

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки

Кафедра інформаційних технологій та програмування

Пояснювальна записка
до магістерської дипломної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Аналіз методів балансування енергоспоживання датчиків у
розподілених системах збору інформації

Виконала: студентка 2 курсу, групи ЕЛ-24дм
171 «Електроніка»
(шифр і назва спеціальності)

Макаренко А.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник Зінченко В.Л.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Іванов В.Г.
(прізвище та ініціали)

Київ – 2025 року

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА
ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки
Кафедра інформаційних технологій та програмування
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 171 «Електроніка»
(шифр і назва спеціальності)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІТП
_____ д.т.н., проф.Захожай О.І.
(підпис)
« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дипломну роботу студенті

Макаренко Анастасія Володимирівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Аналіз методів балансування енергоспоживання датчиків у розподілених системах збору інформації,

керівник роботи доц., Зінченко Володимир Леонідович,
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові)

затверджені наказом університету від « 28 » 11 2025 року № 241/17.03

2. Строк подання студентом роботи: 18 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Матеріали науково-дослідної практики, науково-методична література, дані інтернет-мережі

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

4.1 Вступ

4.2 Аналітичний огляд питання

4.3 Основна частина (методи реалізації проекту)

4.4 Практична частина (розробка та моделювання)

4.4 Висновки

4.5 Перелік використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 05.11. 2025р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Одержання завдання на виконання роботи	05.11.2025	виконано
2.	Укладання і погодження з керівником плану і етапів виконання роботи	08.11.2025	виконано
3.	Узагальнення даних літературних джерел	12.11.2025	виконано
4.	Аналіз шляхів виконання завдання. Вибір і погодження з керівником оптимального шляху виконання завдання	18.11.2025	виконано
5.	Аналіз технічних засобів та існуючих систем	22.11.2025	виконано
6.	Реалізація практичної частини завдання	07.12.2025	виконано
7.	Укладання, оформлення та погодження пояснювальної записки з керівником	17.12.2025	виконано
8.	Надання пояснювальної записки на кафедру	18.12.2025	виконано
9.	Підготовка доповіді та презентації	22.12.2025	виконано

Студентка _____ Макаренко А.В.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Зінченко В.Л.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Робота містить 79 сторінки, 25 рисунків, 4 таблиці. Було використано 18 літературних джерела.

БАЛАНСУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ДАТЧИК, СЕНСОРНА МЕРЕЖА, АГРОПРОМИСЛОВІСТЬ, ІНТЕРВАЛ ПЕРЕДАЧІ, ПРОТОКОЛ ЗВ'ЯЗКУ, LORAWAN, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ АЛГОРИТМ, МЕРЕЖА ЗБОРУ ДАНИХ

Актуальність теми роботи. Сучасне сільське господарство активно переходить до інтелектуальних технологій моніторингу стану ґрунту і рослин, які ґрунтуються на використанні розподілених сенсорних мереж. Датчики, розміщені на великих територіях, повинні працювати автономно тривалий час, що робить енергоспоживання ключовим фактором їх ефективності. Умови польового середовища, віддаленість сенсорів, складність доступу до джерел живлення та необхідність забезпечення безперервного збору даних створюють значні виклики. Рациональне використання енергії датчиків дозволяє збільшити термін роботи мережі, зменшити витрати на експлуатацію та підвищити надійність отриманих даних.

Об'єкт дослідження – розподілена сенсорна мережа збору інформації в агропромисловості.

Предмет дослідження – методи та алгоритми балансування енергоспоживання датчиків у системах збору даних.

Методи дослідження. Теоретичною основою дослідження є загальнонаукові методи аналізу та синтезу, системний підхід, математичне моделювання енергоспоживання сенсорних вузлів, а також методи оцінювання та порівняння комунікаційних протоколів, що застосовуються у сенсорних мережах. Для постановки та вирішення задачі використовуються: методи теорії прийняття рішень, методи оптимізації параметрів роботи мережі, аналітичний підхід до опису енергобалансу датчиків, а також моделювання алгоритмів адаптивної передачі даних.

ABSTRACT

The work contains 79 pages, 25 figures, and 4 tables. A total of 18 sources were used.

ENERGY BALANCING, ENERGY CONSUMPTION, SENSOR, SENSOR NETWORK, AGRICULTURAL INDUSTRY, DATA TRANSMISSION INTERVAL, COMMUNICATION PROTOCOL, LORAWAN, ENERGY-EFFICIENT ALGORITHM, DATA COLLECTION NETWORK

Relevance of the topic. Modern agriculture is actively adopting intelligent technologies for monitoring soil and crop conditions, which rely on distributed sensor networks. Sensors deployed across large agricultural areas must operate autonomously for long periods, making energy consumption a critical factor in system efficiency. Field conditions, sensor remoteness, limited access to power sources, and the need for uninterrupted data collection create significant challenges. Rational energy use by sensors increases the operational lifetime of the network, reduces maintenance costs, and improves the reliability of the collected data. Therefore, developing methods for balancing energy consumption is essential for building stable and energy-efficient agricultural monitoring systems.

Object of research – a distributed sensor network for data collection in the agricultural sector.

Subject of research – methods and algorithms for balancing energy consumption in sensor-based data collection systems.

Research methods. The theoretical basis of the study includes general scientific methods of analysis and synthesis, a systems approach, mathematical modelling of sensor node energy consumption, as well as methods for evaluating and comparing communication protocols used in sensor networks. To formulate and solve the research problem, the study applies decision-making theory, methods of network parameter optimization, analytical approaches to modelling sensor energy balance, and modelling of adaptive data transmission algorithms.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1. Аналітичний огляд систем збору інформації.....	11
1.1 Розподіленні системи збору інформації	11
1.2 Особливості збору даних в агропромисловості.....	13
1.3 Види датчиків агросектору та їх характеристики	15
1.4 Протоколи зв'язку та їх енергоефективність	21
1.4.1 LPWAN-технології.....	22
1.4.2 Короткодіапазонні протоколи	25
1.5 Методи та підходи до балансування енергоспоживання у РСЗІ	28
2. Аналіз технічного завдання та постановка задачі балансування енергії	33
2.1 Опис предметної області	33
2.2 Технічні вимоги до системи.....	34
2.3 Аналіз енергоспоживання датчиків	37
2.4 Формулювання задачі балансування енергоспоживання	42
2.5 Вибір методів оптимізації енергоспоживання сенсорної мережі	46
3. Практична реалізація та дослідження енергоефективного алгоритму..	49
3.1 Обґрунтування вибору підходу	49
3.2 Структура сенсорного вузла та архітектура системи.....	50
3.2.1 LPWAN-технології.....	50
3.2.2 Архітектура сенсорної мережі.....	53
3.3 Принципова електрична схема сенсорного вузла	54
3.4 Математичний опис алгоритму балансування енергоспоживання	58

3.5 Модифікований алгоритм балансування енергоспоживання сенсорного вузла	61
3.6 Методика моделювання та критерії оцінювання ефективності адаптивного алгоритму	64
Загальні висновки.....	69
Список використаних джерел.....	70
Додатки	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РСЗІ – розподілені системи збору інформації

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЛЧМ – лінійно-частотна модуляція

LEACH – Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (Ієрархічна адаптивна кластеризація з низьким енергоспоживанням)

CH – Cluster Head (голова кластера)

PEGASIS – Power-Efficient GAthering in Sensor Information Systems
(Енергоефективне збирання даних у сенсорних інформаційних системах)

TEEN – Threshold-sensitive Energy Efficient Network Protocol (Пороговий енергоефективний мережевий протокол)

АСВ – автономні сенсорні вузли

СМ – сенсорна мережа

ВСТУП

Актуальність роботи. У сучасних умовах цифрової трансформації агропромисловий комплекс активно переходить до використання інтелектуальних технологій моніторингу стану ґрунту, навколишнього середовища та рослин. Основою таких технологій є розподілені сенсорні мережі, що складаються з великої кількості датчиків, розміщених на значних територіях та здатних передавати інформацію у режимі реального часу.

Ключовою проблемою функціонування сенсорних мереж є обмеженість енергоресурсів датчиків, адже більшість із них працює автономно та живиться від батарей. В умовах польового середовища, де доступ до джерел живлення є складним або неможливим, ефективне управління енергоспоживанням стає вирішальним фактором забезпечення стабільної та довготривалої роботи системи.

Зростання попиту на точне землеробство та необхідність безперервного моніторингу посилюють вимоги до надійності, енергоефективності та довговічності сенсорів. Балансування енергоспоживання дозволяє зменшити кількість заміन батарей, подовжити термін служби мережі, знизити витрати та підвищити якість отриманих даних.

Об'єкт дослідження – розподілена сенсорна мережа збору інформації в агропромислових системах моніторингу.

Предмет дослідження – методи, технології та алгоритми балансування енергоспоживання датчиків у системах збору даних.

Мета роботи. Розробка методу балансування енергоспоживання датчиків у розподілених системах збору інформації для підвищення ефективності та тривалості автономної роботи сенсорної мережі.

Основні завдання роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати особливості роботи сенсорних мереж у агропромисловості та специфіку їх енергоспоживання;

- Дослідити існуючі методи та підходи балансування енергії у сенсорних мережах;
- Виконати огляд сучасних комунікаційних протоколів (LoRaWAN, ZigBee, NB-IoT та ін.) та визначити їх енергоефективність;
- Побудувати модель енергоспоживання типового сенсорного вузла;
- Розробити алгоритм адаптивного балансування енергоспоживання датчиків;
- Теоретично оцінити ефективність запропонованого алгоритму та вплив на тривалість автономної роботи мережі.

Методи дослідження. У роботі застосовуються загальнонаукові методи аналізу та синтезу, системний підхід, математичне моделювання енергоспоживання сенсорних вузлів, методи оптимізації, теорія прийняття рішень, аналітичні методи оцінювання комунікаційних протоколів, а також методи побудови структурних і функціональних моделей сенсорних мереж.

Наукова новизна роботи. Наукова новизна полягає в розробці алгоритму адаптивного регулювання інтервалів передачі даних залежно від динаміки зміни контрольованих параметрів. На відміну від фіксованих режимів роботи, запропонований підхід забезпечує зменшення енергоспоживання без втрати інформативності зібраних даних.

Практичне значення роботи. Реалізація запропонованих рішень дозволяє збільшити автономність сенсорної мережі, зменшити експлуатаційні витрати, підвищити якість моніторингу та забезпечити стабільну роботу системи на великих територіях без частого втручання людини.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Розподіленні системи збору інформації

Розподілені системи збору інформації (РСЗІ) є складними технічними комплексами, призначеними для вимірювання, передавання, накопичення та первинної обробки даних у реальному часі. Їх ключовою особливістю є просторовий розподіл сенсорних вузлів, які працюють як єдина мережа та забезпечують збір даних у масштабованому та автономному режимі.

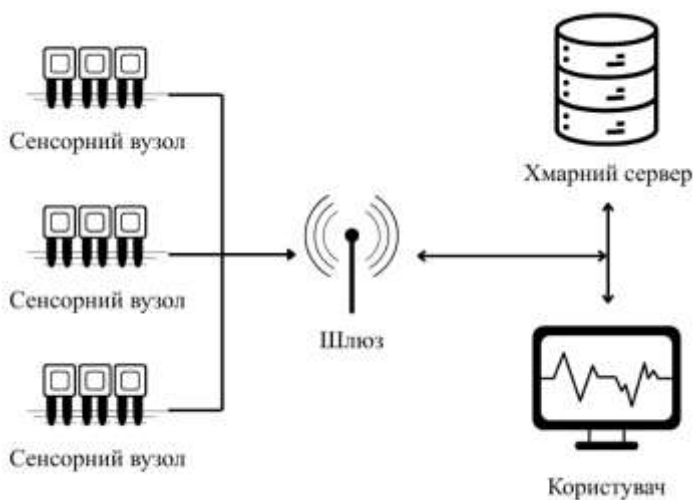


Рисунок 1.1 — Структурна схема розподіленої системи збору інформації

У загальному вигляді РСЗІ складаються з таких основних елементів (Рис.1.1):

- Сенсорні вузли (датчики) – пристрої, що здійснюють вимірювання фізичних параметрів (температури, вологості, тиску, освітленості тощо). Сенсорні вузли зазвичай оснащені мікроконтролером, модулем зв'язку та джерелом живлення, що забезпечує їх автономну роботу.

- Комунікаційні модулі – забезпечують передавання інформації між вузлами та шлюзами. Залежно від технології зв'язку можуть використовуватися

протоколи ближньої дії (ZigBee, BLE, Wi-Fi) або енергоефективні протоколи великої дальності (LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT).

- Шлюзи – проміжні вузли, що виконують роль концентратора даних. Вони приймають інформацію від сенсорів і передають її у центральний сервер або хмарну інфраструктуру для подальшої обробки.

- Сервер або хмарна платформа – здійснюють аналіз, обробку, зберігання даних, формування аналітичних звітів, відображення інформації в системах моніторингу.

- Користувацькі інтерфейси – програмне забезпечення, що дозволяє операторам переглядати, аналізувати та інтерпретувати дані.

Функціонування розподілених систем збору інформації ґрунтується на низці фундаментальних принципів, що визначають їхню ефективність, надійність та здатність адаптуватися до умов експлуатації. Одним із ключових принципів є децентралізація, завдяки якій кожен сенсорний вузол працює автономно, має власну логіку обробки даних, а в окремих випадках — виконує попередній аналіз вимірювань. Такий підхід забезпечує стійкість системи до відмов окремих компонентів, підвищує її гнучкість та дозволяє оптимізувати обмін інформацією. Другим важливим принципом є масштабованість: мережа може розширюватися шляхом додавання нових сенсорів без необхідності суттєвої реконфігурації, що є критично важливим для агропромисловості, де площі моніторингу можуть змінюватися від невеликих ділянок до великих сільськогосподарських полів. Важливим аспектом також є забезпечення безперервного збору інформації: сенсори повинні здійснювати регулярні вимірювання параметрів середовища, а отримані дані надходять до центральних систем у визначені інтервали часу, частота яких залежить від конкретних задач моніторингу та технологічних вимог.

Одним із визначальних чинників функціонування РСЗІ є обмеженість енергоресурсів. Оскільки більшість сенсорних вузлів працює на батарейному живленні, енергоощадність стає критично важливою для забезпечення тривалої експлуатації мережі. Саме тому балансування енергоспоживання розглядається

як одне з основних завдань при проєктуванні та використанні таких систем. Не менш значущим принципом є автоматизація процесів, яка передбачає здатність системи самостійно регулювати режими вимірювань, тривалість роботи передавача, інтервали передачі даних та інші параметри залежно від фактичного стану середовища та умов експлуатації.

У сфері агропромисловості розподілені системи збору інформації мають низку специфічних особливостей, зумовлених природними та технологічними факторами. Вони використовуються на великих територіях, що вимагає значних радіусів дії сенсорів і протоколів зв'язку. Додаткові труднощі створюють змінні кліматичні умови, висока вологість, перепади температур, інтенсивна сонячна радіація та інші зовнішні впливи, які потребують захисту обладнання та спеціальних режимів роботи. Відсутність можливості підключення до стаціонарних джерел електроживлення робить автономність сенсорних вузлів одним із головних критеріїв ефективності таких систем. Крім того, у багатьох сільськогосподарських регіонах спостерігається низька щільність покриття мобільними мережами, що зумовлює необхідність використання енергоефективних комунікаційних протоколів великої дальності, зокрема LPWAN-технологій. Висунуті вимоги до тривалої роботи — від кількох місяців до кількох років без заміни батарей — визначають актуальність розробки алгоритмів, здатних мінімізувати споживання енергії під час передачі даних, активації сенсорів та виконання мікроконтролером службових операцій.

Таким чином, принципи функціонування розподілених систем збору інформації та особливості їх використання в агропромисловості формують комплекс вимог до побудови енергоефективних мереж, де ключову роль відіграють оптимізація режимів роботи сенсорів, вибір відповідних технологій зв'язку та розробка інтелектуальних алгоритмів балансування енергоспоживання.

1.2 Особливості збору даних в агропромисловості

Аграрне виробництво впродовж всієї історії людської цивілізації відіграло роль рушійної сили технологічного прогресу, а в сучасному світі його інноваційний розвиток, що забезпечується біотехнологічними та інтелектуальними технологіями, сприяє кращому використанню дефіцитних природних ресурсів. Умови роботи сенсорних систем на полях характеризуються підвищеною складністю через вплив температурних коливань, вологості, ультрафіолетового випромінювання, вітрових навантажень та опадів. Ці фактори вимагають застосування спеціалізованих датчиків, здатних працювати в екстремальних умовах без втрати точності вимірювань та працездатності протягом тривалого періоду. У відкритому польовому середовищі розміщення сенсорів охоплює великі площі, що визначає необхідність використання мереж із широким радіусом дії та стабільним зв'язком навіть у зонах зі слабкою інфраструктурою мобільних мереж.

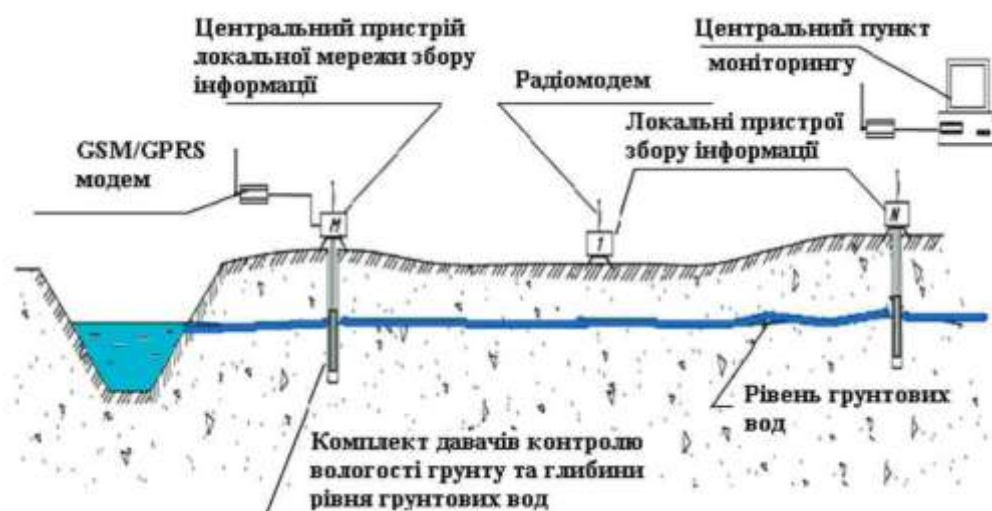


Рисунок 1.2 — Система моніторингу вологості ґрунту та глибини рівня ґрунтових вод

У процесі агромоніторингу збираються такі основні параметри, як вологість ґрунту (Рис. 1.2), температура ґрунту й повітря, рівень освітленості, концентрація води в ґрунтовому профілі, а також додаткові показники, включно

зі станом рослинності та рівнем води у зрошувальних системах. Кожен із цих параметрів має різні вимоги до частоти вимірювань та точності, що впливає на вибір типу сенсора та режимів його роботи. Наприклад, вологість ґрунту потребує відносно частих вимірів для відстеження вологообміну протягом доби, тоді як параметри освітленості або температури можуть фіксуватися рідше. Всі ці аспекти визначають структуру системи збору інформації та її функціональні характеристики.

Особливо важливою у сільському господарстві є автономність роботи сенсорних вузлів, оскільки більшість із них встановлюється в місцях без можливості підключення до електромережі. Живлення датчиків здійснюється від батарей або малопотужних елементів енергозбирання, тому оптимізація енергоспоживання стає критичною умовою ефективності системи. Відомо, що саме процес передавання даних є найбільш енерговитратним, тому алгоритми енергобалансування, адаптивні інтервали передачі та локальна попередня обробка інформації є ключовими підходами до подовження строку роботи сенсорної мережі без обслуговування.

1.3 Види датчиків агросектору та їх характеристики

- Температурні сенсори

Моніторинг температурних параметрів ґрунту та повітря здійснюється за допомогою спеціалізованих сенсорних систем (Рис. 1.3). Ці дані є критичними для ідентифікації фаз росту рослин та подальшої стратегічної розробки агротехнічних заходів. Цифровий датчик DS18B20 працює за інтерфейсом 1-Wire і забезпечує високу точність $\pm 0,5$ °C завдяки інтегрованому аналого-цифровому перетворювачу. Його електрична модель описується залежністю між температурою й часом перетворення, а також можливістю паразитного живлення при напрузі 3,0 – 5,5 В.

NTC-термістори мають нелінійну залежність опору від температури, що описується рівнянням Стейнхарта–Гарта:

$$\frac{1}{T} = A \cdot B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3, \quad (1)$$

що забезпечує високу чутливість у низькотемпературному діапазоні. Сенсор SHT21 поєднує вимірювання температури та вологості, має інтерфейс I^2C і низьке споживання ($< 0,3 \text{ mA}$).



Рисунок 1.3 — Приклади моделей: (а) DS18B20; (б) MF52 NTC 10k; (в) SHT21

- Датчики вологості ґрунту

Рівень вологості ґрунту є ключовим параметром, який детермінує (визначає) оптимальну інтенсивність іригаційних заходів (поливу) та загальний фізіологічний стан рослинних організмів.

Щодо методів вимірювання, резистивні давачі функціонують на принципі вимірювання електропровідності між двома електродами. Проте їх використання обмежене через суттєвий недолік: вони піддаються електрохімічній корозії та негативному впливу хімічного складу ґрунтового розчину.

Натомість ємнісні сенсори (Рис. 1.4) застосовують інший підхід, вимірюючи діелектричну проникність середовища (ґрунту). Принцип їхньої роботи базується на використанні формули ємності:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}, \quad (2)$$

де зміна ϵ ґрунту відповідає його вологості. Такі датчики мають низьку завадність та довговічність. Професійні TDR-сенсори вимірюють швидкість електромагнітної хвилі у ґрунті, забезпечуючи точність до $\pm 1\%$. Їх електрична частина базується на аналізі форми імпульсу та відбиття хвилі.

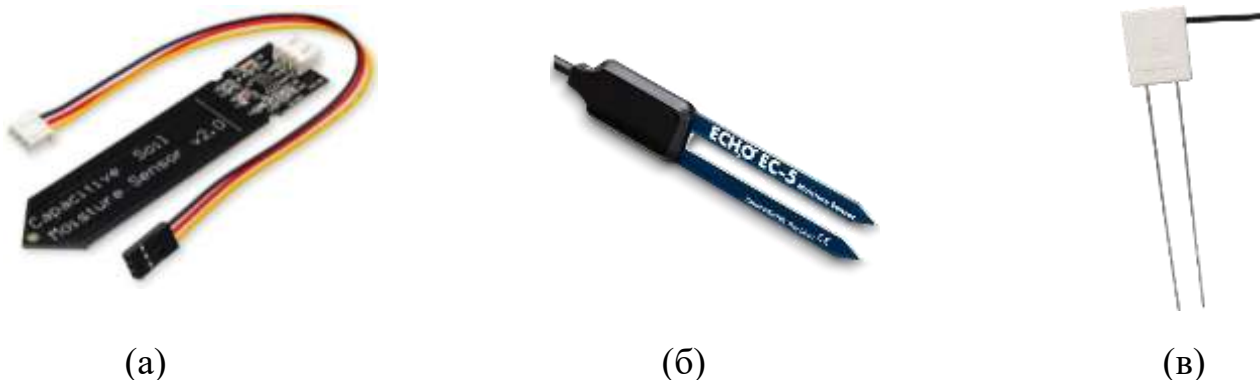


Рисунок 1.4 — Приклади моделей: (а) Capacitive v2.0; (б) Decagon EC-5 (SDI-12); (в) TDR Campbell Scientific CS616

- Датчики вологості повітря

Давачі вимірювання відносної вологості повітря (Рис. 1.5) є невід'ємним компонентом систем моніторингу та регулювання мікрокліматичних параметрів як у захищеному ґрунті (теплиці, оранжереї), так і в умовах польових досліджень (відкритий ґрунт). Зокрема, широко застосовуваний цифровий давач DHT22 (або подібні ємнісні гігрометри) функціонує на основі використання спеціалізованого полімерного чутливого елемента. Принцип його дії полягає в реєстрації зміни електричної ємності цього полімерного шару пропорційно до рівня адсорбованої водяної пари з навколишнього середовища. Передача даних відбувається цифровим протоколом, а точність становить $\pm 2 - 5\%$. Розширені сенсори, такі як SHT31, мають інтегровані аналого-цифрові перетворювачі та калібрування на рівні мікросхеми. Мультисенсор BME280 вимірює температуру, тиск і вологість, використовуючи компенсаційні формули виробника для корекції температурної нелінійності.

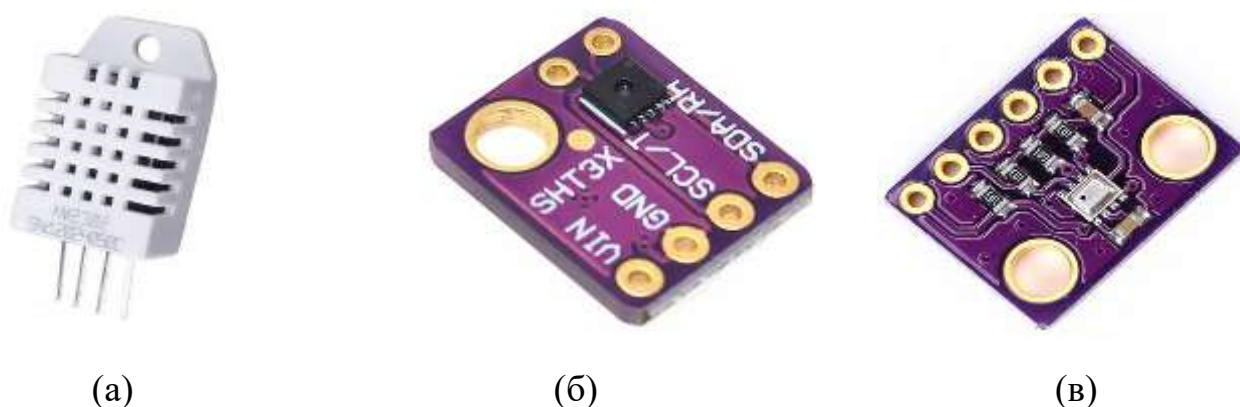


Рисунок 1.5 — Приклади моделей: (а) DHT22; (б) SHT31; (в) BME280

- Мультиспектральні на NDVI-датчики

Принцип роботи сенсорів нормалізованого різницевого індексу рослинності (NDVI) (Рис. 1.6) базується на спектрофотометричному аналізі інтенсивності відбитого електромагнітного випромінювання у видимому червоному (RED) та ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах спектра. Кількісне значення індексу визначається шляхом математичної обробки цих даних згідно з такою розрахунковою формулою:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}, \quad (3)$$

Мультиспектральні датчики містять набір фотодіодів або CMOS-матрицю з фільтрами для 4–8 спектральних зон. Електрична модель включає підсилювач низького шуму (LNA) та аналого-цифровий тракт. Датчики мають підвищене споживання через оптичний тракт та обробку сигналу (30–150 mА). Вони застосовуються у дронах і стаціонарних станціях.



Рисунок 1.6 — Приклади моделей: (а) Parrot Sequoia; (б) Skye SKR1850; (в) MicaSense RedEdge-MX

- Датчики освітленості

Рівень інсоляції має критичне значення для оптимізації процесів фотосинтезу та ефективної регуляції іригаційних систем. Для вимірювання цього параметра застосовуються оптичні сенсори (Рис. 1.7), конструкція яких базується на використанні фотодіодів. Принцип дії цих пристроїв полягає у генерації електричного струму, сила якого є прямо пропорційною інтенсивності падаючого світлового потоку:

$$I_{ph} = q \cdot \eta \cdot \phi, \quad (4)$$

де q — заряд електрона; η — квантова ефективність; ϕ — потік фотонів. Сенсор освітленості BH1750 характеризується інтеграцією 16-бітного АЦП та використовує для передачі даних цифровий послідовний інтерфейс I^2C . На відміну від нього, давач TSL2561 є більш досконалим рішенням, що включає два незалежні фотодіоди, чутливі до різних спектральних. Така архітектура уможливорює диференційовану оцінку опромінення у різних спектральних зонах, що забезпечує ефективну автоматичну компенсацію потенційних спектральних спотворень під час вимірювань.



(a)



(б)

Рисунок 1.7 — Приклади моделей: (a) BH1750; (б) TSL2561

- Датчики CO_2

Датчики CO_2 (Рис. 1.8) використовують NDIR-принцип, де вимірювання базується на поглинанні інфрачервоного випромінювання молекулами на довжині CO_2 хвилі $4,26 \mu m$. Інтенсивність поглинання описується законом Бугера–Ламберта–Бера:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha c l}, \quad (5)$$

де c — концентрація CO_2 ; l — довжина оптичного шляху; α — коефіцієнт поглинання. Такі сенсори мають високу точність (± 30 ppm), але й підвищене енергоспоживання $80 - 220$ mA через нагрівач і ІЧ-джерело. SCD30 має вбудований температурний компенсаційний модуль.



(a)



(б)

Рисунок 1.8 — Приклади моделей: (a) MH-Z19B; (б) Sensirion SCD30

З огляду на різноманіття сенсорів, що застосовуються в агросекторі, доцільно узагальнити їх основні технічні характеристики, принципи роботи та параметри енергоспоживання. Для цього в таблиці 1.1 наведено порівняльну

характеристику найбільш поширених типів сенсорів, які використовуються в системах моніторингу агропараметрів.

Таблиця 1.1 — Порівняльна таблиця характеристик сенсорів

Тип сенсора	Приклади моделей	Принцип роботи	Точність	Споживання	Інтерфейс
Температурні	DS18B20, SHT21	1-Wire / термісторна залежність	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$< 1\text{mA}$	1-Wire, I ² C
Вологість ґрунту	Capacitive v2.0, EC-5	Ємність / діелектрична проникність	2 – 5%	5 – 20mA	Analog, SDI-12
Вологість повітря	DHT22, SHT31	Ємнісний полімер	$\pm 2\%\text{RH}$	0,3 – 1mA	I ² C, Digital
NDVI/ мультиспектр	Sequoia, RedEdge	Порівняння NIR/RED	-	30 – 150mA	I ² C, SPI
Освітленість	BH1750, TSL2561	Фотоелектричний ефект	$\pm 1\text{ lx}$	0,12-1mA	I ² C
CO ₂	MH-Z19B, SCD30	Інфрачервоне поглинання (NDIR)	$\pm 30\text{ppm}$	80 – 220mA	UART, I ² C

1.4 Протоколи зв'язку та їх енергоефективність

Імплементація сучасних розподілених бездротових сенсорних мереж в агропромисловому комплексі вимагає застосування енергоефективних протоколів бездротової комунікації. Ці технології мають забезпечувати передачу телеметричних даних на значні відстані за умови мінімізації споживання енергії. В умовах польової експлуатації до комунікаційних протоколів висуваються підвищені вимоги щодо забезпечення стабільності з'єднання. Зокрема, критичними є підтримка зв'язку при низькому співвідношенні сигнал/шум,

робота в умовах інтенсивних перешкод та функціонування в автономних системах без доступу до постійного електроживлення.

У наступних підрозділах представлено аналіз ключових технологій класу LPWAN та короткодіапазонних протоколів, які знайшли найбільше застосування у системах агромоніторингу.

1.4.1 LPWAN-технології

- LoRaWAN

Однією з основних діючих LPWAN мереж є LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks). Найбільш відкритим стандартом для створення невеликих приватних мереж. Технологія LoRa використовує діапазони частот, що не потребують ліцензування (для України 433МГц). Також, LoRa - це технологія з розширеним спектромна основі ЛЧМ, з більш широкою смугою пропускання, ніж у Sigfox (наведено нижче), яка сама по собі виглядає як шум. Через метод модуляції та вбудованої можливості прямого виправлення помилок сигнал LoRa може передавати дані з рівнями сигналу значно нижче мінімального рівня шуму.

LoRaWAN використовує модуляцію Chirp Spread Spectrum, що підвищує стійкість до шумів і дозволяє передавати дані на відстань 2–15 км при наднизькому енергоспоживанні. Передача даних регулюється параметром Spreading Factor, де швидкість передачі описується як:

$$R_b = \frac{SF \cdot BW}{2^{SF}}, \quad (6)$$

зменшення швидкості відповідає значному виграві у дальності та завадостійкості. Термін автономної роботи сенсорних вузлів може досягати 5-10 років. LoRaWAN підтримує клас А (найбільш енергоефективний), що ідеально для агросенсорів. Ключові експлуатаційні характеристики даної технології

включають діапазон дії в межах від 5 до 15 км. Енергоспоживання варіюється від 10–50 мА в активному режимі передачі даних до рівня менше ніж 10 мкА в режимі енергозбереження, що забезпечує високу автономність пристроїв. Пропускна здатність каналу передачі даних становить від 0.3 до 50 кбіт/с. Структура мережі зображена нижче (Рис. 1.9).



Рисунок 1.9 — Структура мережі із застосуванням технології LoRaWAN

- Sigfox

Sigfox -це технологія LPWAN, яка використовує технології модуляції надвузької смуги. Методика модуляції дозволяє приймачу слухати лише крихітний фрагмент спектра, щоб мінімізувати перешкоди. Вони здатні досягти дальності від 10 до 50 км при мінімальних перешкодах. Стандарт розгортає диференціальну двійкову фазову маніпуляцію та гауссову маніпуляцію з частотним зсувом, що забезпечує можливість зв'язку в діапазоні частот ISM. Функціонування технології Sigfox реалізується на різних радіочастотних діапазонах залежно від регіону: 902 МГц для Сполучених Штатів Америки та 868 МГц для Європи. Початково система була розроблена виключно як односпрямований канал зв'язку (симплекс); однак поточні версії забезпечують підтримку дуплексного (двонаправленого) зв'язку. Стандарти комунікації Sigfox лімітують обсяг передачі даних до 140 повідомлень висхідної лінії на добу.

Кожне повідомлення має максимальний розмір корисного навантаження 12 октетів, а швидкість передачі даних при цьому не перевищує 100 біт на секунду. Енергоспоживання варіюється від $\approx 50\text{--}100$ мА·мс. Структура мережі зображена нижче (Рис. 1.10).

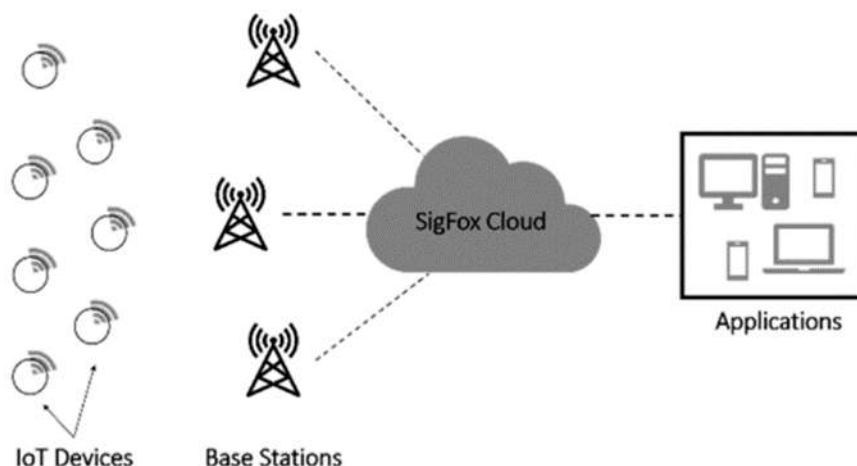


Рисунок 1.10 — Структура мережі із застосуванням технології Sigfox

- NB-IoT

NB-IoT – це новий стандарт мобільного зв'язку для пристроїв телеметрії з невеликими обсягами передачі даних. Ця технологія використовує існуючу стільникову інфраструктуру стандарту LTE, що гарантує високий рівень надійності зв'язку та ефективну роботу в умовах глибокого проникнення сигналу (з коефіцієнтом посилення до +20 дБ), зокрема всередині приміщень. Система підтримує двосторонній зв'язок і, на відміну від LoRa та Sigfox, здатна оперувати зі значними обсягами даних. Завдяки інтеграції режиму енергозбереження PSM (Power Saving Mode), сенсорні пристрої можуть мінімізувати споживання енергії до рівня <5 мкА в режимі очікування. Експлуатаційні параметри даної технології включають діапазон дії від 5 до 15 км. Енергоспоживання в режимі передавання даних є відносно високим і становить 30–200 мА, проте в режимі очікування воно знижується до рівня менше 5 мкА. Пропускна здатність забезпечується в діапазоні 26–159 кбіт/с. Ключовим недоліком цієї системи є підвищена

енерговитратність порівняно з іншими LPWAN-протоколами, а також критична залежність функціонування від інфраструктури та послуг оператора мобільного зв'язку. Структура мережі зображена нижче (Рис. 1.11).



Рисунок 1.11 — Структура мережі із застосуванням технології NB-IoT

1.4.2 Короткодіапазонні протоколи

- ZigBee

ZigBee – відкритий стандарт бездротового зв'язку, що насамперед виглядає привабливим з погляду розробників та виробників. ZigBee (IEEE 802.15.4) працює у діапазоні 2.4 GHz та формує Mesh-мережі, що забезпечує високу надійність. Електронна частина використовує O-QPSK модуляцію. Протокол придатний для теплиць або невеликих фермерських майданчиків. Радіус дії становить від 100 до 300 метрів. Енергоспоживання в активному режимі передачі знаходиться в діапазоні 15–35 мА, у режимі глибокого сну воно мінімізується до 1 мкА. Пропускна здатність каналу зв'язку фіксована і становить 250 кбіт/с. Істотним недоліком є непридатність цього рішення для застосування на великих територіях, зокрема на полях площею понад 0.5 км у периметрі або діаметрі. Структура мережі зображена нижче (Рис. 1.12).

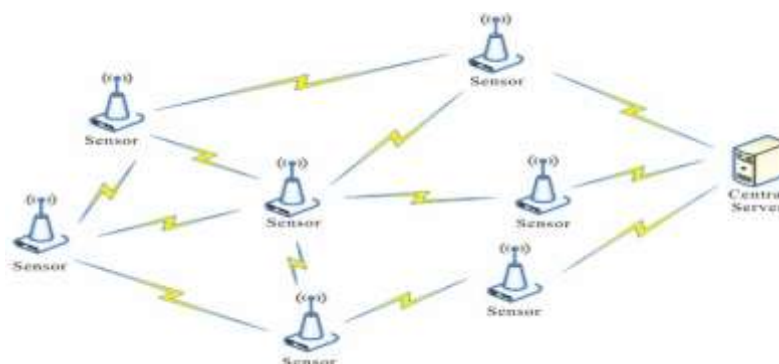


Рисунок 1.12 — Структура мережі ZigBee

- BLE Mesh (Bluetooth Low Energy Mesh)

Технологія BLE Mesh функціонує на базі стандартів BLE 4.2/5.0 та використовує механізм передачі з низьким енергоспоживанням. Цей підхід дозволяє мінімізувати витрати енергії під час трансмісії невеликих пакетів даних. Архітектура мережі передбачає можливість ретрансляції пакетів між окремими вузлами, що забезпечує масштабованість та надійність покриття. Діапазон дії технології становить від 30 до 100 м, з можливістю розширення до 300 м при використанні стандарту Bluetooth Low Energy. Енергоспоживання знаходиться в межах 5–15 мА. Швидкість передачі даних варіюється від 125 кбіт/с до 2 Мбіт/с. Ключовою перевагою цієї технології є її надзвичайно низький рівень споживання енергії.



Рисунок 1.13 — Структура мережі Bluetooth Low Energy Mesh

- 6LoWPAN

Протокол 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) забезпечує інтеграцію стандартів IPv6 у бездротові сенсорні мережі. Це досягається шляхом ефективного стиснення заголовків IP-пакетів за допомогою алгоритмів HC1/HC2. Технологія функціонує спільно з фізичним рівнем стандарту IEEE 802.15.4. Експлуатаційні характеристики включають дальність дії 50–200 м, енергоспоживання, співставне з параметрами ZigBee, та пропускну здатність у діапазоні 20–250 кбіт/с. Ключовою перевагою 6LoWPAN є повна підтримка сучасної інфраструктури IoT на мережевому рівні. Структура мережі зображена нижче (Рис. 1.14).

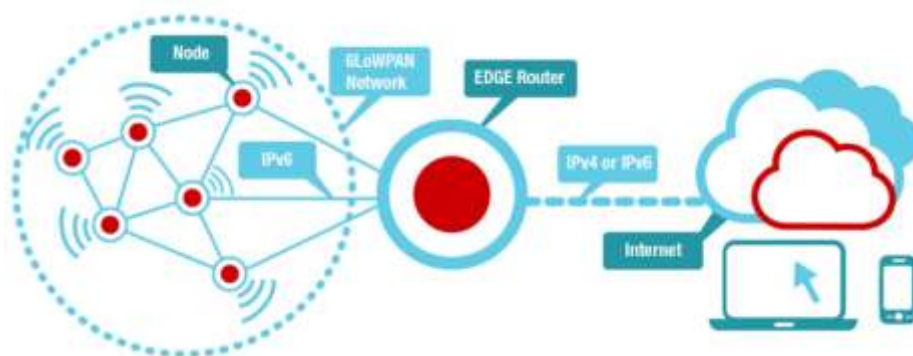


Рисунок 1.14 — Структура мережі 6LoWPAN

Порівняння найпоширеніших технологій IoT в агропромисловості наведено нижче (Табл. 1.2).

Таблиця 1.2 — Порівняльна таблиця технологій IoT

Протокол	Даль- ність	Частота	Спожи- вання	Швидкість	Пропускна здатність	Стійкість до перешкод
LoRaWAN	2-15 км	868 МГц (ЄС) / 915 МГц (США)	●●●●● дуже низьке	0.3 – 50 кбіт/с	●●○○○ низька	●●●●● дуже висока
1	2	3	4	5	6	7

1	2	3	4	5	6	6
Sigfox	10-50 км	868 МГц (ЄС), 902 МГц (США)	●●●●● дуже низьке	100 біт/с	●○○○○ дуже низька	●●●●○ висока
NB-IoT	5-15 км	Ліцензовані діапазони 700-2100 МГц	●●○○○ високе	20–250 кбіт/с	●●●○○ середня	●●●●● дуже висока
ZigBee	До 300 м	2.4 ГГц	●●●●○ низьке	250 кбіт/с	●●●○○ середня	●●●○○ середня
BLE Mesh	До 300 м	2.4 ГГц	●●●●○ низьке	1 Мбіт/с (РНУ), ефективно 100–200 кбіт/с	●●●●● висока	●●●○○ середня
6LoWPAN	До 200 м	2.4 ГГц	●●●●○ низьке	250 кбіт/с	●●●○○ середня	●●●○○ середня

1.5 Методи та підходи до балансування енергоспоживання у РСЗІ

Ефективна стратегія управління енергоспоживанням сенсорних вузлів є визначальним фактором забезпечення довговічності та надійності функціонування РСЗІ. Особливо це актуально в агропромисловому секторі, де більшість кінцевих пристроїв експлуатуються автономно протягом тривалого періоду. Структура енергетичних витрат сенсорного вузла складається з трьох основних компонентів: споживання обчислювальною електронікою (CPU, АЦП), енергія, необхідна для здійснення вимірювань, та енергія на передачу даних. Аналіз показує, що саме передавання даних зазвичай є найбільш енерговитратним етапом. У зв'язку з цим сучасні методи енергобалансування орієнтовані на мінімізацію обсягу та частоти трансмісії пакетів, оптимізацію алгоритмів маршрутизації та впровадження динамічних режимів роботи з низьким енергоспоживанням.

- Режим сну та керування живленням вузла

Одним із найбільш ефективних підходів до оптимізації енергоспоживання є застосування режимів зниженого енергоспоживання. У цих режимах мікроконтролер та радіомодуль переводяться в стан *low-power mode*, що дозволяє мінімізувати споживання струму до величин у діапазоні від 1 до 15 мкА.

Потужність у режимі сну визначається як: $P_{sleep} = V \cdot I_{sleep}$.

Для типової батареї 3,3 В та струму 5 мкА отримаємо:

$$P_{sleep} = 3,3 \times 5 \cdot 10^{-6} = 16,5 \mu W . \quad (7)$$

Це на порядки менше, ніж енергоспоживання в активному режимі роботи радіомодуля, яке зазвичай становить 40–100 мВт. Таким чином, існує пряма залежність: максимальне збільшення тривалості перебування сенсорного вузла в режимі зниженого енергоспоживання пропорційно підвищує загальну тривалість автономного функціонування системи.

- Керування коефіцієнтом активності вузла

Циклічний режим роботи — це метод управління енергоспоживанням, який полягає в періодичному чергуванні активної фази функціонування та пасивної фази сенсорного вузла.

Коефіцієнт активності:

$$DC = \frac{t_{active}}{t_{active} + t_{sleep}} . \quad (8)$$

Наприклад, при встановленні коефіцієнта активності на рівні 1% та потужності передавача 60 мВт, середнє інтегроване енергоспоживання системи зменшується більш ніж у 50 разів. В умовах застосування в сільському господарстві, де параметри навколишнього середовища характеризуються повільною динамікою змін, оптимальне значення робочого циклу може варіюватися від 0.1% до 1%. Такий підхід забезпечує тривалий термін автономної експлуатації сенсорного вузла від одного джерела живлення протягом 3–5 років.

- Енергоефективна маршрутизація

Алгоритми маршрутизації мають прямий вплив на загальну кількість трансмітованих пакетів даних і, як наслідок, на сумарні енергетичні витрати системи. Найбільш ефективними з точки зору енергоефективності визнано кластерні алгоритми маршрутизації.

а) LEACH

Алгоритм LEACH забезпечує зниження енергоспоживання завдяки формуванню динамічних кластерів та періодичному ротаційному вибору голови кластера (CH). Ключовий принцип полягає в тому, що CH агрегує дані, зібрані від підлеглих вузлів, і передає на базову станцію один узагальнений пакет, мінімізуючи загальну кількість трансмісій.

Імовірність вибору CH визначається таким чином:

$$P(n) = \frac{k}{N}, \quad (9)$$

де N – кількість вузлів; k – бажана кількість голів кластерів.

Витрати енергії моделі LEACH обчислюються:

$$E_{tx}(k, d) = E_{elec}k + \epsilon_{amp} kd^2, \quad (10)$$

де E_{elec} – енергія електроніки; d – відстань; k - довжина пакета.

Цей метод забезпечує економію енергії до 40-60% порівняно зі звичайною маршрутизацією.

б) PEGASIS

Протокол PEGASIS — це вдосконалення LEACH, що використовує альтернативний підхід до маршрутизації: формування лінійного ланцюжка між сенсорними вузлами. Кожен вузол передає дані найближчому сусідові. Роль головного вузла, який агрегує інформацію та передає на базову станцію, динамічно ротується. Ключові переваги — мінімізація радіопередач та оптимізація енергоспоживання. Головний недолік — значна затримка даних при довгих ланцюгах, що обмежує застосування там, де потрібен реальний час.

в) TEEN

Протокол TEEN використовує механізм адаптивних порогів для ефективного управління трафіком: Hard Threshold (абсолютне значення для генерації пакета) та Soft Threshold (мінімальна зміна параметра для нового пакета). Застосування цих порогів значно зменшує обсяг трафіку. У задачах моніторингу вологості ґрунту TEEN знижує кількість переданих пакетів у 10–50 разів.

Нижче зображено графічну ілюстрацію енергоспоживання окремого сенсорного вузла для алгоритмів TEEN та LEACH (Рис. 1.15). По горизонтальній осі відкладено час моделювання, а по вертикальній осі — енергія вузла в джоулях.

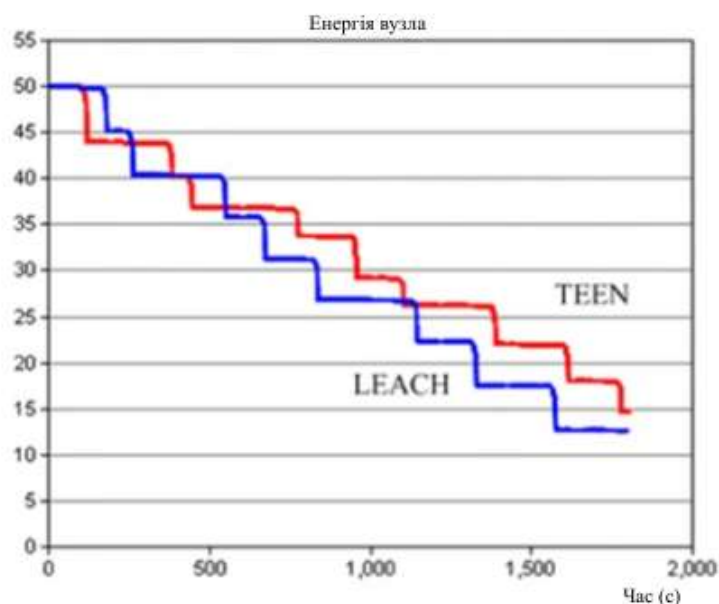


Рисунок 1.15 — Енергоспоживання одиночного вузла при LEACH і TEEN

- Адаптивна частота вимірювань

Сенсорні вузли можуть динамічно адаптувати частоту вимірювань залежно від контекстних умов: стабільності контрольованого параметра, часу доби, сезону або поточних погодних умов.

Для реалізації цього підходу застосовується формула адаптивного інтервалу:

$$T_{new} = T_{base} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left|\frac{dX}{dt}\right|\right), \quad (11)$$

де: X – вимірюваний параметр; α - коефіцієнт чутливості.

Цей метод зменшує витрати на вимірювання та передачу.

- Зменшення обсягу передавання даних

Зменшення обсягу реалізується кількома методами. Агрегація даних (наприклад, функція кластерних голів у протоколі LEACH) консолидує інформацію перед передачею. Компресія даних, зокрема алгоритми RLE (Run-Length Encoding) або дельта-кодування, зменшує розмір кожного пакету.

Крім того, застосовується попередня обробка на кінцевому вузлі, що включає фільтрацію шумів, видалення аномальних сплесків та передачу виключно значущих подій. Ці підходи дозволяють транслювати лише ключові точки замість повного часового ряду, що забезпечує значне зниження енергоспоживання на 30–80%.

- Енергозбирання

В агропромисловому секторі активно застосовуються різноманітні методи збору енергії з навколишнього середовища. Найбільш поширеним варіантом є використання сонячних панелей; також використовуються термоелектричні мікрогенератори, вітрові мікротурбіни та п'єзоелектричні елементи.

Енергія E , отримана від сонячної інсоляції, розраховується за формулою:

$$E = \eta \cdot A \cdot G, \quad (12)$$

де η – ефективність панелі (типовий діапазон 0,12 -0,22), A – площа панелі, а G – сонячна інсоляція (в середньому 100-300 Вт/м² у літній період).

Завдяки високій ефективності цього підходу, навіть панель мінімального розміру (наприклад, 5×5 см) здатна забезпечити сенсорну мережу достатньою кількістю енергії для безперервної автономної роботи.

2. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ БАЛАНСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ

2.1 Опис предметної області

Системи моніторингу параметрів ґрунту та навколишнього середовища в агропромисловості базуються на використанні розподілених сенсорних мереж, призначених для роботи на великих територіях за умов мінімального обслуговування. Аграрні поля характеризуються просторовою неоднорідністю ґрунтових і кліматичних параметрів, що зумовлює необхідність розміщення сенсорних вузлів відповідно до визначеної моделі покриття.

Аграрне поле розглядається як двовимірна просторова область, у межах якої сенсорні вузли формують розподілену систему збору інформації. Топологія розміщення вузлів може бути регулярною, випадковою або кластерною, залежно від характеристик культури та цілей моніторингу. Типова відстань між сенсорами становить 50–150 м, що забезпечує достатню просторову роздільну здатність для контролю параметрів ґрунту та атмосфери.

Сенсорні вузли встановлюються безпосередньо в ґрунті для контролю параметрів кореневої зони або на опорних конструкціях для вимірювання атмосферних показників. Відсутність стаціонарного електроживлення на великих площах вимагає повної автономності кожного вузла та використання енергоефективних апаратно-програмних рішень.

Функціонування таких систем ускладнюється впливом природних факторів, зокрема рельєфу, рослинності та метеорологічних умов, що висуває вимоги до надійності бездротового каналу зв'язку. У зв'язку з цим доцільним є використання LPWAN-технологій, які поєднують велику дальність передачі з низьким енергоспоживанням.

Забезпечення тривалої автономної роботи сенсорних вузлів є ключовим завданням при проектуванні розподілених систем моніторингу. Досягнення терміну експлуатації 1–5 років можливе за рахунок оптимізації

енергоспоживання, використання режимів сну, адаптивного керування частотою вимірювань та енергоефективних протоколів зв'язку. Саме ці фактори формують основу для подальшого дослідження методів балансування енергоспоживання в сенсорних мережах.

2.2 Технічні вимоги до системи

Технічні вимоги слугують основоположним набором критеріїв, яким повинна відповідати проектована сенсорна мережа для забезпечення довготривалого, стабільного та енергоефективного функціонування в умовах агропромислового середовища. Ці вимоги є результатом комплексного аналізу особливостей предметної області, зокрема: абсолютної відсутності стаціонарної електричної інфраструктури, необхідності моніторингу великих просторових масштабів сільськогосподарських угідь, а також потреби у високій достовірності, точності та репрезентативності отримуваних вимірювань. Зазначені технічні вимоги безпосередньо детермінують архітектуру системи та апаратну конфігурацію сенсорних вузлів, визначаючи ключові параметри, які необхідно оптимізувати для забезпечення ефективної роботи.

- Мінімальне споживання енергії сенсорними вузлами

Енергоспоживання є визначальним чинником у розробці розподіленої сенсорної мережі, оскільки більшість вузлів працюють від автономних джерел живлення й розташовані на значних площах, що ускладнює технічне обслуговування. Середній струм споживання сенсорного вузла повинен залишатися в діапазоні 10 – 200 μA у режимах сну та 5 – 40 mA під час передавання даних, залежно від вибраного протоколу зв'язку.

Енергетична ефективність системи визначається середнім добовим споживанням:

$$I_{avg} = \frac{I_{tx}t_{tx} + I_{meas}t_{meas} + I_{sleep}t_{sleep}}{T}, \quad (13)$$

де: t_{tx} – струм передавача; I_{meas} – струм вимірювання модуля; I_{sleep} – струм у режимі сну; t_{tx} , t_{meas} , t_{sleep} – тривалість відповідних режимів.

Ця формула дозволяє визначити можливий ресурс роботи від батареї, що є критичним параметром для проєктування мережі.

- Достатня частота вимірювань

Частота дискретизації сенсорних показників повинна бути корельована з агротехнологічними вимогами та забезпечувати адекватне відображення динаміки параметрів навколишнього середовища. Типові режими моніторингу в агропромисловості передбачають наступні інтервали: а) вимірювання ґрунтової вологи- 1 раз на 15–60 хвилин; б) температури ґрунту та повітря- кожні 5–10 хвилин; в) освітленості- 1-5 хвилин; г) рівня води- 1 раз на 5-20 хвилин.

Слід зазначити, що збільшення частоти вимірювань прямо пропорційно впливає на енергоспоживання системи, оскільки лінійно зростає кількість циклів пробудження мікроконтролера та загальний час активної роботи АЦП. Тому критично важливо забезпечити оптимальний баланс між необхідною точністю моніторингу і мінімізацією енергетичних витрат. Це досягається шляхом застосування адаптивних методів, що передбачають зниження частоти дискретизації в періоди стабільних умов та її підвищення при виявленні динамічних змін контрольованих параметрів.

- Надійність передачі даних

Проектована система повинна гарантувати високу надійність доставки даних до шлюзу або хмарного сервера, що кількісно визначається коефіцієнтом успішної доставки пакетів на рівні не нижче 95 %, навіть за умов складного електромагнітного середовища. Забезпечення заявленого показника вимагає імплементації механізмів прямої корекції помилок на фізичному рівні та протоколів автоматичного повторного запиту, які ініціюють ретрансляцію пакетів за відсутності підтвердження. Особливу увагу слід приділити стійкості каналу зв'язку до специфічних для агроландшафту явищ, таких як мультишляхове поширення сигналу, ефекти затінення рослинністю та зміна

імпедансних характеристик середовища внаслідок флуктуацій вологості ґрунту, що суттєво впливають на параметри.

- Максимальна дальність зв'язку

Дальність визначає щільність розміщення сенсорів та необхідність використання ретрансляції.

Умови відкритого поля дозволяють досягти (Табл. 1.2): а) LoRaWAN- 5-15 км; б) Sigfox- 10-40 км; в) NB-IoT- 5-15 км; г) ZigBee/BLE/6LoWPAN- 50-300 м.

Для системи, яку ми проектуємо, важливо забезпечити мінімальну необхідну дальність зв'язку між сусідніми вузлами, що дозволяє гарантувати зв'язність без додаткових ретрансляторів.

Формула втрат на трасі:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} , \quad (14)$$

де: $PL(d)$ – втрати сигналу на відстань d ; n – коефіцієнт втрат середовища (2-3 для відкритого поля); X_{σ} – гаусівська складова тіньових флуктуацій.

- Тривалий термін автономної роботи

Цільовий термін автономної роботи системи — від 1 до 3 років, бажано 5 років при оптимізації режимів роботи.

Ресурс батареї оцінюється:

$$T = \frac{Q_{battery}}{I_{avg}} . \quad (15)$$

Наприклад: $Q = 2400 \text{ mA} \cdot \text{h}$ $I_{avg} = 0,1 \text{ mA}$ виходить тривалість $\approx 2,7$ роки.

Стратегія пролонгації терміну автономного функціонування реалізується шляхом інтеграції енергоефективних мікроконтролерних архітектур (зокрема, ARM Cortex-M0/M4 або ESP32-C3), здатних підтримувати режими наднизького споживання, та оптимізації комунікаційних протоколів для мінімізації кількості циклів активної передачі даних. Домінуючим алгоритмом роботи стає

максимізація періодів перебування вузла у стані сну, що у поєднанні з технологіями енергозбирання (сонячні панелі, термоелектричні перетворювачі) забезпечує необхідний енергетичний баланс та експлуатаційну стійкість системи.

У цьому підрозділі сформульовано основні технічні вимоги до архітектури та функціонування розподіленої сенсорної мережі для агропромислового моніторингу. Показано, що ключовою умовою її ефективної роботи є мінімізація енергоспоживання, зумовлена необхідністю тривалої автономної експлуатації сенсорних вузлів за відсутності регулярного обслуговування. Частотні режими знімання та передавання даних повинні забезпечувати достатню інформативність вимірювань без надмірних енергетичних витрат, що вимагає оптимізації режимів роботи системи.

Визначено, що досягнення терміну автономного функціонування на рівні 1–5 років можливе за рахунок поєднання енергоефективних апаратних компонентів, режимів глибокого сну, надійних каналів зв'язку та адаптивного керування активністю сенсорних вузлів. Сукупність цих вимог формує основу для постановки задачі енергетичної оптимізації, яка розглядається в подальшому та є ключовою в межах даного дослідження.

2.3 Аналіз енергоспоживання датчиків

Типовий сенсорний вузол функціонує у трьох основних режимах: режим сну, режим вимірювання та режим передавання/приймання даних. Загальне енергоспоживання вузла визначається часткою часу, проведеною в кожному з цих станів, і відповідними струмами споживання.

- Енергоспоживання у режимі сну

У режимі сну сенсорний вузол перебуває більшу частину часу (до 99 % робочого циклу). Мікроконтролер і радіомодуль у цьому стані споживають мінімальну потужність — від 1 до 20 μA , залежно від архітектури MCU та вибраного протоколу зв'язку.

Енергія, що витрачається у режимі сну:

$$E_{sleep} = I_{sleep} \cdot V \cdot t_{sleep}, \quad (16)$$

де: I_{sleep} – струм у режимі сну; V – напруга живлення; t_{sleep} – загальна тривалість перебування в цьому режимі.

Оскільки цей режим триває найдовше, зменшення I_{sleep} навіть у декілька разів суттєво продовжує автономність вузла.

- Енергоспоживання під час вимірювання

Вимірювальні модулі (температурні, вологості, мультиспектральні тощо) активуються періодично. У цьому стані споживання зростає до 1-10 mA залежно від типу сенсора та швидкості вимірювання.

Енергія вимірювання:

$$E_{meas} = I_{meas} \cdot V \cdot t_{meas}, \quad (17)$$

де: I_{meas} – струм під час вимірювання; t_{meas} – тривалість цього режиму.

Суттєва мінімізація середнього енергоспоживання сенсорного вузла досягається шляхом комплексної оптимізації алгоритмів збору даних, яка передбачає адаптивне регулювання частоти дискретизації, інтеграцію апаратних рішень з наднизьким споживанням та критичне зменшення тривалості фази попередньої стабілізації вимірювальних каналів.

- Енергоспоживання під час передачі й приймання даних (TX/RX)

Цей найбільш енерговитратний етап роботи вузла. Радіомодулі LPWAN споживають від 20 до 120 mA під час передачі, а короткодіапазонні протоколи (BLE, ZigBee)— від 10 до 40 mA. Тривалість передачі залежить від розміру пакету, швидкості модуляції та якості каналу.

Енергія передавання:

$$E_{tx} = I_{tx} \cdot V \cdot t_{tx}. \quad (18)$$

Енергія приймання:

$$E_{rx} = I_{rx} \cdot V \cdot t_{rx} . \quad (19)$$

У більшості протоколів (LoRaWAN, Sigfox) приймання використовується мінімально, що дозволяє знизити витрати енергії. Короткодіапазонні протоколи, навпаки, часто потребують активного приймання.

- Формула загального енергобалансу сенсорного вузла

Сумарне середнє енергоспоживання:

$$E_{total} = E_{sleep} + E_{meas} + E_{tx} + E_{rx} . \quad (20)$$

Підставивши детальні формули:

$$E_{total} = I_{sleep} V t_{sleep} + I_{meas} V t_{meas} + I_{tx} V t_{tx} + I_{rx} V t_{rx} . \quad (21)$$

Якщо нормувати на один цикл роботи тривалістю T , отримуємо середній струм споживання:

$$I_{avg} = \frac{I_{sleep} t_{sleep} + I_{meas} t_{meas} + I_{tx} t_{tx} + I_{rx} t_{rx}}{T} . \quad (22)$$

Цей параметр є базовий для оцінки тривалості роботи від батареї:

$$T_{life} = \frac{Q_{battery}}{I_{avg}} , \quad (23)$$

де: $Q_{battery}$ – ємність батареї в $\text{mA} \cdot \text{год}$.

Основні втрати енергії сконцентровані у стадії передачі даних, що узгоджується з математичною моделлю енергоспоживання, описаною в цьому

підрозділі. Стадія сну, навпаки, характеризується мінімальними витратами та визначає сумарну автономність сенсорного вузла.

Блок-схема (Рис. 2.1) відображає послідовність переходів сенсорного вузла між основними режимами роботи.



Рисунок 2.1 — Блок-схема енергетичного циклу роботи сенсорного вузла

Оскільки робота сенсорного вузла є циклічною, а тривалість окремих фаз суттєво відрізняється, моделювання енергоспоживання в часовій області дозволяє визначити частку втрат для кожного режиму.

Для оцінки впливу вибраного протоколу зв'язку на загальне енергоспоживання сенсорного вузла було проведено порівняльний аналіз основних технологій бездротової передачі даних (Табл. 2.1), що використовуються у розподілених сенсорних мережах.

Таблиця 2.1 — Порівняння енергоспоживання сенсорних вузлів

Протокол	Споживання у sleep режимі, μA	Споживання під час вимірювання, mA	Споживання TX, mA	Споживання RX, mA	Час TX (типичний), ms	Коментар
LoRaWAN	1-10	5-15	20-40	10-15	40-200	Дуже низьке середнє споживання завдяки рідкісним TX
Sigfox	1-5	5-15	20-60	~0	50-200	Односторонній канал → найнижче середнє TX
NB-IoT	5-20	5-20	100-250	30-90	500-2000	Високе навантаження; залежить від операторської мережі
ZigBee	2-10	5-15	25-35	20-35	10-50	Часті обміни, високе RX- навантаження
BLE Mesh	1-5	3-10	10-20	8-15	5-30	Оптимально для коротких пакетів, низьке TX
6LoWPAN	1-10	5-20	20-30	15-30	10-50	Витрати залежать від маршрутизації

Як видно з таблиці, найменше енергоспоживання спостерігається у технологій LPWAN (LoRaWAN, Sigfox), що зумовлено низькою швидкістю передачі та великою дальністю зв'язку, що дозволяє мінімізувати кількість активацій радіомодуля. NB-IoT, хоча і забезпечує високу пропускну здатність, демонструє значно більші витрати енергії через тривалішу процедуру встановлення з'єднання. Короткодіапазонні протоколи (ZigBee, BLE Mesh) мають середнє енергоспоживання, але суттєво меншу дальність передачі, що обмежує їх застосування у великих сільськогосподарських ділянках.

Отримані дані підтверджують, що обрана технологія зв'язку є критичним фактором у забезпеченні тривалої автономної роботи сенсорних вузлів. З огляду на необхідність зменшення активного часу передачі та мінімізації струмів TX, LPWAN-протоколи виявляються найбільш придатними для агропромислових умов. Це безпосередньо обґрунтовує необхідність розробки алгоритмів балансування енергоспоживання, які зменшують кількість передач та оптимізують структуру мережі.

2.4 Формулювання задачі балансування енергоспоживання

Метою функціонування розподіленої сенсорної мережі на агропромисловому полі є довготривалий збір інформації про параметри середовища з необхідною просторовою роздільною здатністю та часовою регулярністю. Кожен сенсорний вузол живиться від автономного джерела і має обмежений енергетичний ресурс. У разі повного вичерпання енергії вузол вибуває з мережі, що призводить до зниження якості моніторингу. Тому постає задача балансування енергоспоживання між вузлами та в часі. Розглянемо математичну модель мережі.

Розглянемо мережу з N сенсорних вузлів. Для кожного вузла $i, i = 1, \dots, N$, відомі: початковий енергетичний запас $E_i^{(0)}$ (Дж або $\text{mA} \cdot \text{год}$); енергія, що витрачається на одну операцію вимірювання E_i^{meas} ; енергія

передавання одного пакета даних до шлюзу (або до наступного вузла) E_i^{tx} ; енергія приймання одного пакета E_i^{rx} .

Нехай протягом деякого проміжку часу мережа працює у раундах збору даних. У k -му раунді вузол i виконує: $n_{i,k}^{meas}$ вимірювань; $n_{i,k}^{tx}$ передавань пакетів; $n_{i,k}^{rx}$ приймань пакетів.

Тоді енергія, яку витрачає вузол i у раунді k :

$$E_{i,k} = n_{i,k}^{meas} E_i^{meas} + n_{i,k}^{tx} E_i^{tx} + n_{i,k}^{rx} E_i^{rx} . \quad (24)$$

Поточний енергетичний запас вузла після k раундів:

$$E_i^{(K)} = E_i^{(0)} - \sum_{k=1}^K E_{i,k} . \quad (25)$$

Мережа вважається працездатною доти, доки виконується умова:

$$E_i^{(K)} = E_{min} \forall i , \quad (26)$$

де: E_{min} – мінімально допустимий запас енергії (поріг відмови).

Основна задача енергетичної оптимізації формулюється як максимізація часу життя мережі або еквівалентна мінімізація сумарного енергоспоживання при заданих вимогах до якості сервісу.

Позначаємо через T_{life} час роботи мережі до моменту, коли перший або певна частка вузлів вичерпаються енергетичний ресурс:

$$T_{life} = \max K \text{ такий, що } E_i^{(K)} > E_{min} \forall i . \quad (27)$$

Тоді цільова функція може бути записана у вигляді:

$$\min_x E_{total}(x) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K E_{i,k}(x), \quad (28)$$

де: x – вектор керованих параметрів (частота вимірювань, інтервали сну, вибір маршруту/кластерів-голів, потужність передавача тощо.)

Оптимізації енергоспоживання має проводитися за умови збереження достовірність та регулярності моніторингу. Це формалізується у вигляді таких обмежень:

- Часова регулярність вимірювань

Нехай Δt_{req} – максимально допустимий інтервал між послідовними вимірюваннями одного параметра в конкретній точці поля (вимога агротехнології). Тоді для кожного вузла:

$$\Delta t_i(x) \leq \Delta t_{req}. \quad (29)$$

- Обмеження на ймовірність втрати пакетів

Нехай $P_{loss}(x)$ – середня ймовірність втрати пакетів у мережі (через колізії, завади, перевищення відстані тощо). Вимога до надійності:

$$P_{loss}(x) \leq P_{loss}^{max}, \quad (30)$$

де: P_{loss}^{max} – максимально допустиме значення (наприклад 5%).

- Обмеження на затримку передачі

Нехай $D_{avg}(x)$ – середня затримка доставки виміряного значення від сенсора до шлюзу/сервера. Для оперативного моніторингу повинно виконуватися:

$$D_{avg}(x) \leq D^{max}, \quad (31)$$

де: D^{max} – максимально допустима затримка (наприклад 1-5 хвилин).

- Баланс енергоспоживання між вузлами

Щоб уникнути ситуації, коли окремі вузли (наприклад, близькі до шлюзу або кластерні голови) вичерпують енергію значно швидше за інші, вводиться критерій рівномірності:

$$\max_i E_i^{(K)} - \min_x E_i^{(K)}, \text{ мінімізувати.} \quad (32)$$

Це забезпечує балансування навантаження: енергія витрачається більш рівномірно по всій мережі, що збільшує корисний час її роботи.

- Формулювання задачі оптимізації

Таким чином, задача балансування енергоспоживання в розподіленій сенсорній мережі може бути сформульована у вигляді:

$$\begin{aligned} & \max_x T_{life}(x) \\ & \text{за умов} \quad \Delta t_i(x) \leq \Delta t_{req}, \forall i, \\ & \quad P_{loss}(x) \leq P_{loss}^{max}, \\ & \quad D_{avg}(x) \leq D^{max}, \\ & \quad E_i^{(K)} = E_{min}, \forall i, \\ & \quad \max_i E_i^{(K)} - \min_x E_i^{(K)}. \end{aligned} \quad (33)$$

У рамках даної магістерської роботи вектор керованих параметрів x включатиме, зокрема, правила вибору вузлів-лідерів та стратегію їх ротації, параметри режимів сну та частоту вимірювань. У наступному розділі буде запропоновано та досліджено модифікований енергоефективний алгоритм балансування на основі LEACH, що реалізує сформульовану задачу оптимізації для сенсорної мережі на базі протоколу LoRaWAN.

2.5 Вибір методів оптимізації енергоспоживання сенсорної мережі

Ефективність функціонування розподілених сенсорних мереж значною мірою залежить від раціонального використання енергетичних ресурсів окремих вузлів. Оскільки сенсорні модулі в агропромислових системах працюють переважно автономно й упродовж тривалого часу, питання оптимізації енергоспоживання є ключовим для забезпечення сталості моніторингу та мінімізації простоїв. З огляду на сформульовану математичну постановку задачі, необхідно обрати методи оптимізації, які забезпечать баланс між енергетичною ефективністю та якісними показниками роботи мережі.

У сучасних сенсорних мережах використовують різні підходи до зниження енергоспоживання, зокрема: адаптивні режими сну, регулювання частоти дискретизації, компресію даних, оптимізацію інтервалів передавання інформації та енергоефективні методи маршрутизації. Проте для великих територій агропромислового призначення, де вузли розташовані на значних відстанях один від одного, найбільш ефективними виявляються кластерні методи маршрутизації, які дозволяють зменшити кількість енерговитратних передач на великі дистанції.

Одним із найбільш поширених методів такого типу є алгоритм LEACH. Його використання забезпечує: рівномірний розподіл енергетичного навантаження між вузлами за рахунок ротації кластерних голів; зменшення кількості передач на великі відстані (кластерні голови виконують агрегацію та ретрансляцію даних); низькі накладні витрати на організацію кластерної структури; автономність і адаптивність до змін топології мережі.

Зазначені властивості дають змогу значно підвищити довговічність сенсорної мережі. Однак класичний LEACH має обмеження, що знижують його ефективність у реальних умовах агропромислових полів. Зокрема, алгоритм: не враховує залишковий заряд батареї окремих вузлів при виборі кластерних голів; не бере до уваги відстань до шлюзу, що призводить до нерівномірного

виснаження енергії; має фіксовану ймовірність вибору голови, яка не адаптується до умов мережі.

Отже, існуючий алгоритм вимагає модифікації, ключовою метою якої є пролонгація терміну автономного функціонування системи через підвищення його енергоефективності.

Для повноти аналізу доцільно розглянути також альтернативні підходи до зниження енергоспоживання, оцінити їх обмеження та визначити причини, з яких вони виявляються менш ефективними порівняно з обраним кластерним методом.

- Адаптивна частота вимірювань. Цей метод дозволяє частково зменшити енергоспоживання, проте він не забезпечує балансування енергетичних витрат між вузлами та не усуває проблему надмірних навантажень на вузли, розташовані ближче до шлюзу;

- Оптимізація потужності передавання. Хоча регулювання потужності передавача у протоколі LoRaWAN може бути ефективним, воно потребує регулярної оцінки якості каналу, що, у свою чергу, збільшує енергоспоживання. Крім того, зниження потужності може призвести до зростання ймовірності втрати пакетів;

- Багатохопова маршрутизація. У мережах LoRaWAN вона застосовується рідко та є неефективною у великих однорівневих топологіях через значні накладні витрати та складність реалізації.

Таким чином, альтернативні методи не забезпечують необхідного рівня оптимізації для умов агропромислових систем контролю.

З огляду на викладене, у межах даної магістерської роботи обрано модифікований кластерний алгоритм на основі LEACH, який передбачає: урахування залишкового заряду батареї (SoC) при виборі кластерної голови; урахування відстані до шлюзу з метою мінімізації енергетичної вартості передачі; оптимізацію частоти вимірювань залежно від характеру динаміки параметрів середовища; адаптивне регулювання інтервалів передачі даних, що

зменшує кількість циклів ТХ; забезпечення рівномірного розподілу навантаження між усіма вузлами.

Такий підхід забезпечує досягнення цілей, сформульованих у підпункті 2.4, а саме: мінімізації сумарного енергоспоживання мережі; збільшення часу автономної роботи системи; підвищення рівномірності енергетичного навантаження; забезпечення стабільності та надійності каналів зв'язку.

Оптимальний метод обирається згідно з критерієм:

$$Method_{opt} = \arg \min_{method} E_{total} \quad (34)$$

за умови забезпечення $P_{loss} \leq P_{loss}^{max}, D \leq D^{max}, \Delta t \leq \Delta t_{req}$.

Модифікований LEACH задовольняє зазначені обмеження й забезпечує оптимальний компроміс між енергетичною ефективністю, простотою реалізації та адаптивністю до умов агропромислових полів. На цій підставі його обрано як основний метод оптимізації, який буде реалізовано та досліджено у наступному розділі.

3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО АЛГОРИТМУ

3.1 Обґрунтування вибору підходу

Розробка енергоефективних алгоритмів керування розподіленими сенсорними мережами є складною багатокритеріальною задачею, що вимагає врахування апаратних особливостей вузлів, топології мережі, характеристик каналу зв'язку та умов експлуатації. Для агропромислових систем моніторингу визначальним обмеженням є автономне живлення сенсорних вузлів, що унеможлиблює застосування енергоємних методів маршрутизації та зумовлює необхідність використання спеціалізованих підходів до балансування енергоспоживання.

Аналіз існуючих методів зниження енергоспоживання, проведений у розділі 2, показав, що такі підходи, як фіксоване або адаптивне регулювання частоти вимірювань, оптимізація потужності передавача та багатохопова маршрутизація, мають обмежену ефективність у мережах з великою площею покриття та низькою щільністю вузлів. Зазначені методи не забезпечують рівномірного розподілу енергетичного навантаження або супроводжуються зростанням накладних витрат на організацію обміну даними.

У зв'язку з цим у даній роботі обрано кластерний підхід до організації сенсорної мережі, який дозволяє зменшити кількість далекодистанційних передач та локалізувати енергоємні операції в обмеженій кількості вузлів. Як базовий алгоритм розглядається LEACH, що забезпечує балансування енергоспоживання завдяки ротації кластерних голів і характеризується простотою реалізації.

Водночас класичний алгоритм LEACH не враховує залишковий заряд батареї вузлів, їх просторове розташування відносно шлюзу та динаміку змін контрольованих параметрів середовища, що може призводити до передчасного виснаження окремих елементів мережі. Тому у роботі запропоновано

модифікований алгоритм на основі LEACH, який поєднує кластерну організацію мережі з адаптивними механізмами керування режимами роботи сенсорних вузлів.

Запропонований підхід передбачає врахування залишкового заряду батареї та відстані до шлюзу під час вибору кластерних голів, а також адаптивне регулювання частоти вимірювань і передачі даних залежно від динаміки змін параметрів середовища. Це створює передумови для зменшення енергетичних витрат, рівномірного розподілу навантаження між вузлами та збільшення часу автономної роботи мережі, що обґрунтовує доцільність подальшого дослідження запропонованого підходу.

3.2 Структура сенсорного вузла та архітектура системи

Для реалізації запропонованого алгоритму балансування енергоспоживання необхідно визначити апаратну структуру сенсорного вузла та загальну архітектуру системи збору даних. У цьому розділі розглядається типовий склад сенсорного вузла агропромислової сенсорної мережі, а також принципи побудови архітектури системи з урахуванням вимог енергоефективності, автономності та дальності бездротового зв'язку.

3.2.1 LPWAN-технології

Для реалізації запропонованого алгоритму балансування енергоспоживання розглянуто типову апаратну структуру сенсорного вузла (Рис. 3.1), призначеного для роботи у складі розподіленої сенсорної мережі агропромислового призначення. Структура сенсорного вузла формується з урахуванням вимог до мінімального енергоспоживання, автономності роботи та підтримки бездротового зв'язку на великих відстанях.

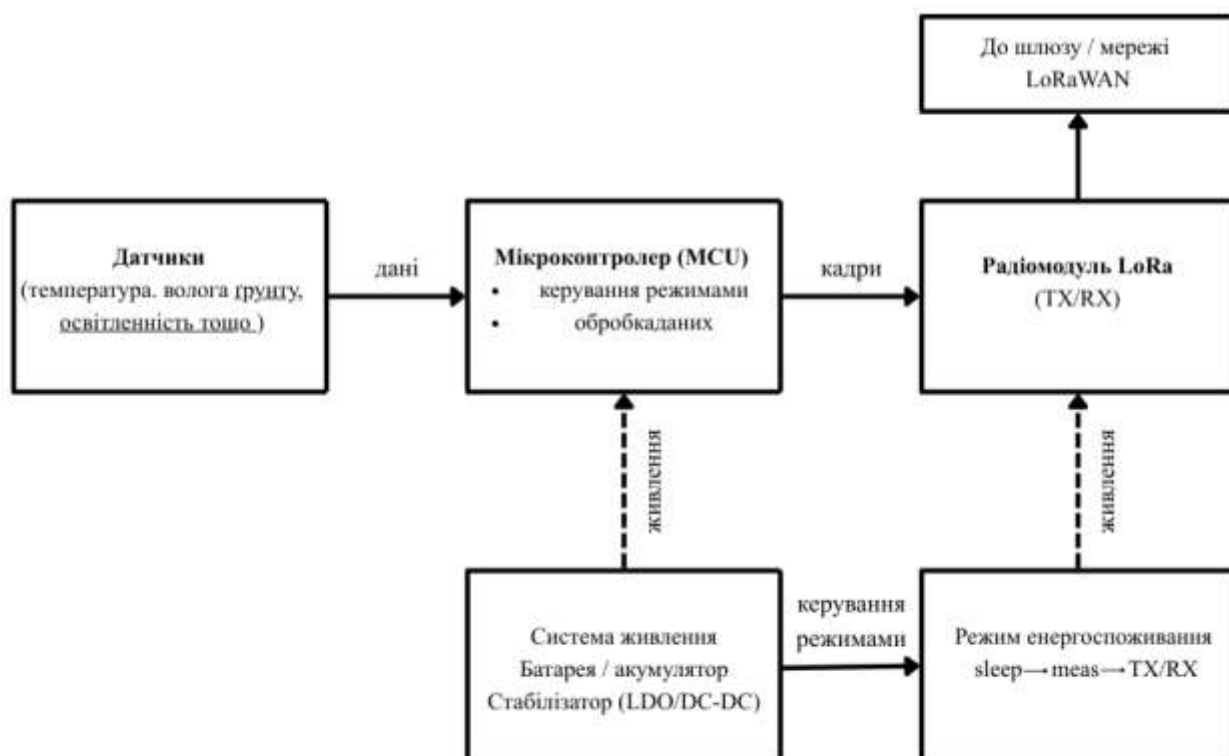


Рисунок 3.1 — Структурна схема сенсорного вузла

На рисунку 3.1 наведено структурну схему сенсорного вузла, яка відображає основні функціональні блоки та їх взаємодію між собою. Схема має узагальнений характер і використовується для пояснення принципів функціонування вузла без деталізації електричних з'єднань.

- **Мікроконтролер.** Центральним елементом сенсорного вузла є мікроконтролер з низьким енергоспоживанням (low-power MCU), який виконує функції керування роботою вузла, обробки вимірювальних даних та організації обміну інформацією з радіомодулем. Мікроконтролер забезпечує перемикання між режимами енергоспоживання (сон, вимірювання, передача даних), що є критично важливим для реалізації алгоритмів балансування енергії. Саме на рівні мікроконтролера реалізується логіка адаптивного керування інтервалами вимірювань і передачі даних.

- **Вимірювальні датчики.** До складу сенсорного вузла входять вимірювальні датчики, призначені для контролю параметрів агропромислового

середовища, зокрема температури, вологості ґрунту, вологості повітря або інших фізичних величин. Датчики активуються мікроконтролером лише на час проведення вимірювань, після чого переводяться у режим низького енергоспоживання або повністю знеструмлюються. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити середнє енергоспоживання сенсорного вузла.

- Радіомодуль LoRa. Для бездротової передачі даних у мережі використовується радіомодуль стандарту LoRa, який забезпечує далекобійний зв'язок при низькому енергоспоживанні. Радіомодуль активується лише у моменти передавання або приймання даних, тоді як у решту часу перебуває в режимі сну. Оскільки передача даних є найбільш енерговитратною операцією, алгоритм балансування енергоспоживання передбачає мінімізацію кількості сеансів зв'язку та оптимізацію їх тривалості.

- Система живлення. Вона включає автономне джерело енергії (батарею або акумулятор), а також елементи стабілізації напруги. Характеристики джерела живлення безпосередньо впливають на тривалість автономної роботи вузла та враховуються при оцінці енергетичного балансу. У межах даної роботи розглядається робота вузла без зовнішнього підживлення, що відповідає умовам експлуатації в агропромислових системах.

- Режим енергоспоживання. Сенсорний вузол функціонує у кількох режимах енергоспоживання: режимі сну, режимі вимірювання та режимі передавання/приймання даних. Перемикання між режимами здійснюється під керуванням мікроконтролера відповідно до алгоритму роботи мережі. Запропонований у даній роботі підхід передбачає адаптивне керування тривалістю кожного режиму з метою зменшення сумарного енергоспоживання та рівномірного розподілу навантаження між вузлами.

Таким чином, структурна схема сенсорного вузла визначає апаратну основу для реалізації алгоритмів балансування енергоспоживання та забезпечує зв'язок між програмною логікою керування і фізичними характеристиками елементів вузла.

3.2.2 Архітектура сенсорної мережі

Архітектура сенсорної мережі визначає принципи взаємодії між окремими сенсорними вузлами, комунікаційною інфраструктурою та серверною частиною системи збору й обробки даних. Для задач агропромислового моніторингу, що розглядаються в даній роботі, обрано ієрархічну архітектуру з використанням технології LoRaWAN, яка забезпечує значну дальність зв'язку при низькому енергоспоживанні сенсорних вузлів.

Сенсорні вузли рівномірно розміщуються на території поля відповідно до вимог просторової дискретизації контрольованих параметрів (вологість ґрунту, температура, освітленість тощо). Кожен вузол функціонує автономно, здійснюючи періодичне вимірювання параметрів середовища та передавання результатів вимірювань по бездротовому каналу зв'язку. Прямий обмін даними між сенсорними вузлами в базовій архітектурі не передбачається, що дозволяє зменшити накладні витрати та спростити управління мережею.

Передавання даних від сенсорних вузлів здійснюється до шлюзу LoRaWAN, який виконує функцію концентратора мережевого трафіку. Шлюз забезпечує приймання повідомлень від великої кількості вузлів, їх буферизацію та подальшу передачу до серверної частини системи через IP-мережу (Ethernet або мобільний зв'язок). При цьому шлюз не виконує складної обробки даних, що відповідає концепції мінімізації затримок і зниження вимог до обчислювальних ресурсів на проміжних рівнях системи.

Сервер збору та обробки даних є центральним елементом архітектури мережі. На сервері здійснюється приймання телеметричної інформації, її збереження у базі даних, попередня обробка, аналіз та візуалізація. Крім того, серверна частина відповідає за формування керуючих параметрів мережі, зокрема інтервалів передавання даних, режимів роботи вузлів та інших параметрів, що можуть впливати на енергоспоживання системи.

Потоки даних у сенсорній мережі мають переважно висхідний характер, оскільки основною функцією системи є передавання вимірюваних параметрів від

сенсорних вузлів до серверу. Низхідні повідомлення використовуються обмежено та призначені для конфігурації вузлів або коригування режимів їх роботи. Такий підхід дозволяє зменшити частоту енерговитратних операцій приймання даних на сенсорних вузлах та підвищити загальну енергоефективність мережі.

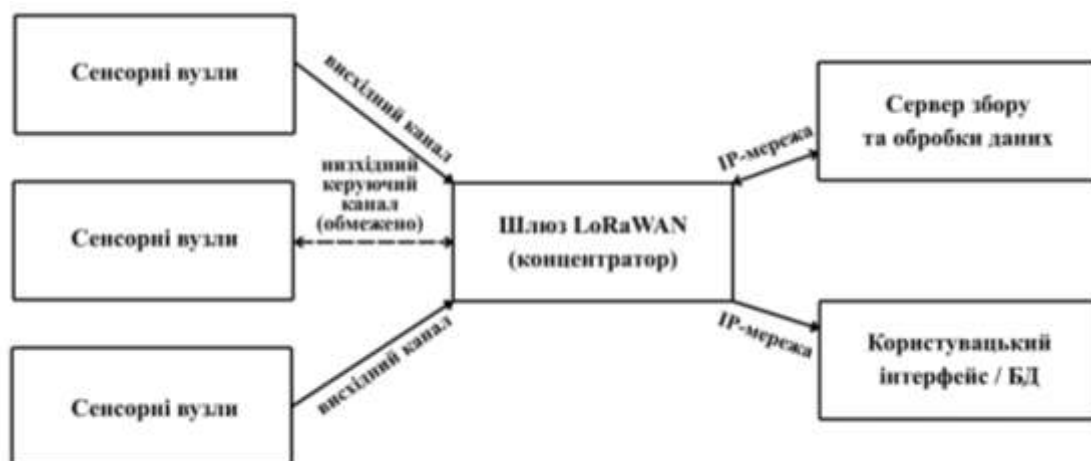


Рисунок 3.2 — Структурна схема архітектури сенсорної мережі

3.3 Принципова електрична схема сенсорного вузла

Для реалізації запропонованого алгоритму балансування енергоспоживання розглянуто типову апаратну реалізацію сенсорного вузла, призначеного для автономного функціонування в складі розподіленої сенсорної мережі агропромислового призначення. Основною вимогою до апаратної частини є мінімальне енергоспоживання за умови забезпечення надійного збору, обробки та передавання вимірювальних даних на значні відстані.

На рисунку 3.3 наведено принципову електричну схему сенсорного вузла, що включає мікроконтролер, радіомодуль LoRa, вимірювальні інтерфейси та автономне джерело живлення з елементами стабілізації напруги. Обрана структура відповідає сучасним підходам до побудови low-power IoT-пристроїв і забезпечує можливість програмної оптимізації енергоспоживання.

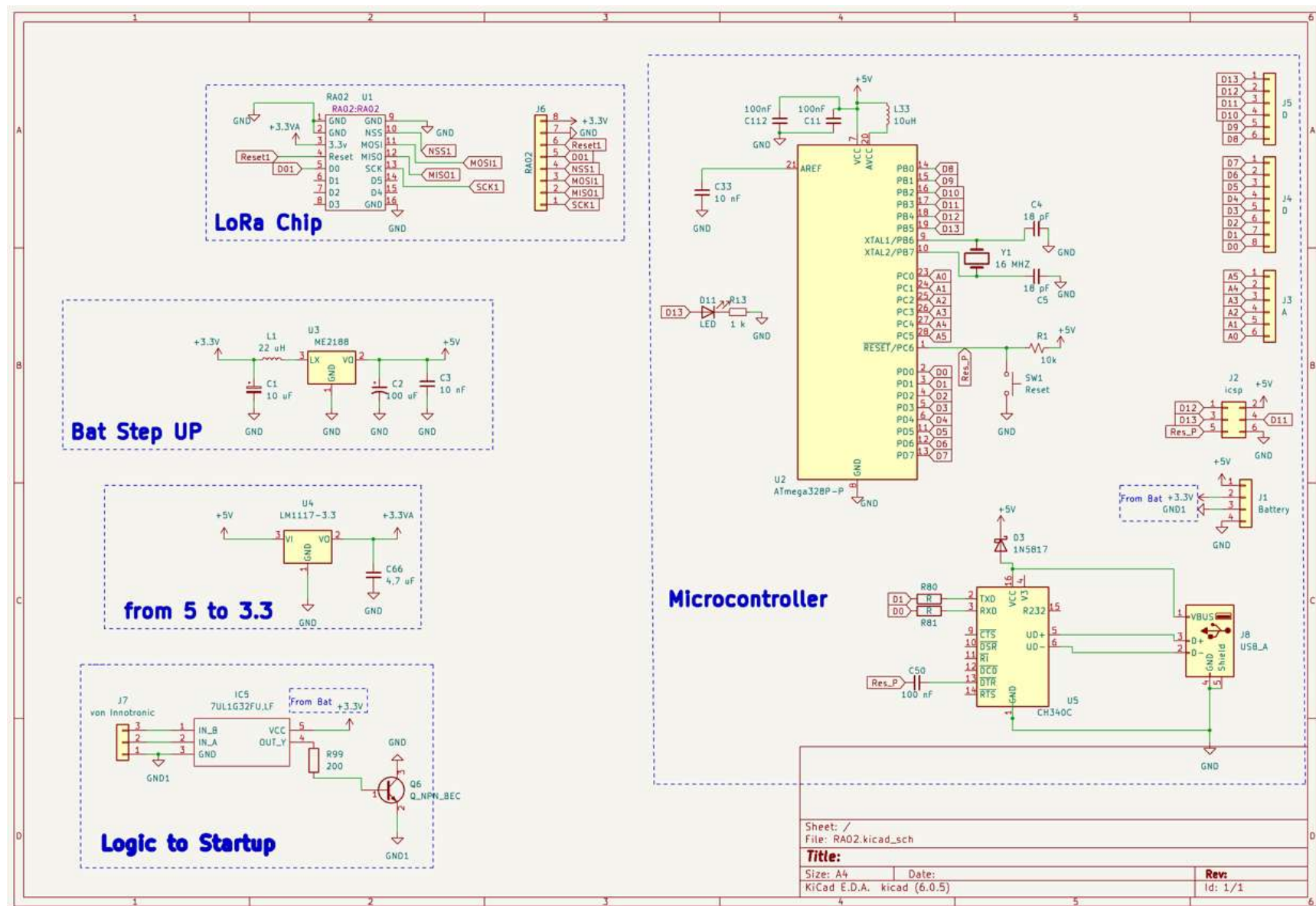


Рисунок 3.3 — Принципова електрична схема сенсорного вузла з LoRa-модулем

Центральним елементом сенсорного вузла є мікроконтролер ATmega328P, який виконує функції керування режимами роботи вузла, опитування датчиків, формування пакетів даних та керування обміном з радіомодулем. Мікроконтролер працює при напрузі живлення 3,3 В, що є оптимальним з точки зору зниження енергоспоживання та сумісності з більшістю сучасних радіомодулів LPWAN.

Мікроконтролер підтримує кілька режимів енергозбереження, зокрема Idle, Power-down та Standby, що дозволяє суттєво зменшити середній струм споживання під час простою між циклами вимірювання та передачі даних. Саме можливість переходу мікроконтролера в глибокі режими сну є базовою передумовою реалізації алгоритму балансування енергоспоживання, розробленого в межах даної роботи.

Передавання даних у сенсорному вузлі реалізовано за допомогою LoRa-модуля (типу RA-02 на базі чипа SX127x), підключеного до мікроконтролера через інтерфейс SPI. Радіомодуль працює в неліцензованому діапазоні частот та підтримує різні параметри модуляції, що дозволяє адаптувати дальність зв'язку, швидкість передачі та рівень енергоспоживання.

Режими передачі (TX) та приймання (RX) є найбільш енерговитратними в циклі роботи вузла. У зв'язку з цим, у запропонованій схемі передбачено можливість програмного керування активністю радіомодуля, включаючи його повне відключення або переведення в режим сну в проміжках між сеансами зв'язку. Це безпосередньо узгоджується з логікою модифікованого алгоритму LEACH, де кількість і тривалість сеансів передавання мінімізується.

Живлення сенсорного вузла здійснюється від автономного джерела — батареї, що є типовим для агропромислових систем, які експлуатуються у віддалених районах без доступу до електромережі. Для забезпечення стабільної роботи електронних компонентів у схемі реалізовано багаторівневу систему перетворення напруги.

Первинне підвищення напруги здійснюється за допомогою DC-DC перетворювача (Step-Up), після чого напруга стабілізується до рівня 3,3 В за

допомогою лінійного стабілізатора. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільне живлення мікроконтролера та радіомодуля навіть при зниженні напруги батареї в процесі розряду.

Використання стабілізаторів з низьким струмом спокою є критичним фактором для зменшення паразитного енергоспоживання в режимах сну, що особливо важливо для тривалої автономної роботи сенсорного вузла.

Розглянута принципова електрична схема дозволяє чітко ідентифікувати основні джерела енергоспоживання сенсорного вузла: мікроконтролер, радіомодуль та систему живлення. Саме ці блоки визначають форму енергетичного профілю вузла в різних режимах роботи — сну, вимірювання та передачі даних.

Завдяки програмному керуванню режимами роботи мікроконтролера та радіомодуля, а також оптимізації інтервалів активності, апаратна структура забезпечує можливість реалізації алгоритмів балансування енергоспоживання, спрямованих на рівномірне використання енергетичних ресурсів усіх вузлів мережі.

Енергоспоживання сенсорного вузла формується сумарним внеском окремих апаратних блоків, кожен з яких характеризується власним режимом роботи та струмом споживання (Табл. 3.1).

Таблиця 3.1 — Основні апаратні блоки сенсорного вузла та їх енергетичні характеристики

Апаратний блок	Напруга живлення, В	Струм споживання	Режим роботи	Примітка
Мікроконтролер ATmega328P	3.3	5-10 мА	Активний	Обробка даних
1	2	3	4	5

1	2	3	4	5
Мікроконтролер ATmega328P	3.3	1-5 мкА	Сплячий	Основний режим
LoRa-модуль (RA-02)	3.3	20-120 мА	TX	Найбільші втрати
LoRa-модуль (RA-02)	3.3	10-15 мА	RX	Короткочасно
LoRa-модуль (RA-02)	3.3	< 1 мкА	Сплячий	Поза передачею
DC-DC перетворювач	3.3-5	10-50 мкА	Очікування	Фонове споживання
Датчики	3.3	1-10 мА	Вимірювання	Короткі імпульси

Енергоспоживання сенсорного вузла формується сумарним внеском окремих апаратних блоків, кожен з яких характеризується власним режимом роботи та струмом споживання.

3.4 Математичний опис алгоритму балансування енергоспоживанням

Функціонування автономного сенсорного вузла в агропромисловій бездротовій мережі характеризується циклічною зміною режимів роботи, кожен з яких має різний рівень енергоспоживання. Для формального опису процесів споживання енергії та подальшої оптимізації розглянемо математичну модель енергетичного балансу сенсорного вузла.

Робота сенсорного вузла подається у вигляді послідовності дискретних станів: режим сну; режим вимірювання; режим передавання даних (TX); режим приймання службових повідомлень (RX).

Сумарне енергоспоживання вузла за один цикл роботи може бути описане як:

$$E_{cycle} = E_{sleep} + E_{meas} + E_{TX} + E_{RX} , \quad (35)$$

де: $E_{sleep} + E_{meas} + E_{TX} + E_{RX}$ — енерговитрати у відповідних режимах.

Кожна складова визначається як добуток струму споживання, напруги живлення та тривалості перебування у відповідному режимі:

$$E_i = U \cdot I_i \cdot t_i , \quad (36)$$

де: U — напруга живлення сенсорного вузла; I_i — струм споживання в режимі i ; t_i — тривалість режиму i .

Залишковий заряд батареї сенсорного вузла на момент часу k визначається як:

$$Q_k = Q_{k-1} - \Delta Q_k , \quad (37)$$

де: Q_{k-1} — заряд батареї після попереднього циклу; ΔQ_k — витрачений заряд за поточний цикл роботи.

Величина ΔQ_k безпосередньо пов'язана з сумарним енергоспоживанням:

$$\Delta Q_k = \frac{E_{cycle}}{U} . \quad (38)$$

Таким чином, динаміка розряду батареї визначається режимами роботи вузла та частотою виконання циклів вимірювання і передачі.

Основною ідеєю запропонованого алгоритму є адаптивне регулювання інтервалу між передачами даних залежно від: залишкового заряду батареї Q_k ;

швидкості зміни контрольованих параметрів середовища; o — ролі вузла в кластерній структурі мережі.

Інтервал передачі визначається як:

$$T_{TX} = f(Q_k, \Delta x, R), \quad (39)$$

де: Δx — швидкість зміни вимірювання параметра; R — роль вузла (звичайний вузол або кластерна голова).

При малих змінах параметрів середовища та зменшенні залишкового заряду батареї інтервал передачі збільшується, що дозволяє зменшити кількість енерговитратних операцій TX. У випадку різких змін контрольованих параметрів або виконання вузлом функцій кластерної голови інтервал передачі зменшується для забезпечення актуальності даних.

Задача балансування енергоспоживання формулюється як задача мінімізації сумарного енергоспоживання мережі:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^N E_{cycle,i} \rightarrow \min, \quad (40)$$

за умов обмежень:

$$\begin{cases} Q_i > Q_{min} \\ P_{loss} \leq P_{loss}^{max} \\ D \leq D^{max} \\ T_{TX} \leq T_{req} \end{cases}, \quad (41)$$

де: N — кількість вузлів у мережі; P_{loss} — імовірність втрати пакетів; D — затримка передачі; T_{req} — допустимий інтервал оновлення даних.

Алгоритм роботи сенсорного вузла реалізується у вигляді автомата станів:

- Sleep — мінімальне енергоспоживання, очікування події або таймера;
- Meas — зчитування даних з датчиків;

- Decision — оцінка необхідності передачі даних;
- TX/RX — передача або приймання інформації;
- Повернення у режим Sleep.

Запропонована модель дозволяє формально описати вплив кожного режиму роботи на енергоспоживання та створює основу для подальшого моделювання ефективності алгоритму балансування енергії.

3.5 Модифікований алгоритм балансування енергоспоживання сенсорного вузла

У стандартних підходах до роботи автономних сенсорних вузлів у бездротових мережах інтервал між вимірюваннями та передаванням даних, як правило, є фіксованим або змінюється за заздалегідь заданим розкладом. Такий підхід не враховує поточний стан батареї сенсорного вузла та динаміку змін контрольованих параметрів середовища, що призводить до нераціонального використання енергії та передчасного вичерпання ресурсу автономного живлення.

З метою підвищення енергоефективності в даній роботі запропоновано модифікований алгоритм балансування енергоспоживання, який реалізує адаптивне керування режимами роботи сенсорного вузла та інтервалами передавання даних на основі оцінки залишкового заряду батареї і необхідності актуалізації вимірюваної інформації.

Робота сенсорного вузла організована у вигляді циклічного алгоритму, що складається з послідовності дискретних станів, показаних на рисунку 3.4. Основною метою алгоритму є мінімізація сумарного енергоспоживання за рахунок скорочення кількості енерговитратних операцій та максимального використання режимів зниженого споживання енергії.

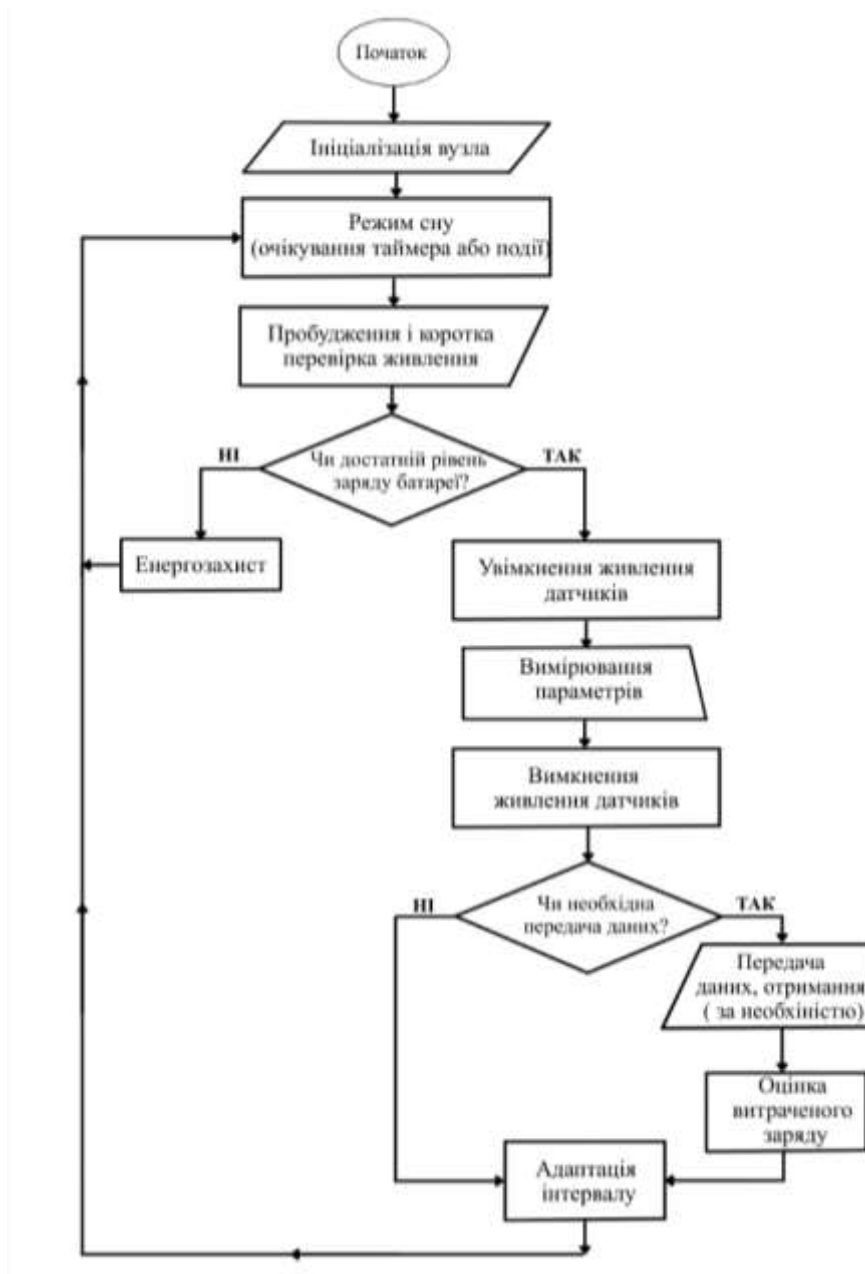


Рисунок 3.4 — Блок-схема алгоритму балансування енергоспоживання сенсорного вузла

На початковому етапі відбувається ініціалізація сенсорного вузла, під час якої налаштовуються периферійні модулі мікроконтролера, інтерфейси зв'язку та таймери. Після цього вузол переходить у режим сну, в якому перебуває до моменту настання події пробудження, зумовленої таймером або зовнішнім сигналом.

Після пробудження сенсорного вузла виконується коротка перевірка рівня заряду батареї. На цьому етапі здійснюється оцінка залишкового заряду Q_k шляхом вимірювання напруги живлення та порівняння її з мінімально допустимим рівнем.

У випадку, якщо рівень заряду батареї є критично низьким, вузол переходить у режим енергозахисту, в якому виконуються лише мінімально необхідні операції, після чого здійснюється повернення у режим сну з максимально збільшеним інтервалом очікування.

За умови достатнього рівня заряду батареї активується живлення вимірювальних датчиків, після чого здійснюється зчитування контрольованих параметрів середовища. Після завершення вимірювань живлення датчиків вимикається з метою зменшення енергоспоживання у неактивній фазі роботи.

У випадку, якщо зміни параметрів є незначними і не потребують негайної актуалізації даних, передавання відкладається, що дозволяє зменшити кількість енерговитратних сеансів зв'язку.

За умови необхідності передавання виконується передача даних через радіомодуль LoRa, після чого оцінюється витрачений заряд батареї, пов'язаний з операціями передавання та приймання службових повідомлень.

Після завершення активної фази роботи виконується адаптація інтервалу між наступними циклами роботи сенсорного вузла. Значення інтервалу передавання визначається відповідно до функціональної залежності.

$$T_{TX} = f(Q_k, \Delta x, R), \quad (43)$$

що була формально описана у розділі 3.4. При зменшенні залишкового заряду батареї або за умови стабільності параметрів середовища інтервал між передаваннями збільшується, що дозволяє знизити середній струм споживання вузла.

Після завершення всіх операцій сенсорний вузол переходить у режим сну, де перебуває до наступного циклу пробудження.

На відміну від стандартних алгоритмів з фіксованим інтервалом передавання даних, запропонований модифікований алгоритм: вразовує поточний стан сенсорного вузла; реалізує адаптивне керування режимами роботи; забезпечує більш рівномірний розподіл енергоспоживання у часі.

Запропонований алгоритм створює основу для подальшого моделювання та кількісної оцінки ефективності балансування енергоспоживання сенсорної мережі, що буде розглянуто в наступному розділі.

3.6 Методика моделювання та критерії оцінювання ефективності адаптивного алгоритму

Для оцінки ефективності запропонованого алгоритму адаптивного збору даних у сенсорній мережі було використано метод імітаційного моделювання. Обраний підхід дозволяє відтворити поведінку реального сенсорного вузла в керованих умовах без необхідності використання фізичного апаратного стенда, що є доцільним на етапі дослідження та порівняльного аналізу алгоритмів.

Імітаційне моделювання полягає у програмному відтворенні ключових процесів роботи системи, зокрема циклів сну та активності сенсорного вузла, виконання вимірювань, передачі даних та споживання енергії окремими компонентами. У даній роботі модель реалізована мовою Python у середовищі Google Colaboratory, що забезпечує відтворюваність результатів та зручність аналізу.

У межах моделі імітується робота типового IoT-вузла на базі мікроконтролера ATmega328P з радіомодулем LoRa SX1276/78, живленого від автономного джерела енергії. Для кожного режиму роботи вузла задані характерні значення струмів споживання: режим глибокого сну, активний режим мікроконтролера, робота сенсорів та передача даних по радіоканалу. Таким чином, енергоспоживання вузла формується як сума витрат енергії на виконання цих операцій у часі.

Моделювання проводиться для двох сценаріїв:

- базового алгоритму, в якому передача даних здійснюється з фіксованим інтервалом (300 с);
- адаптивного алгоритму, запропонованого в роботі, який змінює інтервал передачі залежно від динаміки вимірюваного параметра та поточного рівня заряду батареї.

Вхідним сигналом для моделі є синтетично сформований часовий ряд, що імітує зміну фізичного параметра середовища (наприклад, температури) з урахуванням шуму та короткочасної аномалії. Це дозволяє перевірити здатність алгоритму реагувати на різкі зміни параметра та водночас зменшувати кількість передач у стабільних умовах.

За результатами моделювання (Рис. 3.5) встановлено, що за період 72 годин роботи рівень заряду батареї для базового алгоритму зменшився приблизно з 100 % до 98,7 %, тоді як для адаптивного алгоритму — лише до 99,6 %. Таким чином, швидкість зниження рівня заряду батареї у випадку адаптивного алгоритму є майже в 3,5 раза меншою, що свідчить про значно ефективніше використання енергетичного ресурсу.

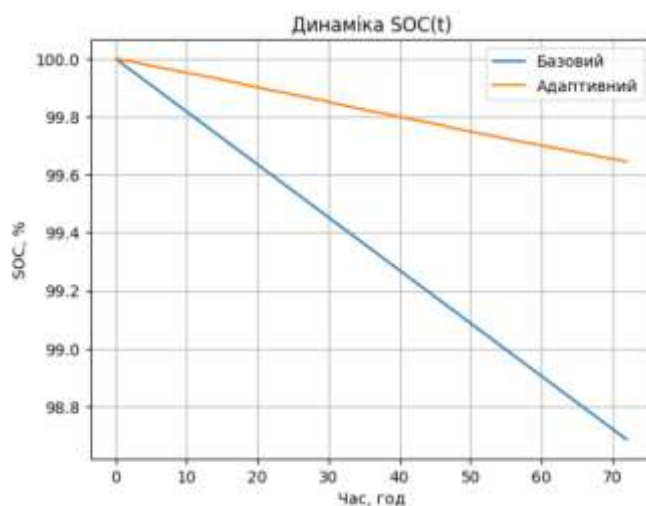


Рисунок 3.5 — Динаміка зміни рівня заряду батареї у часі.

Аналіз графіка залишку заряду батареї $Q(t)$ (Рис. 3.6) показує, що після завершення моделювання залишок заряду для базового алгоритму становив 2,368 Ah, тоді як для адаптивного алгоритму — 2,391 Ah. Різниця у 0,023 Ah за відносно короткий період експерименту є суттєвою для автономних сенсорних вузлів та вказує на накопичувальний ефект економії енергії при тривалій експлуатації.

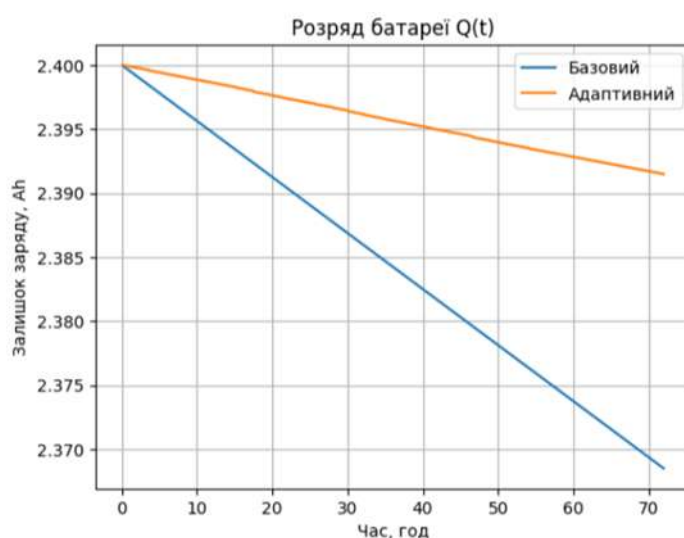


Рисунок 3.6 — Разряд батареи

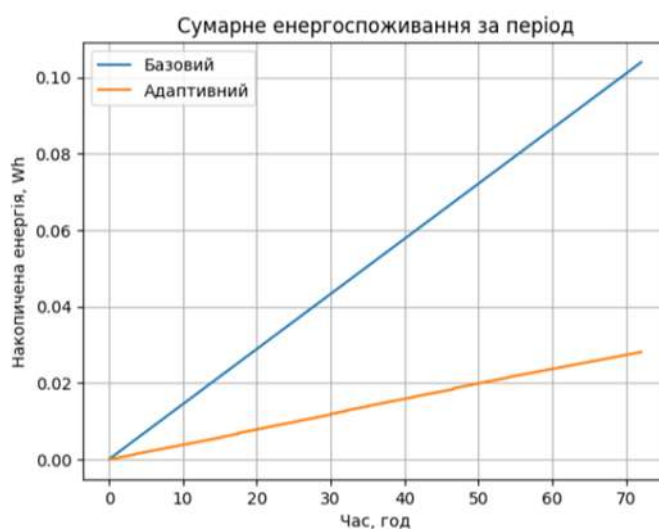


Рисунок 3.7 — Сумарне енергоспоживання за період

Згідно з результатами імітаційного моделювання (Рис. 3.7), сумарне енергоспоживання сенсорного вузла за період 72 годин для базового алгоритму склало 0,104 Wh, тоді як для адаптивного алгоритму — лише 0,028 Wh. Це означає, що запропонований підхід дозволяє зменшити енергоспоживання приблизно у 3,7 раза, що є критично важливим для систем з автономним живленням.

Оцінка середнього струму споживання показала (Рис. 3.8), що для базового алгоритму середній струм протягом експерименту залишався на рівні близько 0,40 мА, тоді як для адаптивного алгоритму він поступово зменшувався та стабілізувався на рівні 0,10–0,12 мА. Зменшення середнього струму більш ніж у 3 рази безпосередньо впливає на збільшення ресурсу батареї та стабільність роботи вузла.

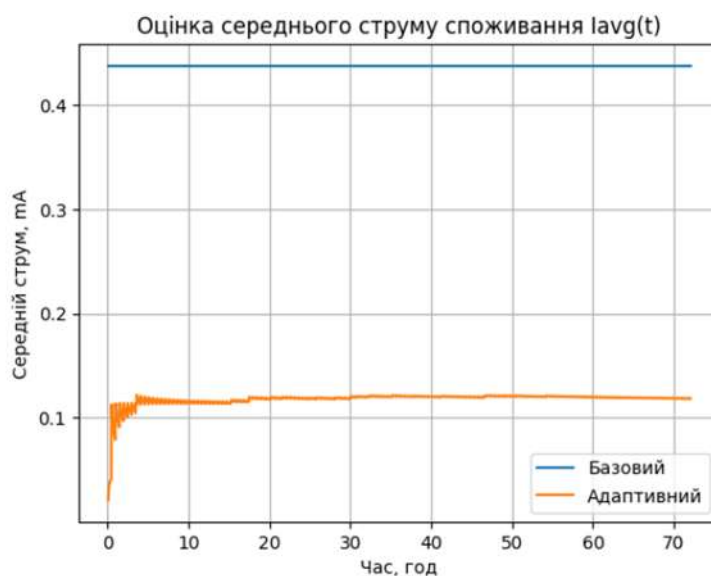


Рисунок 3.8 — Середній струм споживання

Як видно з графіка порівняння кількості ТХ (Рис. 3.9), за період моделювання базовий алгоритм виконав 864 передачі, тоді як адаптивний алгоритм — лише 155 передач. Таким чином, запропонований метод дозволяє зменшити кількість передач у 5,6 раза. Отримане зменшення кількості ТХ

безпосередньо пояснює суттєве зниження сумарного енергоспоживання та середнього струму споживання, показане на попередніх графіках.

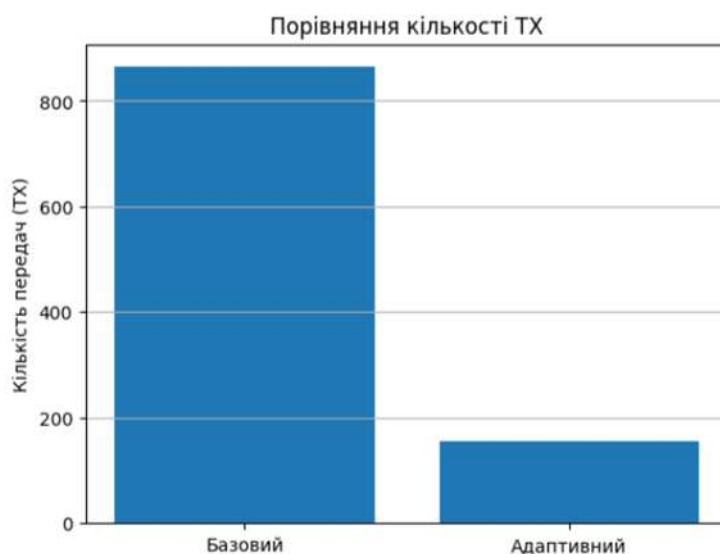


Рисунок 3.9 — Порівняння кількості ТХ

Слід зазначити, що при однаковому часовому горизонті моделювання обидва алгоритми забезпечили безперервну роботу сенсорного вузла. Водночас адаптивний алгоритм досяг цього результату за значно меншої кількості передач та нижчого енергоспоживання, що підтверджує його ефективність з точки зору оптимізації використання ресурсу батареї.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглянуто актуальну задачу підвищення енергоефективності сенсорних вузлів у розподілених системах збору інформації, що функціонують в умовах агропромислового середовища. Обмежені енергетичні ресурси автономних сенсорних вузлів та необхідність їхньої тривалої безперервної роботи обумовлюють потребу у розробці адаптивних методів керування енергоспоживанням. У першому розділі виконано аналітичний огляд сучасних сенсорних мереж і методів зниження енергоспоживання, що дозволило сформулювати вимоги до енергоефективної системи моніторингу.

У другому розділі роботи обґрунтовано структуру сенсорного вузла та визначено основні фактори, що впливають на енергоспоживання, зокрема режими роботи мікроконтролера, датчиків і радіомодуля. Сформульовано базовий алгоритм передавання даних із фіксованим інтервалом, який використано як еталон для подальшого порівняльного аналізу.

У третьому розділі запропоновано адаптивний алгоритм балансування енергоспоживання, що враховує динаміку зміни вимірюваного параметра та поточний стан заряду батареї сенсорного вузла. Для перевірки ефективності підходу виконано імітаційне моделювання в програмному середовищі Python з використанням параметрів, характерних для сенсорного вузла з радіомодулем LoRa.

Результати імітаційного моделювання підтвердили, що запропонований алгоритм забезпечує зменшення середнього енергоспоживання та збільшення часу автономної роботи сенсорного вузла порівняно з базовим алгоритмом. Отримані результати свідчать про доцільність застосування розробленого підходу в розподілених системах збору інформації агропромислового призначення та можливість його подальшої практичної реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

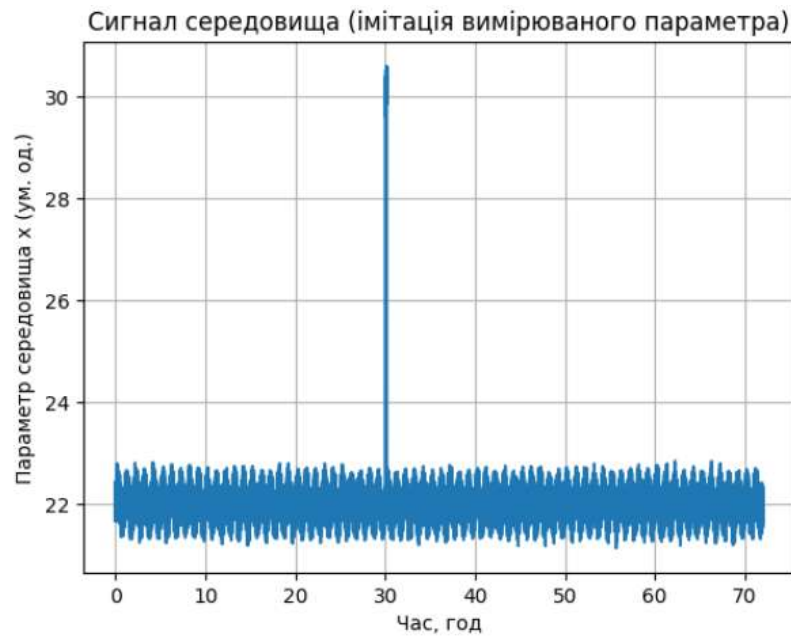
1. LoRa. *LoRa*. 19.09.2018. URL: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/> (access date: 26.11.2025).
2. Alqurashi H., Bouabdallah F. SCAP SigFox: A Scalable Communication Protocol for Low-Power Wide-Area IoT Networks. *MDPI*. 2023. Vol. 23, iss. 7. P. 3732.
3. Brown I. A Detailed Breakdown of LPWAN Technologies and Providers. *Analyst Insight*. 2025.
4. Jones H. G. Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology.. Cambridge University Press, 2013. 320 p.
5. Kiani F., Seyyedabbasi A. Wireless Sensor Network and Internet of Things in Precision Agriculture. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2018. Vol. 9, iss. 6. P. 99–103. URL: <https://doi.org/DOI:10.14569/IJACSA.2018.090614>.
6. Lin Y.-W., Lin C.-Y. An Interactive Real-Time Locating System Based on Bluetooth Low-Energy Beacon Network. *MDPI*. 2018. Vol. 18, iss. 4. P. 1638.
7. Lova Raju K., Veeramani V. IoT Technologies in Agricultural Environment: A Survey. *Wireless Personal Communications*. 2020. Vol. 113, iss. 3. P. 2415–2446. URL: <https://doi.org/DOI:10.1007/s11277-020-07334-x>.
8. Silva J. C. LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities. *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, Split, Croatia, 12 Jul. 2017.
9. Internet of underground things in precision agriculture: Architecture and technology aspects / M. C. Vuran et al. *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 81. P. 160–173.
10. Yanhong G., Shubin W., Jinyu M. Optimization on TEEN routing protocol in cognitive wireless sensor network. China : ational Natural Science Foundation of China, 2018.

11. Дячук О. Порівняльний аналіз технологій класу LPWAN. *Електронна та Акустична Інженерія*. 2020. Т. 3, вип. 2. С. 40–44. URL: <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2020.3.3.199519>.
12. "Вимірювальні-аналітичні засоби IoT-моніторингу вологості ґрунтів." / В. В. Жуковський та ін. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2025. Т. 35, вип. 4. С. 115–122.
13. Кузьминський А., Носков В., Бондарчук А. ГІБРИДНИЙ ПІДХІД ПОЄДНАННЯ NB-IOT З LORA. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2025. Т. 2, вип. 85. С. 134–148.
14. Маркін Н. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ПРОТОКОЛІВ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ. *МІЖНАРОДНЕ НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО В ПРИЛАДОБУДУВАННІ В УМОВАХ ІНДУСТРІЇ 4.0.*, Київ, Україна.
15. Опірський І. Р., Головчак Р. В. ПРОБЛЕМИ ТА ЗАГРОЗИ БЕЗПЕЦІ IoT ПРИСТРОЇВ. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2021. Т. 3, вип. 10. С. 31–42. ISSN 2663-4023. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.11.3142>.
16. Писарець А., Писарець Є. ВТОМАТИЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. *Вісник КПІ*. 2020. Т. 60, вип. 1 : Приладобудування. С. 58–65.
17. Свидрук І. І. "ОСОБЛИВОСТІ ЗАПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (IOT) ЯК ДРАЙВЕРУ ІННОВАЦІЙ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ СЕКТОРІ.". *Вісник ЛТЕУ*. 2025. Т. 81 : Економічні науки. С. 7–13.
18. ВИБІР ПРОТОКОЛУ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ БЕЗПРОВОДОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ / О. Штойко та ін. *Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна*. 2022. С. 189–192.

ДОДАТКИ

Додаток А

Графік сигналу середовища (імітація вимірюваного параметра)



Графік порівняння часу автономної роботи до критичного заряду



```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# =====
# 0) ПАРАМЕТРИ (під вузол ATmega328P + LoRa SX1276/78)
# =====

# Напруга живлення логіки (після LDO)
U = 3.3 # V

# Ємність батареї (приклад: 2.4 Ah).
Q_batt_Ah = 2.4
Q_batt_As = Q_batt_Ah * 3600 # A*s

# Критичний рівень (енергозахист)
SOC_min = 0.15 # 15%

# --- Струми ---
I_sleep = 15e-6 # 15 µA (ATmega sleep + LDO quiescent)
I_mcu_active = 5e-3 # 5 mA (ATmega active)
I_sensors = 3e-3 # 3 mA (умовно сумарно датчики під час вимірювання)
I_tx = 120e-3 # 120 mA (LoRa TX)
I_rx = 12e-3 # 12 mA (LoRa RX)

# --- Тривалості фаз (сек) ---
t_wake = 0.02 # пробудження/ініціалізація
t_meas = 0.20 # вимірювання
t_tx = 1.0 # передача (один пакет)
t_guard = 0.02 # службові перевірки

# Базовий інтервал передачі
T0 = 300 # sec

# Горизонт моделювання
T_total_h = 72 # годин
T_total = T_total_h * 3600 # sec

# =====
# 1) СИГНАЛ СЕРЕДОВИЩА (імітація вимірюваного параметра)
# =====
np.random.seed(1)

t_env = np.arange(0, T_total, 1) # 1 сек для середовища
# базовий рівень + повільна синусоїда
x_env = 22 + 0.25*np.sin(2*np.pi*t_env/3600) # 1 година період
# додамо шум
x_env += 0.15*np.random.randn(len(t_env))

```

```

# додамо "аномалію": стрибок на 10 хв десь посередині
an_start = int(30*3600)
an_end = an_start + int(10*60)
x_env[an_start:an_end] += 8.0

def sample_env(ti):
    """Взяти значення середовища в момент ti (сек)."""
    ti = int(np.clip(ti, 0, len(x_env)-1))
    return x_env[ti]

# =====
# 2) ДОПОМІЖНІ ФУНКЦІЇ ЕНЕРГІЇ
# =====

def E_of(I, dt):
    """Енергія (Дж):  $E = U * I * dt$ """
    return U * I * dt

def dQ_of_energy(E):
    """Втрачений заряд (А*s):  $dQ = E / U$ """
    return E / U

# =====
# 3) БАЗОВИЙ АЛГОРИТМ (ТХ кожні 300 сек)
# =====

def simulate_baseline():
    t = 0.0
    Q = Q_batt_As
    soc_hist, q_hist, e_hist, t_hist = [], [], [], []
    tx_count = 0
    E_total = 0.0

    while t < T_total and (Q / Q_batt_As) > SOC_min:
        # Сон до наступного циклу (T0 - активні фази)
        # Активні фази: wake + meas + tx + guard
        t_active = t_wake + t_meas + t_tx + t_guard
        t_sleep = max(T0 - t_active, 0)

        # SLEEP
        E = E_of(I_sleep, t_sleep)
        E_total += E
        Q -= dQ_of_energy(E)
        t += t_sleep

        # WAKE + CHECK
        E = E_of(I_mcu_active, t_wake + t_guard)
        E_total += E
        Q -= dQ_of_energy(E)
        t += (t_wake + t_guard)

        # MEAS (MCU + sensors)
        E = E_of(I_mcu_active + I_sensors, t_meas)
        E_total += E

```

```

    Q -= dQ_of_energy(E)
    t += t_meas

    # TX (LoRa TX + MCU active)
    E = E_of(I_tx + I_mcu_active, t_tx)
    E_total += E
    Q -= dQ_of_energy(E)
    t += t_tx
    tx_count += 1

    soc_hist.append(Q / Q_batt_As)
    q_hist.append(Q / 3600)          # Ah
    e_hist.append(E_total / 3600)    # Wh (бо 1Wh = 3600J)
    t_hist.append(t / 3600)          # год

    return {
        "t_h": np.array(t_hist),
        "soc": np.array(soc_hist),
        "q_Ah": np.array(q_hist),
        "E_Wh": np.array(e_hist),
        "tx": tx_count,
        "life_h": (t_hist[-1] if len(t_hist) else 0.0),
        "E_total_Wh": (e_hist[-1] if len(e_hist) else 0.0),
        "Q_end_Ah": (q_hist[-1] if len(q_hist) else Q/3600)
    }

# =====
# 4) АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ – ЗА БЛОК-СХЕМОЮ
# =====
def simulate_adaptive():
    t = 0.0
    Q = Q_batt_As
    soc_hist, q_hist, e_hist, t_hist = [], [], [], []
    tx_count = 0
    E_total = 0.0

    # Пам'ять останнього виміряного значення
    x_prev = sample_env(0)

    # "Вік даних" – щоб не мовчати занадто довго навіть при стабільності
    max_silent = 6*T0    # напр. максимум 30 хв без передачі
    time_since_tx = 0.0

    # Порог зміни (налаштовується)
    dx_thr = 0.6    # якщо зміни різкі – передавати частіше

    # Межі інтервалу (адаптація)
    T_min = 60      # мінімальний інтервал (1 хв)
    T_max = 1800    # максимальний інтервал (30 хв)

```

```

# Початковий інтервал
T_next = T0

while t < T_total and (Q / Q_batt_As) > SOC_min:
    SOC = Q / Q_batt_As

    # ----- СОН -----
    # спимо до наступного пробудження T_next, але не менше 0
    t_active_nom = t_wake + t_meas + t_guard # актив без TX
    t_sleep = max(T_next - t_active_nom, 0)

    E = E_of(I_sleep, t_sleep)
    E_total += E
    Q -= dQ_of_energy(E)
    t += t_sleep
    time_since_tx += t_sleep

    # ----- ПРОБУДЖЕННЯ / ПЕРЕВІРКА ЖИВЛЕННЯ -----
    E = E_of(I_mcu_active, t_wake + t_guard)
    E_total += E
    Q -= dQ_of_energy(E)
    t += (t_wake + t_guard)
    time_since_tx += (t_wake + t_guard)

    SOC = Q / Q_batt_As

# ЕНЕРГОЗАХИСТ: якщо заряд низький – збільшуємо інтервал і забороняємо
TX
if SOC <= SOC_min:
    # фіксуємо стан і виходимо (до критичного рівня дійшли)
    soc_hist.append(SOC)
    q_hist.append(Q/3600)
    e_hist.append(E_total/3600)
    t_hist.append(t/3600)
    break

    # ----- УВІМКНЕННЯ ЖИВЛЕННЯ ДАТЧИКІВ + ВИМІР -----
    x_now = sample_env(t)
    E = E_of(I_mcu_active + I_sensors, t_meas)
    E_total += E
    Q -= dQ_of_energy(E)
    t += t_meas
    time_since_tx += t_meas

    # ----- ОЦІНКА ДИНАМІКИ -----
    dx = abs(x_now - x_prev)
    x_prev = x_now

    # ----- РІШЕННЯ: ЧИ ПОТРІБНА ПЕРЕДАЧА? -----
    # TX якщо:

```

```

# (1) параметр змінився суттєво (dx >= dx_thr)
# або (2) дані застаріли
need_tx = (dx >= dx_thr) or (time_since_tx >= max_silent)

# Додаткове правило: коли SOC падає, ми обмежуємо TX (частіше – тільки
при важливих змінах)
if SOC < 0.30 and dx < dx_thr:
    need_tx = False # економія: при низькому SOC не передаємо рутинні
пакети

# ----- ПЕРЕДАЧА ДАНИХ (за необхідності) -----
if need_tx:
    E = E_of(I_tx + I_mcu_active, t_tx)
    E_total += E
    Q -= dQ_of_energy(E)
    t += t_tx
    tx_count += 1
    time_since_tx = 0.0 # обнулили вік даних

# ----- АДАПТАЦІЯ ІНТЕРВАЛУ -----
SOC = Q / Q_batt_As

# Компонента від SOC: менший SOC -> більший інтервал
T_soc = T_min + (1 - SOC) * (T_max - T_min)

# Компонента від динаміки: стабільно -> інтервал росте, різко ->
інтервал зменшується
eps = 1e-6
dyn_factor = 1.0 / (1.0 + dx/(dx_thr + eps)) # dx великий -> фактор
менший
# Перетворимо в інтервал: при dx малому dyn_factor ~ 1 -> T ближче до
T_soc
# при dx великому dyn_factor малий -> T ближче до T_min
T_dyn = T_min + dyn_factor * (T_soc - T_min)

# Остаточний інтервал
T_next = float(np.clip(T_dyn, T_min, T_max))

# ----- ЛОГ ДЛЯ ГРАФІКІВ -----
soc_hist.append(SOC)
q_hist.append(Q/3600) # Ah
e_hist.append(E_total/3600) # Wh
t_hist.append(t/3600) # h

return {
    "t_h": np.array(t_hist),
    "soc": np.array(soc_hist),
    "q_Ah": np.array(q_hist),
    "E_Wh": np.array(e_hist),
    "tx": tx_count,

```

```

        "life_h": (t_hist[-1] if len(t_hist) else 0.0),
        "E_total_Wh": (e_hist[-1] if len(e_hist) else 0.0),
        "Q_end_Ah": (q_hist[-1] if len(q_hist) else Q/3600)
    }

# =====
# 5) ЗАПУСК СИМУЛЯЦІЇ
# =====
res_base = simulate_baseline()
res_adap = simulate_adaptive()

summary = pd.DataFrame([
    ["Базовий (T=300с)", res_base["tx"], res_base["E_total_Wh"],
    res_base["Q_end_Ah"], res_base["life_h"]],
    ["Адаптивний (наш)", res_adap["tx"], res_adap["E_total_Wh"],
    res_adap["Q_end_Ah"], res_adap["life_h"]],
], columns=["Алгоритм", "К-сть TX", "Енергія за період, Wh", "Залишок заряду, Ah", "Час до SOCmin, год"])

print(summary.to_string(index=False))

# =====
# 6) ГРАФІКИ
# =====

# (А) Сигнал середовища
plt.figure()
plt.plot(t_env/3600, x_env)
plt.xlabel("Час, год")
plt.ylabel("Параметр середовища x (ум. од.)")
plt.title("Сигнал середовища (імітація вимірюваного параметра)")
plt.grid(True)
plt.show()

# (1) SOC(t)
plt.figure()
plt.plot(res_base["t_h"], 100*res_base["soc"], label="Базовий")
plt.plot(res_adap["t_h"], 100*res_adap["soc"], label="Адаптивний")
plt.xlabel("Час, год")
plt.ylabel("SOC, %")
plt.title("Динаміка SOC(t)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# (1b) Q(t) в Ah
plt.figure()
plt.plot(res_base["t_h"], res_base["q_Ah"], label="Базовий")
plt.plot(res_adap["t_h"], res_adap["q_Ah"], label="Адаптивний")
plt.xlabel("Час, год")

```

```

plt.ylabel("Залишок заряду, Ah")
plt.title("Розряд батареї Q(t)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# (2) Сумарна енергія за період (накопичена)
plt.figure()
plt.plot(res_base["t_h"], res_base["E_Wh"], label="Базовий")
plt.plot(res_adap["t_h"], res_adap["E_Wh"], label="Адаптивний")
plt.xlabel("Час, год")
plt.ylabel("Накопичена енергія, Wh")
plt.title("Сумарне енергоспоживання за період")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# (3) Середній струм споживання Iavg(t) = (E(t) / (U * t))
# E в Wh -> переведемо в Дж: Wh*3600
def iavg_curve(t_h, E_Wh):
    t_s = np.maximum(t_h*3600, 1e-9)
    E_J = E_Wh * 3600
    return (E_J / (U * t_s)) # A

plt.figure()
plt.plot(res_base["t_h"], 1000*iavg_curve(res_base["t_h"],
res_base["E_Wh"]), label="Базовий")
plt.plot(res_adap["t_h"], 1000*iavg_curve(res_adap["t_h"],
res_adap["E_Wh"]), label="Адаптивний")
plt.xlabel("Час, год")
plt.ylabel("Середній струм, mA")
plt.title("Оцінка середнього струму споживання Iavg(t)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# (4) Час автономної роботи до SOCmin
plt.figure()
plt.bar(["Базовий", "Адаптивний"], [res_base["life_h"], res_adap["life_h"]])
plt.ylabel("Год")
plt.title("Порівняння часу автономної роботи до критичного заряду")
plt.grid(True, axis="y")
plt.show()

# (5) Кількість TX
plt.figure()
plt.bar(["Базовий", "Адаптивний"], [res_base["tx"], res_adap["tx"]])
plt.ylabel("Кількість передач (TX)")
plt.title("Порівняння кількості TX")
plt.grid(True, axis="y")
plt.show()

```