

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка
другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Застосування стратегій збереження енергії
в автономних сенсорних мережах на основі Bluetooth Low Energy

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи СКСМ-18-1

Костюк С.О.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова) Освітня

програма Спеціалізовані

комп'ютерні системи

(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент кафедри АПОТ,

канд. техн. наук Філіппенко І.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Чумаченко С.В.

(прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерної інженерії та управління _____
Кафедра _____ Автоматизації проектування обчислювальної техніки _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 123 – Комп'ютерна інженерія _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Спеціалізовані комп'ютерні системи _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

_____ (підпис)

« _____ » _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові

Костюку Сергію Олександровичу

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Застосування стратегій збереження енергії в автономних сенсорних мережах на основі Bluetooth Low Energy

затверджена наказом по університету від 04 листопада 20 19 р. № 1624 Ст

2. Термін подання студентом роботи (проекту) 14 грудня _____ 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи (проекту) Бездротові сенсорні мережі
Стек протоколів Bluetooth Low Energy

Структура та характеристики сенсорних вузлів

Методи збереження енергії в сенсорних мережах та складових сенсорних мереж

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Аналіз предметної області

Складові сенсорних вузлів

Протоколи передачі даних

Джерела енергії в сенсорних мережах

Методи енергозбереження в сенсорних вузлах

Ефективність методів енергозбереження в сенсорних вузлах

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

19 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (проекту)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		(підпис)	(дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п./п.	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	03.09.2019-05.09.2019	
2	Аналіз предметної області	06.09.2019-13.09.2019	
3	Аналіз джерел з проблемної галузі	16.09.2019-27.09.2019	
4	Огляд методів енергозбереження	30.09.2019-11.10.2019	
5	Створення моделі споживання енергії для сенсорного вузла, оцінка рівня споживання	14.10.2019-25.10.2019	
6	Дослідження ефективності методів збереження енергії в сенсорних вузлах	28.10.2019-08.11.2019	
7	Оформлення пояснювальної записки	11.11.2019-29.11.2019	
8	Оформлення графічного матеріалу	2.12.2019-10.12.2019	
9	Перевірка виконаного проекту керівником	13.12.2019-16.12.2019	
10	Захист проекту	23.12.2019	

Дата видачі завдання 3 вересня 2019 р.

Студент

_____ (підпис)

Керівник роботи

доцент Філіппенко І.В.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 91 сторінку, 42 рисунка, 11 таблиць, 58 джерел за переліком посилань.

СЕНСОРНА МЕРЕЖА, СЕНСОРНИЙ ВУЗОЛ, ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, МЕТОДИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, BLUETOOTH LOW ENERGY, ВБУДОВАНА СИСТЕМА, NRF52832.

Метою роботи є дослідження питання енергозбереження та оптимізації використання енергії в автономних сенсорних мережах на основі Bluetooth Low Energy. Проведено аналіз предметної області, розглянуто специфіку побудови та функціонування сенсорних мереж у порівнянні з традиційними комп'ютерними мережами. Наведена структура типового сенсорного вузла.

Розглянуто особливості побудови та алгоритмів функціонування сенсорних вузлів. Проведено аналіз основних споживачів енергії в сенсорних вузлах, надана теоретична оцінка рівнів споживання енергії для сенсорних вузлів, реалізованих на основі SoC nRF52832 від Nordic Semiconductor.

Розглянуто методи оптимізації енергоспоживання в сенсорних мережах. Ефективність розглянутих методів перевірена експериментально. Створена модель енергоспоживання сенсорного вузла на основі SoC nRF52832.

ABSTRACT

Explanatory note: 91 pages, 42 figures, 11 tables, 58 sources.

SENSOR NETWORK, SENSOR NODE, POWER USAGE OPTIMIZATION, POWER SAVING METHODS, BLUETOOTH LOW ENERGY, EMBEDDED SYSTEM, NRF52832.

This work is devoted to research in the field of power saving and energy usage optimization in autonomous sensor networks based on Bluetooth Low Energy. The subject area was thoughtfully studied, reviewed the specifics of structure and operation of sensor networks in comparison to traditional computer networks. Subjected the generic structure of a sensor node.

Reviewed the specifics of structure and operation of sensor nodes in comparison to generic embedded devices. Added the list of main software and hardware energy consuming components in wireless sensor nodes based on the nRF52832 SoC from Nordic Semiconductor.

Reviewed various methods of the energy usage optimization in wireless sensor networks, performed an experimental study of effectiveness for such methods. Created the energy consumption model for sensor nodes based on nRF52832 SoC.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	11
1.1 Загальна характеристика сенсорних мереж	11
1.2 Сенсорні вузли як складові сенсорних мереж	13
1.3 Застосування сенсорних мереж	16

1.4 Особливості проектування сенсорних вузлів та мереж	18
2 ТЕХНОЛОГІЇ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	20
2.1 Спеціалізовані протоколи передачі даних	20
2.2 Протоколи загального призначення у сенсорних мережах.....	25
2.3 Протокол Bluetooth Low Energy	28
2.4 Інтерференція та співіснування протоколів.....	32
3 ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ	34
3.1 Проблема вибору джерела енергії.....	34
3.2 Батареї та акумулятори	35
3.3 Постійні джерела енергії.....	37
3.4 Використання енергії навколишнього середовища.....	37
4 ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СЕНСОРНИХ СИСТЕМАХ.....	39
4.1 Передумови щодо використання технологій збереження енергії	39
4.2 Огляд методів енергозбереження в сенсорних мережах.....	39
5 ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	50
5.1 Загальний опис об'єкту досліджень	50
5.2 Структура сенсорної мережі.....	51
5.3 Структура та характеристики сенсорного вузла	52
5.4 Блок керування та зв'язку сенсорного вузла	53
5.5 Передача даних по протоколу BLE	56
5.6 Датчики сенсорного вузла	58
5.6 Джерело енергії сенсорного вузла.....	60
5.7 Програмне забезпечення сенсорного вузла	62
6 ОЦІНКА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ СЕНСОРНОГО ВУЗЛА	65
6.1 Джерела енергетичних витрат у сенсорному вузлі	65
6.2 Математична модель енергоспоживання сенсорного вузла	72
6.3 Експериментальне дослідження енергоспоживання сенсорного вузла .	75
7 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ ...	84

7.1 Обрання стратегій енергозбереження для досліджуваної системи	84
7.2 Управління циклами сну/роботи	85
7.3 Контроль потужності передачі даних	87
7.4 Оптимізація вбудованого програмного забезпечення.....	89
7.5 Оцінка та аналіз результатів оптимізації	90
ВИСНОВКИ	91
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	92

ДОДАТОК А ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ **ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

ДОДАТОК Б ВИХІДНИЙ КОД ПЗ СЕНСОРНОГО ВУЗЛА **ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

ДОДАТОК В РОБОТИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ **ОШИБКА!** **ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

- IoT – The Internet of Things, Інтернет речей
- WSN – Wireless Sensor Network, бездротова сенсорна мережа
- LP-WSN – Low-Power Wireless Sensor Network, бездротова сенсорна мережа з низьким енергоспоживанням
- EH – Energy Harvesting, збирання енергії навколишнього середовища
- BLE – Bluetooth Low Energy, Bluetooth версії 4.0 і вище
- BR/EDR, Bluetooth Classic – Bluetooth нижче версії 3.0
- ISM – Industrial, Scientific and Medical, діапазон неліцензованих частот
- АЗ – апаратне забезпечення
- ПЗ – програмне забезпечення
- ПрО – предметна область
- ОС – операційна система
- RTOS – Real-Time Operating System, операційна система реального часу
- МП – мова програмування
- IDE – інтегроване середовище програмування
- SDK – Software Development Kit, набір програмного забезпечення для розробки прикладного ПЗ для деякої програмно-апаратної платформи
- SoC – System on Chip, система на кристалі, інтегрована апаратна система, що включає в себе пам'ять, мікроконтролер та/або засоби зв'язку
- БД – база даних
- Порт GPIO – порт введення-виведення загального призначення
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВСТУП

За останні 5 років розвитку індустрії спостерігається значне пожвавлення інтересу до питання отримання, зберігання та обробки даних. Такі компанії, як Google та Facebook, будують власний бізнес на аналізі даних про поведінку, вподобання та інтереси користувачів Інтернет-ресурсів. Вони створюють складні моделі та алгоритми для покращення якості власних сервісів, підбору персоналізованих пропозицій, покращення ефективності реклами, аналізу ринку та світових трендів, що швидко змінюються [1].

У сфері виробництва фізичних продуктів наразі відбувається перехід до так званої «Індустрії 4.0» – нового етапу розвитку індустрії, пов'язаного з використанням новітніх технологій Інтернету речей, обробкою великих об'ємів даних за допомогою штучних нейронних мереж, постійного моніторингу та загальної інформатизації бізнес-процесів [2].

В новітній індустрії додаткові дані про фізичні об'єкти дозволяють вирішувати безліч задач, пов'язаних з оптимізацією виробничого процесу та попередженням нештатних ситуацій, моніторингом та превентивною діагностикою аномалій. Таким чином технології збору та обробки даних дозволяють мінімізувати час простою, зменшити витрати на обслуговування індустріальних об'єктів, підвищити рівень безпеки співробітників та кінцевих користувачів виготовлених продуктів.

Одним із засобів збору інформації про об'єкти реального світу та стан навколишнього середовища є сенсорні мережі – мережі спеціалізованих вузлів, що виконують моніторинг заданих показників роботи об'єктів та передачу отриманої інформації для подальшої обробки [3].

Вузли таких сенсорних мереж часто встановлюються у безпосередній близькості до досліджуваного об'єкту чи явища, можуть зазнавати

екстремальних показників температури, тиску, рівня інфрачервоного та радіоактивного випромінювання. Також вони можуть розміщуватися у несучих конструкціях будівель, віддалених та небезпечних географічних локаціях, а також у інших середовищах з обмеженим доступом.

Таким чином постає важливе завдання спрощення початкового налаштування та подальшого обслуговування сенсорних мереж, збільшення ресурсу та часу автономної роботи системи без втручання людини.

Одним із засобів спрощення та здешевлення початкового налаштування сенсорної мережі є використання бездротових технологій та мереж на їх основі. Вузли бездротової сенсорної мережі часто обладнуються власними автономними джерелами живлення – хімічними елементами та засобами акумуляції енергії з навколишнього середовища.

Для вузлів з автономними джерелами живлення критичним є питання збереження та оптимального використання наявної енергії для забезпечення безперебійної роботи сенсорного вузла впродовж всього строку експлуатації.

Мета роботи – дослідження питання енергозабезпечення та енергозбереження в сенсорних мережах. У якості об'єкту дослідження обрано бездротові сенсорні мережі на основі технології Bluetooth Low Energy.

Предмет дослідження – методи енергозбереження та оптимізації енергоспоживання в бездротових сенсорних мережах на основі BLE.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Загальна характеристика сенсорних мереж

Сенсорні мережі – мережі спеціалізованих пристроїв, що здатні виконувати вимірювання параметрів навколишнього середовища та

передавати зібрані дані за допомогою деяких засобів зв'язку. Спеціалізовані пристрої, що безпосереднього призначені для виконання вимірювань та входять до складу сенсорних мереж, називаються сенсорними вузлами [4].

Відмінність сенсорних і традиційних комп'ютерних мереж безпосередньо пов'язана з їх структурою та цільовим призначенням. Комп'ютери, за своєю природою, є пристроями для виконання обчислень, зберігання та обробки даних. Звідси: висока швидкодія, універсальність, розміри та ціна комп'ютерів, систем та мереж на їх основі.

З іншої сторони, сенсорні вузли є пристроями з чіткою спеціалізацією: виконання вимірювань та передача їх результатів. Вони не виконують складних розрахунків та не передають потоки відео. Таким чином, потреба у швидкісних процесорах та широкому каналі передачі даних відпадає. У той же час на перший план виходять мініатюрність, низька собівартість, здатність до самоорганізації та надійність всієї системи [5-6].

Окрім сенсорних вузлів, до складу сенсорної мережі можуть входити вузли пересилання даних, вузли збору даних, а також шлюзи [4].

Вузлами пересилання даних можуть виступати спеціалізовані пристрої або самі сенсорні вузли. Вузли збору даних, що іноді називаються моніторами або координаторами, можуть або виконувати безпосередній збір та локальну обробку отриманих даних, або пересилати дані для обробки в інші мережі.

Для зв'язку сенсорних мереж з іншими мережами та системами, зокрема комп'ютерними мережами, використовуються шлюзи. Шлюзи зазвичай підтримують декілька протоколів передачі даних та здатні виконувати трансляцію даних між мережами та форматами. Часто функціональність шлюзів та вузлів збору даних поєднується у єдиному пристрої.

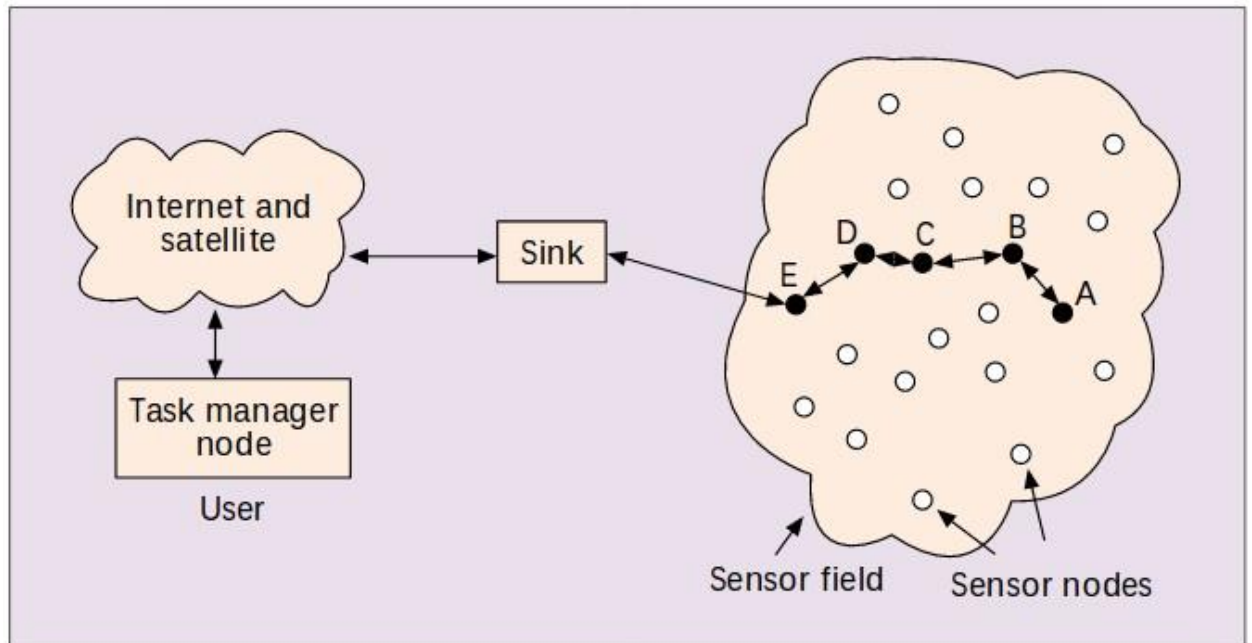


Рисунок 1.1 – Структура типової сенсорної мережі [6]

Говорячи про сенсорні мережі взагалі, найчастіше мають на увазі бездротові сенсорні мережі (Wireless Sensor Networks). У порівнянні з попередніми технологіями встановлення сенсорів, бездротовий зв'язок забезпечує підвищену гнучкість, мобільність та простоту встановлення сенсорних вузлів. Однак, вартістю за ці переваги є підвищена складність самого вузла та необхідність у використанні автономних джерел енергії [6].

1.2 Сенсорні вузли як складові сенсорних мереж

Як було зазначено у пункті 1.1, сенсорні вузли є базовою складовою сенсорних мереж. Складаються з п'яти основних компонентів: датчика (сенсора), керуючого блоку (процесор, мікроконтролер) з оперативною пам'яттю, постійної пам'яті, блоку зв'язку (transceiver, засіб приймання та передачі даних) та джерела енергії (рисунок 1.2) [7].

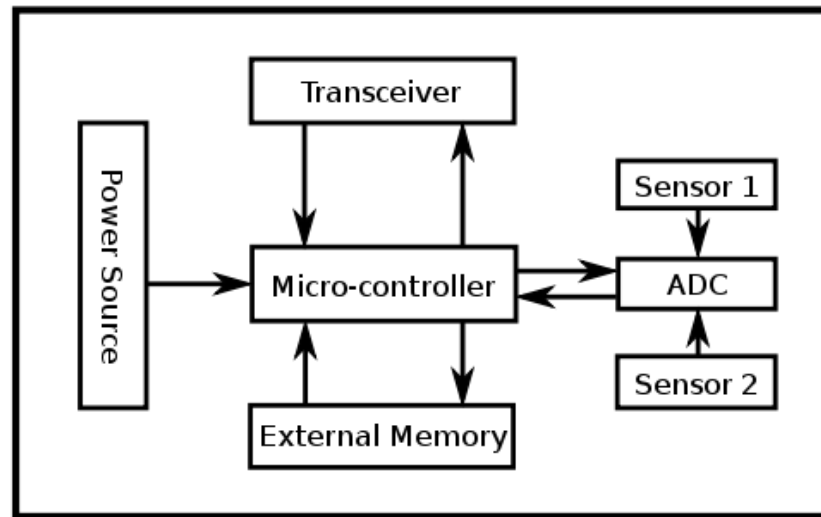


Рисунок 1.2 – Структура типового сенсорного вузла

Сенсори здатні перетворювати фізичні величини (такі як рівень освітленості, тиск, механічна деформація, температура тощо) у електричні сигнали. В залежності від призначення, сенсорний вузол містить один чи декілька датчиків різного типу. При використанні аналогових датчиків, до складу сенсорного вузла зазвичай додаються аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). Такі перетворювачі можуть бути як дискретними, так і вбудованими в блок керування (мікроконтролер).

Постійна пам'ять використовується для збереження програми управління, результатів вимірювань та налаштувань сенсорного вузла між періодами активності. В якості постійної пам'яті може використовуватися пам'ять на основі технологій Flash, FRAM, або оперативна пам'ять з автономним джерелом енергії. Аналогічно, постійна пам'ять може бути як дискретною, так і поєднаною з блоком керування.

Блок керування являє собою мікроконтролер – мікропроцесор з базовою периферією, такою як оперативна пам'ять, регістри керування, порти введення-виведення (GPIO), таймери, блоки апаратної підтримки протоколів обміну даними та інші. Блок керування здатен виконувати попередньо визначений

алгоритм керування, здатен отримувати дані з датчиків та обмінюватися інформацією з іншими пристроями через блок зв'язку.

Блок керування може фізично виконуватися на одному кристалі з іншими компонентами системи (периферійними блоками, датчиками, блоками зв'язку, тощо) та утворювати єдину систему на кристалі (System on Chip, SoC). Такі рішення дозволяють підвищити рівень інтеграції системи, зменшити розміри та оптимізувати енергоспоживання вбудованих компонентів.

Додатково дискретні компоненти системи можуть об'єднуватися у інтегровані системи на модулі (System on Module, SoM). SoM виконуються у вигляді стандартних друкованих плат, придатних для інтеграції у інші проекти. Використання SoM дозволяє зменшити витрати на розробку та виготовлення сенсорних вузлів за рахунок повторного використання стандартизованих компонентів (off-the-shelf components).

Для забезпечення роботи всього сенсорного вузла використовується деяке джерело енергії – хімічний елемент, акумулятори, зовнішні постійні джерела енергії та/або енергія навколишнього середовища (ambient energy).

Для стабілізації і оптимального використання отриманої енергії встановлюються додаткові елементи управління живленням (Power Management Integrated Circuits, PMICs). Ці елементи включають в себе елементи контролю та перетворення напруги, моніторингу використаної та доступної енергії, а також засоби зв'язку з блоком керування.

Блок зв'язку (transceiver) відповідає за комунікацію сенсорного вузла з зовнішнім світом. Він підтримує деяку множину протоколів передачі даних, контролює процеси встановлення зв'язку, передачі та отримання даних, а також відповідає за перетворення сигналів у фізичну форму (радіохвилі, світло, звук і так далі). Виконується у вигляді зовнішнього модуля з власним блоком управління або входить до складу SoC.

Вершиною ієрархії компонентів сенсорного вузла є вбудоване програмне забезпечення – прошивка (firmware) сенсорного вузла. Прошивка зберігається у постійній пам'яті, завантажується і виконується блоком керування. Саме прошивка визначає режим роботи компонентів сенсорного вузла, порядок активації, проведення вимірювань та комунікації в мережі.

1.3 Застосування сенсорних мереж

Як зазначено у пункті 1.1, сенсорні мережі є мережами спеціалізованих пристроїв, що обладнані датчиками та сенсорами. Основним завданням таких мереж є проведення вимірювань та отримання даних про стан віддалених об'єктів, явищ та процесів на деякій території. Таким чином, сенсорні мережі широко застосовуються як одна із складових у системах моніторингу, контролю та управління у різних сферах людської діяльності.

У роботі [8] згадуються деякі традиційні сценарії застосування сенсорних мереж. У цій роботі всі сценарії застосування розділені на 5 великих категорій: військова галузь (military applications), моніторинг стану навколишнього середовища (environmental monitoring), логістика та доставка (support for logistics), медицина та здоров'я людини (human-centric), а також мобільні сенсорні мережі на основі роботів (applications to robotics).

Типовими сценаріями для військової галузі є відслідковування противників, розпізнавання та класифікація цілей, контроль поля бою, контроль кордону, патрулювання і так далі. Загалом такі сенсорні мережі надають додаткову інформацію для прийняття тактичних рішень.

Моніторинг стану навколишнього середовища розділяється на дві категорії: моніторинг приміщень (indoor monitoring) та зовнішнього середовища (outdoor monitoring). Типовими сценаріями для моніторингу приміщень є моніторинг мікрокліматичних параметрів, контроль проникнень та фізична безпека, попередження пожеж та моніторинг фізичного стану

будівлі, зокрема після землетрусів. Для моніторингу зовнішнього середовища типовими є сценарії застосування у агрономії (agriculture), лісництві, заповідниках та природних системах, контроль кліматичних показників, рівнів вологості та ультрафіолетового випромінення, моніторинг рівня шуму у містах, розпізнавання сейсмічної активності і таке інше.

У сфері логістики для відслідковування стану та положення дорогих, цінних та схильних до псування товарів широко застосовуються спеціалізовані пристрої – трекери. Трекери є класичними представниками сенсорних вузлів, що обладнані датчиками положення (geoposition), засобами зв'язку (зокрема мобільного стільникового зв'язку) та множиною додаткових датчиків для контролю умов перевезення – температури, вологості, вібрації та, цілісності. Також до складу трекерів можуть входити запам'ятовуючі пристрої.

У поєднанні з додатковим програмним забезпеченням такі трекери можуть застосовуватися для автоматизованого контролю умов виконання контрактів (smart contracts) та виконання транзакцій без участі людини [9].

У сфері медицини для моніторингу стану людини використовуються натільні сенсорні мережі (body-area sensor networks). Ці мережі складаються з носимих пристроїв (wearables), що обладнані датчиками для контролю життєвих характеристик – активності (рухів), пульсу, серцевого ритму, дихання, температури тіла, рівня цукру у крові та гідратації (hydration). Для передачі даних використовуються телефони та спеціалізовані пристрої.

У зв'язку з розвитком систем зберігання даних, досягненнями у сфері обробки великих обсягів даних (big data) та штучних нейронних мереж (artificial neural networks), значно підвищується інтерес до сенсорних мереж як засобу збору даних та отримання «прихованих» корисних даних (insights) про стан досліджуваного об'єкта чи явища.

У комбінації з нейронними мережами сенсорні мережі дозволяють попереджувати вихід з ладу індустріальних об'єктів на виробництві, попереджати та виявляти захворювання на ранніх стадіях, досліджувати поведінку людей та отримувати дані для маркетингових досліджень, підвищувати врожаї у аграрній сфері, покращувати спортивні результати та поліпшувати якість людського життя взагалі [3,5,10-12].

Таким чином додаткові дані про фізичне середовище дозволяють значно підвищити якість та ефективність виробничих процесів в індустрії, економити кошти, попереджувати хвороби, забезпечувати фізичну безпеку та досягати кращих результатів у різних сферах людської діяльності. А сенсорні мережі є невід'ємним засобом збору такої інформації у сучасному світі.

1.4 Особливості проектування сенсорних вузлів та мереж

Враховуючи велике розмаїття доступних програмних компонентів та апаратної елементної бази, критичним є визначення вимог до сенсорної мережі в цілому та сенсорних вузлів зокрема на початкових етапах проектування системи. Саме на основі початкових вимог визначається список доступних компонентів, структура системи та приймаються інші проектні рішення.

При проектуванні сенсорних вузлів та мереж враховуються наступні вимоги та фактори [5]:

- стійкість до збоїв;
- здатність до масштабування;
- собівартість виробництва;
- апаратні обмеження;
- топологія сенсорної мережі;
- умови навколишнього середовища; □ середовище (medium) передачі даних;

□ рівень споживання енергії.

Необхідність у стійкості до збоїв безпосередньо витікає з природи самої сенсорної мережі. Дешевизна компонентів, мобільність вузлів та їх обмежене енергопостачання зумовлюють високу вірогідність виходу з ладу окремого вузла. Таким чином, створюється необхідність в дублюванні сенсорних вузлів та зв'язків між ними, підтримка автоматичної реконфігурації та відновлення роботи сенсорної мережі. Відповідно, ці фактори впливають на топологію, список доступних протоколів зв'язку та компонентів в системі.

В залежності від вирішуваної задачі, одна сенсорна мережа може мати від десятків одиниць до сотень тисяч сенсорних вузлів у своєму складі. Таким чином, постає завдання масштабування – організації працездатності та ефективної взаємодії в мережі при заданій кількості вузлів. Для рішення задачі використовуються кластеризація, оптимізовані протоколи передачі даних, засоби планування та уникнення колізій.

При високій кількості встановлюваних вузлів, дуже гостро постає питання зменшення їх собівартості. Для цього використовуються популярні готові компоненти (off-the-shelf components) та більш дешеві апаратні рішення з меншою обчислювальною потужністю. У такому випадку завдання обробки даних повністю переноситься на зовнішні вузли та сервіси обробки даних.

Серед фізичних обмежень можна виділити обмеження за розміром, рівнем енергоспоживання компонентів та діапазоном робочих параметрів.

За своєю природою сенсорні вузли встановлюються у безпосередній близькості з досліджуваним об'єктом чи явищем. Так, наприклад, у транспортних системах сенсорні вузли контролюють рівень вібрацій, на виробництві – температури та тиску, рівні радіації та ультрафіолетового випромінювання. Серед динамічних процесів можуть відслідковуватися стрімкі перепади тиску та температур, зміни швидкості та прискорення.

Таким чином, всі елементи у таких системах повинні витримувати задані умови навколишнього середовища та зберігати власну працездатність впродовж усього терміну експлуатації. Такі фактори можуть значно обмежити список доступних для використання компонентів та проектних рішень.

В залежності від особливостей застосування сенсорної мережі, можуть застосовуватися різноманітні середовища передачі даних, найбільш поширеними із яких є радіохвилі та дротовий зв'язок. При цьому дротовий зв'язок забезпечує кращу надійність каналу комунікації, а радіохвилі – простоту встановлення та розгортання сенсорної мережі.

В умовах обмеженого енергопостачання зростає важливість такого фактору, як рівень споживання енергії сенсорного вузла. Сюди входять як характеристики енергоспоживання окремих компонентів, так і алгоритми вимірювання, планування, передачі даних та функціонування вузла взагалі.

Як результат, у процесі проектування сенсорної мережі беруться до уваги одразу декілька різноманітних факторів, пов'язаних між собою. Причому вибір компонентів та технологій фактично перетворюється на вирішення завдання багатокритеріальної оптимізації.

2 ТЕХНОЛОГІЇ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

2.1 Спеціалізовані протоколи передачі даних

Існує велике розмаїття протоколів передачі даних, що використовуються в сенсорних мережах. Протоколи відрізняються за своїм рівнем (фізичний, каналний, мережевий, прикладний), фізичним середовищем поширення сигналу (провідні і бездротові), максимальним покриттям, швидкістю передачі даних та іншими характеристиками. В рамках цього підрозділу увага зосереджена на популярних бездротових протоколах трьох нижніх рівнів

ієрархії, спеціалізованих для роботи в мережах з обмеженими ресурсами: IEEE 802.15.4, ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHART, Thread та LoRaWAN [3].

Протокол IEEE 802.15.4 є основою багатьох протоколів вищих рівнів, зокрема ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHART та Thread. Визначає роботу на фізичному та каналному рівнях мережевої моделі OSI: діапазон частот передачі, формат модуляції, засоби контролю каналу та попередження колізій.

На фізичному рівні протокол використовує частоти неліцензованого діапазону Industrial Scientific and Medical (ISM): застосування частот до 1 ГГц регламентується законами окремих країн, у той час як частотний діапазон 2,4 ГГц є доступним у всьому світі. Швидкість передачі даних у мережі становить до 250 кбіт/с. Для попередження колізій та забезпечення масштабованості кожному вузлу виділяється гарантовані інтервали GTS (Guaranteed Time Slots), використовується схема попередження колізій

CSMA/CA. Підтримує два типи топології: сітчаста мережа (mesh network) та «зірка» (star). Вузли за своїми ролями розділяються на повнофункціональні пристрої FFD (full-function device) та пристрої з обмеженою функціональністю RFD (reduced-function device). У такій мережі пристрої з обмеженою функціональністю виконують тільки передачу пакетів на сусідні вузли, а повнофункціональні пристрої проводять ретрансляцію отриманих пакетів.

Загалом характеризується як енергоефективний протокол для передачі телеметрії та коротких фрагментів даних. Структура типової мережі на основі IEEE 802.15.4 представлена на рисунку 2.2 [4].

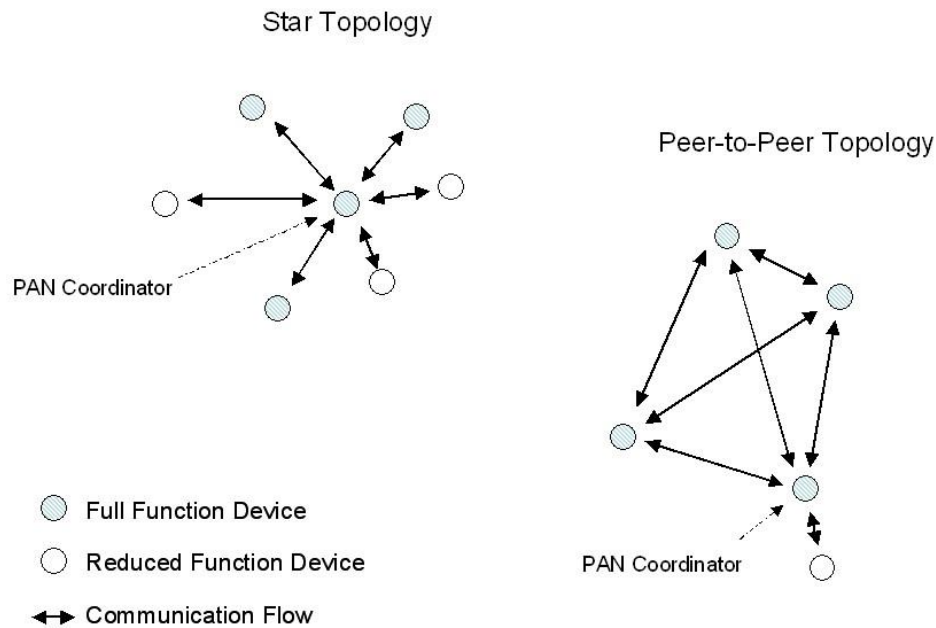


Рисунок 2.1 – Структура типової мережі на основі IEEE 802.15.4, зірка (star) та сітчаста (mesh) топологія

Протокол ZigBee повністю базується на протоколі IEEE 802.15.4 і визначає роботу протоколів вищих рівнів ієрархії: мережевого та прикладного. На мережевому рівні визначає порядок встановлення зв'язків між вузлами, порядок додання нових мережевих вузлів та маршрутизацію пакетів. На прикладному рівні протокол визначає загальний порядок комунікації між вузлами, пересилання команд та доступу до ресурсів (рисунок 2.2) [4]. Широко використовується в індустрії та наукових дослідженнях.

WirelessHART є спеціалізованим відкритим протоколом для передачі даних в індустріальному середовищі [13]. Базується на протоколі IEEE 802.15.4, визначає роботу на мережевому, транспортному та прикладному рівнях ієрархії мережевих протоколів. Серед особливостей: розширені інструменти безпеки, контролю та моніторингу стану мережі, гарантовані параметри швидкодії, затримки поширення та надійності мережі.

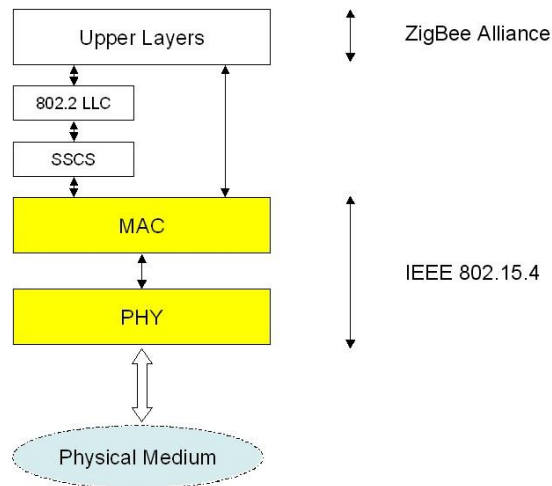


Рисунок 2.2 – Стек протоколів ZigBee

Стандарт 6LoWPAN визначає порядок маршрутизації з використанням протоколу IPv6 в мережах з низьким енергоспоживанням та високою вірогідністю втрати пакетів (Routing Over Low-Power and Lossy Networks). У порівнянні зі стандартними мережевими протоколами, 6LoWPAN визначає додаткові механізми сегментації пакетів та стиснення заголовків. Розміри пакетів мінімізовані, частина заголовків пакетів виключена взагалі. На каналному та фізичному рівні використовує протокол IEEE 802.15.4.

Мотивацією щодо використання протоколу 6LoWPAN можна назвати можливість організації обміну даними між вузлами за допомогою стандартного стеку протоколів TCP/IP, прямого виходу в глобальну мережу та взаємодії з традиційними комп'ютерними мережами через прості шлюзи. Також у протокол IPv6 надає можливість прямої адресації для набагато більшої кількості мережеских вузлів, ніж в мережах IPv4.

У свою чергу, протокол 6LoWPAN стає основою інших протоколів більш високого рівня, у тому числі – для стеку протоколів Thread.

Стандарт Thread базується на протоколі 6LoWPAN та використовує IPv6-адресацію для передачі пакетів. Технологія оптимізована для використання в домашньому середовищі, має латентність на рівні нижче 100

мс, використовує сітчасту топологію та не має єдиної точки відмови (single point of failure). Стек протоколів Thread зображено на рисунку 2.3 [14].

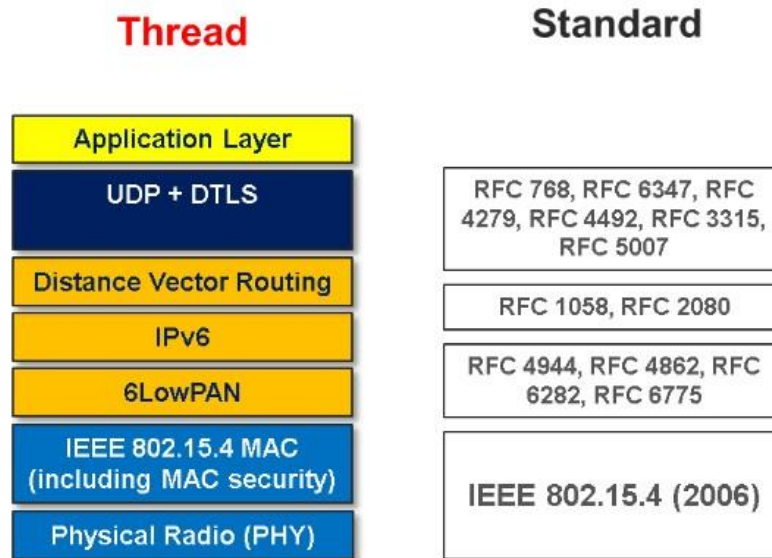


Рисунок 2.3 – Стек протоколів Thread

Аналогічно протоколам ZigBee та WirelessHART, визначає окремі ролі для мережевих пристроїв: лідер (leader), маршрутизатор, прикордонний маршрутизатор (border router), кінцевий пристрій (end device) та «сонний» кінцевий пристрій (sleepy end device). Таке розділення дозволяє виконати оптимізацію використання ресурсів у мережі, зокрема – енергоспоживання кінцевих пристроїв. Таким чином, прикордонний маршрутизатор виконує зв'язок з зовнішніми мережами (зокрема, традиційними комп'ютерними мережами), лідер виконує конфігурацію і моніторинг, а кінцеві пристрої (сенсори та актуатори) – взаємодію з об'єктами реального світу. Архітектура типової мережі на основі Thread зображена на рисунку 2.5 [3].

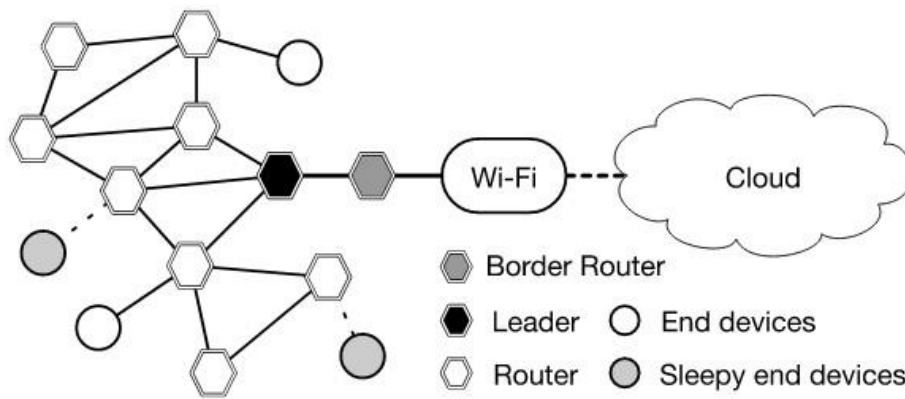


Рисунок 2.4 – Архітектура типової мережі на основі Thread

У той час, як протоколи IEEE 802.15.4, ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHART, Thread представляють протоколи для організації локальних мереж, протокол LoRaWAN дозволяє будувати глобальні мережі з широким покриттям. Заснована на технології LoRa (від англійського long range), у порівнянні з традиційними бездротовими глобальними мережами та мобільним зв'язком зокрема характеризується низькою швидкістю передачі даних та низьким енергоспоживанням. Складові мережі (вузли) розділяються на класи (A, B та C) за характером передачі даних та енергоспоживанням. Використовується в географічно розподілених сенсорних мережах.

2.2 Протоколи загального призначення у сенсорних мережах

В доповнення до спеціалізованих протоколів передачі даних, в сенсорних мережах можуть використовуватися засоби зв'язку загального призначення: WiFi, Bluetooth та технології мобільного зв'язку. Основними перевагами таких протоколів є поширеність, наявність готової інфраструктури та підтримка зі сторони доступних на ринку пристроїв. Зведена інформація про деякі протоколи передачі даних наведено на рисунку 2.5 [15].

Wireless Protocol	ZigBee	WiFi	Thread	Z-Wave	Bluetooth LE
IEEE Standard	802.15.4	802.11	802.15.4	N/A	802.15.1
Frequency band	2.4 GHz	2.4 GHz, 5 GHz	2.4 GHz	900 MHz	2.4 GHz
Nominal range	100 m	150 m	30m	30m	10 m
Peak current consumption	30 mA	116 mA	12.3 mA	17 mA	12.5 mA
Power consumption per bit	185.9 μ W/bit	0.00525 μ W/bit	11.7 μ W/bit	0.71 μ W/bit	0.153 μ W/bit
Data Rate	250 Kbps	1Gbps	250 kbps	100 Kbps	1 Mbps
Network topology	Star, Cluster, Mesh	Star, Mesh	Mesh	mesh	Star-Bus
Number of nodes per network	65000	250/access point	300	232	one-to-many

Рисунок 2.5 – Зведена інформація про деякі поширені бездротові протоколи передачі даних, спеціалізовані та загального призначення

Протоколи сімейства IEEE 802.11 WiFi призначені для побудови бездротових локальних мереж (Wireless Local Area Networks). Широко використовується в пристроях для кінцевих користувачів, індивідуального та домашнього використання – від принтерів та телефонів до телевізорів та комп'ютерів. В залежності від версії, працює у неліцензованих частотних діапазонах ISM 2,4 ГГц та 5 ГГц. І, в залежності від версії, підтримує швидкість передачі даних до 6 Гбіт/с за наявності декількох антен та вільних частотних каналів. Протоколи сімейства визначають роботу фізичного та канального рівнів ієрархії на різних частотах, порядок під'єднання вузлів, роумінгу, використання сітчастої топології і так далі.

Однак, у високої швидкості передачі даних є власна ціна – енергоспоживання. При передачі даних в мережі WiFi використовується на порядок більше енергії, ніж при використанні спеціалізованих протоколів. Додатково, для пристроїв в мережі WiFi використання режимів енергозбереження є ускладненим: протоколи не є оптимізованими для частого під'єднання та виходу мережевих вузлів, а підключення до мережі займає суттєвий проміжок часу, в порядку секунд та десятків секунд.

Окремою проблемою можна виділити складності масштабування мережі та проблеми з затуханням сигналу, що частково вирішуються використанням сітчастої топології, ретрансляторів та коштовного комерційного обладнання.

Для вирішення проблем затухання, радіусу зв'язку та енергоспоживання комітетом IEEE запропоновано стандарт 802.11ah – стандарт, що визначає роботу мереж WiFi на частотах до 1 ГГц. Але, нажаль, стандарт все ще не отримав широкої підтримки зі сторони виробників апаратного забезпечення.

Як і WiFi, сімейство протоколів Bluetooth має свої сильні сторони: поширеність, доступність інфраструктури та відносно високу швидкість передачі даних. Як і WiFi, протоколи Bluetooth до версії 4.0 потерпають від підвищеного енергоспоживання. На відміну від WiFi, призначенням Bluetooth є побудова персональних, невеликих та тимчасових мереж. Для передачі даних використовують спектр частот ISM 2,4 ГГц

Протоколи Bluetooth версій 2.1 і нижче використовують scatternet – топологію, що складається з великої кількості малих мереж (piconet). Ілюстрація топології в мережах Bluetooth Classic зображена на рисунку 2.6 [3].

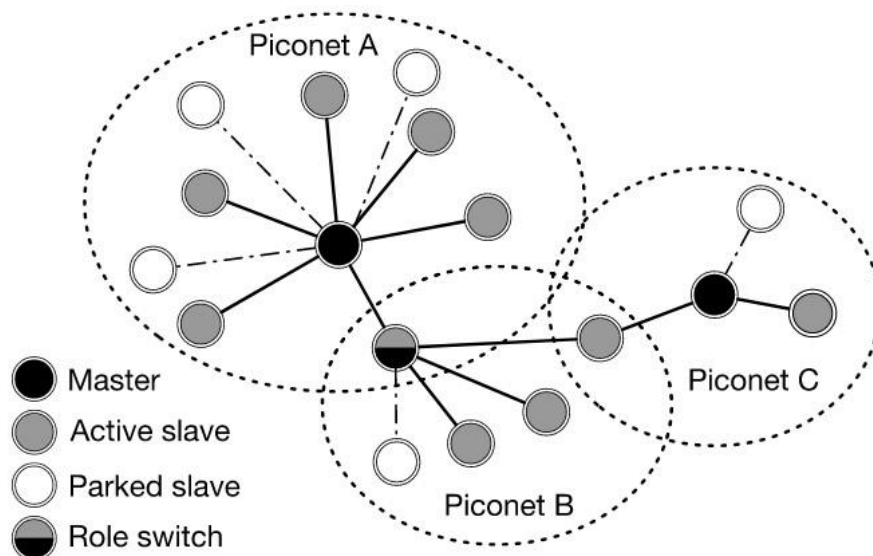


Рисунок 2.6 – Топологія мереж Bluetooth версій 2.1 і нижче

У кожній малій мережі виділяється тільки один головний пристрій (master), до семи активних (одночасно підключених) периферійних, а також до 255 периферійних пристроїв, що знаходяться у режимі очікування (parted slave). Пряме об'єднання малих мереж та використання сітчастої топології є неможливим. Єдиний засіб поєднання таких мереж – використання спільних вузлів, що поперемінно переключаються та передають дані між мережами.

Версії Bluetooth 2.1 і нижче часто поєднують у єдину групу та називають єдиним терміном – Bluetooth Classic. Основним призначенням цих протоколів є підключення периферійних пристроїв та передача даних між комп'ютерами, телефонами та іншими мобільними пристроями. Звідси: складна процедура встановлення зв'язку між пристроями, дуже обмежена здатність до масштабування, відсутність підтримки сітчастої топології та слабка загальна придатність до застосування в сенсорних мережах.

Підбиваючи підсумки, слід зазначити, що протоколи WiFi та Bluetooth знаходять своє застосування у якості засобів зв'язку з зовнішніми системами – мобільними клієнтськими пристроями, комп'ютерними мережами, глобальною мережею та хмарними сервісами. В такому випадку недоліки щодо енергозбереження нівелюються підведенням постійного джерела енергії (наприклад, використанням мережних адаптерів), а масштабування – встановленням єдиного контролера (концентратора, маршрутизатора), що буде пересилати дані та виконувати зв'язок між сенсорною мережею та зовнішніми системами.

2.3 Протокол Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (скорочено BLE; іноді – Bluetooth Smart) – це загальна назва для протоколів Bluetooth версій 4.0 і вище. BLE розроблено як пряму відповідь на проблеми «класичного» Bluetooth – загальну складність,

затримку встановлення зв'язку та розповсюдження інформації, високий рівень споживання енергії, вузький радіус дії та слабку масштабованість.

Засобом досягнення поставленої мети стало загальне спрощення протоколу, переглядання процесів комунікації, обмеження розміру пакетів та проведення оптимізації. Як результат, пристрої BLE абсолютно не сумісні з Bluetooth Classic і навпаки. Виключенням є пристрої, що були спеціально розроблені з підтримкою двох несумісних протоколів одночасно.

Порівняння особливостей різних версій стандарту Bluetooth (Bluetooth Classic, Bluetooth Low Energy 4.0, 4.1, 4.2 та 5) наведено на рисунку 2.7 [3].

	BR/EDR	BLE 4.0/4.1	BLE 4.2	BLE 5 [145]			
				LE Coded S=2	LE coded S=8	LE 1M	LE2M
Channels	79 (1 MHz)	40 (2 MHz)	40 (2 MHz)	40 (2 MHz)	40 (2 MHz)	40 (2 MHz)	40 (2 MHz)
Advertisement Ch.	N/S	3	3	3 (P) 37 (Sc)	3 (P) 37 (Sc)	3 (P) 37 (Sc)	3 (P) 37 (Sc)
TX power (dBm)	0 to 20	-20 to 10	-20 to 10	-20 to 20	-20 to 20	-20 to 20	-20 to 20
RX sensitivity (dBm)	-93 [146]	-97 [147]	-97	-99	-103	-95	-89
Peak current (mA)	<30	<15	<15	<15	<15	<15	<15
Latency (ms)	100	<6	<6	<6	<6	<6	<6
Range (m)	10-100	10-100	10-100	40-400	20-200	10-100	10-100
Data rate (Mbps)	1, 3, 24	1	1	0.5	0.125	1	2
Max payload (byte)	1021	37	255	255	255	255	255
Max ADV payload (byte)	NS	37	37	255	255	255	255
Voice channels	3	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Max active nodes	8	Unlimited	Unlimited	Unlimited	Unlimited	Unlimited	Unlimited
PDU format	Several	Single	Single	Single (coded)	Single (coded)	Single	Single

Рисунок 2.7 – Порівняння стандартів Bluetooth

На фізичному рівні в протоколах BLE виконується розділення частотного спектру на 40 каналів шириною 2 МГц. 37 каналів використовуються для традиційної передачі даних з попереднім встановленням зв'язку, але 3 інших канали використовуються для нового режиму – ширококомовної передачі даних (advertising mode).

Відповідно, в протоколах BLE вводяться нові стани роботи мережевих вузлів: прослуховування (scanning), очікування, передача ширококомовних повідомлень (advertising), ініціалізація підключення (initiating) та встановлення зв'язку між вузлами. Загальна діаграма станів вузла в мережі BLE зображена на рисунку 2.8 [16].

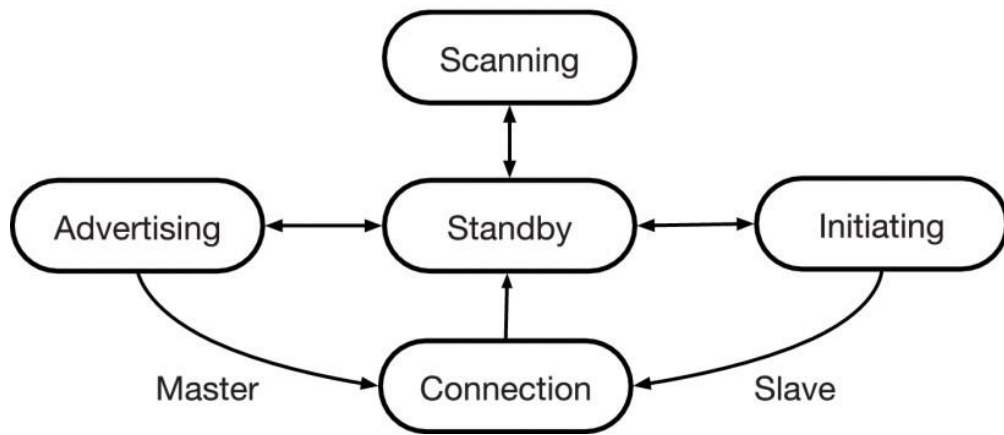


Рисунок 2.8 – 5 можливих станів мережевого вузла в BLE

Режим широкомовної передачі даних дозволяє передавати дані без встановлення попереднього з'єднання між вузлами. Об'єм таких даних є відносно невеликим та складає не більше 37 байт в версіях BLE нижче за 5.0. Зазвичай цей режим використовується для обміну службовою інформацією, знаходження пристроїв (device discovery), анонсування, сповіщення про появу певних подій та доступність нової інформації, а також у процедурі встановлення нового зв'язку між вузлами.

Процедура встановлення каналу передачі даних між двома вузлами розпочинається головним (master) пристроєм у відповідь на появу широкомовних пакетів. У порівнянні з широкомовним режимом, – збільшується максимальний розмір пакету даних (починаючи з Bluetooth 4.2), використовуються інші радіоканали та оновлена технологія динамічної зміни каналів (frequency hopping). Таким чином забезпечується надійний бездротовий зв'язок між двома вузлами.

Режим прослуховування (scanning) використовуються вузлами для отримання широкомовного трафіку. Розрізняють два види прослуховування: активне (з передачею пакетів у відповідь на отримані широкомовні пакети) і пасивне (без передачі таких пакетів).

У режимах широкомовної передачі та прослуховування

використовується тільки три канали: 37, 38 та 39. Прослуховування на цих каналах відбувається послідовно. А обмежена кількість таких каналів дозволяє пришвидшити процеси знаходження пристроїв і встановлення зв'язку, а також зменшує навантаження на джерело живлення. Загальна схема передачі та прослуховування ширококомовних пакетів наведена на рисунку 2.9 [3]

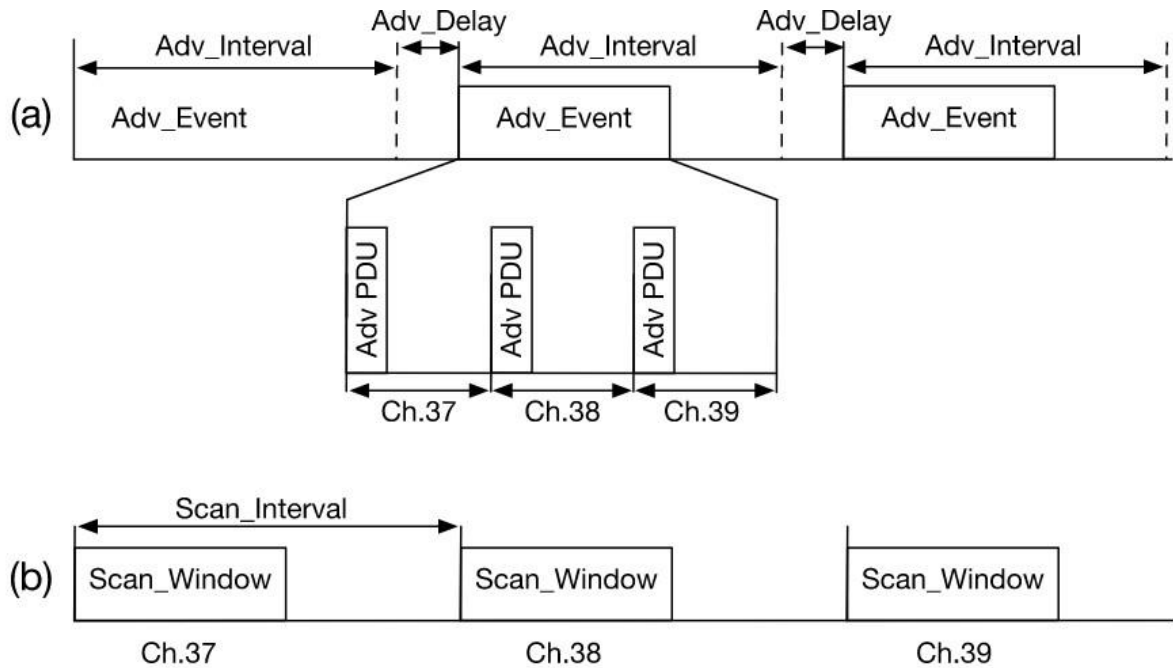


Рисунок 2.9 – Робота вузлів в режимі ширококомовної передачі (a) та прослуховування (b)

На основі протоколів фізичного та каналного рівнів Bluetooth Low Energy будуються протоколи більш високих рівнів – HCI (Host Controller Interface), L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) та GATT (Generic Attribute Profile). Ці протоколи реалізують механізми забезпечення безпеки та захисту інформації, уможливають уніфікований доступ до ресурсів мережевих пристроїв, сегментацію та мультиплексування трафіку, порядок взаємодії з апаратним забезпеченням і так далі.

Додатково, можливе використання стеку TCP/IP та протоколу IPv6 в мережах BLE за допомогою профілю IPSP (Internet Protocol Support Profile) та стандарту IETF RFC 7668 (IPv6 over Bluetooth Low Energy).

На більш високих рівнях ієрархії розміщуються прикладні протоколи, профілі та сервіси (рисунок 2.10) [17].

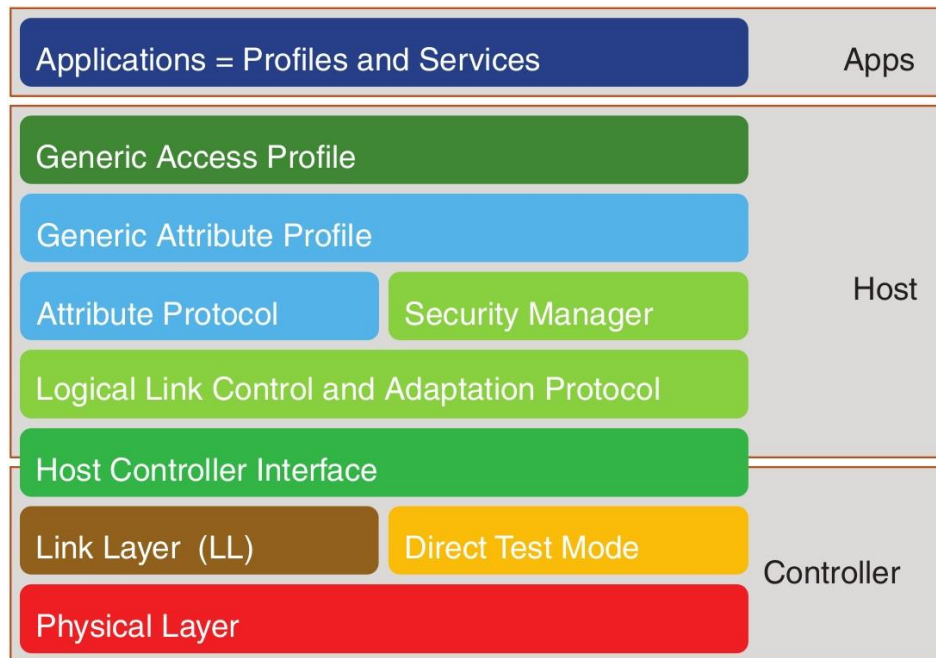


Рисунок 2.10 – Стек протоколів BLE

2.4 Інтерференція та співіснування протоколів

Як відомо [3], бездротові мережі є вразливими до інтерференції – «втручання» сторонніх радіохвиль з пошкодженням корисного сигналу.

Джерелами інтерференції можуть виступати як інші передавачі, встановлені в радіусі поширення електромагнітної хвилі, так і сторонні джерела електромагнітної енергії (мікрохвильові печі, індуктивні навантаження тощо).

Особливо гострою проблема інтерференції стає при використанні великої кількості вузлів, що працюють в однаковому діапазоні частот та використовують суміжні радіоканали. У випадку сенсорних мереж,

найбільшим джерелом інтерференції можна назвати сигнал WiFi: потужний, широкопasmовий та дуже поширений у міському середовищі.

У якості ілюстрації на рисунку 2.11 приведена схема розподілення радіоканалів для популярних бездротових протоколів, що використовують смугу частот 2,4 ГГц [3].

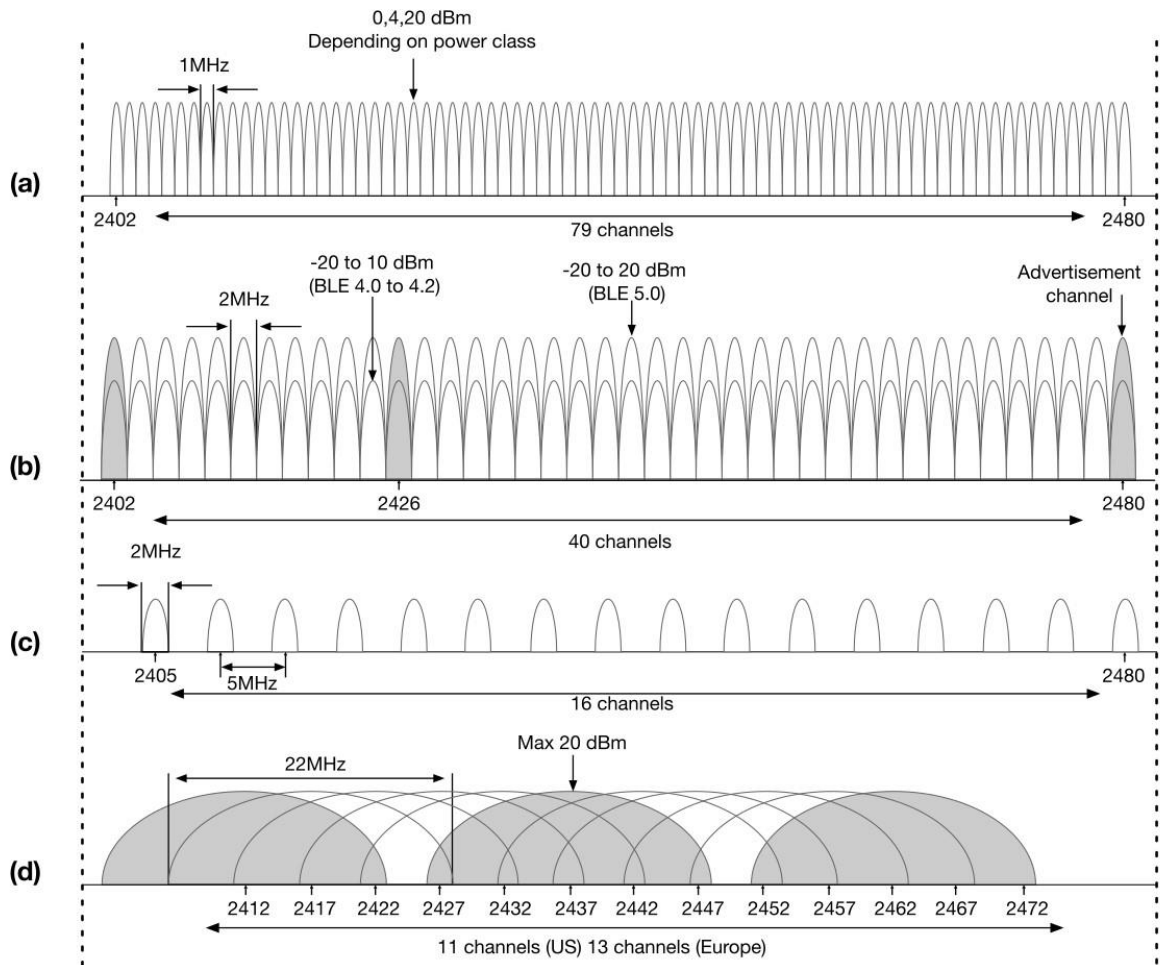


Рисунок 2.11 – BR/EDR (a), BLE (b), IEEE 802.15.4 (c) та WiFi (d) – протоколи, що розділяють єдину смугу частот 2,4 ГГц

Для запобігання інтерференції, появи колізій та втрати пакетів, протоколи реалізують різноманітні підходи.

Протоколи WiFi та IEEE 802.15.4 використовують схему з запобіганням колізій CSMA/CA (carrier-sense multiple access with collision avoidance). Перед початком нового сеансу передачі відбувається попереднє прослуховування

радіоканалу на предмет його використання та наявності існуючого сеансу передачі даних. За наявності вільного каналу в протоколі WiFi передавач розсилає широкомовне попередження про початок передачі і, після підтвердження зі сторони приймаючої сторони, розпочинає саму передачу.

Основним мінусом CSMA/CA для сенсорних мереж можна назвати підвищену витрату енергії через необхідність попереднього прослуховування каналу перед початком передачі. Основним мінусом протоколів WiFi та IEEE 802.15.4 з точки зору уникнення колізій можна назвати використання фіксованих радіоканалів. Хоча, цей недолік усунуто в стандарті IEEE 802.15.4e з впровадженням підтримки режиму TSCH (Time-Slotted Channel Hopping).

В протоколі BLE використовуються два інших механізми: динамічна зміна радіоканалів (frequency hopping) та використання для широкомовного трафіку каналів, що не перекриваються з основними каналами WiFi. Таким чином, основний службовий трафік опиняється поза межами інтерференції від сигналів WiFi, а втрачена інформація просто повторюється на новому каналі.

В якості універсальних методів боротьби з колізіями можна відзначити зменшення потужності передавачів, встановлених в радіусі поширення радіохвилі, використання фіксованих часових вікон зв'язку та довгих проміжків часу між передачами даних. Основною мотивацією впровадження механізмів боротьби з колізіями можна назвати попередження втрати пакетів, їх повторної передачі і, як результат, енергоспоживання всього вузла.

3 ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Проблема вибору джерела енергії

Враховуючи вимоги та фактори проектування сенсорних мереж, що наведені в пункті 1.3 роботи, важливим стає питання забезпечення всіх

компонентів системи належним джерелом енергії. Проблема вибору джерела енергії ускладнюється через суперечливість самих факторів проектування та характеристик компонентів системи: мобільність суперечить з використанням дротових джерел енергії, обмежені розміри не дозволяють встановити потужні джерела енергії, а обмеження вартості є завадою для використання дорогих джерел енергії з високою енергетичною щільністю.

Таким чином, вибір джерел енергії пов'язаний з пошуком компромісу між усіма згаданими факторами та вимогами до створюваної системи.

Основними варіантами при виборі джерела енергії є хімічні елементи (батареї, акумулятори), постійні джерела (електромережі), а також засоби збирання та використання енергії навколишнього середовища [18-20]. Зведена характеристика для деяких джерел енергії наведена на рисунку 3.1 [19].

Power Source	P/cm ³ (μW/cm ³)	E/cm ³ (J/cm ³)	P/cm ³ /yr (μW/cm ³ /Yr)	Secondary Storage Needed	Voltage Regulation	Comm. Available
Primary Battery	-	2880	90	No	No	Yes
Secondary Battery	-	1080	34	-	No	Yes
Micro-Fuel Cell	-	3500	110	Maybe	Maybe	No
Heat engine	-	3346	106	Yes	Yes	No
Radioactive(⁶³ Ni)	0.52	1640	0.52	Yes	Yes	No
Solar (outside)	15000 *	-	-	Usually	Maybe	Yes
Solar (inside)	10 *	-	-	Usually	Maybe	Yes
Temperature	40 * †	-	-	Usually	Maybe	Soon
Human Power	330	-	-	Yes	Yes	No
Air flow	380 ††	-	-	Yes	Yes	No
Vibrations	200	-	-	Yes	Yes	No

Рисунок 3.1 – Зведена порівняльна характеристика для деяких джерел енергії
3.2 Батареї та акумулятори

Батареї та акумулятори – традиційне джерело живлення бездротових сенсорних вузлів. У порівнянні з іншими джерелами енергії, вони мобільні,

передбачувані та прості в експлуатації. Однак їх мінусами є обмежена ємність та необхідність періодичного обслуговування (заміни та перезарядження).

Всі батареї можна розділити на дві великі категорії: первинні (primary) та вторинні (secondary) батареї [21], приклади зображено на рисунку 3.2 [22].

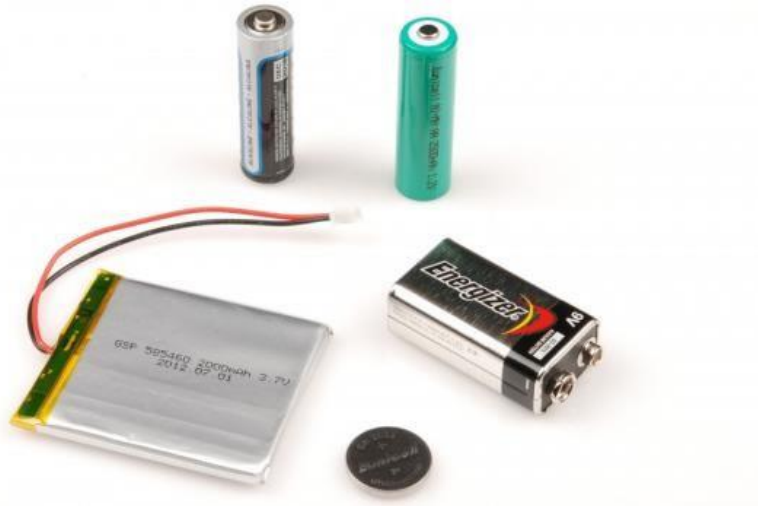


Рисунок 3.2 – Різновиди первинних батарей та акумуляторів

До первинних належать всі одноразові батареї, тобто батареї без можливості повторного зарядження. Ємність таких батарей залежить від технології та розміру: від 200 мА·год для літєвих батарей формату CR2032 до 1800 мА·год для літєвих батарей формату BR-A і 3000 мА·год для лужних батарей формату AA. Літєві батареї часто обирають у якості джерела живлення для сенсорних вузлів через енергетичну щільність таких батарей.

До вторинних батарей належать всі хімічні елементи живлення з можливістю перезарядження. Найчастіше в сенсорних вузлах використовуються літій-іонні, літій-полімерні, нікель-метал-гідридні та нікель-кадмієві вторинні батареї. Характеристики батарей також сильно відрізняються в залежності від розмірів та технології. Серед загальних рис можна виділити обмежений ресурс циклів перезарядження, високу чутливість до температури (для літєвих батарей) та більш низьку енергетичну щільність

у порівнянні з первинними батареями аналогічних технологій [12]. На рівні з супер-конденсаторами вторинні батареї часто використовуються у ролі елемента зберігання, буфера для енергії, отриманої з зовнішніх джерел [23].

3.3 Постійні джерела енергії

У випадках високого енергоспоживання, підвищених вимог до надійності та можливості прокласти силовий кабель, найбільш надійним джерелом живлення є електромережа. Для випрямлення та стабілізації електроенергії до заданих параметрів зазвичай використовують зовнішні мережеві адаптери. Якщо дозволяє конструкція, блоки живлення можуть встановлюватися безпосередньо в корпусі пристрою-споживача.

3.4 Використання енергії навколишнього середовища

Альтернативним рішенням для живлення сенсорних вузлів є збирання енергії навколишнього середовища та від зовнішніх джерел – energy harvesting (scavenging). Серед доступних джерел енергії найчастіше використовують світло, різницю температур, кінетичну та радіочастотну енергію [24-26].

У порівнянні з традиційною альтернативною енергетикою, системи зі збиранням енергії оперують з дуже малими об'ємами доступної енергії – порядку сотень мікровоат та десятків міліват [25-26]. Такі об'єми диктують підвищені вимоги до ефективності всіх компонентів системи: від пристроїв зв'язку та мікроконтролерів до алгоритмів та підсистем керування живленням.

При проектуванні враховуються стабільність джерела енергії, його передбачуваність та керованість [26]. Стабільне у часі та відносно потужне джерело енергії дозволяє відмовитися від акумуляторів та забезпечити безперебійну роботу пристрою [27]. Відсутність стабільності компенсується

додаванням буферних елементів та «розумним» керуванням режимами енергозбереження. Наявність коротких потужних імпульсів енергії дозволяє відмовитися від буферних елементів, але потребує максимальної швидкості «пробудження» сенсорного вузла [25].

При порівнянні ефективності використання різноманітних джерел енергії, найкращі показники належать сонячному світлу. При встановленні на відкритому просторі, сонячні батареї забезпечують достатньо енергії для безперебійної роботи сенсорного вузла, а передбачуваність дозволяє використовувати батареї для функціонування вночі. Тим не менш, у приміщенні їх ефективність різко зменшується [25].

Серед інших перспективних джерел можна відмітити кінетичну енергію, вібрації та деформації. Для перетворення кінетичної енергії в електричну використовуються п'єзоелектричні елементи та електромагніти у комбінації зі стабілізаторами та ректифікаторами [26, 28].

Використання радіочастотної енергії обмежене через сильну залежність від відстані до передавача [25,29]. Теплова енергія придатна для живлення індустриальних сенсорів, в умовах високої різниці температур.

Загальна структура блоку живлення сенсорного вузла з застосуванням технологій збирання енергії представлена на рисунку 3.3 [18].

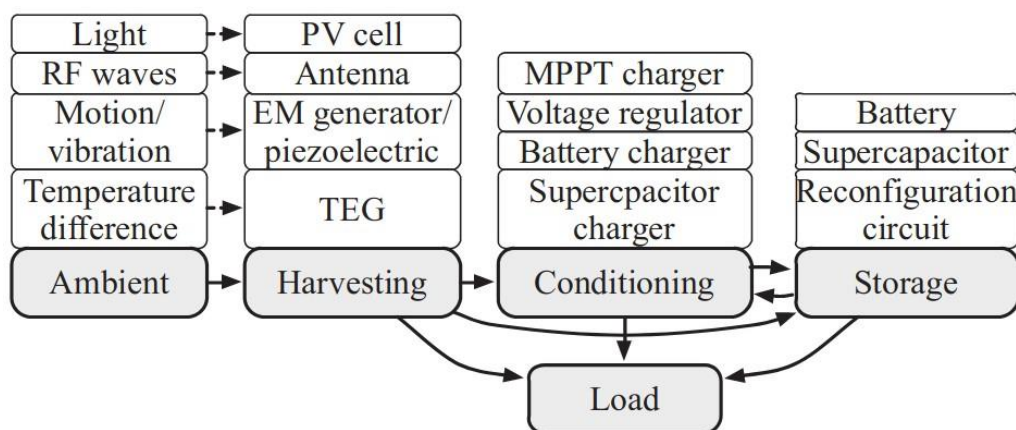


Рисунок 3.3 – Загальна структура блоку живлення для вузлів з використанням технології збирання енергії

4 ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СЕНСОРНИХ СИСТЕМАХ

4.1 Передумови щодо використання технологій збереження енергії

Як згадано у пункті 1.3 цієї роботи, розробка сенсорних вузлів та сенсорних мереж на їх основі пов'язана з великою кількістю обмежень. Обмеження максимального розміру сенсорного вузла не дозволяє встановити елементи живлення високої потужності, наявність батарей потребує їх періодичного обслуговування, а необхідність встановлення сенсорів у місцях з обмеженим доступом робить обслуговування батарей економічно не вигідним чи взагалі неможливим.

Як зазначено у пункті 3.4, для живлення сенсорних вузлів може використовуватися енергія, що збирається з навколишнього середовища: енергія світла, різниця температур, тощо. Як результат, постає питання максимально ефективної та, в деяких випадках, максимально швидкої утилізації енергії для виконання вимірювань та передачі даних у мережі.

Таким чином, постає завдання максимального енергозбереження в бездротових сенсорних мережах. Технології енергозбереження дозволяють збільшити період автономної роботи системи, знизити витрати на обслуговування, а також відкривають нові можливості щодо застосування сенсорних вузлів для вирішення питань моніторингу у складних умовах.

4.2 Огляд методів енергозбереження в сенсорних мережах

Всі методи збереження енергії у сенсорних мережах можна розділити на чотири великі групи: оптимізація циклів сну/роботи (sleep/wakeup schemes), оптимізація даних (data-driven), оптимізація маршрутів та радіо-обміну (radio and routing), а також оптимізація апаратного забезпечення та алгоритмів керування (hardware and control optimization).

Кожна з цих категорій включає в собі вкладені категорії. Кожна вкладена категорія має вертикальну характеристику, тобто реалізація окремих схем енергозбереження зачіпає всі рівні реалізації сенсорного вузла: від низького рівня апаратного забезпечення до алгоритмів маршрутизації та програмного забезпечення.

Ілюстрація для запропонованої класифікації представлена на рис. 4.1.

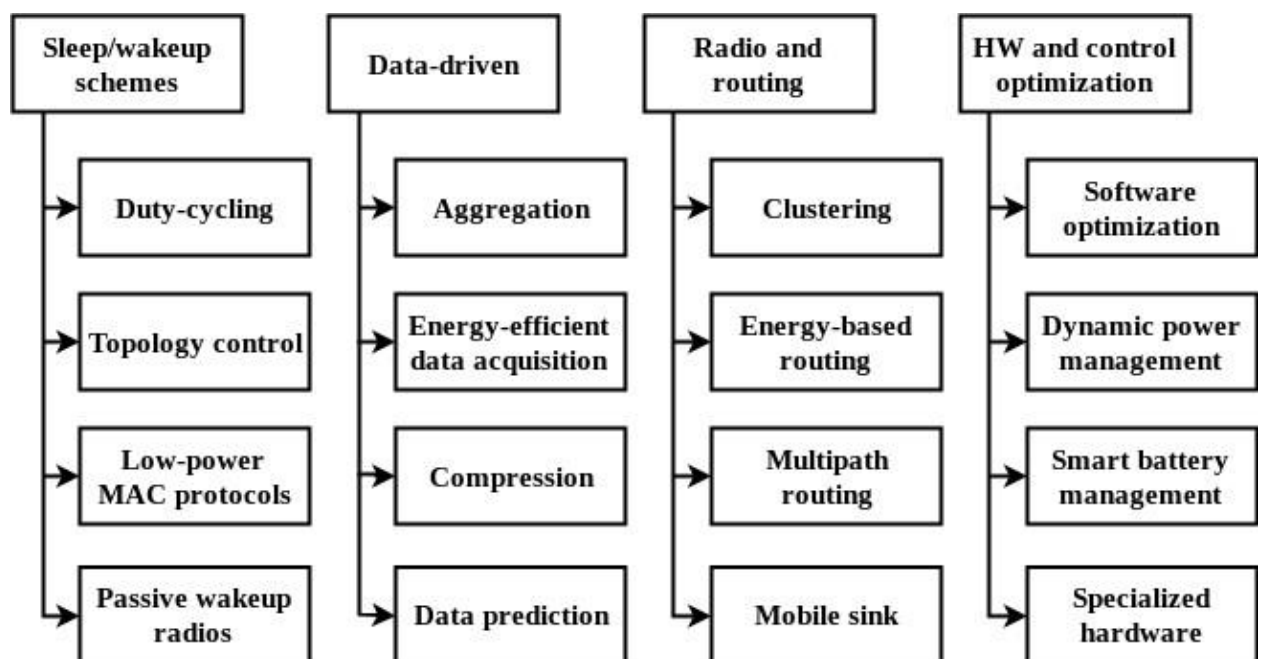


Рисунок 4.1 – Класифікація механізмів забезпечення енергоефективності

Серед всіх методів оптимізації циклів сну/роботи можна виділити 4 вкладені категорії: керування робочим циклом (duty cycling), керування топологією мережі (topology control), використання спеціальних протоколів доступу до каналу (low-power MAC protocols) та використання бездротових

модулів зв'язку з пасивним пробудженням (passive wakeup radios). Основою таких методів є алгоритми планування та переключення сенсорного вузла між активним станом роботи та пасивним станом збереження енергії в залежності від деяких параметрів.

Схеми керування робочим циклом визначають алгоритми пробудження сенсорного вузла для забезпечення успішної комунікації, отримання та ретрансляції мережевих пакетів від інших вузлів мережі. Більшу частину власного часу сенсорний вузол знаходиться у режимі збереження енергії, а пробудження відбуваються у відповідь на настання деякої події. Таким чином більшу частину часу вузли не беруть участі у процесі обміну пакетами, а затримка розповсюдження інформації зростає. Пробудження модуля зв'язку відбувається при отриманні пакету від іншого вузла (on-demand), асинхронно у довільні проміжки часу (asynchronous) та синхронно на основі визначеного графіку (scheduled rendezvous).

Детальне дослідження схем керування робочим циклом наведено у роботі [30].

У схемах з керуванням топологією використовується надлишок (redundancy) з'єднань між вузлами сенсорної мережі. При наявності надлишкової кількості вузлів можливо використовувати тільки невелику множину вузлів для передачі даних та справної роботи сенсорної мережі. Тільки невелика підмножина вузлів знаходиться у активному стані та здатна до ретрансляції даних у один момент часу. Топологія з'єднань, у свою чергу, адаптується у залежності від поточної завантаженості мережі, а надлишкові вузли перемикаються у режим енергозбереження.

Питання оптимального вибору множини активних вузлів є предметом окремих досліджень. Зокрема, у роботі [31] множина активних вузлів визначається на основі залишку доступної енергії. А у роботі [32]

пропонується розділення вузлів на групи за місцезнаходженням: тільки один сенсор з усієї групи сенсорів є активним у кожний момент часу.

У енергоефективних схемах керування доступом до каналу (MAC, media access control) тісно поєднуються питання енергозбереження та організації обміну даними між вузлами, як зазначено нижче.

У протоколах з розділенням за часом (time-division multiple access, TDMA-based protocols) доступ до каналу передачі даних розбивається на суворо визначені часові проміжки: сенсорні вузли здатні приймати та відправляти інформацію тільки у межах власного часового проміжку, а увесь інший час вони знаходяться у режимі збереження енергії, не передають та не отримують жодної інформації. Зокрема така схема керування входить до стеку протоколів Bluetooth Low Energy, але рідко використовується у чистому вигляді через вразливість до інтерференції та колізій [30].

Альтернативною схемою керування доступом у сенсорних мережах є керування з попередженням «суперечок» (contention-based protocols). Основним завданням таких схем є саме попередження колізій. Вони передбачають попереднє прослуховування каналу перед початком передачі та просунуті алгоритми затримки між спробами повторного доступу (back-off algorithms). Серед яскравих представників – протокол IEEE 802.15.4 [33], а також протоколи B-MAC (Berkeley MAC) та S-MAC (Sensor-MAC), описані у роботах [34] та [35] відповідно.

Окремою категорією схем керування робочим циклом є схеми керування з застосуванням пасивних модулів бездротового зв'язку, що не споживають електричної енергії у режимі прослуховування. При детектуванні радіосигналу радіо-модуль сповіщає про подію блок керування та пробуджує сенсорний вузол. Одна з реалізацій такого підходу на основі технології RFID описана у роботі [36].

Інша велика категорія методів спрямована на оптимізацію того об'єму даних, які передаються у сенсорній мережі. Розділяються на 4 вкладені категорії: об'єднання даних (aggregation), енергоефективне отримання даних (energy-efficient data acquisition), стискання (compression) та передбачення (data prediction).

У роботі [37] приводяться результати детального дослідження питання об'єднання даних у сенсорних мережах. В них описується процес попередньої обробки та агрегації даних на проміжних вузлах сенсорної мережі, що дозволяє скоротити об'єм даних на передачу та, як результат, скоротити енергетичні витрати у мережі. У якості альтернативи може використовуватися стискання (компресія) даних без втрат на вихідних та проміжних вузлах [38].

Методи енергоефективного отримання даних базуються на оптимізації опитування та циклів роботи сенсорних блоків. Як було вказано у розділі 2, сенсорні блоки можуть використовувати об'єми енергії, що перевищують енергоспоживання усіх інших модулів загалом. Для оптимального використання енергії можуть використовуватися комбінації сенсорів. У роботі [38] наведено приклад спостереження за об'єктом, де для детектування вторгнення пропонується використовувати звукові сенсори та вмикати енергетично дорогі камери тільки при спрацюванні таких енергетично дешевих сенсорів.

У якості альтернативи можуть застосовуватися адаптивні алгоритми та методи передбачення даних на основі моделі досліджуваного явища. Один з алгоритмів планування вимірювань з використанням енергетично дорогих сенсорів запропоновано у роботі [39], а повний огляд методів наведено у роботі [30].

Третя велика категорія методів спрямована на оптимізацію маршрутизації та передачі трафіку довільного розміру між вузлами мережі. У свою чергу, всі такі методи можна поділити на: методи кластеризації

(clustering), маршрутизації на основі енергетичних показників (energy-based routing), балансування маршрутів (multipath routing) та методи з використанням мобільних вузлів збору даних (mobile sinks)

Алгоритми кластеризації засновані на ієрархічній моделі побудови сенсорної мережі. Вся сенсорна мережа розбивається на окремі незалежні сегменти – кластери. У рамках одного кластеру обирається один вузол, що відповідає за координацію роботи та збирає дані від усіх інших вузлів кластеру – cluster head (CH). Таким чином передача даних від окремих вузлів відбувається на невеликі відстані у чітко визначених межах, що дозволяє зменшити потужність передавачів. Більш того, всі вузли окрім CH отримують можливість ігнорувати трафік сторонніх сенсорів та проводити більшу частину часу у режимі енергозбереження. Приклад такої мережі наведено на рисунку 4.2 [39].

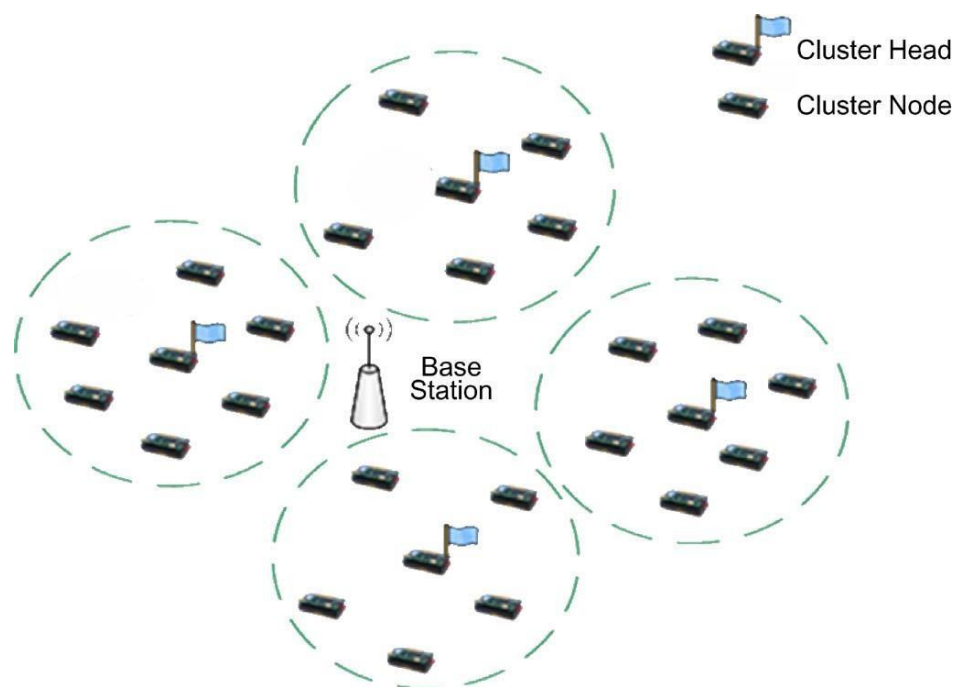


Рисунок 4.2 – Кластеризація та визначення головного вузла у кластері (Cluster Head)

Питання кластеризації та вибору СН широко досліджується у наукових роботах. Зокрема у роботі [40] запропоновано протокол LEACH – адаптивний протокол з випадковим вибором СН, ротацією СН та об'єднанням даних (data aggregation and reduction). А у роботі [41] запропоновано протокол HEED, що передбачає вибір СН на основі залишку доступної енергії на вузлах та деякому вторинному параметрі, як, наприклад, близькість до сусідніх вузлів.

Інший підхід – це маршрутизація на основі енергетичних показників. В таких мережах у якості метрики маршруту від вимірювального вузла до точки збору даних застосовується кількість залишкової енергії. Одна з можливостей застосування такої метрики досліджується у роботі [42].

Методи балансування маршрутів засновані на періодичній ротації проміжних вузлів ретрансляції для попередження передчасного виснаження енергетичних запасів вузлів. А методи з мобільним вузлом збору даних дозволяють скоротити маршрут передачі даних від вузла, що безпосередньо виконує вимірювання до вузла збору даних [38].

Як зазначено вище, різноманітні методи оптимізації циклів сну/роботи, оптимізації даних, маршрутів та радіо-обміну використовують складні алгоритми контролю та обробки даних на вузлах мережі, а також потребують апаратної підтримки режимів сну та пробудження вузла. Таким чином гостро постає питання оптимізації блоку керування сенсорним вузлом, а саме його апаратного та програмного забезпечення.

До групи методів оптимізації апаратного забезпечення та алгоритмів блоку керування (hardware and control optimization) входять методи оптимізації програмного забезпечення (software optimization), динамічне керування енергопостачанням (dynamic power management), застосування спеціалізованого апаратного забезпечення (specialized hardware), а також

методи оптимального використання джерел енергії, зокрема акумуляторів (battery management).

Методи оптимізації програмного забезпечення (ПЗ) спрямовані на оптимізацію програмних реалізацій алгоритмів керування та обробки даних в сенсорних вузлах. У роботі [43] описуються стандартні способи оптимізації ПЗ на рівні алгоритмів, сирцевого коду та інструкцій. А у роботі [44] досліджується вплив методів оптимізації на енергоспоживання, швидкість та розмір вбудованого ПЗ.

Серед проблем написання енергетично-ефективного програмного забезпечення у роботі [45] називається загальна складність програмного коду, використання абстракцій високого рівня та закритих бібліотек від виробників апаратного забезпечення, що ускладнюють аналіз енергоефективності окремих програмних рішень. Також авторами відмічається важливість оптимального використання апаратних ресурсів та апаратних режимів збереження енергії.

Разом з методами написання енергетично ефективного програмного забезпечення використовуються методи динамічного керування енергопостачанням. У роботі [46] відмічається, що в електронних схемах на базі технології КМОН (CMOS) зростання споживання енергії є пропорційним до зростання тактової частоти та квадрату напруги.

Таким чином для зменшення енергоспоживання доцільно використовувати динамічне керування напругою та тактовою частотою елементів сенсорного вузла. Вичерпний огляд сучасних методів динамічного керування енергопостачанням у комбінації з механізмами планування в операційних системах реального часу наведено у роботі [47]. Зі сторони апаратного забезпечення необхідно приділяти увагу ефективності DC-DC перетворювача та блоку керування живленням взагалі.

Окрему увагу при проектуванні та розробці сенсорного вузла слід приділяти характеристикам того джерела енергії, що використовується у проекті. Справа в тому, що характеристика джерел енергії не є лінійною та потребує адаптації використання у апаратній та програмній реалізації пристрою.

Наприклад у роботі [48] згадується про характеристики батарейних елементів та пропонується метод оцінки часу автономної роботи у залежності від показників стуму та напруги. А у роботі [49] пропонується використовувати суперконденсатори у якості енергетичних буферів для зменшення динамічного навантаження на батарейний елемент та збільшення часу автономної роботи.

У той самий час стратегії використання відновлюваної енергії сонця, вібрації та інших джерел за технологією збору енергії (energy harvesting) різночче відрізняються від стратегій використання джерел з фіксованим об'ємом енергії. Наприклад за наявності надлишку енергії та відсутності буферних елементів може стояти завдання максимально швидкої утилізації отриманої енергії. Більш детально питання оптимального використання зібраної енергії досліджується у роботах [50] та [51].

Однак в деяких випадках вирішити питання енергоспоживання чисто програмними методами не є можливим: деякі завдання потребують виконання складних алгоритмів та проведення обчислень, для виконання яких стандартні блоки мікроконтролерів не є пристосованими. Таким чином з'являється необхідність у використанні спеціалізованих обчислювачів, блоків керування та обробки.

Серед найбільш поширених та універсальних блоків для сучасних систем на кристалі (system on chip, SoC) можна відмітити апаратні блоки шифрування інформації. Вони використовуються у інтегрованих рішеннях для

реалізації захищених протоколів Bluetooth Low Energy та ZigBee. А також входять до складу незалежних блоків керування.

У роботі [52] пропонується повністю спеціалізоване рішення на основі програмованої логіки (FPGA). На одному кристалі FPGA реалізований програмний мікропроцесор (soft core), блок керування енергопостачанням (комбінований блок Power Management Unit з DVFS та Clock Gating) та блок прискорення задач управління операційної системи (Cooperative Custom Unit). Проте результати дослідження та дані про ефективність розробленого рішення у роботі не опубліковані.

Автори роботи [53] пішли ще далі та переклали більшу частину роботи щодо контролю та обробки на спеціалізований блок керування. У запропонованому рішенні мікроконтролерне ядро загального призначення є вимкненим більшу частину власного часу. Вся обробка вхідних подій, рішення про активацію окремих вузлів пристрою та комунікація за модулем зв'язку виконується спеціалізованим модулем обробки подій (event processor). Ілюстрація архітектури такого рішення приведена на рис. 4.4 [53].

Сучасна технологічна база дозволяє розвинути ідеї апаратного прискорення та використовувати складні апаратні прискорювачі та ефективні реалізації нейронних обчислювачів на основі ПЛІС.

Більш детальний огляд сучасних апаратних методів збереження енергії в сенсорних вузлах, включаючи використання спеціалізованих обчислювачів на основі FPGA наведено у роботі [54].

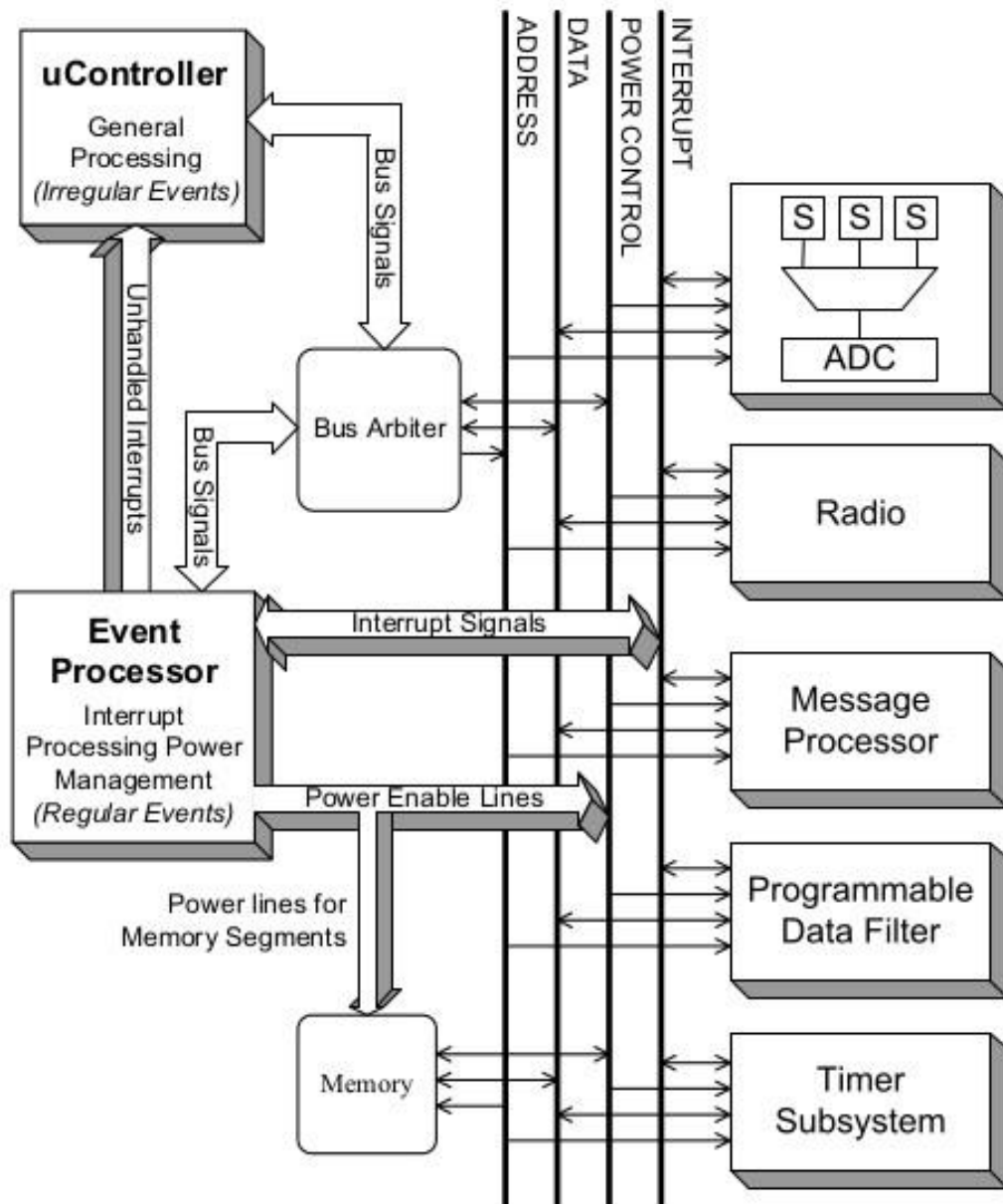


Рисунок 4.3 – Внутрішня архітектура апаратного рішення зі спеціалізованим контрольним блоком

Таким чином, є велике розмаїття методів збереження та оптимального використання енергії в сенсорних мережах. Кожний метод спрямований на оптимізацію окремих аспектів роботи мережі та має власну зону застосовності.

Рішення про застосування кожного з методів у конкретній реалізації сенсорної мережі приймається у результаті аналізу вимог та особливостей створюваної мережі.

5 ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

5.1 Загальний опис об'єкту досліджень

Як зазначено вище, однією з цілей роботи є оптимізація енергоспоживання сенсорних вузлів для досліджуваної сенсорної мережі, побудованої на основі Bluetooth Low Energy.

Метою досліджуваної сенсорної мережі є моніторинг характеристик оточуючого середовища, збирання та передача інформації для віддаленого зберігання та обробки за допомогою хмарних сервісів.

Серед основних вимог та обмежень сенсорної мережі можна виділити наступні показники:

- моніторинг та періодичність виконання вимірювань з інтервалом не менше однієї години для кожної локації;
- розгортання мережі просто неба – захист від зовнішнього впливу та широкий діапазон робочих температур від -40 до +40 °С;
- простота початкового встановлення та налаштування – можливість автоматичного розгортання мережі без втручання людини;
- низька собівартість кожного з елементів мережі – собівартість одного сенсорного вузла не повинна перевищувати \$5;
- автономна робота впродовж двох років без обслуговування мережі;
- встановлення вузлів у межах прямої видимості радіосигналу;
- необхідність у шифруванні та верифікації даних відсутня;
- необхідність у попередній обробці даних на сенсорних вузлах відсутня – обробка всіх отриманих даних виконується віддалено.

Вказані обмеження у великій мірі визначають подальші особливості сенсорної мережі, множину проектних рішень та, зокрема, множину доцільних для застосування методів збереження енергії в сенсорних мережах.

Більш детальний опис досліджуваної сенсорної мережі та її компонентів наведено у наступних розділах.

5.2 Структура сенсорної мережі

Досліджувана сенсорна мережа складається лише з двох типів вузлів:

□ сенсорні вузли, обладнані датчиками температури; □ вузли збору та передачі даних.

Передача інформації між сенсорними вузлами та вузлами збору інформації відбувається за допомогою бездротового зв'язку у зоні прямої видимості. Збільшення площі покриття сенсорної мережі відбувається за рахунок кластеризації – розділення території та відповідних вузлів сенсорної мережі на окремі групи (кластери). Кожна така група складається з множини сенсорних вузлів, а також одного-двох вузлів збору та передачі інформації, що виступають в ролі координатора кластеру (cluster head, CH).

Загальна структура досліджуваної мережі зображена на рисунку 5.1.

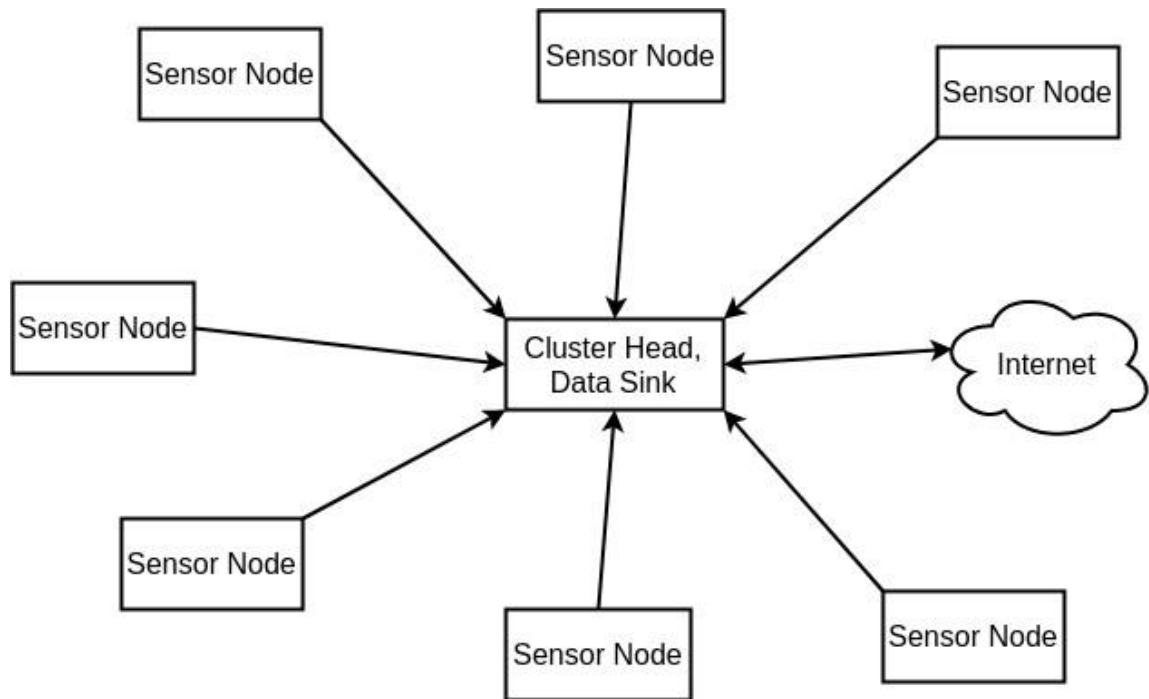


Рисунок 5.1 – Загальна структура досліджуваної мережі

Зв'язок між сенсорними вузлами та вузлами збору (агрегації) даних більшу частину часу є одностороннім – сенсорні вузли сповіщають координатора кластера про власний стан, проте не отримують інших даних у відповідь.

Кожний сенсорний вузол встановлений у відомій позиції та володіє унікальним ідентифікатором (адресою) у мережі. Таким чином забезпечується можливість встановлення відповідності між фізичним розміщенням сенсору та отриманими результатами вимірювань. Додатково унікальність адрес забезпечує можливість аналізу списку активних вузлів та детектування виходу з ладу для кожного з встановлених сенсорних вузлів.

5.3 Структура та характеристики сенсорного вузла

Будова та список компонентів сенсорного вузла в досліджуваній мережі відповідає загальній структурі сенсорного вузла, наведеній у розділі 1.2. Таким чином сенсорний вузол складається з цифрового датчика температури

AD7415, джерела живлення – літієвого елемента формату CR2032, а також комбінованого блоку управління та зв'язку на основі SoC nRF52832.

Зовнішній вигляд сенсорного вузла зображено на рисунку 5.2. Компоненти сенсорного вузла позначені цифрами від 1 до 3 для датчика температури, джерела живлення та блоку управління/зв'язку відповідно.

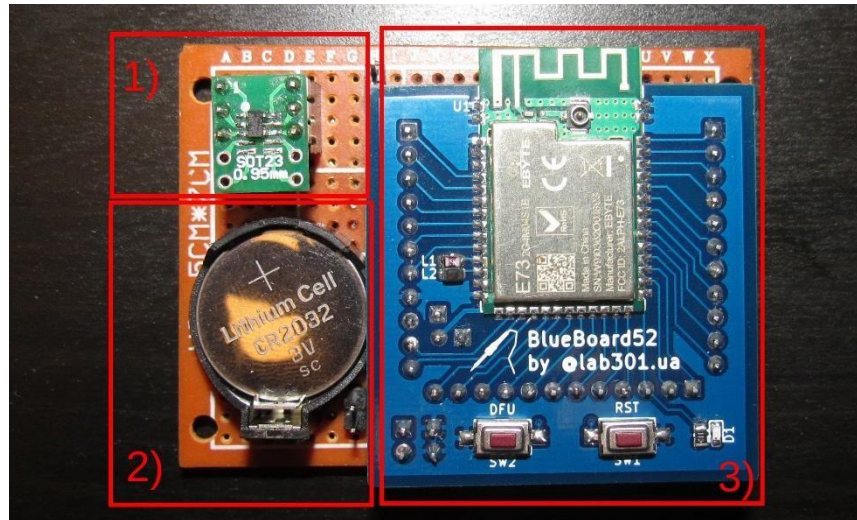


Рисунок 5.2 – Досліджуваний сенсорний вузол з позначенням компонентів
5.4 Блок керування та зв'язку сенсорного вузла

Основою сенсорного вузла є система-на-кристалі (SoC) nRF52832 від Nordic Semiconductor. Це інтегроване рішення поєднує у собі функції блоку керування (мікроконтролера), засобу бездротового зв'язку, постійної енергонезалежної пам'яті, а також множини периферійних блоків. Детальний опис внутрішньої архітектури та компонентів SoC наведено у [52].

З точки зору блоку керування, nRF52832 заснована на 32-бітному мікроконтролерному ядрі ARM Cortex-M4F з номінальною частотою роботи 64 МГц. Така висока обчислювальна потужність може використовуватися як для виконання користувацького коду, так і для забезпечення роботи алгоритмів зв'язку за протоколом Bluetooth Low Energy.

Блок зв'язку nRF52832 підтримує роботу з двома протоколами бездротової передачі даних: Bluetooth Low Energy 5.0, а також фірмовим протоколом Gazelle від Nordic Semiconductor. Робота з протоколом Gazelle реалізована на рівні регістрів SoC, а робота з протоколом BLE реалізована у вигляді програмних бібліотек з закритим вихідним кодом – Nordic SoftDevice. Ці бібліотеки встановлюються окремо від користувацького коду та випускаються у різних модифікаціях: в залежності від цільової платформи, списку підтримуваної функціональності та розміру бібліотек у флеш-пам'яті.

У свою чергу SoC nRF52832 підтримують три версії Nordic SoftDevice: S112, S113 та S132, від найбільш обмеженої до найбільш повної підтримки BLE відповідно. Детальні характеристики впливу використовуваної версії Nordic SoftDevice на енергоспоживання системи виробником не вказуються.

Платформа nRF52832 має апаратну підтримку SPI, I2C, UART та інших протоколів взаємодії. Кожен з цих блоків підтримує автономний прийом та передачу даних без участі мікроконтролерного ядра з використанням механізмів прямого доступу до пам'яті (direct memory access, DMA). У комбінації з механізмом сигналізації подій (event signaling) такі блоки дозволяють розвантажити блок керування під час обміну даними з периферією. У цей час блок керування може виконувати інші завдання, пов'язані з обробкою інформації, виконанням процедур BLE та вбудованого ПЗ, а також перемикатися в один з режимів збереження енергії.

Серед інших функціональних блоків до складу SoC входять вбудовані перетворювачі напруги: лінійний перетворювач (LDO, low drop-out) та понижуючий імпульсний перетворювач (DC-DC step-down converter). Такі перетворювачі використовуються у системі для стабілізації та перетворення вхідної напруги номіналом 1.7-3.6 вольт до рівня напруги у 1.3 вольт, придатного для живлення усіх внутрішніх компонентів на кристалі.

Використання імпульсного перетворювача вимагає встановлення додаткових пасивних компонентів на друковану плату, проте дозволяє досягти росту показників ефективності перетворення енергії при збільшенні енергоспоживання у системі.

Окремої уваги заслуговує блок керування живленням (Power Management Unit, PMU) nRF52832. Зокрема підтримується відключення та переведення у режими низького енергоспоживання окремих блоків оперативної пам'яті, вимкнення периферійних блоків, активація режимів енергозбереження для блоку управління та всієї системи взагалі.

Загальна структура блоку керування живленням в SoC nRF52832 наведена на рисунку 5.3 [52].

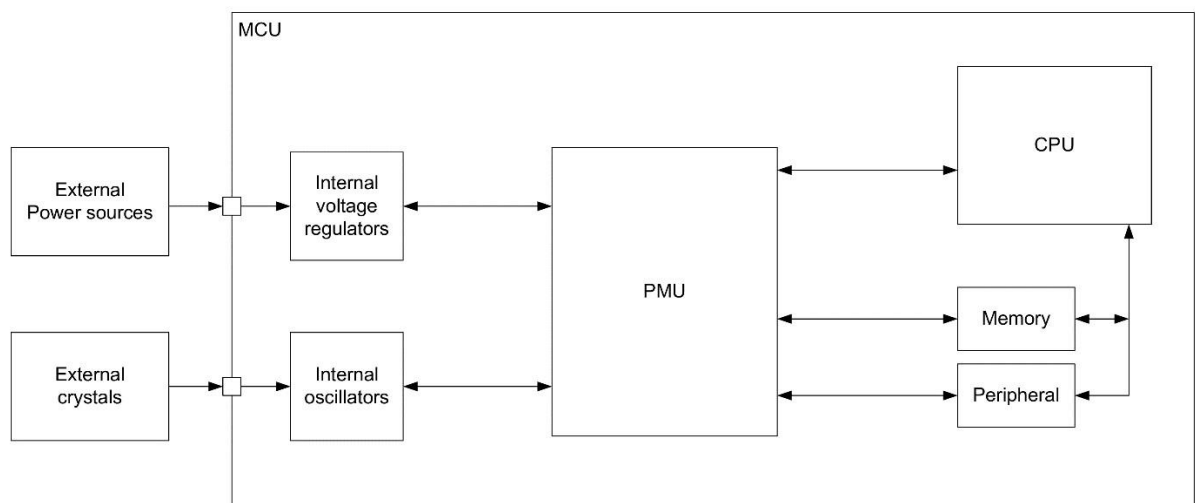


Рисунок 5.3 – Загальна структура блоку керування живленням в nRF52832
Керування режимами роботи активних блоків SoC виконується автоматично у відповідності з поточним станом системи, конфігурацією вбудованого ПЗ та значень регістрів управління SoC.

Таким чином для вирішення завдання оптимізації енергоспоживання сенсорного вузла на основі nRF52832 ключову роль грають оптимізація використання ресурсів системи, алгоритми керування режимами енергозбереження та використання вбудованих підсистем керування

живленням. В усьому іншому за наявності достатньої інформації про «наміри» розробника вбудованого програмного забезпечення підсистема керування живленням nRF52832 значно спрощує завдання оптимізації енергоспоживання.

Серед інших можливих засобів оптимізації енергоспоживання доцільно розглянути вплив значення вхідної напруги на енергоспоживання вузла.

Зведене порівняння характеристик nRF52832 та альтернативних SoC з підтримкою стандарту Bluetooth 5 наведено на рисунку 5.4.

	CC2640R2F [137]	EFR32BG12 [138]	nRF52840 [139]	nRF52832 [140]	EM9304 [141]
RF processor	Cortex-M0	Cortex-M4	Cortex-M4F	Cortex-M4F	ARC EM4
SoC processor	Cortex-M3	Cortex-M4	Cortex-M4F	Cortex-M4F	ARC EM4
Supply (V)	1.8 to 3.8	1.8 to 3.8	1.7 to 5.5	1.7 to 3.6	1.5 to 3.0
Max. power (dBm)	5	19	8	4	6
TX current @ 0 dBm (mA)	6.1	8.5	6.4	7.1	5.5
Peak RX current (mA)	6.1	10.8	12.9	6.5	3.5
Sleep current (μA)	1.1	1.5	1.3	1.9	0.9
RF sensitivity (dBm)					
125-kbps Coded	-103	NA	-103	NS	NA
500-kbps Coded	-101	NA	-99	NS	NA
1-Mbps	-97	-95.2	-96	-96	-96
2-Mbps	-92	-91.3	-92	-92	NA
RAM (KB)	20	256	256	64	136
ROM (KB)	128	1024	1024	512	48

(NS) No Support, NA Not Available

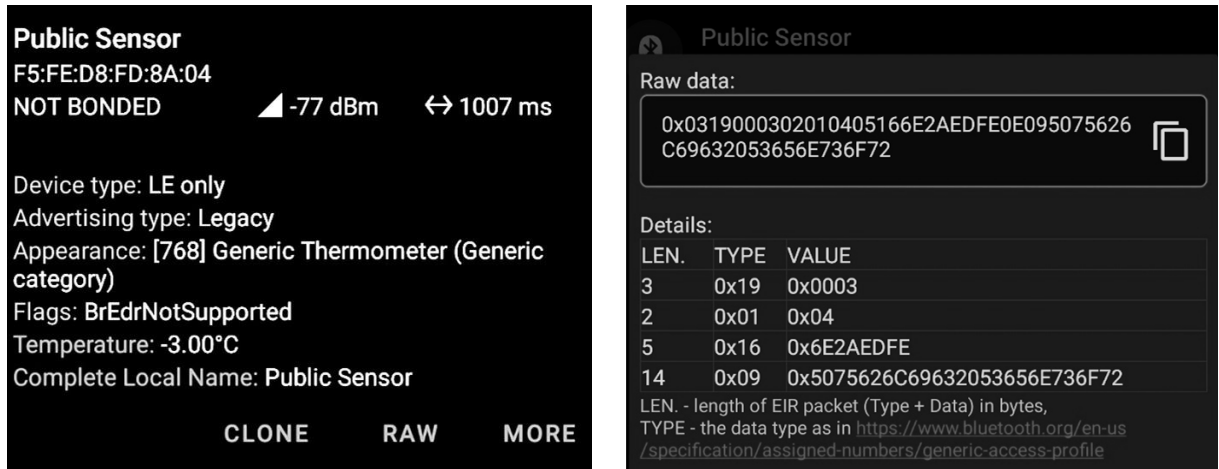
Рисунок 5.4 – Характеристики популярних інтегрованих SoC з підтримкою Bluetooth 5 [3]

5.5 Передача даних по протоколу BLE

Як зазначено у розділі 2.3, пристрої в мережі BLE можуть виконувати різні ролі: одностороння передача даних без попереднього з'єднання (Broadcaster), одностороннє прослуховування та отримання даних (Scanner), двосторонній зв'язок з попереднім з'єднанням у режимі головного (Central) та периферійного (Peripheral) вузла мережі BLE.

У досліджуваній сенсорній мережі сенсорні вузли виконують роль передавачів інформації (Advertiser role). Зв'язок є одностороннім, а показники температури передаються у складі широкомовного повідомлення (Advertising

message). Відображення структури та корисного навантаження такого повідомлення у мобільному додатку nRF Connect наведено на рисунку 5.5.



а)

б)

Рисунок 5.5 – Загальна інформація про передавач (а) та відображення вмісту широкомовного повідомлення від сенсорного вузла (б)

Пристрої, що виступають у ролі BLE Broadcaster, не здатні приймати з'єднання та встановлювати двосторонній зв'язок з іншими пристроями в мережах BLE. Необхідність у прослуховуванні ефіру для таких пристроїв відсутня, окрім випадків контролю передачі та механізмів попередження колізій, що не використовуються у протоколі BLE за замовчуванням.

Таким чином споживання енергії сенсорного вузла в мережі BLE можна скоротити за рахунок повного вимкнення блоку бездротового зв'язку у період між відправкою двох послідовних повідомлень у ефір. За необхідності отримання службових даних з головного вузла доцільно об'єднувати періодичні сеанси передачі та прийому даних у єдиний часовий проміжок.

Серед подальших засобів збереження енергії можна відмітити скорочення об'єму даних, що передаються сенсорним вузлом, збільшення

інтервалу пересилання даних, обмеження списку каналів, на яких дублюються ширококомовні повідомлення, та зниження потужності вихідного сигналу.

Проте ціною таких методів оптимізації є деяка втрата стійкості до інтерференції, збільшення затримки оновлення даних та зниження надійності роботи сенсорної мережі загалом.

5.6 Датчики сенсорного вузла

Основним вимірювальним компонентом сенсорного вузла виступає цифровий датчик температури – Analog Devices AD7415 з діапазоном вимірюваних температур від -40 до $+40$ °C, вбудованим 10-бітним АЦП та точністю вимірювання до ± 0.5 °C. Для отримання даних про температуру, контролю та керування станом датчика використовується протокол I2C, максимальна частота передачі даних складає 400 кбіт/с [56].

Структурна схема датчику температури з ілюстрацією його внутрішніх компонентів наведена на рисунку 5.6 [56].

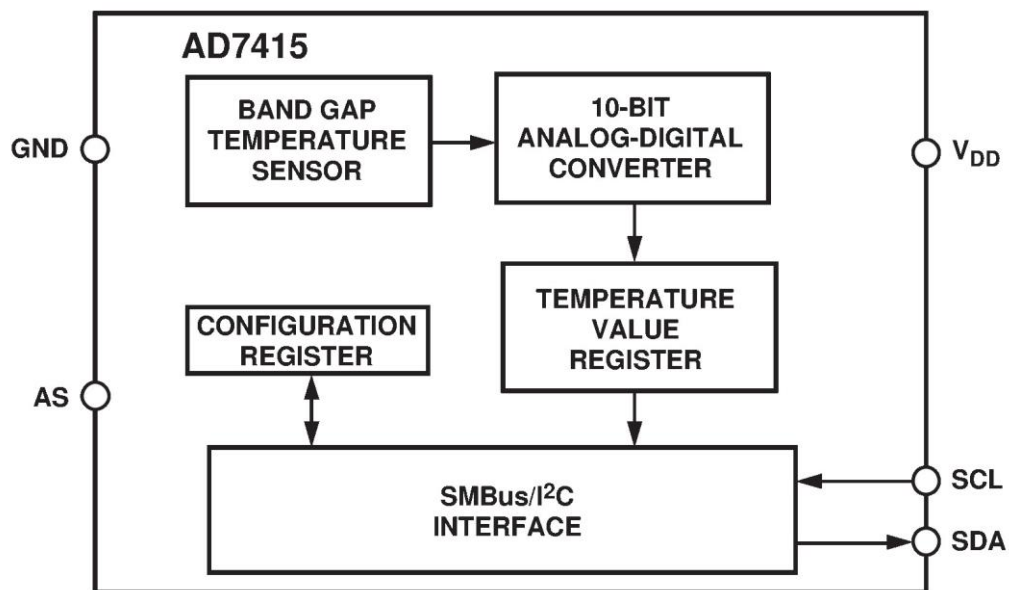


Рисунок 5.6 – Структурна схема датчику температури AD7415 []

Показники енергоспоживання датчику температури залежать від його поточного стану. Таким чином, робота датчика розділяється на 3 окремих стани: очікування, отримання нових показників температури, а також передача даних по протоколу I2C. Згідно з документацією, отримання нових показників температури займає приблизно 25 мікросекунд.

За замовчуванням отримання нових показників температури та занесення результатів у внутрішні регістри датчика відбувається з періодом 800 мс, при цьому датчик витрачає додаткову енергію для підтримки роботи внутрішнього таймера у стані очікування. При використанні довгих періодів опитування датчика доцільно використовувати режим одноразової конвертації температури за запитом (single-shot mode), що дозволяє відімкнути внутрішній таймер датчика та зменшити його енергоспоживання у стані очікування.

Слід зазначити, що чутливість датчика температури AD7415 залежить від номіналу напруги його живлення. Загальний діапазон напруги складає від 2,4 до 5,5 вольт, найменше значення похибки досягається в області 3 вольт.

Це означає, що методи керування напругою необхідно застосовувати з обережністю для підтримання точності вимірювань. Діаграму залежності похибки вимірювань від вхідної напруги зображено на рисунку 5.7 [56].

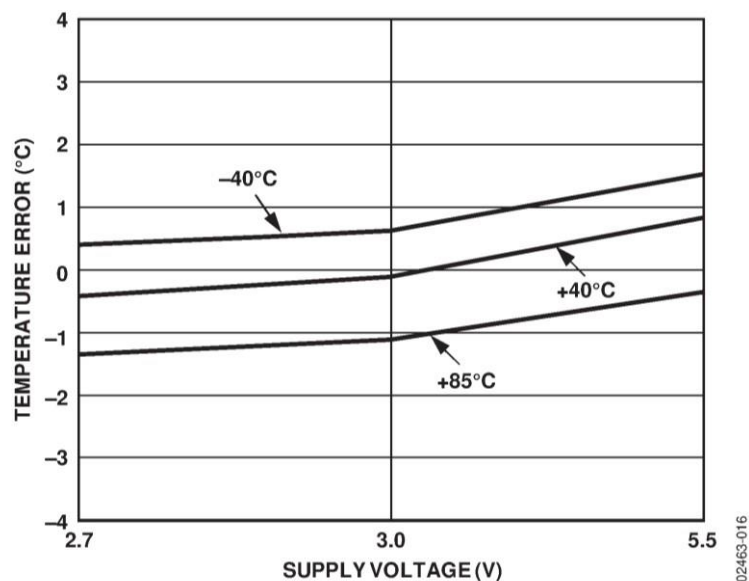


Рисунок 5.7 – Залежність похибки вимірювань від напруги живлення для серії датчиків AD7415 згідно з документацією

Таким чином оптимізація енергоспоживання датчика температури AD7415 більшою мірою полягає у використанні окремого режиму збереження енергії та початку вимірювань тільки за запитом від мікроконтролера.

Однак у такому випадку необхідно враховувати додаткові енергетичні витрати на контроль, управління та організацію періодичного опитування датчика зі сторони блоку управління (мікроконтролера).

5.6 Джерело енергії сенсорного вузла

Як зазначено у розділі 3, існує безліч джерел енергії, що можуть використовуватися для живлення сенсорного вузла: від хімічних елементів до суперконденсаторів та сонячних елементів. Всі ці джерела відрізняються за сукупністю показників: номінальна вихідна напруга, номінальний та максимальний імпульсний струм, об'єм збереженої енергії та стабільність характеристик впродовж роботи джерела енергії.

Джерелом енергії для сенсорного вузла виступають одноразові літієві елементи CR2032. При порівняно малому розмірі та об'ємі у 1 см^3 вони мають енергетичну щільність приблизно $650 \text{ мВт}\cdot\text{год}/\text{см}^3$, номінальну напругу в 3В та ємність порядку $230 \text{ мА}\cdot\text{год}$. На базі енергетичної щільності та розмірів елементу можна отримати його теоретичний енергетичний об'єм – близько 2100 Дж. Фактичний об'єм доступної енергії є значно меншим через конструктивні особливості літієвих елементів живлення.

Ці характеристики, включаючи номінальну напругу, дозволяють використовувати елементи CR2032 без додаткових блоків перетворення

напруги, що у свою чергу підвищує ефективність використання енергії за рахунок уникнення втрат, пов'язаних з конвертацією.

Цікавою особливістю елементів CR2032 є нелінійний зв'язок кількості енергії, яку може постачати елемент, від швидкості її споживання (струму). Нелінійність показників внутрішнього опору, струму та об'єму доступної енергії значно ускладнює оцінку часу автономної роботи вузла.

Номінальні показники об'єму розраховуються для навантаження приблизно 15 кОм. При експлуатації елементів поза номінальними показниками можливе передчасне розрядження та втрата значного відсотку енергії від початкового об'єму елемента.

Приклад характеристики залежності об'єму доступної енергії від струму споживання для елементів компанії Energizer наведено на рисунку 5.8 [57].

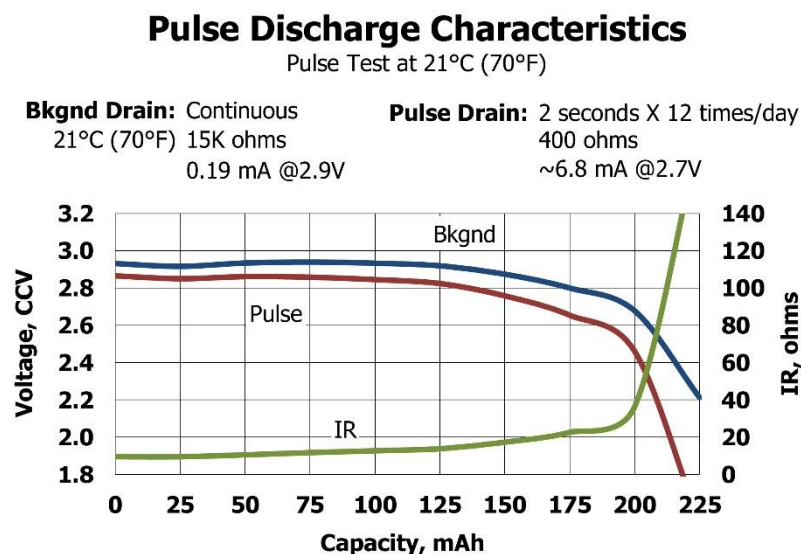


Рисунок 5.8 – Залежність корисної ємності елемента (Capacity) від струму споживання та залежність внутрішнього опору (Internal Resistance, IR) від загального об'єму спожитої енергії

Внутрішній опір елемента CR2032 також зростає разом з обсягом спожитої енергії, що призводить до значного зниження вихідної напруги

елемента живлення під навантаженням і, свою чергу, до зменшення вихідної напруги живлення сенсорного вузла. Таким чином доцільно злагоджувати піки споживання струму за допомогою конденсаторів та інших енергетичних буферів для оптимального використання енергії елементів CR2032.

У якості альтернативи розглядається рішення з комбінацією сонячних панелей, блоку перетворення енергії Texas Instruments BQ25570, а також літійполімерної батареї для зберігання енергії. Рішення з використанням таких альтернативних джерел живлення наразі знаходиться на стадії тестування.

5.7 Програмне забезпечення сенсорного вузла

Основним завданням програмного забезпечення сенсорного вузла є реалізація алгоритму керування його апаратними блоками.

Всі задачі керування у програмному забезпеченні сенсорного вузла можна розділити на п'ять етапів: початкова ініціалізація, опитування датчика температури, оновлення вмісту широкомовного повідомлення, передача широкомовного повідомлення у ефір та очікування наступного циклу роботи.

Для реалізації програмного забезпечення сенсорного вузла використовується мова програмування C. Ця мова програмування надає інструменти прямого керування ресурсами системи, безпосереднього доступу до регістрів nRF52832 та має низький рівень абстракції у порівнянні з альтернативними для платформи C++ та Python.

Таким чином мова програмування C дозволяє створювати ефективно програмне забезпечення для вбудованих платформ: як за кількістю інструкцій, так і за енергетичними показниками. За необхідності подальшої оптимізації використовуються просунуті параметри компіляції та асемблерні вставки.

Одними з базових компонентів для вбудованого ПЗ вузла є фірмовий набір бібліотек Nordic nRF5 SDK v16.0.0 та Nordic SoftDevice S132 версії 7.0.1.

Для роботи з протоколом BLE, взаємодії з блоком зв'язку, оновлення вмісту широкомовного повідомлення та пересилання повідомлення у ефір використовується бібліотека Nordic SoftDevice S132. Окрім безпосередньої роботи з BLE, бібліотека також реалізує механізми планування завдань, відліку часу, перемикання контексту та доступу до окремих блоків периферії.

Великим недоліком даної бібліотеки є закритість реалізації – бібліотека поширюється у вигляді двійкового файлу з файлами заголовків, публікується без відкритого вихідного коду та використовує незадокументовані можливості nRF52832. Таким чином код бібліотеки є недоступним для прямого аналізу та оптимізації. Єдиною можливістю для оптимізації є непрямий аналіз впливу окремих параметрів та функцій бібліотеки на енергоспоживання вузла.

Іншою можливістю є аналіз зміни показників енергоспоживання вузла при використанні різних версій та реалізацій бібліотеки Nordic SoftDevice.

Для керування та взаємодії з апаратними блоками системи використовується рівень програмної абстракції CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard) та фірмова бібліотека nrfx від Nordic Semiconductor. CMSIS забезпечує інтерфейс взаємодії з периферією та апаратними блоками мікроконтролерів сімейства ARM Cortex, що є спільним та незалежним для різних виробників апаратного забезпечення. За своєю суттю є абстракцією низького рівня та являє собою сукупність визначень регістрів мікроконтролера, доступних для використання засобами мови C.

Бібліотека nrfx є обгорткою для рівня абстракції CMSIS та дозволяє налаштовувати роботу апаратного забезпечення, виконувати обмін та пересилання даних, комунікацію з іншими вузлами шляхом виклику попередньо визначених функцій.

Окремі функціональні блоки бібліотеки можуть бути відімкнені на етапі компіляції у конфігураційному файлі `sdk_config.h`. Цей файл дозволяє чітко

визначити список активних програмних та апаратних блоків системи, контролювати розміри вбудованого програмного забезпечення, об'єм використаної оперативної пам'яті та інших ресурсів. Фрагмент файлу конфігурації `sdk_config.h` наведено на рисунку 5.9.

```

4164 // <e> NRFX_TWI_ENABLED - nrfx_twi - TWI peripheral driver
//=====
#ifndef NRFX_TWI_ENABLED
#define NRFX_TWI_ENABLED 1
#endif
// <q> NRFX_TWI0_ENABLED - Enable TWI0 instance
4170
#ifndef NRFX_TWI0_ENABLED
#define NRFX_TWI0_ENABLED 1
#endif

// <q> NRFX_TWI1_ENABLED - Enable TWI1 instance

#ifndef NRFX_TWI1_ENABLED
4180 #define NRFX_TWI1_ENABLED 0
#endif

```

Рисунок 5.9 – Фрагмент файлу конфігурації `sdk_config.h`

З метою отримання детальної інформації про поточний стан системи, налагодження та визначення проблемних компонентів використовуються механізми бібліотеки `nrf_log`. Бібліотека підтримує можливості друку інформації для налагодження з використанням послідовного інтерфейсу UART, пропрієтарного інтерфейсу Segger RTT (Real Time Transfer), постійної флеш-пам'яті та інших засобів. Для зменшення кількості виконуваних інструкцій, пришвидшення роботи системи, скорочення об'єму прошивки та зменшення загального енергоспоживання існує можливість відімкнення засобів друку налагоджувальної інформації у файлі `nrf_config.h`.

Серед можливостей програмної оптимізації енергоспоживання окремої уваги заслуговує бібліотека для керування режимами енергозбереження – бібліотека `nrf_pwr_mgmt` для SoC серії nRF52. Вона дозволяє керувати режимами роботи як для всієї системи, так і для кожного з її блоків окремо.

Як зазначено у пункті 5.1, потреба у реалізації додаткових етапів прослуховування даних у мережі, шифрування, захисту та встановлення зв'язку з іншими вузлами мережі відсутня. Отже, відповідні програмні та апаратні блоки системи можуть бути відімкнені як ті, що не задіяні.

Таким чином для зменшення енергоспоживання вузла можуть служити засоби програмної оптимізації, заміна бібліотеки Nordic SoftDevice S132 на більш прості реалізації стеку BLE, відімкнення друку налагоджувальної інформації, перехід у режими збереження енергії та відімкнення окремих програмних та апаратних блоків, що не використовуються для роботи системи.

Розробка вбудованого ПЗ сенсорного вузла виконується в середовищі Segger Embedded Studio for ARM Release 4.18. Середовище збирання – GNU ARM Embedded Toolchain версії 8-2018-q4-major.

Лістинг вихідного коду вбудованого ПЗ сенсорного вузла до початку інтеграції методів програмної оптимізації наведено у додатку Б.

6 ОЦІНКА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ СЕНСОРНОГО ВУЗЛА

6.1 Джерела енергетичних витрат у сенсорному вузлі

Як зазначено у розділі 5, сенсорний вузол у досліджуваній мережі складається з наступних компонентів: об'єднаний блок керування та зв'язку на основі SoC Nordic Semiconductor nRF52832, датчик температури Analog Devices AD7415 та літєвий батарейний елемент формату CR2032. У кожного компоненту є власні характеристики, режими функціонування та особливості використання енергії у різних режимах. Зазвичай такі характеристики вказуються у документації для кожного зі згаданих компонентів.

У документації SoC nRF52832 типові показники енергоспоживання вказуються окремо для кожного з внутрішніх елементів: мікроконтролерного ядра та периферійних блоків, оперативної пам'яті та блоку зв'язку. Таким чином показники споживання струму та загальної енергії більшою мірою залежить від множини активних блоків SoC та їх поточного стану роботи.

Типові показники споживання струму, що вказані у документації для мікроконтролерного ядра SoC nRF52832 при виконанні бенчмарку CoreMark (максимальному завантаженні потужностей) наведено у таблиці 6.1 [55].

Таблиця 6.1 – Типові показники споживання струму для мікроконтролерного ядра nRF52832 при максимальному навантаженні та вхідній напрузі 3В

Позначення	Опис	Струм
I _{FLCACHE}	Виконання з флеш-пам'яті, кеш ввімкнено, LDO	7,4 мА
I _{FLCACHEDCC}	Виконання з флеш-пам'яті, кеш ввімкнено, DC-DC	3,7 мА
I _{FL}	Виконання з флеш-пам'яті, кеш вимкнено, LDO	8,0 мА
I _{FLDCDC}	Виконання з флеш-пам'яті, кеш вимкнено, DC-DC	3,9 мА
I _{RAM}	Виконання з оперативної пам'яті, LDO	6,7 мА
I _{RAMDCDC}	Виконання з оперативної пам'яті, DC-DC	3,3 мА

З таблиці видно, що при максимальному завантаженні обчислювальних потужностей, на споживання струму значною мірою впливають обраний тип перетворювача напруги, розташування виконуваного ПЗ (оперативна або флеш-пам'ять) та (за використання флеш-пам'яті) активація кешу команд.

Механізми керування живленням SoC nRF52832 дозволяють визначити список активних секцій оперативної пам'яті. Всього доступно 8 периферійних вузлів оперативної пам'яті, кожен з вузлів під'єднаний до двох секцій оперативної пам'яті по 4 кБ. Кожен з таких вузлів може налаштовуватися індивідуально у відповідних регістрах конфігурації. Згідно з документацією на

підтримання роботи одної секції оперативної пам'яті витрачається приблизно 4 нА струму, що складає у сумі 64 нА на всі 16 секцій.

Для комунікації з датчиком температури за протоколом I2C (InterIntegrated Circuit) використовується периферійний блок TWI. Використання спеціалізованого периферійного блоку дозволяє розвантажити обчислювальне ядро та перевести його у стан очікування на час передачі задля збереження енергії. Цікаво, що, згідно з документацією, показники споживання струму блоку TWI не залежать від швидкості передачі даних по шині I2C та складають 50 мкА як для швидкості 100 кбіт/с, так і для швидкості 400 кбіт/с.

Додаткова енергія може витрачатися на роботу таймеру TIMER0, передачу налагоджувальної інформації по UART та інші периферійні блоки.

Дуже значним споживачем енергії в сенсорних вузлах взагалі та у SoC nRF52832 зокрема є блок бездротового зв'язку – приймання та передачі даних на частоті 2,4 ГГц. У свою чергу, характеристики споживання енергії розділяються на два основних режими: приймання та передачі даних.

В режимі приймання даних рівні споживання струму сильно залежать від активного перетворювача напруги та швидкості обміну даними. Додаткова енергія витрачаються на запуск та налаштування модулю перед початком безпосереднього отримання даних. Таким чином споживання енергії у режимі прослуховування можна знизити за рахунок використання DC-DC перетворювача замість LDO та зменшення швидкості обміну даними.

Типові показники споживання струму блоком зв'язку у режимі прослуховування та отримання даних наведені у таблиці 6.2 [55].

Таблиця 6.2 – Типові показники споживання струму блоком зв'язку у режимі прослуховування за вхідної напруги 3В

Позначення	Опис	Струм
------------	------	-------

IRX,1M,DCDC	Отримання даних, швидкість 1 Мбіт/с, DC-DC	5,4 мА
IRX,1M	Отримання даних, швидкість 1 Мбіт/с, LDO	11,7 мА
IRX,2M,DCDC	Отримання даних, швидкість 2 Мбіт/с, DC-DC	5,8 мА
IRX,2M	Отримання даних, швидкість 2 Мбіт/с, LDO	12,9 мА
I _{START,RX,DCDC}	Запуск у режимі отримання, DC-DC	3,5 мА
I _{START,RX,LDO}	Запуск у режимі отримання, LDO	7,5 мА

Як зазначено у пункті 5.1, основним завданням сенсорного вузла є не отримання, а передача даних про результати вимірювань іншим вузлам.

Типові показники споживання струму блоком зв'язку у режимі передачі даних наведені у таблиці 6.3 [55].

Таблиця 6.3 – Типові показники споживання струму блоком зв'язку у режимі передачі даних за вхідної напруги 3В

Позначення	Опис	Струм
I _{TX,+4dBm,DCDC}	Передача даних, потужність +4 дБм, DC-DC	7,5 мА
I _{TX,+4dBm}	Передача даних, потужність +4 дБм, LDO	16,6 мА
I _{TX,0dBm,DCDC}	Передача даних, потужність 0 дБм, DC-DC	5,3 мА
I _{TX,0dBm}	Передача даних, потужність 0 дБм, LDO	11,6 мА
I _{TX,-4dBm,DCDC}	Передача даних, потужність -4 дБм, DC-DC	4,2 мА
I _{TX,-4dBm}	Передача даних, потужність -4 дБм, LDO	9,3 мА
I _{TX,-8dBm,DCDC}	Передача даних, потужність -8 дБм, DC-DC	3,8 мА
I _{TX,-8dBm}	Передача даних, потужність -8 дБм, LDO	8,4 мА
I _{TX,-12dBm,DCDC}	Передача даних, потужність -12 дБм, DC-DC	3,5 мА
I _{TX,-12dBm}	Передача даних, потужність -12 дБм, LDO	7,7 мА
I _{TX,-16dBm,DCDC}	Передача даних, потужність -16 дБм, DC-DC	3,3 мА
I _{TX,-16dBm}	Передача даних, потужність -16 дБм, LDO	7,3 мА

$I_{TX,-20dBm,DCDC}$	Передача даних, потужність -20 дБм, DC-DC	3,2 мА
$I_{TX,-20dBm}$	Передача даних, потужність -20 дБм, LDO	7,0 мА
$I_{TX,-40dBm,DCDC}$	Передача даних, потужність -40 дБм, DC-DC	2,7 мА
$I_{TX,-40dBm}$	Передача даних, потужність -40 дБм, LDO	5,9 мА
$I_{START,TX,DCDC}$	Запуск у режимі передачі, +4 дБм, DC-DC	4,0 мА
$I_{START,TX}$	Запуск у режимі передачі, +4 дБм, LDO	8,8 мА

На основі наведених даних можна зробити висновок, що струм споживання блоком зв'язку сильно залежить від потужності випромінювання та, вже традиційно, від використаного перетворювача напруги.

Слід зазначити, що загальні показники споживання енергії залежать не тільки від моментальних показників споживання струму, а й від тривалості виконання відповідних операцій – обчислень, отримання та передачі даних.

Приблизний графік використання енергії для вузла BLE у ролі Advertiser наведено у документації S132 SoftDevice Specification та на рисунку 6.1 [58].

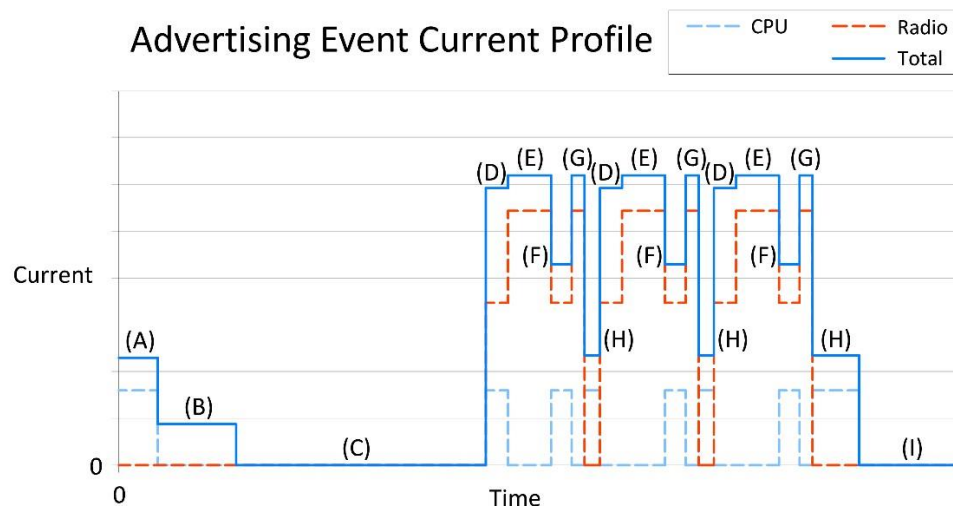


Рисунок 6.1 – Приблизні показники тривалості виконання операцій та відповідне споживання струму для вузла BLE у ролі Advertiser

У таблиці 6.4 наведені опис та базові характеристики для кожного зі станів пристрою, зображених на рисунку 6.1. Точні дані тривалості та рівня

споживання струму для деяких етапів передачі у документації не вказані та повинні бути визначені експериментальним шляхом.

Таблиця 6.4 – Опис станів пристрою при роботі у режимі BLE Advertiser

Стан	Опис	Тривалість
(A)	Підготовка (ЦП)	До 50 мкс
(B)	Очікування та запуск резонатора високої частоти (HXFO)	Не вказано
(C)	Очікування	Не вказано
(D)	Запуск радіо-частини	До 20 мкс
(E)	Передача даних	2250–6650 мкс, 0–255 байт, три канали, non-connectable extended advertising, 1 Мбіт/с
(F)	Перемикання режимів радіо-частини	
(G)	Отримання даних	
(H)	Пост-обробка (ЦП)	До 75 мкс між пакетами, до 128 мкс – завершення циклу
(I)	Очікування	Не вказано

Як зазначено у пункті 5.6, додаткова енергія сенсорного вузла використовується для живлення датчику температури AD7415. Показники споживання струму датчиком температури залежать від його поточного стану. Додатково датчик AD7415 підтримує два режими функціонування: режим звичайного функціонування та режим збереження енергії. У першому режимі датчик підтримує роботу внутрішнього таймера для виконання періодичних вимірювань з інтервалом 800 мс. У другому режимі вимірювання температури відбувається за запитом від мікроконтролера, а у період між запитами датчик переходить у режим повного вимкнення.

Детальна інформація про показники споживання струму для датчика AD7415 наведена у таблиці 6.5 [56].

Таблиця 6.5 – Стани датчика AD7415 та їх динамічні показники

Стан	Опис	Струм
Конвертація	Активізація вбудованого АЦП та отримання цифрового значення температури.	1,2 мА (тип.)
Підготовка	Пікове споживання струму перед початком конвертації напрутязі	До 900 мкА
Очікування на лінії I2C	Стан очікування без конвертації, нормальний режим, відсутність активності на лінії I2C	169 мкА (тип., 3В)
Активність на лінії I2C	Передача та отримання даних по лінії I2C, нормальний режим роботи.	180 мкА (тип., 3В)
Датчик вимкнено	Режим повного вимкнення датчику температури, внутрішній таймер вимірювань зупинений.	До 3 мкА

Як зазначено у пункті 5.3, для керування та стабілізації напруги живлення SoC nRF52832 використовуються внутрішні перетворювачі напруги SoC – LDO або DC-DC. Зовнішні перетворювачі напруги не використовуються, а елементом живлення сенсорного вузла безпосередньо виступає батарейний елемент CR2032. Таким чином дозволяється уникнути додаткових втрат на конвертацію та стабілізацію енергії в сенсорному вузлі.

Як зазначено у пункті 5.6, об'єм доступної для споживання енергії батарейних елементів CR2032 залежить від пікових динамічних характеристик споживання струму. Для вирівнювання пікових показників споживання струму можуть використовуватися конденсатори та інші енергетичні буфери.

Для простоти подальшого аналізу пропонується знехтувати динамічними показниками елементів CR2032 та використовувати оцінку об'єму доступного заряду на рівні 190 мА·год та енергії на рівні 1700 Дж.

Такі значення відповідають доступному заряду для імпульсного режиму роботи до моменту зменшення вихідної напруги до рівня 2,4 В для елемента

Energizer CR2032. Як зазначено у пункті 5.6, напруга у 2,4 В є гранично дозволеною напругою живлення для датчика температури AD7415.

6.2 Математична модель енергоспоживання сенсорного вузла

Як зазначено у пунктах 1.2 та 5, сенсорні вузли складаються з множини програмних та апаратних компонентів. Як зазначено у пункті 6.1, кожен з використаних компонентів має власні характеристики енергоспоживання, показники яких залежать від ряду факторів.

Загалом енергоспоживання сенсорного вузла можна оцінити як суму енергії, спожитої кожним з окремих компонентів сенсорного вузла:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n_i} E_i, \quad (6.1)$$

де E_{total} – загальна кількість спожитої енергії, а E_i – індивідуальний показник спожитої енергії для кожного з елементів сенсорного вузла.

У схемах в використанні перетворювачів напруги та інших додаткових компонентів необхідно враховувати ефективність використання енергії:

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^{n_i} E_i, \quad (6.2)$$

де α – коефіцієнт ефективності використання енергії, $\alpha < 1$.

Враховуючи нелінійність характеристик напруги живлення, струму споживання та динамічні параметри елементів сенсорного вузла, показник споживання енергії для одного сенсорного вузла впродовж заданого часового проміжку T набуває інтегральної форми з залежністю від часу:

$$E_i = \int_{t=0}^T P_i(t) dt = \int_{t=0}^T I_i(t) U_i(t) dt, \quad (6.3)$$

де E_i – кількість спожитої енергії елементом сенсорного вузла в заданий часовий проміжок, P – моментальна потужність споживання енергії, I та U – моментальні показники споживання струму та напруги живлення відповідно.

Як зазначено у пункті 6.1, поведінку компонентів сенсорного вузла можна описати як сукупність стійких станів, де кожному стану відповідають власні характеристики енергоспоживання. Таким чином формула (6.3) для оцінки енергоспоживання елементів вузла перетворюється у просту суму добутків потужності споживання на час перебування у визначеному стані:

$$E_i = \sum_{j=1}^m P_{ij} \cdot t_{ij} = \sum_{j=1}^m I_{ij} \cdot U_{ij} \cdot t_{ij}, \quad (6.4)$$

де j – індекс стану роботи компонента, P_{ij} – потужність споживання енергії компоненту у стані j , t_{ij} – час перебування у стані j , I_{ij} та U_{ij} – показники струму споживання та рівня напруги відповідно для стану j .

За сталого рівня напруги живлення компонентів сенсорного вузла, – формула (6.4) спрощується до наступного вигляду:

$$E_i = U \cdot \sum_{j=1}^m I_{ij} \cdot t_{ij}, \quad (6.5)$$

де U – рівень напруги живлення впродовж всього часу функціонування сенсорного вузла, t_{ij} – час перебування у стані j , I_{ij} – показник споживання струму для стану j компонента i .

Враховуючи періодичність повторення станів роботи компонентів сенсорного вузла, оцінка енергоспоживання сенсорного вузла для тривалих відрізків часу може бути представлена у наступній формі:

$$E_i \approx T \cdot U \cdot \sum_{j=1}^m I_{ij} \cdot t_{pij}, \quad (6.6)$$

де $T_{operation}$ – довжина часового проміжку, для якого необхідно оцінити енергоспоживання компоненту сенсорного вузла, $T_{period,i}$ – довжина одного періоду роботи компонента сенсорного вузла, t_{pij} – тривалість перебування компоненту i у стані j в межах одного періоду T , $T_{period,i} = \sum t_{pij}$

Враховуючи дані, наведені у пункті 6.1, найвищі показники моментального споживання енергії належать блоку керування у активному режимі, блоку зв'язку у режимах передачі та отримання даних, а також датчику температури при конвертації. Однак показники споживання енергії у режимах очікування можуть мати значний вплив на енергоспоживання вузла у довгостроковій перспективі та повинні бути враховані у математичній моделі.

Результати оцінки кількості спожитої енергії за один період для датчика AD7415 у нормальному режимі роботи наведено у таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – Теоретична оцінка кількості спожитої енергії за формулою (6.6) для нормального режиму роботи датчика температури AD7415

Стан	Тривалість	Вх. напруга	Струм спож.	Спож./цикл
Активація	4 мкс	3 В	900 мкА	11 нДж
Конвертація	25 мкс	3 В	1.2 мА	90 нДж
Обмін даними по I2C, 400 кГц	75 мкс	3 В	180 мкА	41 нДж
Очікування	799,89 мс	3 В	169 мкА	405,55 мкДж
Всього	800 мс	3 В	–	405,69 мкДж

У режимі збереження енергії AD7415 витрати на очікування значно зменшуються, проте на активацію датчика шляхом надсилання відповідно команди по I2C витрачається додаткова енергія. Оцінка кількості спожитої енергії за один період у режимі зі збереженням енергії наведена у таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Оцінка енергоспоживання для датчика температури AD7415 у режимі роботи зі збереженням енергії

Стан	Тривалість	Вх. напруга	Струм спож.	Спож./цикл
Активація	4 мкс	3 В	900 мкА	11 нДж
Конвертація	25 мкс	3 В	1.2 мА	90 нДж
Обмін даними по I2C, 400 кГц	150 мкс	3 В	180 мкА	82 нДж
Очікування	799,82 мс	3 В	1 мкА	2,4 мкДж
Всього	800 мс	3 В	–	2,58 мкДж

Таким чином за рахунок використання режимів збереження енергії для датчика AD7415 можна зекономити до 400 мкДж на один цикл вимірювання. Доцільність використання режимів збереження енергії зростає разом зі збільшенням періоду опитування датчика температури.

Оцінка рівня споживання енергії за математичною моделлю для блоку зв'язку ускладнюється через відсутність даних про час перебування блоку зв'язку у кожному зі станів для визначеного об'єму переданих даних. Аналогічно, час перебування блоку керування у активному режимі залежить від програмного забезпечення та має бути отриманий у ході експерименту.

6.3 Експериментальне дослідження енергоспоживання сенсорного вузла

Експериментальне дослідження виконується для сенсорного вузла, структура якого описана у пункті 5.3, а програмне забезпечення – у пункті 5.7. Отримані показники є базовими показниками, що будуть використані для порівняння ефективності методів збереження енергії для досліджуваного сенсорного вузла у наступних розділах.

Враховуючи короткочасність подій та станів у системі (порядку сотень мікросекунд), для вимірювання необхідно застосовувати інструменти з високою швидкістю та кількістю вимірювань на одиницю часу.

Таким чином для дослідження енергоспоживання сенсорного вузла використовується схема з резистивним шунтом та осцилографом.

Показники споживання струму у такій системі визначаються на основі показників падіння напруги та відомого номіналу резистивного елементу. Кількість спожитої енергії за визначений проміжок часу визначається на основі номіналу напруги живлення, спожитого струму та часу перебування елементів системи у відповідному стані.

Зображення початкової версії такого тестового середовища наведено на рисунку 6.2. На цьому зображенні видно змінний резистор, положення щупів осцилографа та велику кількість дротів, що з'єднують елементи системи.

Приклад результату вимірювань для стенду наведено на рисунку 6.3.

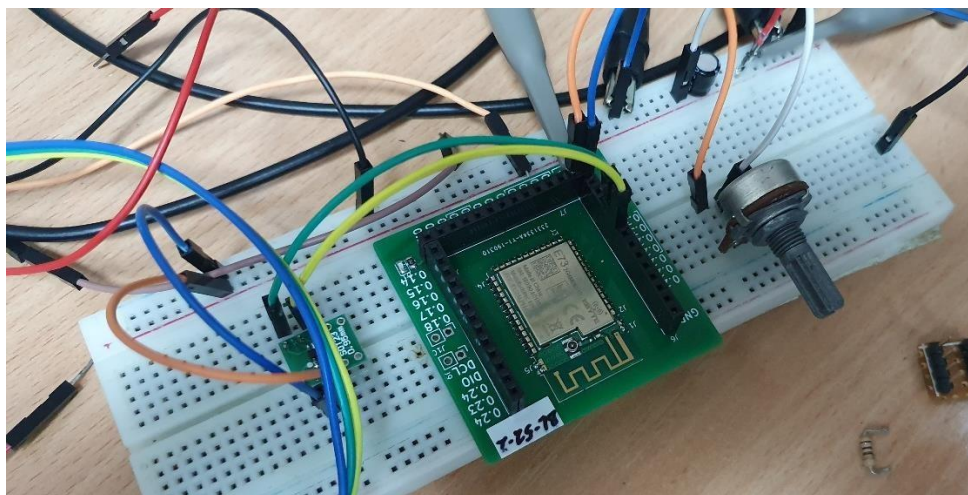


Рисунок 6.2 – Початкова версія тестового стенду для вимірювання показників енергоспоживання сенсорного елемента

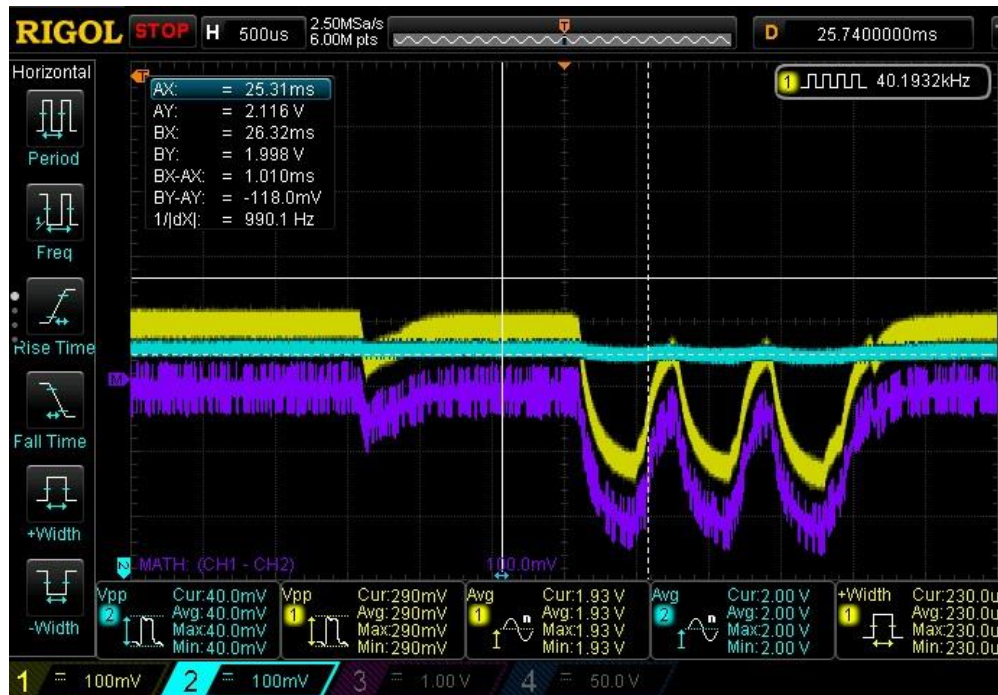


Рисунок 6.3 – Приклад вимірювань для початкової версії стенду

Враховуючи порядок одиниць споживання струму та енергії у системі, важливим завданням є правильна організація експерименту та створення тестового середовища, що дозволить отримати максимально точні результати.

Серед проблем початкової версії стенду можна відмітити підвищені рівні наведеного шуму від з'єднань компонентів та недостатню точність змінного резистора, опір якого змінювався з часом без зовнішнього втручання.

Для покращення показників точності вимірювань була створена друга версія стенду, зображена на рисунку 6.4. У другій версії стенду замінено змінний резистор (шунт), мінімізована кількість з'єднань по лінії живлення для зменшення опору та наведеного шуму, а також встановлено електролітичний конденсатор для стабілізації напруги на вході схеми.

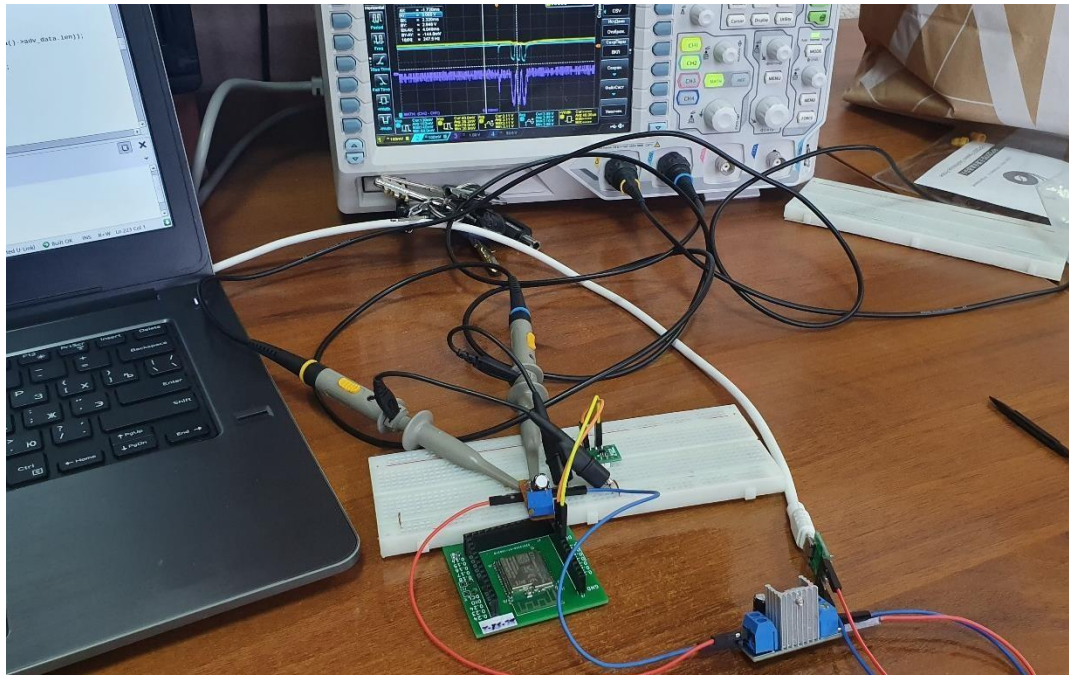


Рисунок 6.4 – Оновлена версія середовища для вимірювання показників енергоспоживання сенсорного вузла

Оновлена версія тестового середовища дозволила отримати результати вимірювань, що придатні для оцінки енергоспоживання сенсорного вузла.

Схема електрична принципова схеми для вимірювання показників енергоспоживання сенсорного вузла наведена на рисунку 6.5.

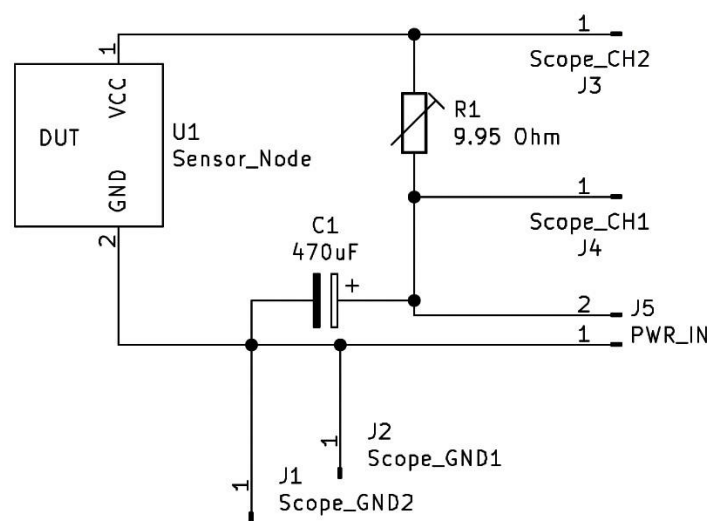


Рисунок 6.5 – Схема електрична принципова для тестового стенду

Анотовані результати вимірювань енергоспоживання для сенсорного вузла, що отримані за допомогою оновленої версії тестового стенду, наведено на рисунку 6.6. Окремі стани роботи вузла позначені цифрами від 1 до 3.



Рисунок 6.6 – Анотовані результати вимірювань для сенсорного вузла, отримані за допомогою вдосконаленої версії тестового стенду

На рисунку 6.6 чітко помітні три стани роботи сенсорного вузла: 1) – передача ширококомовного повідомлення по BLE з періодом 1 секунда, 2) – отримання даних з датчика температури AD7415 з періодом 3 секунди, 3) – оновлення вмісту повідомлення після отримання нових даних від AD7415.

Увесь інший час сенсорний вузол та nRF52832 зокрема знаходяться у режимі енергозбереження. У такому випадку споживання струму перебуває у межах похибки для тестового стенду з осцилографом та складає приблизно 215 мкА, більшу частину (198 мкА) з яких використовується для живлення датчика температури AD7415. Вказані показники практично співпадають з теоретичними показниками споживання струму, наведеними у пункті 6.1.

Результати вимірювань споживання струму для датчика температури AD7415 у нормальному режимі очікування наведені на рисунку 6.7.

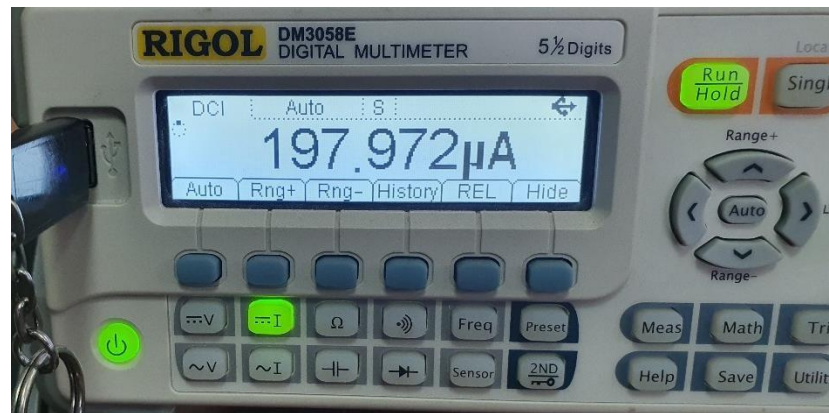


Рисунок 6.7 – Споживання струму датчиком AD7415 у режимі очікування

Серед активних режимів роботи сенсорного вузла велика частка енергії витрачається на передачу даних модулем зв'язку по бездротовому каналу.

Процедура передачі даних по BLE займає близько 2.5 мс. Дані передаються тричі за один період: на каналах 37, 38 та 39. Перед початком передачі виконується процедура ініціалізації, а по завершенні передачі – процедура пост-обробки пакету. За один сеанс передачі пакету довжиною 24 байти з потужністю вихідного сигналу 0 дБм використовується близько 52 мкДж енергії, струм споживання зростає до 12 мА при напрузі 3 В.

Динамічні характеристики для передачі широкомовного повідомлення проілюстровані на рисунках 6.8 та 6.9. Загалом характеристики споживання повністю відповідають теоретичному опису, наведеному на рисунку 6.1.

Процедура отримання нових даних від датчика температури виконується за 3 мс на частоті 1000 кбіт/с, середнє споживання струму при цьому становить 7 мА, а загальна кількість спожитої енергії складає близько 71 мкДж. Зведені характеристики для даного стану наведені на рисунку 6.10.

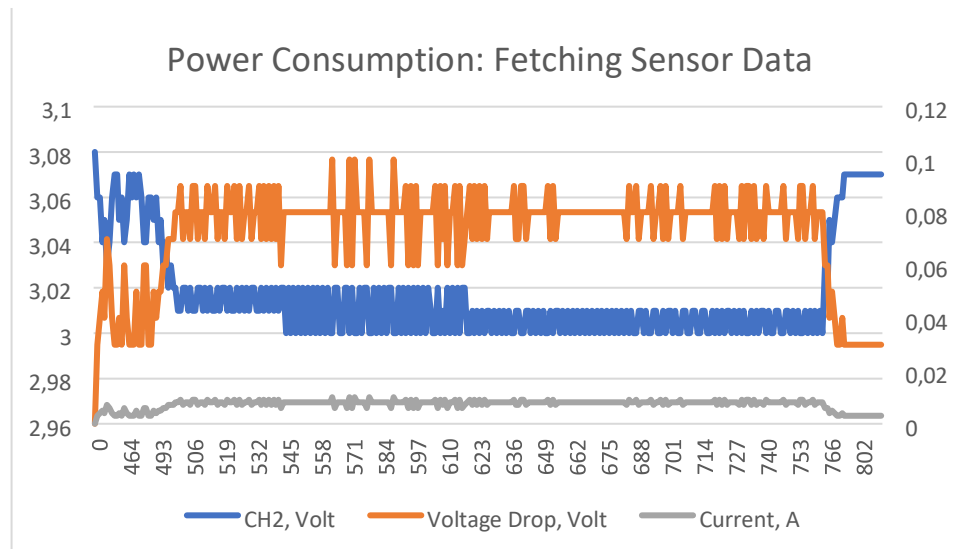


Рисунок 6.10 – Показники споживання струму та падіння напруги на резисторі під час передачі отримання даних від датчика температури

Такі показники споживання струму відповідають теоретичним показникам для активного режиму блока управління. Проте тривалість операції в 3 мс є скоріше аномальною та повинна бути досліджена у контексті оптимізації енергоспоживання.

Останнім з розглянутих станів сенсорного вузла є стан оновлення ширококомовного повідомлення після отримання нових даних від датчика температури. Подія є короткочасною та виконується за 100 мкс. Споживання струму підвищується до 7 мА, номінального струму для блоку керування у активному режимі. Кількість спожитої енергії складає близько 1,5 мкДж. Таким чином показниками споживання для цього стану можна знехтувати у порівнянні зі станами передачі даних та обробки даних від датчика AD7415.

Динамічні характеристики для стану оновлення вмісту ширококомовного повідомлення наведено на рисунку 6.11.

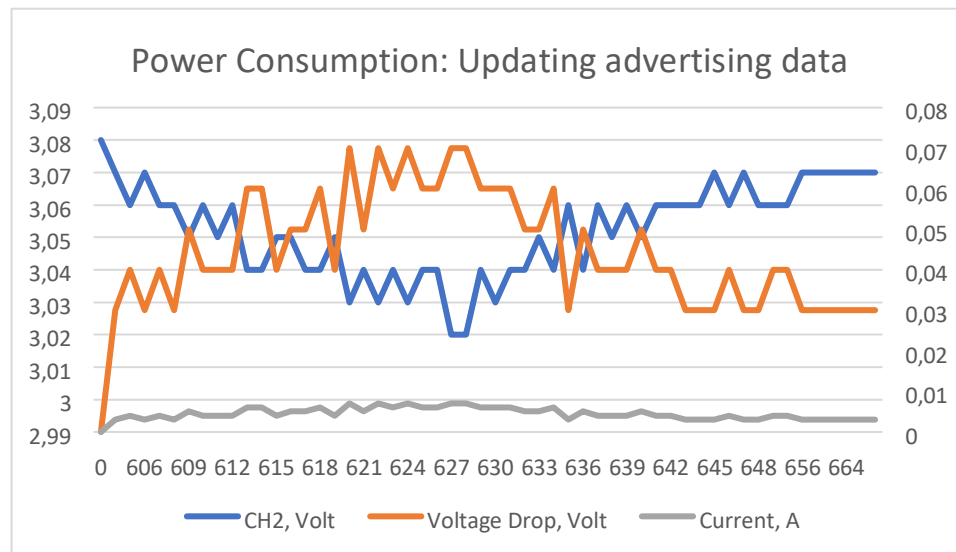


Рисунок 6.11 – Показники споживання струму та падіння напруги на резисторі під час оновлення вмісту ширококомовного повідомлення

Зведена інформація про частку споживання енергії для кожного з розглянутих станів сенсорного вузла наведена у таблиці 6.8. Подія передачі даних по BLE відбувається тричі за один такий період, а отримання даних від датчика та оновлення повідомлення – лише один раз. Час автономної роботи від одного елементу CR2032 до оптимізації можна оцінити як 650 днів.

Таблиця 6.8 – Результати вимірювань енергоспоживання для сенсорного вузла

Стан	Тривалість	Вх. напруга	Струм спож.	Спож./цикл
Отримання даних від AD7415	3 мс	3 В	7 мА	71 мкДж
Передача по BLE	7,5 мс	3 В	11,5 мА	156 мкДж
Оновлення вмісту широк. повідомл.	100 мкс	3 В	7 мА	1,5 мкДж

Очікування	2,989 с	3 В	215 мкА	1,928 мДж
Всього	3 с	3 В	–	2,157 мДж

7 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ

7.1 Обрання стратегій енергозбереження для досліджуваної системи

Обрання найбільш ефективних методів збереження енергії відбувається на основі теоретичних та експериментальних даних, отриманих у розділі 6.

Як зазначено у таблиці 6.8, найбільша частка спожитої енергії відноситься до режиму очікування, а саме – споживання у режимі очікування для датчика температури AD7415.

Як зазначено у пункті 6.1, датчик температури AD7415 підтримує режим сну, очікування з повним вимкненням, що дозволяє застосувати для датчика методи керування робочим циклом, описані у розділі 4.2. Згідно з теоретичних даних, використання режимів енергозбереження дозволить скоротити рівень споживання струму з 215 мкА до близько 20 мкА у режимі очікування.

Доцільно також дослідити ефективність методів керування робочим циклом для блоку управління nRF52832. Зокрема для переходу блоку в режим сну використовується функція `nrf_pwr_mgmt_run` з пакету NRF5 SDK.

За необхідності подальшого підвищення часу автономної роботи сенсорного вузла може розглядатися збільшення періоду опитування датчика температури та періоду відправки ширококомовного повідомлення. Це, у свою чергу, дозволить зменшити час перебування сенсорного вузла у активному режимі та проводити ще більше часу у режимі енергоефективного сну.

Згідно з експериментальними даними, на передачу ширококомовного повідомлення витрачається до 7.5% від усієї спожитої енергії за цикл роботи сенсорного вузла. Згідно з теоретичними даними, наведеними у таблиці 6.3, за

рахунок методів оптимізації зв'язку та зменшення потужності передачі даних можна досягти до 48% відсотків економії від витраченої на зв'язок енергії.

Для одночасної оптимізації показників споживання струму для блоків зв'язку та керування доцільно використовувати методи керування живленням. Згідно з теоретичними даними, наведеними у розділі 6.1, використання DCDC перетворювача замість LDO дозволяє досягти до 50% економії для блоку управління та до 54% для блоку зв'язку при номінальній напрузі 3 В. Також доцільно дослідити вплив вхідної напруги живлення сенсорного вузла на показники споживання струму та ефективність використання енергії.

Останнім з розглянутих методів оптимізації є оптимізація програмного забезпечення для зменшення кількості виконуваних інструкцій та часу перебування блоку керування сенсорного вузла у активному режимі.

Одним з методів такої оптимізації є вимкнення механізмів запису та передачі інформації для налагодження (логування, logging). Оскільки попередні дані про вплив механізмів логування відсутні, ефективність такого методу необхідно дослідити експериментальним шляхом.

У наступних розділах розглядається ефективність запропонованих методів оптимізації енергоспоживання сенсорного вузла.

7.2 Управління циклами сну/роботи

Як зазначено у пункті 6.3 блок керування сенсорного вузла проводить більшу частину власного часу у режимі очікування. У період відсутності активності програмне забезпечення сенсорного вузла викликає функцію `nrf_pwr_mgmt_run` для перемикання мікроконтролерного ядра SoC у режим низького споживання енергії (System ON low power mode) до спрацювання таймерів або настання інших подій у системі.

Для дослідження впливу методів управління циклами сну/роботи на енергоспоживання сенсорного вузла з головного циклу вбудованого ПЗ було вилучено виклик функції `nrf_pwr_mgmt_run`. Таким чином блок управління сенсорного вузла перебуває у режимі роботи з низькою затримкою (System ON low latency mode), а його рівні споживання енергії залишаються високими.

Рисунок 7.1 ілюструє характеристики споживання струму для сенсорного вузла з відімкненими методами управління циклами сну/роботи.



Рисунок 7.1 – Динамічні характеристики споживання струму для сенсорного вузла з відімкненими методами керування циклами сну/роботи

На рисунку 7.1 можна спостерігати значне підвищення рівня споживання струму між періодами активності сенсорного вузла: у період між отриманням даних від датчику температури, оновленням вмісту ширококомовного повідомлення та передачею повідомлення у ефір по BLE.

Результати оцінки енергоспоживання для такого вузла наведені у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Результати вимірювань енергоспоживання для сенсорного вузла

Стан	Тривалість	Вх. напруга	Струм спож.	Спож./цикл
Отримання даних від AD7415	3 мс	3 В	7 мА	71 мкДж
Передача по BLE	7,5 мс	3 В	11,5 мА	215 мкДж
Оновлення вмісту широк. повідомл.	100 мкс	3 В	7 мА	1,5 мкДж
Очікування	2,989 с	3 В	7 мА	62,769 мДж
Всього	3 с	3 В	–	63,057 мДж

7.3 Контроль потужності передачі даних

Для оцінки впливу потужності передачі даних на енергоспоживання вузла оригінальне вбудоване ПЗ сенсорного вузла, описане у розділі 5.7 та досліджене у розділі 6.3, було модифіковано зі збереженням всіх інших характеристик, що не пов'язані зі встановленням рівня потужності передачі.

Оскільки рівень потужності передачі впливає тільки на показники споживання струму блоком зв'язку у стані передачі даних, у даному експерименті досліджуються тільки показники залежності споживання струму та енергії за три періоди передачі даних від показників потужності.

Рисунок 7.2 ілюструє зведену осцилограму для ПЗ зі встановленими рівнями потужності від -40 дБм до +4 дБм.



Рисунок 7.2 – Зведена осцилограма падіння напруги на резисторі для встановленої потужності передачі від -40 дБм до +4 дБм

Зі зведеної осцилограми видно, що тривалість та характер процесів сеансу передачі даних практично не залежить від обраної потужності.

Результати порівняння енергоспоживання сенсорного вузла у стані передачі даних при різних рівнях потужності передачі наведені у таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Залежність енергоспоживання сенсорного вузла у стані передачі даних від потужності передачі даних

Потужність	Вх. напруга	Струм спож.	Спож./цикл	$\Delta E_i/E_{0dB}$
+4 дБм	3 В	14,7 мА	195 мкДж	+25 %
0 дБм	3 В	11,5 мА	156 мкДж	0 %
-4 дБм	3 В	10,6 мА	143 мкДж	-8,3 %
-8 дБм	3 В	9,6 мА	131 мкДж	-16 %
-12 дБм	3 В	9 мА	127 мкДж	-18,6 %
-20 дБм	3 В	8,5 мА	119 мкДж	-23,7 %

-40 дБм	3 В	7,7 мА	110 мкДж	-29,5 %
---------	-----	--------	----------	---------

Таким чином ціною зменшення потужності та надійності передачі даних для розглянутого сенсорного вузла можна зберегти до 29% енергії на передачу даних. Однак такі показники економії для блоку зв'язку за сталості інших параметрів (споживання блоку керування, датчика температури, тощо) дають лише 1% економії у загальному енергетичному профілі сенсорного вузла.

7.4 Оптимізація вбудованого програмного забезпечення

У якості оптимізації вбудованого програмного забезпечення сенсорного вузла були відімкнені механізми логування вбудованого ПЗ через модифікацію конфігураційного параметру у файлі заголовка `sdk_config.h`.

Відімкнення механізмів логування дозволило скоротити кількість виконуваних інструкцій, об'єм використаної оперативної пам'яті блоку керування та, як результат, об'єм прошивки сенсорного вузла. Загалом об'єм прошивки зменшився на 5,9 % (з 174 Кб до 163,7 Кб), а об'єм використаної оперативної пам'яті зменшився на 6,5 % (з 24,5 Кб до 22,9 Кб).

Більш важливим результатом є скорочення часу перебування блоку керування у активному режимі: тривалість перебування у стані отримання даних від датчика температури та виконання інших операцій скоротилася з оригінальних 3 мс до приблизно 400 нс.

Зведена осцилограма для двох версій вбудованого ПЗ у режимі активної роботи блоку керування наведена на рисунку 7.3.



Рисунок 7.3 – Зведена осцилограма падіння напруги на резисторі для блоку керування у активному режимі роботи

Показники споживання енергії у активному стані роботи блоку керування до та після оптимізації ПЗ наведено у таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Показники споживання енергії до та після оптимізації ПЗ для блоку керування у активному стані

Логування	Тривалість	Вх. напруга	Струм спож.	Спож./цикл
Ввімкнено	3 мс	3 В	7 мА	71 мкДж
Вимкнено	400 нс	3 В	7 мА	9 мкДж

7.5 Оцінка та аналіз результатів оптимізації

У ході експериментального дослідження були застосовані наступні методи оптимізації енергоспоживання сенсорного вузла: керування циклами сну/роботи, контроль потужності передачі даних та оптимізація вбудованого програмного забезпечення сенсорного вузла.

Серед усіх досліджених методів оптимізації енергоспоживання сенсорного вузла найкраще себе показали методи керування циклами сну/роботи. Використання вбудованих механізмів переходу сенсорного вузла у режими збереження енергії дозволило скорити кількість спожитої енергії з 63 мДж до 2,2 мДж на один цикл роботи (3-х секундний інтервал).

Зменшення потужності передачі даних до мінімального рівня у -40 дБм не призвело до істотного покращення показників енергоспоживання – зменшення потужності передачі дозволило зекономити лише 1% від початкової енергії. Причиною таких результатів є відносно великий (1 с) інтервал передачі широкомовного повідомлення та, як результат, мала частка перебування сенсорного вузла у стані передачі інформації.

Доволі неочікуваними стали результати оптимізації вбудованого ПЗ та відімкнення механізмів логування сенсорного вузла: енергоспоживання для відповідного стану скоротилося на 87%. Серед причин такої поведінки можна зазначити зменшення кількості виконуваних операцій блоком керування сенсорного вузла та, у меншій мірі, вимкнення блоку апаратної реалізації UART, що відповідає за передачу налагоджувальної інформації.

Серед можливостей для подальшої оптимізації можна зазначити оптимізацію циклів сну/роботи для датчику температури, оптимізацію рівнів напруги живлення за допомогою вбудованого DC-DC перетворювача, застосування додаткових енергетичних буферів для оптимізації використання елементів CR2032 та підключення додаткових джерел живлення для продовження часу автономної роботи сенсорного вузла.

ВИСНОВКИ

У ході виконання атестаційної роботи проведено дослідження питання енергозбереження та оптимізації енергоспоживання в бездротових сенсорних

системах на основі Bluetooth Low Energy. Виконано аналіз предметної області, виділено основні характеристики бездротових сенсорних мереж, сформована узагальнена структура сенсорного вузла.

Розглянуто особливості організації протоколів передачі даних в бездротових сенсорних мережах. Виділено основні характеристики для розглянутих протоколів, проведена порівняльна оцінка за критеріями поширеності, радіусу покриття мережі, швидкості та надійності зв'язку.

Проаналізовано питання енергозабезпечення в бездротових сенсорних мережах. Виділені обмеження на характеристики джерел живлення, що є придатними для використання у сенсорних вузлах. Наведено опис основних категорій джерел живлення у сенсорних вузлах.

Проведено огляд методів енергозбереження та оптимізації енергоспоживання в бездротових сенсорних мережах. Запропонована класифікація методів енергозбереження на 4 категорії: керування циклами сну/роботи, оптимізація даних, оптимізація маршрутів та радіо обміну, а також оптимізація апаратного забезпечення та алгоритмів керування. Створена математична модель для оцінки енергоспоживання сенсорного вузла на основі nRF52832.

Експериментально досліджено питання ефективності наступних методів збереження енергії: керування циклами сну/роботи, оптимізація радіо обміну та програмного забезпечення сенсорного вузла. Отримані результати можуть бути використані у якості підґрунтя для подальших розробок та оптимізації енергоспоживання бездротових сенсорних вузлів у мережах BLE.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Artificial Intelligence Index Report 2019 [Електронний ресурс] / , AI

Index Steering Committee, Human-Centered AI Institute, Stanford University, Stanford, CA. – Режим доступа : [www/ URL: https://hai.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj10986/f/ai_index_2019_report.pdf](http://www/URL:https://hai.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj10986/f/ai_index_2019_report.pdf) – 13.12.2019 р. – Загол. з екрану.

2. Lee, J. Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment [Текст] / J. Lee, H.-A. Kao, S. Yang // *Procedia CIRP*. – 2014. – Т. 16. – С. 3–8.

3. Nikoukar, A. Low-Power Wireless for the Internet of Things: Standards and Applications [Текст] / A. Nikoukar, S. Raza, A. Poole, M. Gunes, B. Dezfouli // *IEEE Access*. – 2018. – Т. 6. – С. 67893-67926.

4. Buratti, C. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution [Текст] / C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, R. Verdone // *Sensors*. – 2009. – Т. 9, №6. – С. 6869–6896.

5. Akyildiz, I. F. A survey on sensor networks [Текст] / I. F. Akyildiz, Su Weilian, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci // *IEEE Communications Magazine*. – 2002. – Т. 40, №8. – С. 102–114.

6. Low power systems for wireless microsensors [Текст] : Proceedings of 1996 International Symposium on Low Power Electronics and Design, 12-14 August 1996 Monterey – Monterey : CLA Electrical Engineering Department Los Angeles, CA and Rockwell Science Center, 1996. – 5 с.

7. Tubaishat, M. Sensor networks: an overview [Текст] / M. Tubaishat, S. Madria // *IEEE Potentials*. – 2003. – Т. 22, №2. – С. 20–23.

8. A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks : Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 27-29 June 2005 Limassol, Cyprus – Cyprus: 2005. – С. 719–724.

9. Christidis, K. Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things

[Текст] / K.Christidis, M.Devetsikiotis // IEEE Access. – 2016. – Т. 4. – С. 2292–2303.

10. Implementing the Internet of Things vision in industrial wireless sensor networks [Текст] : 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 3-6 Feb. 2014 Honolulu – Honolulu: 2014. – С. 545–550.

11. Wireless Sensor Network-based air quality monitoring system [Текст] : 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 27-30 July 2014 Porto Alegre – Porto Alegre : 1996. – С. 627–632.

12. Dehwah, A. H. Lessons learned on solar powered wireless sensor network deployments in urban, desert environments [Текст] / A. H. Dehwah, M. Mousa, C. G. Claudel // Ad Hoc Networks. – 2015. – Т. 28. – С. 52–67.

13. WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control [Текст] : 2008 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 22-24 April 2008 St. Louis – St. Louis: 2008. – С. 377– 386.

14. Thread Stack Fundamentals white paper [Электронный ресурс] / Thread Group, Inc. – Режим доступа : [www/ URL: https://www.threadgroup.org/Portals/0/documents/support/ThreadOverview_633_2.pdf](http://www.threadgroup.org/Portals/0/documents/support/ThreadOverview_633_2.pdf) – 24.12.2018 г. – Загол. з экрана.

15. Samuel S.S.I. A review of connectivity challenges in IoT-smart home [Текст] / S.S.I. Samuel // 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), 15-16 March 2016 – Muscat, Oman, 2016. – С. 364-368.

16. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi [Текст] : IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 5-8 Nov. 2007 Taipei– Taipei: 2007. – С. 46–51.

17. DeCuir, J. Introducing Bluetooth Smart: Part 1: A look at both classic and new technologies [Текст] / J. DeCuir // IEEE Consumer Electronics Magazine. – 2015. – Т. 3, №1 – С. 12–18.
18. Powering the internet of things [Текст] : ISLPED '14 Proceedings of the 2014 international symposium on Low power electronics and design, 11-13 August 2014 La Jolla – La Jolla: 2014. – С. 375-380.
19. Power Sources for Wireless Sensor Networks [Текст] : Wireless Sensor Networks: First European Workshop, EWSN 2004, January 19-21, 2004 Berlin – Berlin: 2004. – С. 1-17.
20. Georgiou, K. The IoT energy challenge: A software perspective [Текст] / K. Georgiou, S. Xavier-de-Souza, K. Eder // IEEE Embedded Systems Letters. – 2018. – Т. 10, No3 – С. 53–56.
21. Knight, C. Energy Options for Wireless Sensor Nodes [Текст] / C. Knight, J. Davidson, & S. Behrens // Sensors. – 2008. – Т. 8, №12 – С. 8037–8066.
22. What is a Battery? [Электронный ресурс] / Sparkfun Electronics. – Режим доступа : [www/ URL: https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-a-battery](http://www.sparkfun.com/tutorials/what-is-a-battery) – 24.12.2018 г. – Загол. з экрану.
23. Reconsidering batteries in energy harvesting sensing [Текст] : ENSsys '18 Proceedings of the 6th International Workshop on Energy Harvesting & EnergyNeutral Sensing Systems, 4 November 2018 Shenzhen – New York: ACM, 2018. – С. 14-18.
24. Internet of things: wireless sensor networks [Текст] / IEC – Geneve : IEC, 2014. – 78 с. – (White paper). – ISBN 978-2-8322-1834-1.
25. Vullers, R. Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks [Текст] / R. Vullers, R. Schaijk, H. Visser, J. Penders, C. Hoof // IEEE Solid-State Circuits Magazine. – 2010. – 2(2). – С. 29–38.
26. Sudevalayam, S. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and

Implications [Текст] / S. Sudevalayam, P. Kulkarni // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2011. – Т. 13, №3. – С. 443–461.

27. Harb, A. Energy harvesting: State-of-the-art [Текст] / A. Harb // Renewable Energy. – 2011. – Т. 36, №10. – С. 2641–2654.

28. Ruan, T. Energy-Aware Approaches for Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Nodes [Текст] / T. Ruan, Z. J. Chew, M. Zhu. // IEEE Sensors Journal. – 2017. – Т. 17, №7. – С. 2165–2173.

29. Lu, X. Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey [Текст] / X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, Z. Han. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Т. 17, №2 – С. 757–789.

30. Anastasi G. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. [Текст] / G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella. // Ad Hoc Networks. – 2009. – Т. 7. – № 3. – С. 537–568.

31. Karasabun E. Active node determination for correlated data gathering in wireless sensor networks [Текст] / E. Karasabun, I. Korpeoglu, C. Aykanat // Computer Networks. – 2013. – Т. 47 – №. 5, С. 1124–1138.

32. Misra S. Connectivity preserving localized coverage algorithm for area monitoring using wireless sensor networks [Текст] / S. Misra, M. Pavan Kumar, M.S. Obaidat // Computer Communications. – 2011. – Т. 34. – № 12. – С. 1484–1496.

33. Baronti P. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards [Текст] / P. Baronti, P. Pillai, V.W.C. Chook, S. Chessa, A. Gotta, Y. F. Hu // Computer Communications. – 2007. – Т. 30. – № 7. – С. 1655–1695.

34. Polastre J. Versatile low power media access for wireless sensor networks. [Текст] / J. Polastre, J. Hill, D. Culler // Proceedings of the 2nd

International Conference on Embedded Networked Sensor Systems – SenSys '04, 3-5 November 2004– Baltimore, USA, 2004. – C. 95–107.

35. Ye W. Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks [Текст] / W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2004. – Т. 12. – № 3. – С. 493–506.

36. Ba H. Passive wake-up radios: From devices to applications [Текст] / H. Ba, I. Demirkol, W. Heinzelman // Ad Hoc Networks. – 2013. – Т. 11. – № 8. – С. 2605–2621.

37. Fasolo E. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey [Текст] / E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer, M. Zorzi // IEEE Wireless Communications. – 2007. – Т. 14. – № 2. – С. 70–87.

38. Rault T. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey [Текст] / T. Rault, A. Bouabdallah, Y. Challal // Computer Networks. – 2014. – Т. 67. – С. 104–122.

39. Alippi C. An Adaptive Sampling Algorithm for Effective Energy Management in Wireless Sensor Networks With Energy-Hungry Sensors [Текст] / C. Alippi, G. Anastasi, M. Di Francesco, M. Roveri // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2010. – Т. 59. – № 2. – С. 335–344.

40. Heinzelman W.R. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [Текст] / W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan // Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 7-7 January 2002 – Maui, HI, USA, 2002. – С. 364-368.

41. Younis O. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [Текст] / O. Younis, S. Fahmy // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2004. – Т. 3. – № 4. – С. 366–379.

42. Shah R.C. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks

[Текст] / R.C. Shah, J.M. Rabaey // 2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. WCNC 2002 (Cat. No.02TH8609), 17-21 March 2002 – Orlando, FL, USA, 2002.

43. Ortiz D.A. Impact of source code optimizations on power consumption of embedded systems [Текст] / D.A. Ortiz, N.G. Santiago // 2008 Joint 6th International IEEE Northeast Workshop on Circuits and Systems and TAISA Conference, 22-25 June 2008 – Montreal, QC, Canada, 2008. – С. 133-136.

44. Dalal V. Software power optimizations in an embedded system [Текст] / V. Dalal, C. P. Ravikumar // VLSI Design 2001. Fourteenth International Conference on VLSI Design, 7-7 January 2001 – Bangalore, India, 2001. – С. 254259.

45. Georgiou K. The IoT energy challenge: A software perspective [Текст] / K. Georgiou, S. Xavier-de-Souza, K. Eder // IEEE Embedded Systems Letters. – 2017. – Т. 10. – № 3. – С. 53–56.

46. Alioto M. Ultra-Low Power VLSI Circuit Design Demystified and Explained: A Tutorial [Текст] / M. Alioto // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2012. – Т. 59. – № 1. – С. 3–29.

47. Dargie W. Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks: State-of-the-Art [Текст] / W. Dargie // IEEE Sensors Journal. – 2012. – Т. 12. – № 5. – С. 1518–1528.

48. Rodrigues L. Estimating the Lifetime of Wireless Sensor Network Nodes through the Use of Embedded Analytical Battery Models [Текст] / L. Rodrigue, C. Montez, G. Budke, F. Vasques, P. Portugal. // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2017. – Т. 6. – No 2. – 2.

49. Lin X. Power supply and consumption co-optimization of portable embedded systems with hybrid power supply [Текст] / X. Lin, Y. Wang, N. Chang,

M. Pedram // 2014 IEEE 32nd International Conference on Computer Design (ICCD), 19-22 October 2014 – Seoul, South Korea, 2014. – С. 477-482.

50. Khan J.A. Energy management in Wireless Sensor Networks: A survey [Текст] / J.A. Khan, H.K. Qureshi, A. Iqbal // Computers & Electrical Engineering. – 2015. – Т. 41. – С. 159–176.

51. Kansal A. Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks: State-of-the-Art [Текст] / A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, M.B. Srivastava // ACM Transactions on Embedded Computing Systems. – 2007. – Т. 6. – № 4. – 32.

52. Patil V.S. FPGA Based Power Saving Technique for Sensor Node in Wireless Sensor Network (WSN) [Текст] / V.S. Patil, Y.B. Mane, S. Deshpande // Computational Intelligence in Sensor Networks. Studies in Computational Intelligence / B. Mishra, S. Dehuri, B. Panigrahi, A. Nayak, B. Mishra, H. Das (ред.) – Springer, Berlin, Heidelberg, 2019. – Разд. 16. – С. 385–404.

53. Hempstead M. An Ultra Low Power System Architecture for Sensor Network Applications [Текст] / M. Hempstead, N. Tripathi, P. Mauro, Gu-Yeon Wei, D. Brooks // 32nd International Symposium on Computer Architecture (ISCA'05), 4-8 June 2005 – Madison, WI, USA, 2005. – С. 208 - 219.

54. Cheour R. Recent Trends of FPGA Used for Low-Power Wireless Sensor Network [Текст] / R. Cheour, S. Khriji, D.E. Houssaini, M. Baklouti, M. Abid, O.

Kanoun // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2019. – Т. 34. – №. 10. – С. 28–38.

55. nRF52832 Product Specification v1.4 [Электронный ресурс] / Nordic Semiconductor ASA. – Режим доступа : [www/nordicsemi.com/infocenter/nRF52832_PS_v1.4.pdf](http://www.nordicsemi.com/infocenter/nRF52832_PS_v1.4.pdf) – 13.12.2019 г. – Загол. з екрану.

56. $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Accurate, 10-Bit Digital Temperature Sensors in SOT-23

AD7414/AD7415 Data Sheet [Электронный ресурс] / Analog Devices, Inc. –
Режим доступа : [www/
https://www.analog.com/media/en/technicaldocumentation/data-
sheets/AD7414_7415.pdf](http://www.analog.com/media/en/technicaldocumentation/data-sheets/AD7414_7415.pdf) – 13.12.2019 г. – Загол. з екрану.

57. ENERGIZER CR2032 PRODUCT DATASHEET [Электронный
ресурс] / Energizer. – Режим доступа : [www/ URL:
https://data.energizer.com/pdfs/cr2032.pdf](http://www.data.energizer.com/pdfs/cr2032.pdf) – 13.12.2019 г. – Загол. з екрану.

58. S132 SoftDevice – SoftDevice Specification v7.0 [Электронный
ресурс]
/ Nordic Semiconductor ASA. – Режим доступа : [www/ URL:
https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/S132_SDS_v7.0.pdf](http://www.infocenter.nordicsemi.com/pdf/S132_SDS_v7.0.pdf) – 13.12.2019 г. – Загол.
з екрану.