючими публічними мережами, зокрема The Things Network з 180000 gateway по всьому світу та Helium з blockchain-винагородою за надання покриття, для користувачів що не бажають розгортати власну інфраструктуру. Покращена антена у вигляді зовнішньої SMA-антени замість вбудованої чіп-антени LoRa модуля збільшить дальність на 30-50 % або дозволить знизити SF на одну сходинку при тій же відстані, економлячи енергію.

Водонепроникний корпус класу захисту IP67 критичний для outdoor застосувань з гумовими ущільнювачами для кнопок та USB-порту зарядки. Опціональна сонячна панель потужністю 0,5-1 Вт для підзарядки батареї забезпечить необмежену автономність стаціонарних трекерів при встановленні на даху будівлі або відкритій місцевості з 4-6 годинами сонячного світла на день.

Регуляторні вимоги для комерціалізації в Україні та Європейському Союзі наведено у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Регуляторні вимоги для комерціалізації

Вимога	Стандарт/Директива	Опис
CE сертифікація	EN 300 220	Радіочастотне обладнання для 868 МГц ISM band
Директива RED	RED 2014/53/EU	Radio Equipment Directive для доступу до ринку ЄС
EMC тестування	-	Електромагнітна сумісність, завадостійкість
Реєстрація НКРЗІ	-	Декларування роботи в ISM діапазоні України
Вартість сертифікації	10000-15000 USD	Випробування у акредитованій лабораторії
Термін отримання	3-6 місяців	Залежить від завантаженості лабораторії

Подальший розвиток проекту може включати створення хмарної платформи для відображення трекерів на інтерактивній карті у реальному часі з

використанням Mapbox або OpenStreetMap API, push-нотифікації на мобільний додаток при виході трекера з заданої геозони з налаштовуваним радіусом від 50 до 5000 метрів, аналітику маршрутів з визначенням пройденої дистанції, середньої швидкості, часу у русі та зупинках, історію переміщень з можливістю відтворення траєкторії за будь-який період до одного року, спільний доступ до трекера для кількох користувачів з розмежуванням прав, інтеграцію з іншими сервісами через RESTful API або webhooks для корпоративних клієнтів.

Монетизація платформи можлива через модель freemium з безкоштовним базовим тарифом та преміум-підпискою 2-5 доларів на пристрій на місяць за розширені функції. Базовий тариф включає один трекер, зберігання історії 7 днів та базову карту. Преміум-підписка надає необмежену кількість трекерів, зберігання до року, детальну аналітику, експорт у GPX/KML формати та API-доступ. Така модель дає стабільний recurring revenue потік та збільшує lifetime value клієнта у 10-20 разів порівняно з одноразовим продажем пристрою.

Впровадження результатів дослідження у комерційне виробництво дозволить створити конкурентоспроможний продукт на ринку IoT-трекерів з унікальними характеристиками енергоефективності та автономності. Відсутність операційних витрат на передачу даних, збільшена тривалість роботи від батареї та можливість функціонування без покриття мобільного зв'язку відкривають нові ринкові ніші для застосування технології LoRa у системах позиціонування та моніторингу.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження енергоефективності процесів передачі сигналів у вбудованих системах керування IoT на базі технології LoRa. Виконання поставлених завдань дозволило досягти мети роботи та отримати практично значущі результати у сфері оптимізації енергоспоживання автономних пристроїв.

Здійснено аналіз існуючих технічних рішень у галузі систем позиціонування та бездротових технологій дальнього зв'язку. Досліджено технічні характеристики технології LoRa, принципи частотної модуляції з розширенням спектру CSS, особливості поширення радіохвиль у різних умовах міської забудови та відкритої місцевості. Проаналізовано можливості застосування LoRa для побудови розподілених систем трекінгу з автоматичним виявленням пристроїв через beacon-протокол.

Здійснено обґрунтований вибір апаратної платформи для реалізації експериментального пристрою GPS-трекера. Проведено порівняльний аналіз характеристик мікроконтролерів сімейств ESP32, ESP8266 та STM32, в результаті якого обрано платформу ESP32-C3 з архітектурою RISC-V завдяки оптимальному співвідношенню продуктивності (160 МГц), енергоефективності (45 мкА у режимі глибокого сну) та наявності вбудованого WiFi-модуля. Досліджено технічні параметри доступних LoRa-модулів на базі чіпів SX1276, SX1278 та RFM95W, обґрунтовано вибір модуля RA-01S з чіпом SX1276 для роботи у діапазоні 868 МГц.

Розроблено апаратно-програмну платформу GPS-трекера з інтегрованим LoRa-модулем та гібридною системою позиціонування. Спроектовано схему міжкомпонентних з'єднань з урахуванням специфіки інтерфейсів SPI для комунікації з LoRa-модулем, I2C для OLED-дисплея SSD1306 з роздільною здатністю 128×32 пікселі, UART для GPS-модуля GP-01-KIT та GPIO для системи з трьох тактових кнопок керування інтерфейсом.

Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера ESP32-C3 з використанням фреймворку ESP-IDF та операційної системи реального часу FreeRTOS. Реалізовано багатозадачну архітектуру з розподілом пріоритетів для забезпечення своєчасної обробки критичних подій комунікації та користувацьких команд. Імплементовано WiFi точку доступу з підтримкою до 4 одночасних підключень, HTTPS веб-сервер для доступу до Geolocation API браузерів, REST API з endpoint /api/gps для прийому координат від смартфона у форматі JSON.

Розроблено протокол beacon-передачі для організації децентралізованої мережі трекерів з автоматичним виявленням пристроїв. Структура beacon-пакета розміром 45 байт включає магічний заголовок для фільтрації сторонніх пакетів, ідентифікатор пристрою та текстове ім'я, GPS-координати у форматі float з точністю до 1,1 метра, рівень заряду батареї та мітку часу. Реалізовано систему управління списком виявлених пристроїв з підтримкою до 10 одночасних трекерів, автоматичним розрахунком дистанції за формулою гаверсінуса, збереженням RSSI та SNR для оцінки якості радіоканалу.

Імплементовано параметри модуляції LoRa з балансом між енергоефективністю та дальністю зв'язку: фактор розширення SF7 для швидкості передачі 5470 біт/с та дальності до 2 км у міських умовах, ширина смуги 125 кГц, швидкість кодування CR 4/5, потужність передавача +17 dBm для споживання 120 мА під час активної передачі. Час передачі beacon-пакета становить 73 мс при налаштуваннях SF7/BW125/CR4/5.

Створено багаторівневу систему налаштувань з енергонезалежним збереженням у NVS flash пам'яті. Параметри включають ім'я пристрою для ідентифікації у beacon-мережі, стан WiFi AP з можливістю повного вимкнення для економії 95 мА, яскравість OLED-дисплея для динамічної адаптації споживання від 3 до 20 мА, період beacon-трансляції від 5 до 60 секунд, таймаут автоматичного вимкнення екрану для економії до 8 мА у неактивному стані.

Розроблено ієрархічну систему користувацького інтерфейсу з п'ятьма екранами та патерном проектування «Стан». Головний екран з п'ятьма

режимами відображення перемикається кнопками без входу у меню: режим координат з базовою GPS-інформацією, режим джерела з детальною інформацією про походження координат, режим статистики GPS, режим LoRa-інформації з RSSI/SNR та списком видимих пристроїв, системний режим з часом роботи та станом компонентів.

Проведено теоретичну оцінку енергетичних характеристик розробленої системи на основі технічної документації компонентів. Базове енергоспоживання ESP32-C3 у активному режимі становить 45 мА при 160 МГц, у режимі глибокого сну 45 мкА. OLED-дисплей споживає 8 мА у типовому режимі, WiFi підсистема 95 мА без активних клієнтів, LoRa-модуль 1,5 мА у Standby та 120 мА при передачі, GPS-модуль 25 мА при пошуку супутників.

Визначено енергетичні профілі різних режимів роботи системи. Режим повної функціональності забезпечує 11,4 годин автономності від батареї 2000 мАг при сумарному споживанні 175,36 мА. Економний режим з вимкненим WiFi дає 37,2 години при споживанні 53,69 мА. Режим глибокого сну з пробудженням кожні 10 хвилин дає 137 годин (5,7 днів) при середньому споживанні 14,63 мА.

Проаналізовано вплив параметрів модуляції на енергоспоживання та характеристики каналу зв'язку. При збільшенні SF з 7 до 12 час передачі beacon-пакета зростає з 73 до 1483 мс, енергія на пакет збільшується з 28,9 до 587 мДж, чутливість приймача покращується з -123 до -137 дБм, теоретична дальність зростає з 2 до 11 км.

Визначено вплив періоду beacon-трансляції на загальне енергоспоживання LoRa підсистеми. При періоді 10 секунд середнє споживання становить 2,36 мА, при 60 секундах знижується до 1,64 мА. Економія 0,72 мА дає додаткові 7-8 годин автономності у економному режимі.

Розраховано економічну ефективність впровадження LoRa-технології порівняно з GSM/LTE рішеннями. Відсутність абонентської плати економить 3-10 доларів на пристрій щомісяця. Збільшена автономність знижує частоту обслуговування з 30 до 6-8 разів на рік. Собівартість виробництва одного

пристрою при серійному випуску 1000 штук оцінюється у 33-47 доларів з GPS модулем.

Результати виконаної роботи підтверджують можливість створення енергоефективних вбудованих систем IoT на базі технології LoRa з тривалістю автономної роботи від 11 годин у режимі повного функціоналу до 5,7 днів у режимі періодичних пробуджень. Запропоновані рішення щодо вибору параметрів модуляції, архітектури beacon-протоколу, гібридної системи позиціонування та багаторівневої системи енергозбереження дозволяють забезпечити оптимальний баланс між дальністю зв'язку, швидкістю оновлення координат та енергоспоживанням.

Отримані результати можуть бути використані для проектування автономних систем моніторингу у сферах логістики, сільського господарства, туризму, муніципальних служб та систем охорони. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення адаптивних алгоритмів управління параметрами передачі залежно від якості радіоканалу та залишкового заряду акумулятора, розробку методів інтеграції з публічними LoRaWAN мережами, впровадження сонечних панелей для необмеженої автономності стаціонарних трекерів.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цис Р., Бельський Б., Конкевич Л., Міскевич О. Запуск MQTT-брокера на Raspberry Pi: практична реалізація та експериментальний аналіз. *Технічні вісти*. 2025/1(61), 2(62). С. 75-76.
2. Cyber Physical Systems: Design Challenges. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4519604> (дата звернення: 25.07.2025).
3. Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/348767151\\_Embedded\\_System\\_Design\\_Embedded\\_Systems\\_Foundations\\_of\\_Cyber-Physical\\_Systems\\_and\\_the\\_Internet\\_of\\_Things](https://www.researchgate.net/publication/348767151_Embedded_System_Design_Embedded_Systems_Foundations_of_Cyber-Physical_Systems_and_the_Internet_of_Things) (дата звернення: 25.07.2025).
4. Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design. *BookSite*. URL: [https://booksite.elsevier.com/samplechapters/9780123743978/Sample\\_Chapters/01~Front\\_Matter.pdf](https://booksite.elsevier.com/samplechapters/9780123743978/Sample_Chapters/01~Front_Matter.pdf) (дата звернення: 25.07.2025).
5. Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/246357308\\_Hard\\_Real-Time\\_Computing\\_Systems\\_Predictable\\_Scheduling\\_Algorithms\\_and\\_Applications\\_-\\_Second\\_Edition\\_Springer\\_2005](https://www.researchgate.net/publication/246357308_Hard_Real-Time_Computing_Systems_Predictable_Scheduling_Algorithms_and_Applications_-_Second_Edition_Springer_2005) (дата звернення: 05.08.2025).
6. The Definitive Guide To ARM CORTEX M3 And CORTEX M4 Processors. Joseph Yiu. *Internet Archive*. URL: <https://archive.org/details/cortexm4/The%20Definitive%20Guide%20to%20ARM%C2%AE%20CORTEX%C2%AE-M3%20and%20CORTEX%C2%AE-M4%20Processors> (дата звернення: 05.08.2025).
7. Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7815384> (дата звернення: 05.08.2025).
8. Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7488250> (дата звернення: 15.08.2025).

9. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. *Wiley*. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119994374> (дата звернення: 15.08.2025).

10. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1368893> (дата звернення: 15.08.2025).

11. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7721743> (дата звернення: 15.08.2025).

12. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/316999399\\_A\\_SURVEY\\_ON\\_ROUTING\\_PROTOCOLS\\_FOR\\_WIRELESS\\_SENSOR\\_NETWORKS](https://www.researchgate.net/publication/316999399_A_SURVEY_ON_ROUTING_PROTOCOLS_FOR_WIRELESS_SENSOR_NETWORKS) (дата звернення: 15.08.2025).

13. MQTT-S - A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4554519> (дата звернення: 19.08.2025).

14. On the features and challenges of security and privacy in distributed Internet of things. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/257582417\\_On\\_the\\_features\\_and\\_challenges\\_of\\_security\\_and\\_privacy\\_in\\_distributed\\_Internet\\_of\\_things](https://www.researchgate.net/publication/257582417_On_the_features_and_challenges_of_security_and_privacy_in_distributed_Internet_of_things) (дата звернення: 19.08.2025).

15. Embedded System Design for Automotive Applications. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4343688> (дата звернення: 19.08.2025).

16. Artificial Neural Networks-Based Machine Learning for Wireless Networks: A Tutorial. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8755300> (дата звернення: 19.08.2025).

17. Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks: a top-down survey. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/261916588\\_Energy\\_Efficiency\\_in\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_a\\_top-down\\_survey](https://www.researchgate.net/publication/261916588_Energy_Efficiency_in_Wireless_Sensor_Networks_a_top-down_survey) (дата звернення: 19.08.2025).

18. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. *Semantic Scholar*. URL: <https://www.semanticscholar.org/>

paper/Wireless-sensor-networks-A-survey-on-the-state-of-Baronti-Pillai/856958549a2badd18ee507d4c31eba2e400db4ef (дата звернення: 24.08.2025).

19. Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology. *Semantic Scholar*. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Overview-and-Evaluation-of-Bluetooth-Low-Energy%3A-An-Gomez-Oller/e70f108961a7b250d3a77ca4a16c8e65626e96e6> (дата звернення: 24.08.2025).

20. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/322018958\\_A\\_comparative\\_study\\_of\\_LPWAN\\_technologies\\_for\\_large-scale\\_IoT\\_deployment](https://www.researchgate.net/publication/322018958_A_comparative_study_of_LPWAN_technologies_for_large-scale_IoT_deployment) (дата звернення: 24.08.2025).

21. Routing Protocols for Low Power and Lossy Networks in Internet of Things Applications. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/332993009\\_Routing\\_Protocols\\_for\\_Low\\_Power\\_and\\_Lossy\\_Networks\\_in\\_Internet\\_of\\_Things\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/332993009_Routing_Protocols_for_Low_Power_and_Lossy_Networks_in_Internet_of_Things_Applications) (дата звернення: 24.08.2025).

22. The Evaluation of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/260710169\\_The\\_Evaluation\\_of\\_MAC\\_Protocols\\_in\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_A\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/260710169_The_Evaluation_of_MAC_Protocols_in_Wireless_Sensor_Networks_A_Survey) (дата звернення: 24.08.2025).

23. MAC layer-based evaluation of IoT technologies: LoRa, SigFox and NB-IoT. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8371016> (дата звернення: 24.08.2025).

24. Internet of Things (IoT) communication protocols: Review. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8079928> (дата звернення: 03.09.2025).

25. Dynamic power management in wireless sensor networks. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/914626> (дата звернення: 03.09.2025).

26. Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A Survey. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/222652984\\_Energy\\_Conservation\\_in\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_A\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/222652984_Energy_Conservation_in_Wireless_Sensor_Networks_A_Survey) (дата звернення: 03.09.2025).

27. Wireless Communications: Principles and Practice. *Page Place*.  
URL: [https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781009489829\\_A49239167/preview-9781009489829\\_A49239167.pdf](https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781009489829_A49239167/preview-9781009489829_A49239167.pdf) (дата звернення: 03.09.2025).
28. Operating Systems for Low-End Devices in the Internet of Things: A Survey. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7347318> (дата звернення: 03.09.2025).
29. Dynamic Power Management: Design Techniques and CAD Tools. *EPFL*.  
URL: <https://si2.epfl.ch/demichel/publications/archive/1997/97SASHIMI3-10.pdf> (дата звернення: 15.09.2025).
30. Wireless Sensor Network Survey. *ResearchGate*.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/222648499\\_Wireless\\_Sensor\\_Network\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/222648499_Wireless_Sensor_Network_Survey) (дата звернення: 15.09.2025).
31. Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks. *ResearchGate*.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/220566249\\_Topology\\_Control\\_in\\_Wireless\\_Ad\\_Hoc\\_and\\_Sensor\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/220566249_Topology_Control_in_Wireless_Ad_Hoc_and_Sensor_Networks) (дата звернення: 19.09.2025).
32. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. *Iczhiku*.  
URL: <https://picture.iczhiku.com/resource/eetop/SyIHajRzjIDhvNX.pdf> (дата звернення: 19.09.2025).
33. Professional NFC Application Development for Android. *ResearchGate*.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/265847704\\_Professional\\_NFC\\_Application\\_Development\\_for\\_Android](https://www.researchgate.net/publication/265847704_Professional_NFC_Application_Development_for_Android) (дата звернення: 19.09.2025).
34. NB-IoT system for M2M communication. *IEEE Xplore*.  
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7552737> (дата звернення: 21.09.2025).
35. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Xplore*.  
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/985679> (дата звернення: 21.09.2025).
36. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/926982> (дата звернення: 21.09.2025).
37. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. *IEEE Xplore*.  
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/993520> (дата звернення: 21.09.2025).

38. Wireless Integrated Network Sensors: Towards Low Cost and Robust Self-Organizing Security Networks. *ResearchGate*.

URL: [https://www.researchgate.net/publication/253778069\\_Wireless\\_Integrated\\_Network\\_Sensors\\_Towards\\_Low\\_Cost\\_and\\_Robust\\_Self-Organizing\\_Security\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/253778069_Wireless_Integrated_Network_Sensors_Towards_Low_Cost_and_Robust_Self-Organizing_Security_Networks) (дата звернення: 23.09.2025).

39. Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Network Applications. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/221091679\\_Simulating\\_the\\_Power\\_Consumption\\_of\\_Large-Scale\\_Sensor\\_Network\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/221091679_Simulating_the_Power_Consumption_of_Large-Scale_Sensor_Network_Applications) (дата звернення: 01.10.2025).

40. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/307965130\\_A\\_Study\\_of\\_LoRa\\_Long\\_Range\\_Low\\_Power\\_Networks\\_for\\_the\\_Internet\\_of\\_Things](https://www.researchgate.net/publication/307965130_A_Study_of_LoRa_Long_Range_Low_Power_Networks_for_the_Internet_of_Things) (дата звернення: 23.09.2025).

41. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7721743> (дата звернення: 23.09.2025).

42. Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8030482> (дата звернення: 23.09.2025).