

2022 p.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТ
Кафедра КІТАМ
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
«____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Слюсару Андрію Павловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Розроблення автоматизованої системи управління ресурсами для комунального сектора на базі бездротових сенсорних мереж
затверджена наказом університету від 07.11.2022р. № 1464 Ст
- Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.12.2022 р.
- Вихідні дані до роботи _____
 - Призначення і цілі розробки: система призначена для управління ресурсами на об'єктах житлово-комунального сектора
 - Середовище моделювання: NS-3.
 - Дані мають передаватися за допомогою бездротових технологій передачі інформації.
 - Система повинна мати високу енергоефективність.
 - Система повинна мати великий радіус дії в умовах щільної міської забудови.
- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
 - Аналіз засобів та методів управління ресурсами на житлово-комунальних об'єктах.
 - Аналіз існуючих систем управління ресурсами на житлово-комунальних об'єктах.
 - Розроблення структурної схеми автоматизованої системи управління ресурсами.
 - Моделювання процесу управління ресурсами комунального сектора з використанням бездротової сенсорної мережі на базі технології LoRa.
 - Розроблення автоматизованої системи управління ресурсами для комунального сектора.
 - Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації Power Point (*ppt) – 21 ст. формату А4.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз технічного завдання</i>	07.11.2022	<i>виконано</i>
2	<i>Аналіз засобів та методів управління ресурсами на житлово-комунальних об'єктах</i>	13.11.2022	<i>виконано</i>
3	<i>Аналіз існуючих систем управління ресурсами на житлово-комунальних об'єктах</i>	21.11.2022	<i>виконано</i>
4	<i>Розроблення структурної схеми автоматизованої системи управління ресурсами</i>	24.11.2022	<i>виконано</i>
5	<i>Моделювання процесу управління ресурсами комунального сектора з використанням бездротової сенсорної мережі на базі технології LoRa</i>	28.11.2022	<i>виконано</i>
6	<i>Розроблення автоматизованої системи управління ресурсами для комунального сектора</i>	03.12.2022	<i>виконано</i>
7	<i>Охорона праці</i>	05.12.2022	<i>виконано</i>
8	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	08.12.2022	<i>виконано</i>
9	<i>Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichек</i>	10.12.2022	
10	<i>Подання роботи на рецензію</i>	12.12.2022	
11	<i>Подання роботи на підпис зав. кафедри</i>	15.12.2022	
12	<i>Подання роботи до ЕК</i>	18.12.2022	

Дата видачі завдання 07.12.2022 р.

Студент _____ Слюсар А. П.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Хрустальова С. В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 99 с., 7 табл., 36 рис., 1 дод., 33 джерела.

ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ, БЕЗДРОТОВА СЕНСОРНА МЕРЕЖА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ШЛЮЗ, ЛІЧИЛЬНИК, МОНІТОРИНГ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ, ДАТЧИК, СЕНСОРНИЙ ВУЗОЛ, БАЗОВА СТАНЦІЯ, ОБРОБКА ДАНИХ.

Мета кваліфікаційної роботи – забезпечення якісного контролю енерговитрат на об'єктах житлово-комунального сектору.

Об'єкт дослідження – процес контролю витрат ресурсів на об'єктах ЖКГ.

Предмет дослідження – автоматизована система управління ресурсами для житлово-комунального сектору на базі бездротових сенсорних мереж.

Методи дослідження – критичний аналіз технології LoRa та інших бездротових технологій IoT, методи кластеризації FOREL та K-means.

Проведено аналіз існуючих методів та засобів управління ресурсами. Досліджено особливості будови й функціонування бездротових сенсорних мереж. Проаналізовано сучасні автоматизовані системи управління ресурсами на об'єктах комунального сектора.

Розроблено структурну схему та алгоритм роботи автоматизованої системи управління ресурсами.

Обрано технологію бездротового зв'язку для розроблюваної системи та проведено вибір її компонентів, описано їх конструктивні та функціональні особливості, наведено їх технічні характеристики. Виконано необхідні розрахунки параметрів бездротової сенсорної мережі для автоматизованої системи управління ресурсами. Проведено моделювання процесу управління ресурсами комунального сектора з використанням бездротової сенсорної мережі на базі технології LoRa.

ABSTRACT

Explanatory note: 99 pages, 7 tables, 36 pictures, 1 applications, 33 sources.

POWER SUPPLY, WIRELESS SENSOR NETWORK, AUTOMATION, GATEWAY, COUNTER, MONITORING, RESOURCE MANAGEMENT SYSTEM, SENSOR, SENSOR NODE, BASE STATION, DATA PROCESSING.

The purpose of the work is to ensure quality control of energy consumption at the facilities of the housing and communal sector.

The object of development is the process of controlling the consumption of resources at housing and communal services facilities.

The subject of development is an automated resource management system for the residential and communal sector based on wireless sensor networks.

An analysis of existing methods and means of resource management was carried out. Peculiarities of the structure and functioning of wireless sensor networks have been studied. Technologies of data transmission in wireless sensor networks are also considered. Modern automated resource management systems at utility sector facilities are analyzed.

The structural diagram and algorithm of the automated resource management system have been developed.

The wireless communication technology for the developed system was chosen and its components were selected, their structural and functional features were described, and their technical characteristics were given.

The necessary calculations of the wireless sensor network parameters for the automated resource management system have been performed.

Modeling of the resource management process of the utility sector using a wireless sensor network based on LoRa technology was carried out.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз особливостей побудови і функціонування бездротових сенсорних мереж та їх застосування в житлово-комунальному секторі	12
1.1 Особливості будови та функціонування бездротових сенсорних мереж.....	12
1.1.1 Поняття бездротової сенсорної мережі.....	12
1.1.2 Класифікація бездротових сенсорних мереж.....	13
1.1.3 Основні поняття бездротових сенсорних мереж.....	15
1.1.4 Загальні принципи функціонування бездротових сенсорних мереж.....	18
1.2 Різновиди топології БСМ та її структурні елементи.....	21
1.2.1 Вузли в бездротових сенсорних мережах.....	20
1.2.2 Види топології бездротових сенсорних мереж.....	27
1.3 Технології передачі даних в бездротових сенсорних мережах.....	32
1.3.1 Технологія бездротової передачі даних Bluetooth.....	32
1.3.2 Технологія Wi-Fi.....	35
1.3.3 Технологія ZigBee та стандарт IEEE 802.15.4.....	36
1.3.4 Технологія NB-IoT.....	40
1.3.5 Технологія LoRaWAN.....	41
1.4 Аналіз сучасних автоматизованих систем управління ресурсами на базі бездротових сенсорних мереж.....	44
1.4.1 Автоматизовані системи та засоби енергоменеджменту від компанії «Smartico».....	44
1.4.2 Автоматизовані системи енергомоніторингу від компанії «YASNO»...	46
1.5 Висновки до розділу.....	47
2 Розроблення структурної схеми та алгоритму роботи автоматизованої системи управління ресурсами.....	49

2.1 Загальний опис та технічні вимоги до автоматизованої системи управління ресурсами.....	49
2.1.1 Загальний опис системи.....	49
2.1.2 Задачі системи.....	49
2.1.3 Склад системи.....	49
2.1.4 Переваги використання системи управління ресурсами.....	50
2.1.5 Загальні технічні вимоги, що пред'являються до системи.....	50
2.2 Вибір технології бездротового зв'язку для АСУР.....	51
2.2.1 Порівняльний аналіз технологій бездротового зв'язку.....	51
2.2.2 Порівняння технологій LoRaWAN та NB-IoT.....	52
2.3 Розроблення структурної схеми АСУР.....	58
2.4 Вибір елементної бази для АСУР.....	60
2.4.1 Вибір шлюзу.....	60
2.4.2 Вибір антени.....	61
2.4.3 Вибір лічильника води.....	62
2.4.4 Вибір газового лічильника.....	63
2.4.5 Вибір лічильника електроенергії.....	64
2.4.6 Вибір лічильника теплопостачання.....	65
2.4.7 Вибір універсального інтерфейсного радіомодуля.....	66
2.5 Розроблення алгоритму роботи АСУР.....	67
2.6 Висновки до розділу.....	68
3 Моделювання процесу управління ресурсами комунального сектора з використанням бездротової сенсорної мережі на базі технології LoRa.....	70
3.1 Розрахунок часу передачі одного пакета через радіоінтерфейс LoRaWAN..	70
3.2 Розрахунок пропускної здатності мережі LoRaWAN.....	74
3.3 Визначення радіусу дії базової станції LoRa.....	76
3.4 Кластеризація вузлів навколо базових станцій за допомогою методів FOREL та K-means.....	80
3.5 Розрахунок ємності базової станції.....	83
3.6 Розрахунок кількості базових станцій.....	86

3.7 Висновки до розділу.....	87
4 Охорона праці.....	88
4.1 Аналіз умов праці в лабораторії.....	88
4.2 Промислова безпека в лабораторії.....	89
Висновки.....	91
Перелік джерел посилання.....	96
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	100

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСУР – автоматизована система управління ресурсами;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

БС – базова станція;

БСМ – бездротова сенсорна мережа;

ЖКГ – житлово-комунальне господарство;

ПЗ – програмне забезпечення

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

ЦОД – центр обробки даних.

ВСТУП

Сучасний стан житлово-комунального сектору України потребує інноваційних підходів у технологічних аспектах енергоменеджменту.

Досліджувана концепція автоматизованої системи управління ресурсами на базі бездротових сенсорних мереж служить для модернізації системи обліку побутових абонентів та технічного обслуговування внутрішньобудинкових мереж енергопостачання, управління постачанням енергоресурсів та інформаційного обслуговування споживачів енергопостачальної компанії.

Враховуючи нинішню складну економічну ситуацію в Україні, що склалася у воєнний час, виникла необхідність ініціювати режим раціонального та економного використання енергоресурсів.

Сучасним методом вирішення проблеми регулювання витрати енергоносіїв є створення автоматизованої системи управління ресурсами (АСУР) на базі бездротових сенсорних мереж з можливістю дистанційного моніторингу енерговитрат та зберігання отриманої інформації у базі даних незалежного сервісного центру енергоаудиту та контролю.

Таким чином, об'єднання функціонально різних бездротових пристроїв (лічильники, датчики, сенсори) в єдину систему обліку та управління енергоспоживанням відповідає світовій тенденції побудови «розумних мереж» на об'єктах житлово-комунального господарства (ЖКГ), що ґрунтуються на принципах енергозбереження та енергоефективності.

Енергозбереження – найефективніший шлях модернізації ЖКГ. Сумарні витрати на виробництво одного кіловата узагальненої потужності за допомогою енергозберігаючих заходів становлять менше 10% необхідних капіталовкладень у будівництво відповідної генеруючої потужності. Потенціал енергозбереження у ЖКГ – 65%. Понад 50% цього потенціалу можна реалізувати за допомогою впровадження системного обліку, збудованого на сучасних інноваційних ІТ-технологіях.

Сьогодні перед компаніями-енергопостачальниками та комунальними підприємствами відкрилася безпрецедентна можливість перетворення мереж енергопостачання на інтелектуальні мережі, що дозволяють керувати всією мережею енергопостачання як єдиною системою. При цьому споживачі отримують можливість не тільки отримати достовірний звіт про спжиті енергоресурси в режимі on-line, але й безпосередньо брати участь у регулюванні витрати енергії в будинках і квартирах. Цьому сприяє нове покоління інтелектуальних приладів обліку та пристроїв, що підтримують двонаправлений інтерфейс зв'язку та управління [1].

Таким чином, задача розробки АСУР для комунального сектору на базі бездротових сенсорних мереж є актуальною.

Метою роботи є забезпечення якісного контролю енерговитрат на об'єктах житлово-комунального сектору.

Об'єкт дослідження – процес контролю витрат ресурсів на об'єктах ЖКГ.

Предмет дослідження – автоматизована система управління ресурсами для житлово-комунального сектору на базі бездротових сенсорних мереж.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих методів, засобів та автоматизованих систем управління ресурсами на базі бездротових сенсорних мереж;
- розробити структуру та алгоритм роботи автоматизованої системи управління ресурсами на базі бездротових сенсорних мереж;
- розробити автоматизовану систему управління ресурсами для житлово-комунального сектору на базі бездротових сенсорних мереж;
- провести моделювання процесу управління ресурсами комунального сектора з використанням бездротової сенсорної мережі на базі технології LoRa;
- розглянути питання охорони праці;
- розробити та оформити пояснювальну записку, використовуючи навчальний посібник з дипломного проектування [2], методичні вказівки [3] та ДСТУ 3008-15 [4].

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ І ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗДРОВОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОМУ СЕКТОРІ

1.1 Особливості будови та функціонування бездротових сенсорних мереж

1.1.1 Поняття бездротової сенсорної мережі

Бездротова сенсорна мережа (БСМ) – це розподілена мережа безлічі датчиків (сенсорів) і виконавчих пристроїв (рис. 1.1), об'єднаних між собою за допомогою радіоканалу. Область покриття подібної мережі може становити від кількох метрів до кількох кілометрів за рахунок можливості ретрансляції повідомлень від одного елемента до іншого. До складу сенсорів зазвичай входять автономні мікроконтролери, приймачі та передавачі, що дають сенсорам здатність до самоорганізації в спеціалізовані мережі та дозволяють їм, зв'язуючись один з одним, обмінюватися даними за допомогою радіозв'язку.

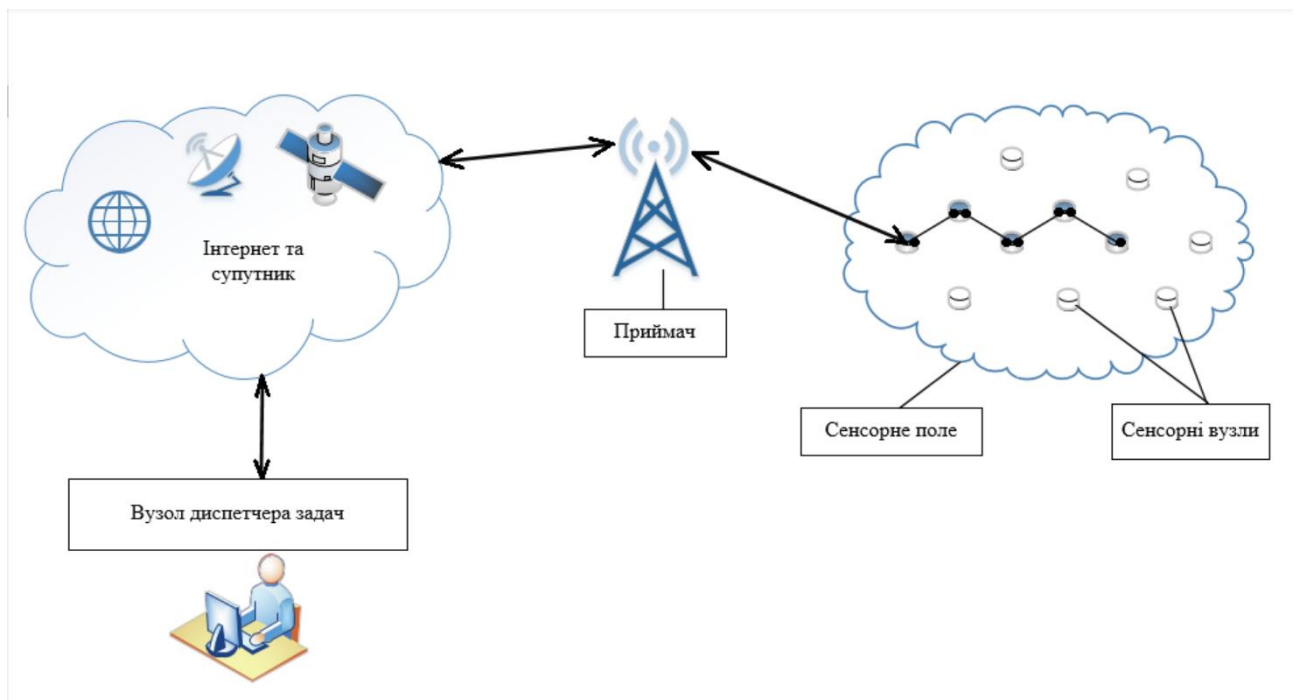


Рисунок 1.1 – Структура бездротової сенсорної мережі

Простір, який покривається сенсорної мережею, називають сенсорним полем. Бездротові сенсорні вузли це мініатюрні пристрої з обмеженими ресурсами: зарядом батареї, об'ємом пам'яті, обчислювальними можливостями і т.п. [6].

Бездротові сенсорні мережі є незамінними у випадках, коли взагалі немає можливості прокласти кабель через технічні, економічні або організаційні причини. Через це БСМ мають наступні переваги:

- мають можливість самовідновлення та самоорганізації;
- передають інформацію на великі відстані за допомогою ретрансляції;
- компактність та дешевизна вузлів;
- автономність та енергоефективність;
- простий монтаж;
- простота впровадження на об'єкти, що вже експлуатуються;
- дешевизна обслуговування.

1.1.2 Класифікація бездротових сенсорних мереж

Для того щоб скласти якісну класифікацію сенсорних мереж (рис. 1.2), необхідно виділити наступні ключові ознаки:

- середовище у якому відбувається передача даних;
- мобільність мережі;
- організацію мережі;
- середовище моніторингу;
- параметри моніторингу;
- область застосування.

Також існує поділ сенсорних мереж за принципом мобільності:

- стаціонарні;
- мобільні сенсорні мережі.

За типом архітектури поділяються на:

- мережі з шаруватою архітектурою;
- мережі з кластерною архітектурою;

– мережі, що мають сенсорні вузли з мобільним стоком.

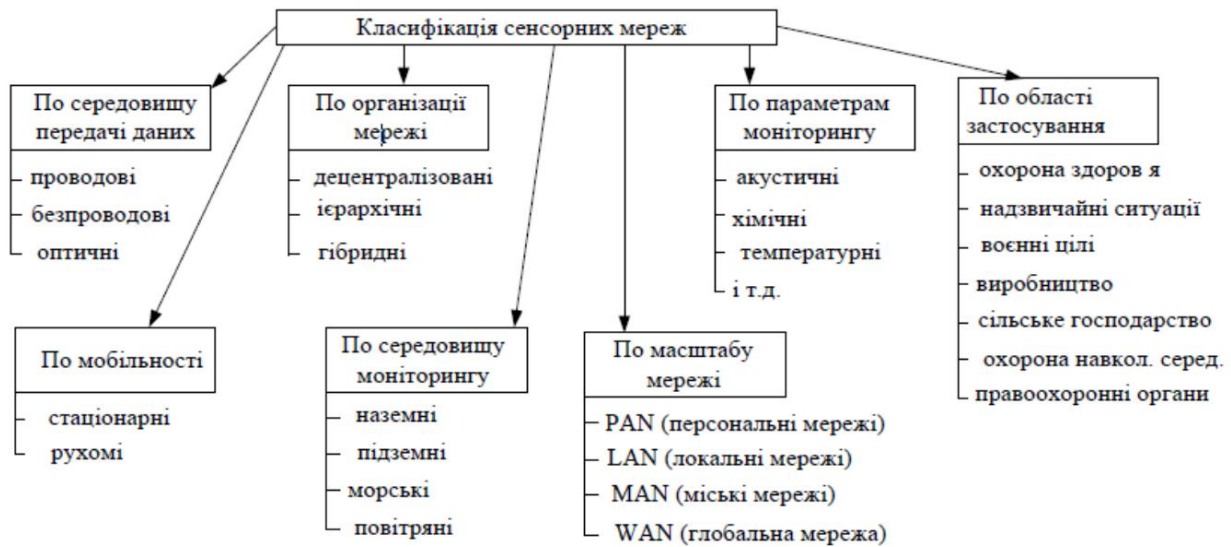


Рисунок 1.2 – Класифікація сенсорних мереж

Персональні мережі забезпечують інтервал зв'язку між двома користувачами від 10 м до 100 м. При використанні ієрархічної структури побудови БСМ мережні вузли PAN належать до нижніх рівнів: першого, а при розширенні мережі – другого рівня. Прикладами таких мереж можуть слугувати мережі, які використовуються у медицині катастроф – повне обстеження організму людини, комплексне вимірювання параметрів: тиску, температури, кардіограми і ін. [11]. Очевидно, що за допомогою однієї передачі даних з контрольованого об'єкту не вдається отримати достовірну інформацію на центральному вузлі. Велику інформативність несе мультимедійна передача мови, а в деяких випадках відео. Таким чином, контентом БСМ можуть бути як дані, так і мультимедійна інформація та передача мови, що вимагає високошвидкісних каналів.

Міські мережі – мережі, радіус дії яких від сотень метрів до декількох десятків кілометрів. Сенсорні міські мережі (MAN-SN) являють собою об'єднання декількох локальних мереж в межах міста і здатні передавати тільки об'єднані потоки, тобто вони призначені виконувати функції верхнього рівня

ієрархії, або ж можуть представляти окрему мережу, кінцеві вузли і маршрутизатори якої розміщені по всьому місту, а сама БСМ охоплює всі рівні ієрархії. MAN-SN і WANSN інтегрують в собі потоки інформації, які агрегуються від персональних і локальних мереж, передають інформацію на великі відстані.

1.1.3 Термінологія методу бездротових сенсорних мереж

Дамо визначення основним поняттям сенсорних мереж.

Сенсор – засіб безпосереднього вимірювання фізичного, хімічного параметра (величини), що перетворює контрольований параметр (величину) на зручний для використання сигнал, як правило електричний [7].

Сенсор складається з чотирьох основних компонентів (рис. 1.3), таких як:

- вимірювальний блок;
- блок обробки;
- блок приймача;
- блок живлення.

Він також має залежні від програм додаткові компоненти, такі як система позиціонування, генератор енергії і мобілізатор.

Сенсорні пристрої зазвичай складаються з двох субодиноць: сенсорів та аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Аналогові сигнали, створені сенсорами, перетворюються в цифрові сигнали за допомогою АЦП, а потім подаються в блок обробки. Процесор, як правило, пов'язаний з невеликим блоком зберігання, і він може управляти процедурами, які змушують сенсор взаємодіяти з іншими сенсорами для виконання призначених завдань розпізнавання. Приймач з'єднує сенсор з мережею.

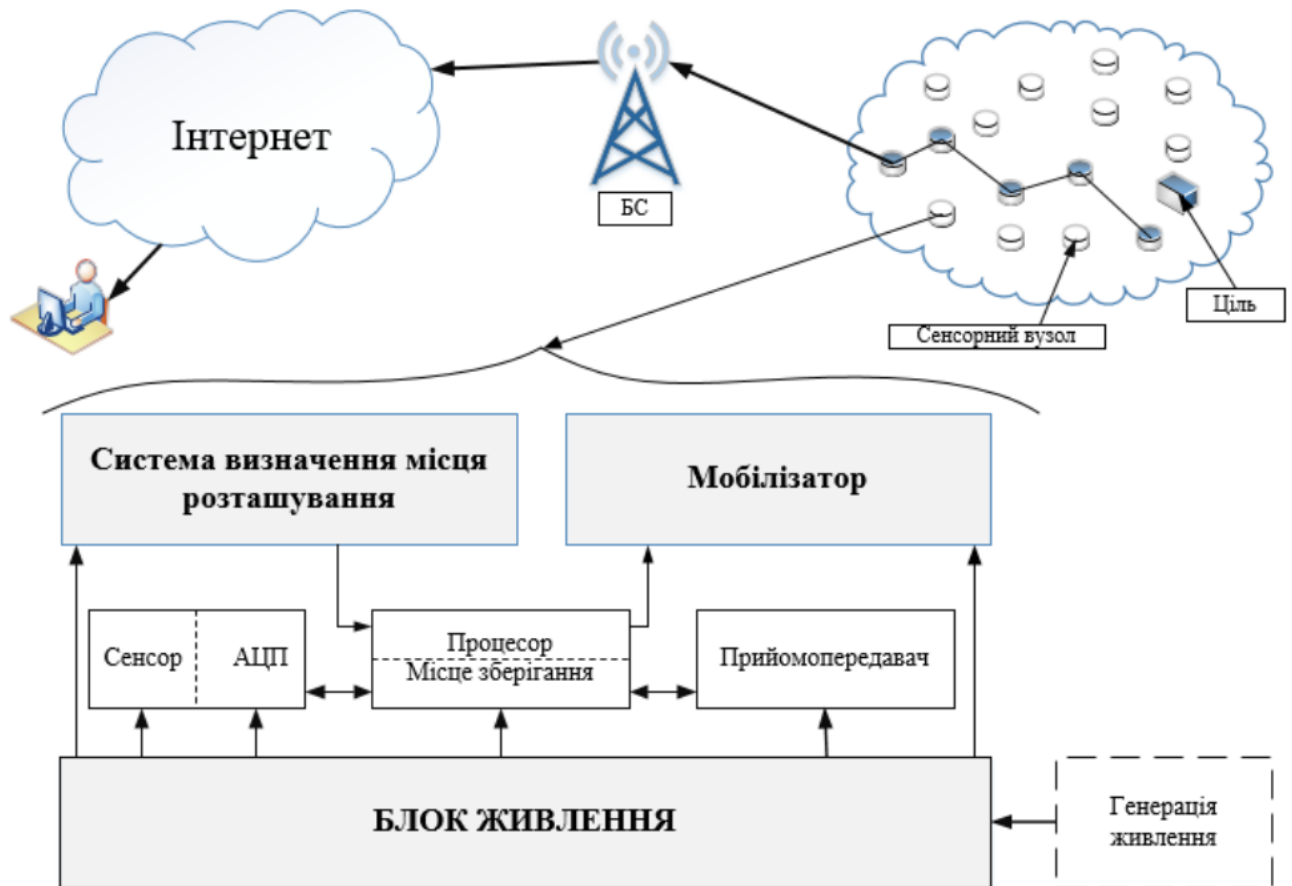


Рисунок 1.3 – Компоненти сенсора

Одним з найбільш важливих компонентів сенсора є блок живлення. Блоки живлення можуть підтримуватися блоком очищення енергії, таким як сонячні елементи. Інші субодиниці сенсора залежать від програм.

Функціональна блок-схема універсального бездротового сенсора представлена на рисунку 1.4.

Модульний підхід до проектування забезпечує гнучку і універсальну платформу для задоволення потреб широкого кола програм. Наприклад, в залежності від сенсорів, які потрібно розгорнути, блок формування сигналу може бути запрограмований або замінений. Це дозволяє використовувати широкий діапазон різних сенсорів з бездротовим сенсором. Аналогічним чином, радіолінія може бути замінена, як потрібно для вимог діапазону бездротових мереж, і необхідності в двонапрямленому зв'язку [8].

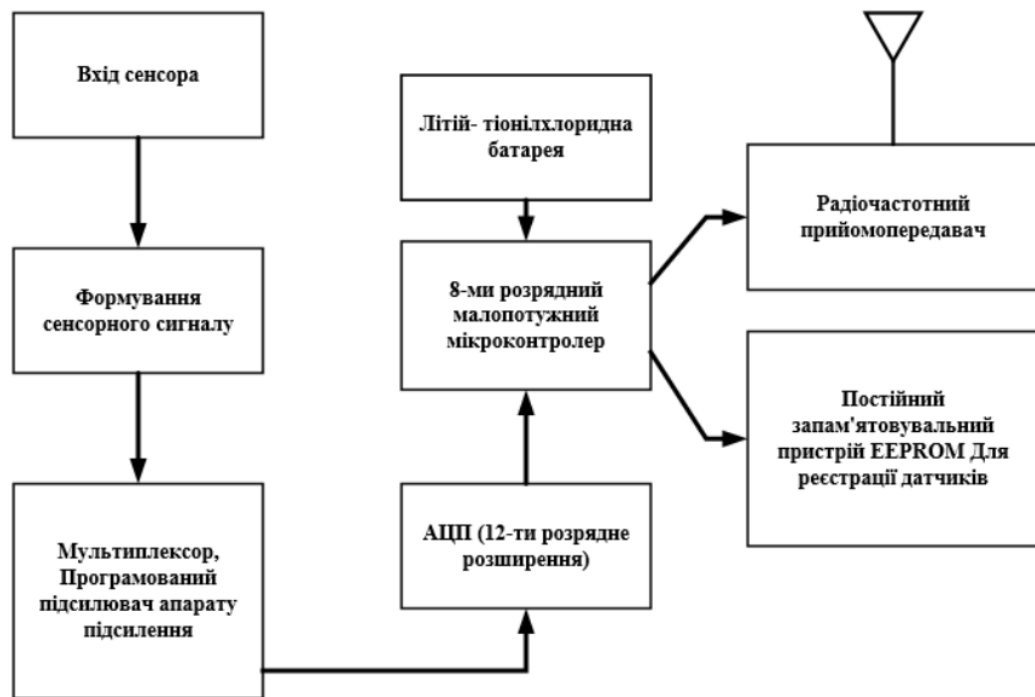


Рисунок 1.4 – Функціональна блок-схема сенсора

Датчик – пристрій, що здатний перетворювати один вид енергії в інший. Тобто, визначення сенсора та датчика є тотожними.

Актуатор – виконавчий пристрій, що може змінювати стан керованого об'єкта шляхом реакції на керуючий сигнал. Актуатор перетворює один тип енергії в інший, наприклад, електричну в механічну.

Сенсорний вузол – це пристрій, який складається, принаймні, з одного сенсора (може також включати один або декілька актуаторів), і має обчислювальні і дротові або бездротові мережеві можливості.

Сенсорна мережа – розподілена система сенсорних вузлів, які взаємодіють між собою, а також з іншими мережами для запитів, обробки, передачі та надання даних, які вони отримують від об'єктів реального фізичного світу для формування реакції на ці дані. Тобто, сенсорна мережа має в своєму складі сенсори, актуатори і комунікаційні вузли. Отже, основна функція сенсорної мережі полягає в тому, щоб контролювати та проводити моніторинг вимірюваних параметрів середовища і його об'єктів, а також здійснювати управління цими об'єктами.

Самоорганізована мережа зв'язку – мережа, в якій число вузлів є випадковою величиною в часі і може змінюватися від 0 до деякого максимального значення. Взаємозв'язки між вузлами в такій мережі також випадкові у часі і утворюються для передачі інформації між подібними вузлами і в зовнішню мережу зв'язку [9].

Базова станція є накопичувачем даних. Це спеціалізований тип компонента мережі, які отримує дані від сенсорів і займається агрегуванням. Від її розташування, в більшій мірі, залежать основні параметри сенсорної мережі, такі як витрата енергії мережі, час її життя, кількість непрацездатних вузлів.

При передачі даних базової станції, може бути задіяна різна кількість вузлів. Визначенням маршруту передачі даних займається протокол, на основі якого працює сенсорна мережа.

1.1.4 Загальні принципи функціонування бездротових сенсорних мереж

Загальний принцип роботи бездротових сенсорних мереж нагадує алгоритм роботи локальної мережі.

Сток або базова станція відправляє всій мережі широкомовний пакет. Далі кожен вузол додає адресу, від якої отримано цей пакет, до своєї таблиці маршрутизації. Також до таблиці вносяться поля ID, рівень заряду батареї, а також кількість проміжних вузлів [10].

Серед усієї інформації, якою обмінюються вузли, найважливішим параметром є рівень заряду батареї, тому що від нього залежить енергетичний баланс всієї мережі. Усі вузли передають дані про заряд батареї сусіднім вузлам. Таким чином, кожен вузол володіє інформацією про витрату енергії вузлів, що знаходяться поряд.

Базова станція здійснює регулярне оновлення даних в таблицях вузлів за допомогою повторної передачі інформації, у випадку появи нових елементів мережі або видалення діючих.

В сучасних БСМ вузли застосовуються тільки при вимірюванні параметрів навколишнього середовища та для подальшої відправки їх до центрального обчислювального пристрою, що здійснює їх обробку.

На сьогоднішній день існує безліч інтелектуальних систем на базі БСМ, наприклад, системи технологічного обліку електроенергії, системи управління центральним тепловим пунктом, системи технологічного моніторингу водопостачання, системи охорони праці на виробничих підприємствах та велика кількість інших систем, що можуть здійснювати моніторинг та управління на промислових та житлово-комунальних об'єктах.

Промислові бездротові сенсорні мережі створюються на основі вузлів передачі даних, що підключаються до сенсорів, які проводять вимірювання різноманітних види показників. Дані показники надходять до вузлів передачі даних від сенсорів і відправляються до центрального обчислювального пристрою для подальшого аналізу. Отже, вузли виконують роль проміжної ланки між інформацією, що характеризує параметри навколишнього середовища і центральною системою, яка в свою чергу має змогу регулювати цей стан, наприклад, знизити температуру даного середовища.

Основні процеси, що проходять під час роботи БСМ (рис. 1.5.)

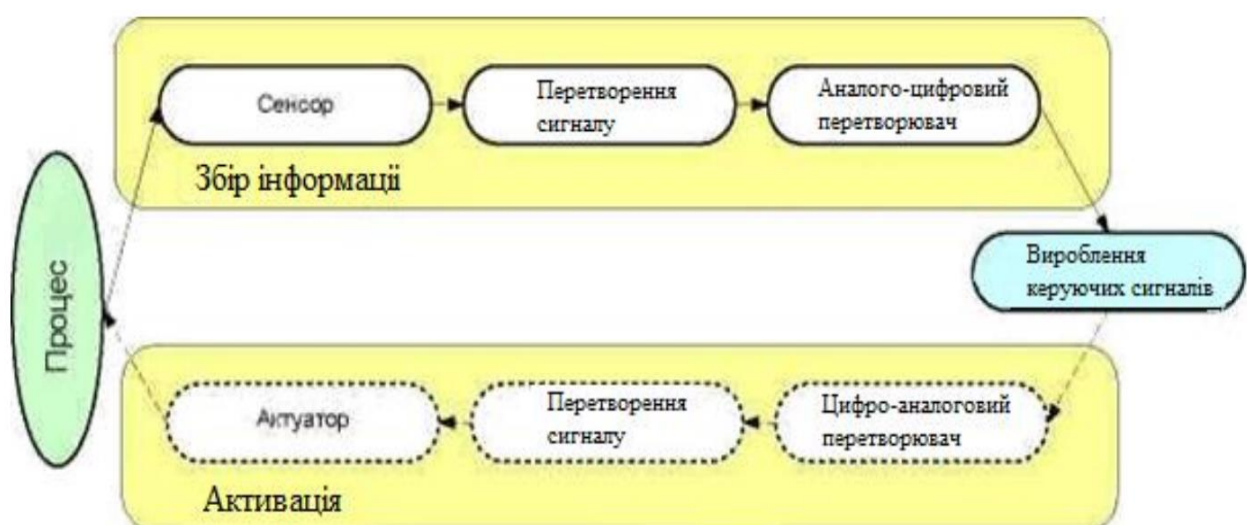


Рисунок 1.5 – Збір інформації та управління в БСМ

До стандартного набору елементів мережі належать:

- координатор;
- сервер;
- вузол передачі даних.

Радіус дії БСМ може складати від декількох метрів до декількох кілометрів. Така велика відстань на якій мережа може повноцінно функціонувати досягається завдяки ретрансляції сигналу між сусідніми елементами мережі. Сенсорна мережа може здійснювати ретрансляцію сигналу по черзі від одного вузла до іншого. Ця функція дає змогу в разі виходу з ладу одного з елементів мережі проводити передачу даних через сусідні вузли без втрати якості.

Найоптимальніший маршрут передачі даних обирається, власне, самою мережею (рис. 1.6).

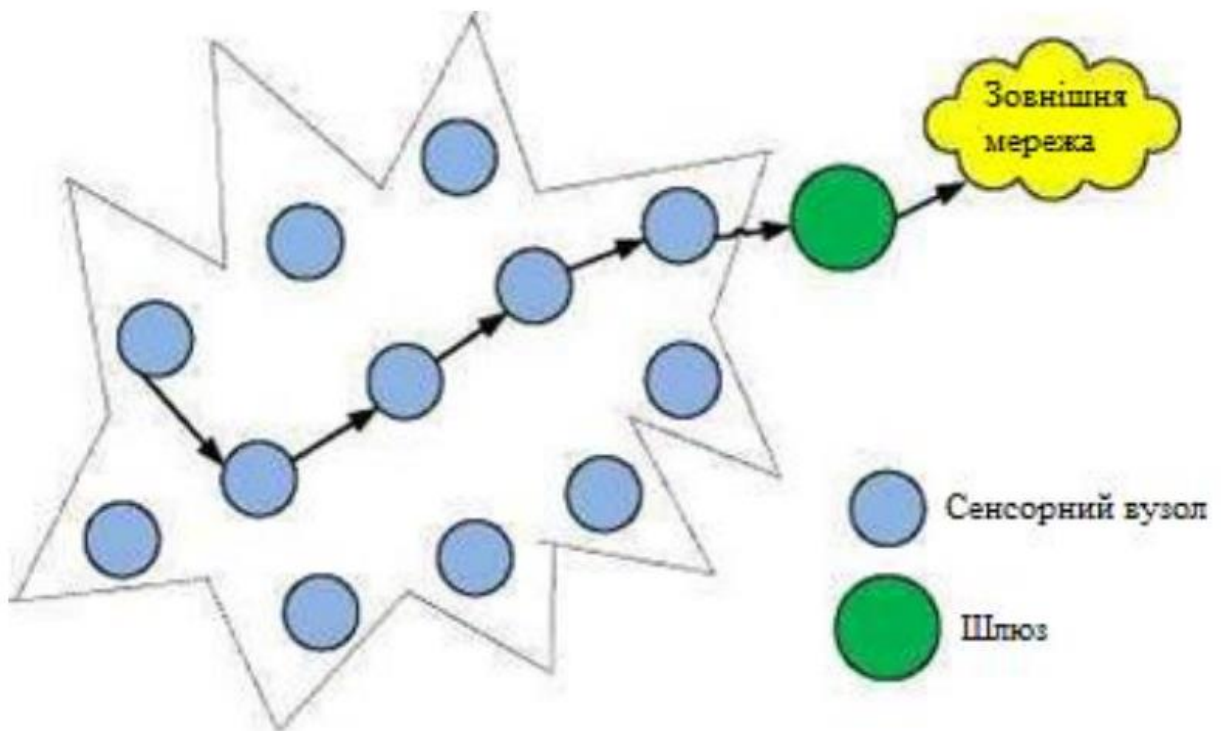


Рисунок 1.6 – Маршрутизація даних в БСМ

1.2 Види топологій бездротових сенсорних мереж та їх структурні елементи

1.2.1 Вузли в бездротових сенсорних мережах

Вузол передачі даних представляють собою мікроконтролер, що має в своєму складі вбудований приймач, батарею живлення, процесор та вбудовану пам'ять. Основною задачею вузла є послідовна передача інформації сусіднім вузлам, при цьому на кожен наступний етап передачі на шляху до базової станції має витратитися менше енергії.

Вузол повинен мати габаритні розміри в декілька сантиметрів квадратних. На системній платі мікроконтролера розташований процесор, пам'ять, ЦАП та АЦП, радіочастотний приймач, акумулятор, різноманітні сенсори та актуатори. Отже, апаратна частина вузла БСМ складається з чотирьох підсистем (рис. 1.7):

- комунікаційної, яка забезпечує бездротовий зв'язок з сусідніми вузлами за допомогою радіоприймача;
- обчислювальної, яка здійснює обробку даних і забезпечує функціональність вузла та містить в своєму складі мікроконтролер (MCU), який в свою чергу складається з процесора, оперативної пам'яті (SRAM), незалежної пам'яті (EEPROM) і флеш-пам'яті, АЦП, таймера, портів вводу/виводу;
- сенсорної, що складається з аналогових та цифрових датчиків і відповідає за зв'язок між сенсорним вузлом та навколишнім середовищем;
- енергетичної підсистеми, яка має в своєму складі пристрій генерування і акумулювання енергії, а також регулювання напруги та здійснює живлення складових частин вузла.

У більшості випадків у сенсорних вузлах використовуються наступні типи датчиків:

- датчики тиску;
- датчики вологості;
- датчики освітленості;
- датчики вібрації;

— датчики положення.

В свою чергу, магнітоелектричні, хімічні та інші типи датчиків застосовуються значно рідше.

Тип датчика, що буде використовуватися у вузлі завжди залежить від функціональних завдань, поставлених конкретній БСМ.

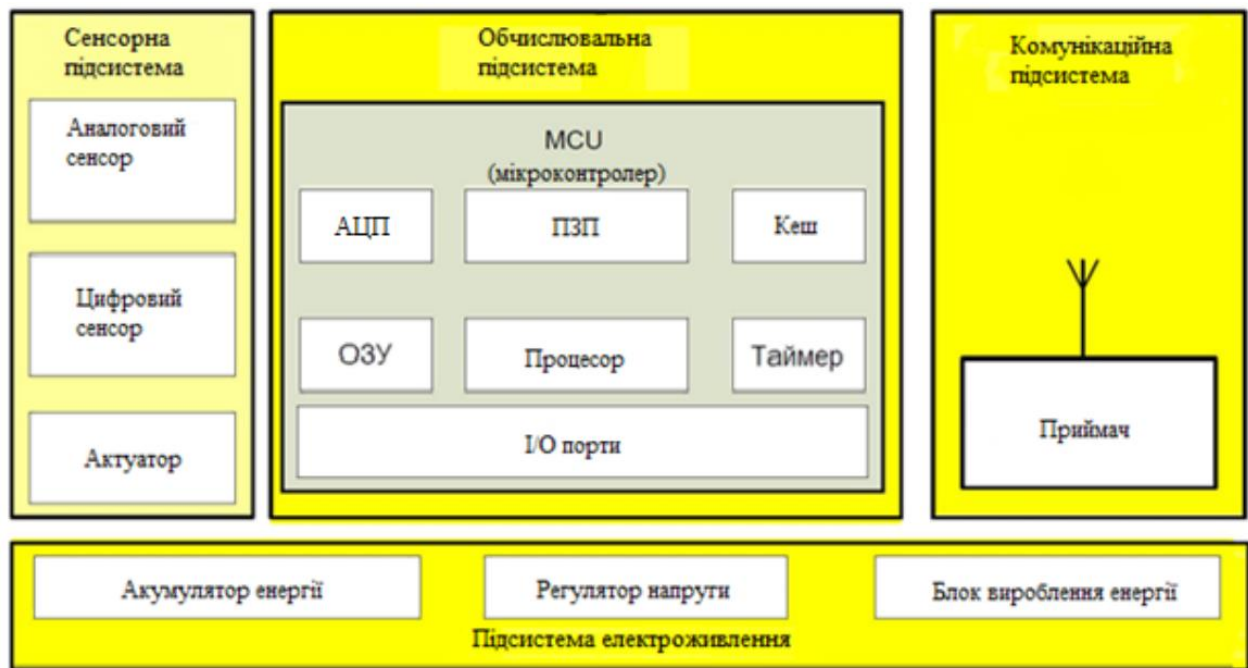


Рисунок 1.7 – Структура вузла БСМ

Як правило, датчики надають непідготовані для обробки дані у вигляді електричних сигналів, які обов'язково повинні пройти стадію перетворення. Наприклад, сигнал зазвичай потребує підсилення амплітуди або усунення шумів в конкретних діапазонах частот за допомогою фільтрів. АЦП трансформує цей сигнал в цифровий вигляд.

Результуючий цифровий сигнал готовий для подальшої обробки в процесорі і зберігання в пам'яті мікроконтролера. При наявності виконавчих механізмів можна здійснювати вплив на навколишнє середовище за допомогою актуаторів мережевих вузлів.

Живлення вузла відбувається переважно від батареї або акумулятора.

Також існує багато жорстких вимог до вузлів БСМ, а саме:

- висока енергоефективність;
- якісний взаємозв'язок між великою кількістю вузлів мережі;
- невисока собівартість виробництва;
- автономність та надійність;
- адаптивність.

Зовнішній вигляд вузлів БСМ зображено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд вузлів БСМ

Для того, щоб вузли мали можливість якісно виконувати свої функції, необхідно встановити на них операційну систему (ОС). Найпопулярнішою ОС для сенсорних вузлів є система з відкритим кодом TinyOS – це операційна система реального часу, налаштована на функціонування в умовах, де обчислювальні можливості досить обмежені. Вона дає змогу сенсорам в автоматичному режимі встановлювати контакт з іншими найближчими сенсорами для формування БСМ конкретної топології.

Найголовнішою задачею сенсорів є автоматична організація схеми мережі і шляхів передачі інформації. Тобто БСМ, фактично, мають здатність до самостійного налаштування. Зазвичай сенсорному вузлу необхідно автоматично встановлювати власне місцезнаходження, принаймні, по відношенню до того вузла, якому він повинен надсилати інформацію. Відповідно, первинною задачею БСМ є ідентифікація всіх сенсорів, після чого відбудеться складення схеми маршрутизації.

Сенсорні вузли можуть бути стаціонарними та бути відносно мобільними, а саме мати здатність до переміщення відносно один одного в заданому просторі та не змінювати при цьому зв'язки всередині мережі. У цьому випадку у БСМ буде відсутня фіксована топологія і з часом її структура перебудовуватиметься.

Загальна архітектура БСМ має наступні вузлів (рис. 1.9):

- координатор;
- маршрутизатор;
- кінцевий вузол.

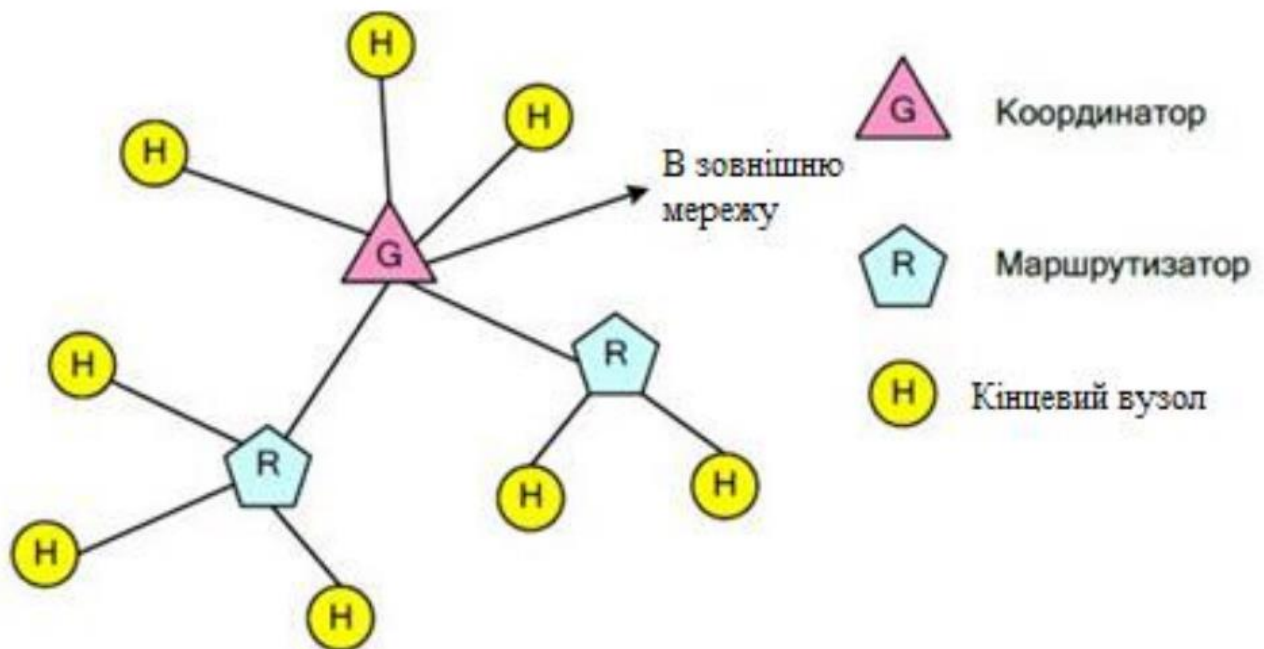


Рисунок 1.9 – Типи вузлів БСМ

Координатор – елемент, що виконує глобальну координацію, організовує та налаштовує параметри БСМ. Саме тому координатор є найскладнішим елементом мережі та потребує великого обсягу пам'яті і джерела живлення з високою потужністю. Для однієї БСМ необхідний лише один координатор. З його допомогою відбувається зв'язок із зовнішньою мережею, тобто він грає роль шлюзу. Зазвичай координатор називають базовою станцією (БС).

Він повинен реалізувати наступні функції:

- виявлення вільних каналів з загальної їх кількості, що можуть бути задіяні для налаштування мережі;
- відправлення мережевих сигналів з даними про мережу;
- керування мережевими пристроями;
- налаштування параметрів мережі, тобто визначення допустимої глибини вкладених підмереж, кількості маршрутизаторів та кількості підлеглих пристроїв;
- забезпечення зв'язку між підлеглими пристроями;
- основну частину робочого часу повинен функціонувати в режимі приймача;
- складання таблиць маршрутизації;
- здійснення допуску маршрутизаторів і кінцевих пристроїв до мережі.

Маршрутизатор – елемент, що здійснює прийом, буферизацію, обирає напрямок передачі даних та виконує відправку інформації від інших вузлів мережі.

Він має наступні функції:

- знаходження діючих каналів, під'єднання до мережі і надання можливості кінцевим пристроям входити в мережу за допомогою додаткових списків діючих каналів, що задані ПЗ;
- ретрансляція сигнальних пакетів, що містять в собі параметри мережі які задані координатором;
- адміністрування адрес під'єднаних до маршрутизатора підлеглих пристроїв;
- взаємодія з пристроями, що містять таблицю маршрутизації і мають функцію деревовидної маршрутизації, пристроями лише з функцією деревовидної маршрутизації та підтримка функції аварійної деревовидної маршрутизації;
- функціонування в двох режимах роботи пристроїв: без переходу в «сплячий» режим і з переходом в «сплячий» режим в періоди, які встановлює координатор мережі;

- надання можливості маршрутизувати мережі з великою кількістю комірок, тобто складання таблиці сусідніх вузлів з параметром якості зв'язку з кожним з них, складання таблиці мережевої маршрутизації, ретрансляції сигналів-запитів і сигналів-підтверджень задання маршрутів між пристроями;

- маршрутизація за деревовидним принципом, тобто трансляція сигналу в усіх напрямках ієрархічної структури дерева гілки в залежності від адреси одержувача сигналу.

Кінцевий пристрій або сенсорний вузол – збирає дані та керує віддаленим об'єктом, не виконуючи при цьому ретрансляцію цих даних.

Кінцевий пристрій повинен мати наступні особливості:

- постійний пошук та регулярні спроби під'єднання до мережі за допомогою додаткових переліків діючих каналів, що визначені додатком, і сигнальних пакетів синхронізації існуючої мережі для налаштування параметрів мережі та маршрутизатора аби увійти в мережу;

- автономне живлення;

- визначення появи даних від координатора за допомогою пакетів синхронізації;

- запит інформації від координатора;

- перебування в режимі сну до 99,99% від загального робочого часу.

Залежно від переліку наявних функцій вузли БСМ поділяються на два види:

а) пристрої з повним набором функцій FFD (Fully Function Device);

- 1) підтримка стандарту IEEE 802.15.4;

- 2) функції координатора мережі виконуються за рахунок більшого обсягу пам'яті та додаткового живлення;

- 3) взаємодія в будь-яких типах топології;

- 4) можливість зв'язку з усіма іншими пристроями мережі;

б) пристрій з обмеженим набором функцій RFD (Reduced Function Device);

- 1) підтримка неповного набору функцій стандарту IEEE 802.15.4;

- 2) підтримка топології «точка-точка», «зірка»;

- 3) не здійснює ролі координатора;
- 4) здійснює запити до координатора мережі і маршрутизатора.

1.2.2 Різновиди топології бездротових сенсорних мереж

Під топологією (компонуванням, конфігурацією) бездротової сенсорної мережі звичайно розуміється фізичне розташування елементів мережі (датчиків) один щодо іншого та спосіб їх з'єднання лініями зв'язку.

Сенсорні мережі будуються з використанням двох типів фізичних пристроїв (рис. 1.10): повнофункціонального пристрою FFD та пристрою з обмеженим набором функцій RFD [11].

Повнофункціональні мережні пристрої функціонують у трьох режимах (в залежності від початкової конфігурації): координатор, маршрутизатор і кінцевий вузол, а пристрої RFD – тільки в режимі кінцевого вузла [12].

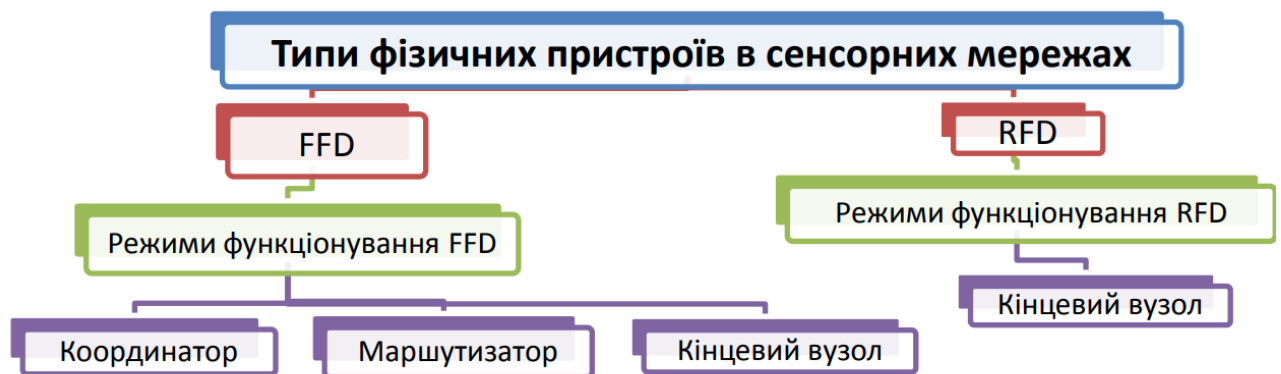


Рисунок 1.10 – Типи та режими функціонування фізичних пристроїв

Пристрій FFD може зв'язуватися як з кількома FFD, так і кількома RFD, в той час як у пристрої RFD відсутня функція встановлення зв'язку з іншими RFD (рис. 1.11). Пристрої FFD відрізняються більшим об'ємом обчислювальних ресурсів і більшим об'ємом пам'яті, тому що він реалізує оцінку якості каналу зв'язку до іншого пристрою та визначає шлях передачі інформації мережею.

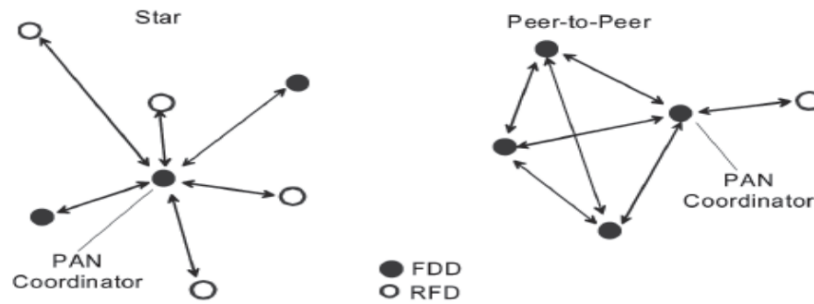


Рисунок 1.11 – Встановлення зв'язку між пристроями в БСМ

Розділення фізичних пристроїв за функціональними властивостями (координатори, маршрутизатори та кінцеві вузли) дозволяє будувати БСМ декількох топологій (рис. 1.12), які за методом організації поділяються на [13]:

- децентралізовані (рис. 1.12, а);
- централізовані та ієрархічні (рис. 1.12, б);
- гібридні.

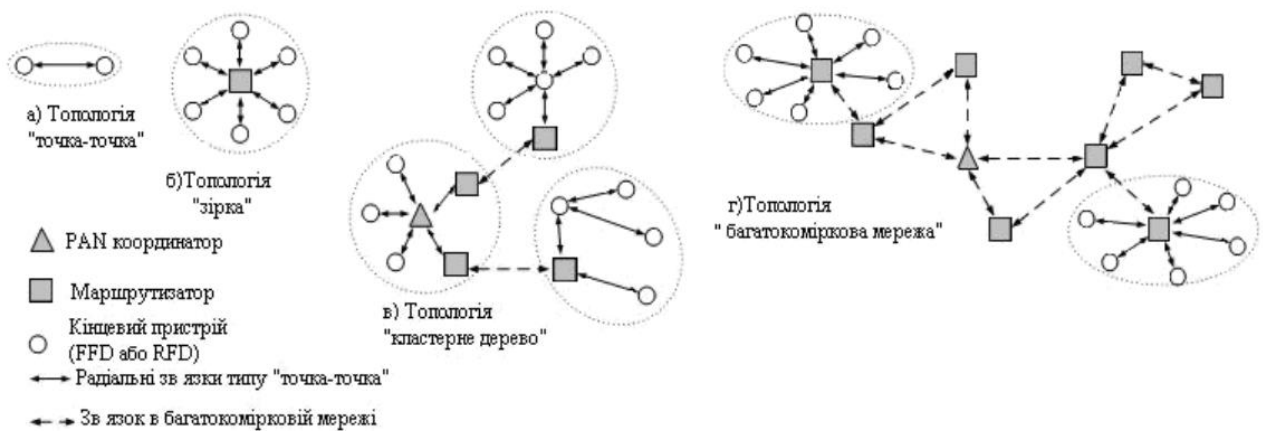


Рисунок 1.12 – Топології сенсорних мереж: а) «точка-точка»; б) «зірка»; в) «кластерне дерево»; г) «багатокоміркова мережа»

Децентралізована структура передбачає наявність у системі рівноправних мережевих вузлів. В даній системі кожен пристрій зв'язується з сусідніми вузлами для адресування інформації з використанням багаторазової ретрансляції (топологія системи типу «точка-точка», рис. 1.12, а). Така структура передбачає,

що один або кілька сенсорів мають доступ до зовнішнього шлюзу, підключеного до інших систем (дротових, бездротових, мобільних та ін.).

Особливістю централізованої структури є наявність у ній лише одного маршрутизатора, що виконує функції центральної станції – концентратора, який в свою чергу маршрутизує агреговану інформацію до наступного вузла. Топологія побудови таких систем відповідає типу «зірка» (рис. 1.12, б).

Багатокоміркова мережа – базова повнозв'язна топологія комп'ютерних мереж і мереж зв'язку, в якій кожна робоча станція мережі з'єднується з усіма іншими робочими станціями цієї ж мережі (рис. 1.12, г). Дана мережа є стійкою до відмов, але при цьому доволі складна в налаштуванні. Завдяки наявності у кожного вузла декількох маршрутів з'єднання з іншими вузлами ця топологія має високу стійкість. Бо у разі втрати зв'язку через один з каналів не буде втрачено зв'язок між двома комп'ютерами. Ця топологія припускає з'єднання великої кількості вузлів і характерна, як правило, для великих мереж, вона будується з повнозв'язкової шляхом видалення деяких можливих зв'язків.

Топологія «кластерне дерево» (рис. 1.12, в) представляє собою різноманітні комбінації вищезгаданих топологій БСМ. Основа дерева обчислювальної мережі розташовується у точці (корінь), у якій збираються комунікаційні лінії інформації (гілки дерева).

Бездротові сенсорні мережі з такою структурою використовуються там, де неможливо безпосередньо застосувати класичні мережеві структури у звичайному вигляді.

Ієрархічна структура системи належить до централізованої. Вона передбачає розбиття системи на кластери і має декілька рівнів ієрархії, на верхньому рівні якої знаходиться головний вузол – координатор (рис. 1.13).

Кластер представляє собою групу вузлів, які формують систему по топології типу «зірка». В ієрархічній кластеризованій системі датчики (рис. 1.12, в) надсилають інформацію до координатора, який зберігає її в концентраторі пам'яті. У концентраторі пам'яті тимчасово зберігаються дані вимірювань, інформація про позиціонування й профілі кожного сенсора в системі, а також

здійснюється первинна обробка даних. Отримані дані координатор надсилає через зовнішній шлюз до центру обробки даних [14].

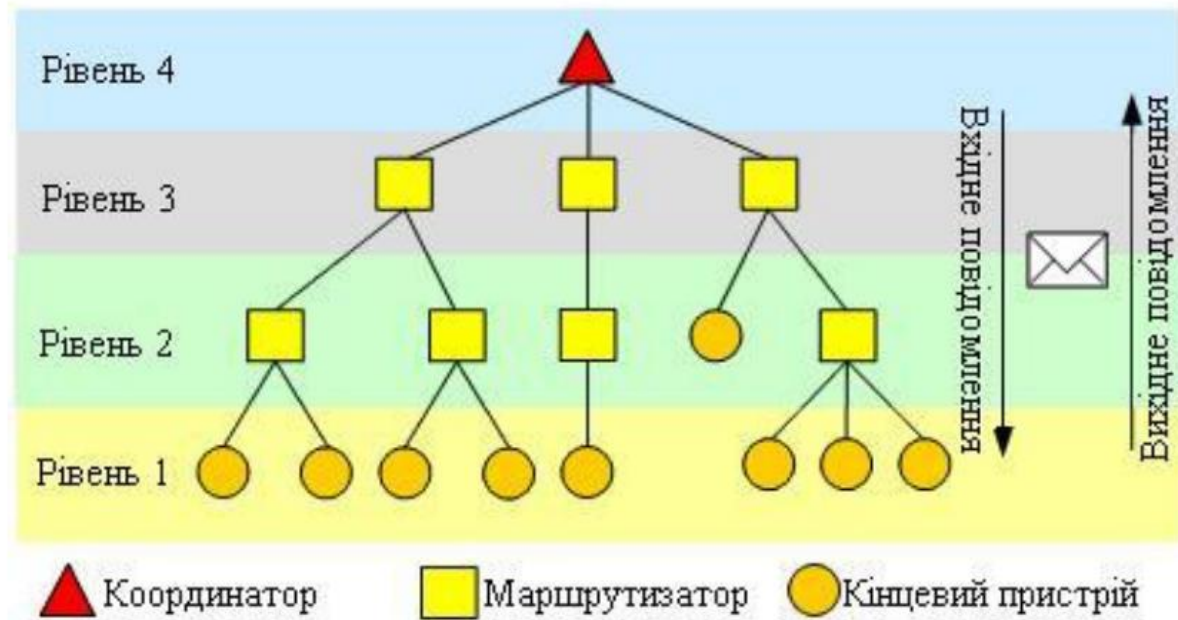


Рисунок 1.13 – Структура чотирьохрівневої БСМ

Ієрархічна архітектура БСМ характеризується централізованою обробкою інформації та програмованими джерелами, що підвищують надійність передачі інформації, вибірковість в топології і масштабованість системи. На рисунку 1.13 наведено приклад БСМ чотирьохрівневої ієрархії [15].

Нижній рівень даної архітектури має в своєму складі неповнофункціональні кінцеві вузли, що збирають достовірні дані та надсилають їх без втрат на наступний рівень.

Другий рівень виконує функцію агрегації висхідних потоків, відповідає за надійність передачі даних на третій рівень і маршрутизує їх. Аби підвищити вибірковість та надійність системи в критичні моменти, допустимим є використання на даному рівні FFD-пристроїв як кінцевих вузлів, що грають роль резервних маршрутизаторів. Маршрутизатори другого рівня дістають необхідні дані про підключені кінцеві вузли: ідентифікатори та координати їх системи.

До складу третього рівня входять координатор і базові станції, які забезпечують самоорганізацію БСМ, передачу інформації від кінцевих вузлів до центру обробки даних (ЦОД) у зовнішню мережу, а також реалізують необхідну якість передачі цих даних. Об'єднання потоків даних з різних джерел в один, що проходить на другому рівні і вище, під час критичних випадків може спричинити перенавантаження або відмову системи через різке підвищення інтенсивності і об'ємів інформації. Тому на рівнях агрегації декількох потоків, крім визначених методів доступу, що зменшують інтенсивність даних, також незамінними виступають механізми обмеження трафіка і запобігання перенавантаження системи. Якщо відсутня функціональна необхідність, то кожен рівень можна опустити.

Гібридна система об'єднує в собі принцип децентралізованої та ієрархічної архітектури, в якому на двох нижніх рівнях допустима побудова децентралізованої структури кластерів. Гібридна архітектура володіє рядом переваг щодо масштабованості системи:

- дешевизна;
- великий радіус дії;
- якісніші функціональні можливості;
- набагато вища надійність.

Пристрої FFD потребують більшої потужності і значних додаткових ресурсів [12, 13].

З практичної точки зору серед гібридних систем найбільший інтерес представляють топології типу «кластерне дерево» (рис. 1.12, в) або «багатокоміркова мережа» (рис. 1.12, г). Топологія «кластерне дерево» представляє собою множину об'єднаних мереж типу «зірка», на вершинах яких розміщені вузли-маршрутизатори, і один координатор кластеру. БСМ даного типу характеризуються низькою стійкістю до відмов та змін в топології, адже маршрутизатори відповідають за вибірковість шляхів і самоорганізацію мережі. За допомогою взаємодії між децентралізованими, ієрархічними та гібридними сенсорними мережами можна досягти значного збільшення дальності дії мереж.

Отже, при виборі структури БСМ треба враховувати дальність зв'язку, кількість датчиків на конкретній території, якість обслуговування, кількість потоків переданої інформації та її об'єм. Таким чином, наприклад, аби підтримувати в одній кімнаті заданий температурний режим, достатньо застосувати систему з топологією типу «точка-точка» з одним або двома пристроями FFD.

Або якщо, наприклад, необхідно забезпечити медичне відділення системою збору даних, то для вирішення цієї задачі оптимальним варіантом стане застосування багатокоміркової структури БСМ. Після цього стане можливим створення в кожному приміщенні декількох мереж типу «зірка» для проведення вимірів параметрів стану здоров'я окремих пацієнтів і передачі єдиного потоку інформації до центру її зберігання.

1.3 Технології передачі даних в бездротових сенсорних мережах

1.3.1 Технологія бездротової передачі даних Bluetooth

Bluetooth – це сучасна технологія бездротової передачі даних, що дозволяє з'єднувати один з одним практично будь-які пристрої. Можна з'єднати все, що з'єднується, тобто має вбудований мікрочип Bluetooth. Технологія стандартизована, отже, проблеми несумісності пристроїв від конкуруючих фірм не повинно бути.

Bluetooth – це маленький чіп, що є високочастотним (від 2,4 ГГц до 2,48 ГГц) приймачем.

Енергоспоживання (потужність передавача) не повинно перевищувати 10 мВт. Спочатку технологія передбачала можливість зв'язку з відривом трохи більше 10 метрів. Сьогодні деякі фірми пропонують мікросхеми Bluetooth, здатні підтримувати зв'язок з відривом до 100 метрів. Як радіотехнологія, Bluetooth здатний "обходити" перешкоди, тому пристрої, що з'єднуються, можуть знаходитися поза зоною прямої видимості. З'єднання відбувається автоматично, як тільки Bluetooth-пристрої з'являються в межах досяжності, причому не тільки

за принципом «точка-точка» (два пристрої), а й за принципом «точка-багато точок» (один пристрій працює з кількома іншими).

Технологія Bluetooth передбачає два види зв'язку: синхронний – SCO (Synchronous Connection Oriented) і асинхронний – ACL (Asynchronous Connectionless).

Перший вид, SCO, розрахований на встановлення симетричного з'єднання «точка-точка» і служить переважно передачі голосових повідомлень. Швидкість передачі SCO дорівнює 64 Кбіт/с.

Другий ACL, призначений для пакетної передачі даних. Він підтримує симетричні та асиметричні з'єднання типу «точка-багато точок». Швидкість передачі пакетної інформації при ACL становить близько 721 Кбіт/с. Пакети мають фіксований формат. На початку блоку знаходиться 72-бітний код доступу. Він може використовуватися, зокрема, для синхронізації пристроїв. За ним слідує 54-біт заголовок пакета, що містить контрольну суму пакета та інформацію про його параметри (наприклад, про повторну передачу блоку даних). Замикає пакет область, що безпосередньо містить інформацію, що пересилається. Розмір цієї області варіюється від 0 біт до 2745 біт.

Основним принципом побудови систем Bluetooth є використання методу розширення спектру при стрибкоподібній зміні частоти (FHSS – Frequency Hop Spread Spectrum). Весь виділений для Bluetooth радіозв'язку частотний діапазон від 2,402 ГГц до 2,480 ГГц розбитий на N частотних каналів. Смуга кожного каналу 1 МГц, рознесення каналів – від 140 кГц до 175 кГц. Для кодування пакетної інформації використовують частотну маніпуляцію.

Для США та Європи $N = 79$. Виняток становлять Іспанія та Франція, де для Bluetooth застосовується 23 частотні канали. Зміна каналів проводиться за псевдовипадковим законом 1600 разів на секунду. Постійне чергування частот дозволяє радіоінтерфейсу Bluetooth транслювати інформацію по всьому діапазону ISM та уникнути впливу перешкод з боку пристроїв, що працюють у цьому діапазоні. Якщо цей канал зашумлений, то система перейде на інший, і так відбуватиметься доти, доки не виявиться канал, вільний від перешкод.

Коли пара будь-яких Bluetooth-пристроїв з'єднується, вони утворюють пікомережу (рис. 1.14).

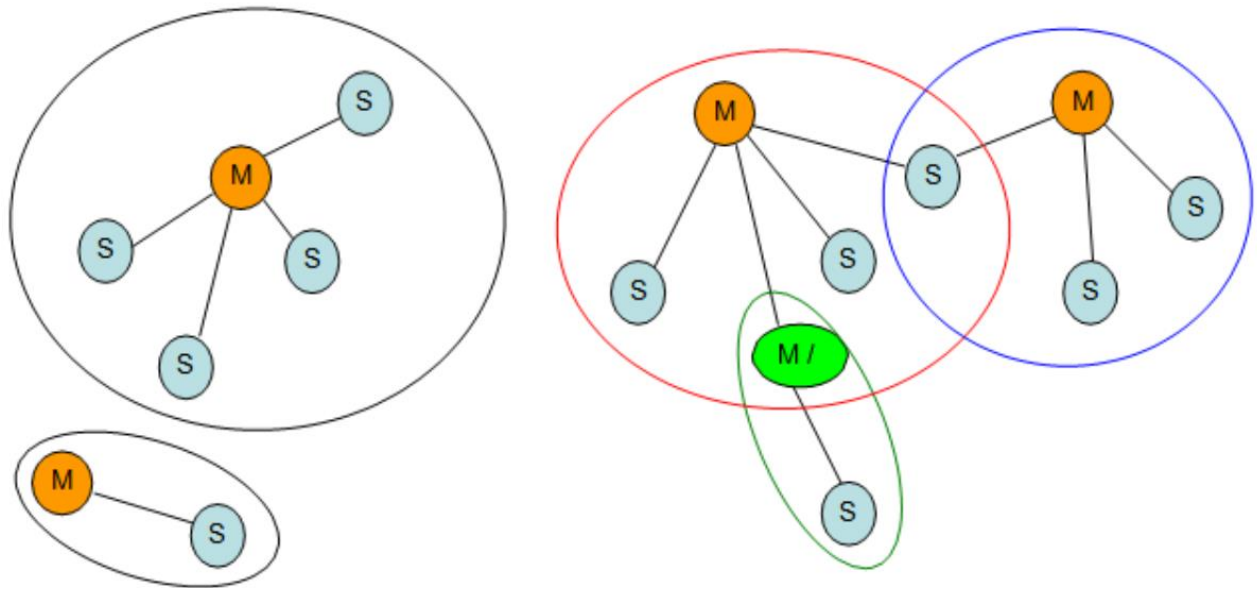


Рисунок 1.14 – Пікомережі в Bluetooth

Один, виконує функції провідного пристрою, формує сигнали синхронізації частоти та її зміни. Зазвичай провідним є той модуль, який розміщений у найбільш потужному пристрої, такому як персональний комп'ютер. Всі інші пристрої є відомими.

Пікомережа є фундаментальною формою комунікації у технології Bluetooth. Пікомережа може містити до 7 активних введених пристроїв. Крім того, в околиці (зоні впевненого прийому) провідного пристрою можуть знаходитися неактивні введені пристрої, які також синхронізовані на загальний годинник і загальну послідовність зміни частот, але не можуть обмінюватися даними доти, доки провідний пристрій не активує їх. Якщо в мережі виявляється більше 8 пристроїв, то буде сформована друга пікомережа і так далі. Декілька (до 10) незалежних і навіть не синхронізованих між собою пікомереж, між якими можливий обмін інформацією, можуть об'єднуватися в так звану велику мережу Scatternet. Для цього кожна пара пікомереж повинна мати як мінімум один загальний пристрій, який буде головним в одній і підпорядковується в іншій.

Таким чином, в межах окремої Scatternet може бути одночасно пов'язано максимум 71 пристрій.

1.3.2 Технологія Wi-Fi

Wi-Fi (Wireless Fidelity – "бездротова точність") – торгова марка Wi-Fi Alliance для бездротових мереж на базі стандарту IEEE 802.11.

Зазвичай схема Wi-Fi-мережі містить не менше однієї точки доступу (так званий режим infrastructure і не менше одного клієнта. Також можливе підключення двох клієнтів у режимі «точка-точка», коли точка доступу не використовується, а клієнти з'єднуються за допомогою мережних адаптерів «напрямую». Точка доступу передає свій ідентифікатор мережі (SSID) за допомогою спеціальних сигнальних пакетів на швидкості 0,1 Мбіт/с кожні 100 мс, тому 0,1 Мбіт/с – найменша швидкість передачі даних для Wi-Fi.

Знаючи SSID мережі, клієнт може з'ясувати, чи можливе підключення до цієї точки доступу. При попаданні в зону дії двох точок доступу з ідентичними SSID приймач може вибирати між ними на підставі даних про рівень сигналу. Стандарт Wi-Fi дає клієнту повну свободу під час вибору критеріїв для з'єднання.

Деякі з різновидів Wi-Fi-стандартів, які набули широкого поширення:

- стандарт IEEE 802.11a – працює у стандартизованому частотному діапазоні 5 ГГц і має швидкість передачі даних у зоні прямої видимості до 54 Мбіт/с;

- стандарт IEEE 802.11b/g – працюють на частоті діапазону 2,4 ГГц та забезпечують максимальну швидкість передачі даних у зоні прямої видимості до 11 Мбіт/с та відповідно 54 Мбіт/с;

- стандарт IEEE 802.11 Super g, будучи логічним продовженням стандарту IEEE 802.11g, здатний забезпечити максимальну швидкість передачі даних до 108 Мбіт/с;

- стандарт IEEE 802.11n – має можливість працювати з частотними діапазонами від 2,4 до 2,5 ГГц або 5,0 ГГц і забезпечує швидкість передачі даних близько 480 Мбіт/с.

Одним із найбільш поширених типів Wi-Fi-мереж є побудова мережі за типом Ad-hoc. З'єднання типу «точка-точка» двох або більше пристроїв в мережу за допомогою вбудованого або додаткового Wi-Fi-адаптера.

Переваги Wi-Fi:

- широке розповсюдження в світі;
- гарантована сумісність;
- висока швидкість передачі даних;
- висока надійність.

Недоліки Wi-Fi:

- обмежений радіус дії;
- накладання сигналів закритої точки доступу яка використовує шифрування та відкритої точки доступу, що працюють на одному або сусідніх каналах, може перешкодити доступу до відкритої точки доступу;
- неповна сумісність між пристроями різних виробників або неповна відповідність стандарту може призвести до обмеження можливостей з'єднання або зменшення швидкості;
- зменшення продуктивності мережі під час дощу;
- перевантаження обладнання під час передачі невеликих пакетів даних через приєднання великої кількості службової інформації;
- мала придатність для роботи з додатками, що використовують медіапотоки в реальному часі;
- частотний діапазон та експлуатаційні обмеження у різних країнах;
- високе в порівнянні з іншими стандартами споживання енергії, що зменшує час життя батареї та підвищує температуру пристрою;
- низький рівень захищеності від кібератак [16].

1.3.3 Технологія ZigBee та стандарт IEEE 802.15.4

У 2001 році Інститут інженерів електротехніки та електроніки IEEE розробив новий стандарт 802.15.4 сімейства бездротових персональних мереж WPAN (Wireless Personal Area Network). У 2002 році було створено альянс

ZigBee. Альянс ZigBee – це консорціум постачальників напівпровідникових компонентів, виробників готових рішень (загалом понад 90 компаній), який здійснює розробку глобальної специфікації програмного стеку протоколів ZigBee.

ZigBee – специфікація мережевих протоколів верхнього рівня (рівня додатків API та мережевого рівня NWK), які використовують сервіси нижніх рівнів:

- управління доступом до середовища MAC;
- фізичного рівня PHY.

Два нижні рівні рівня регламентовані стандартом IEEE 802.15.4–2003 для низькошвидкісних персональних радіомереж (рис. 1.15).

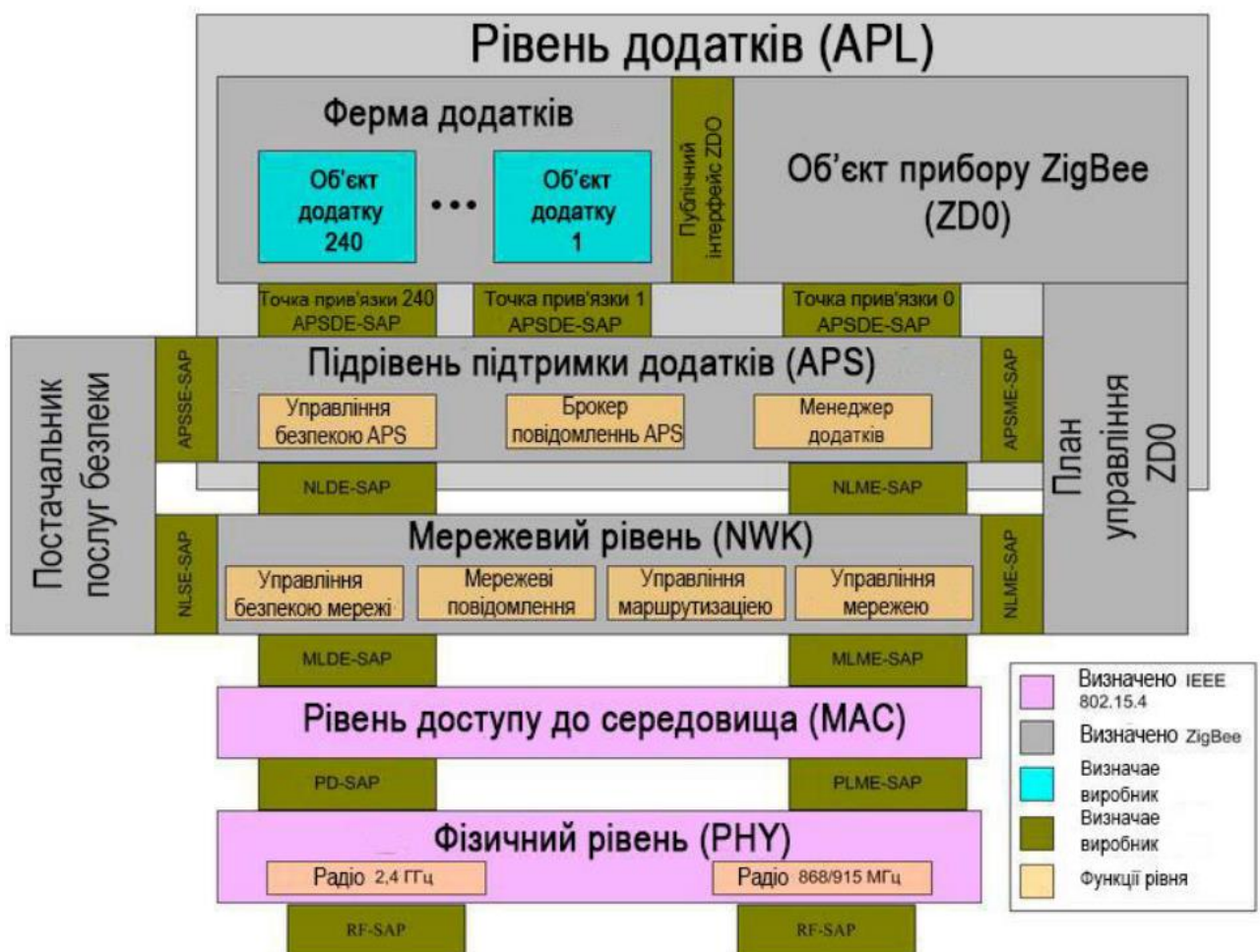


Рисунок 1.15 – Структура стеку ZigBee

Специфікація ZigBee призначена для програм, що вимагають гарантованої безпечної передачі даних при відносно невеликих швидкостях та можливості тривалої роботи мережевих пристроїв від автономних джерел живлення (батарей).

Бездотовий стандарт IEEE 802.15.4 спрямований на побудову мереж для керування та моніторингу автономних пристроїв. Документ IEEE 802.15.4 дає опис частот, апаратних особливостей та інших параметрів мережі, в той час як документ ZigBee включає опис процесу мережевого управління, параметри безпеки, а також важливі складові сумісності і профілів пристроїв.

Стандарт IEEE 802.15.4 використовує під обмін даними 27 каналів у трьох діапазонах частот (868 двійкову фазову маніпуляцію (BPSK) на частотах 868 МГц та 915 МГц і квадратичну фазову маніпуляцію зі зміщенням (O-QPSK) на частоті 2,4 ГГц). У зв'язку з цим, цей стандарт може отримати ліцензію на території більшості країн (загальновідомо, що діапазони, доступні для цивільного використання, поділяються відповідно до поглядів урядів на це питання), а також реалізувати оптимальну передачу сигналу в будь-яких умовах.

Співвідношення сигнал/шум дозволяють сигналам стандарту IEEE 802.15.4 успішно співіснувати з джерелами випромінювання на тій же частоті, наприклад, пристроями, з'єднаними за допомогою Wi-Fi. Так, у стандарті також реалізовані канали, що не взаємодіють з Wi-Fi, що дозволяє функціонувати мережі навіть поряд з інтенсивними джерелами випромінювання.

IEEE 802.15.4 реалізує двосторонню напівдуплексну передачу даних, застосовуючи при цьому шифрування AES 128. В одній мережі можуть бути близько 65 тисяч пристроїв, завдяки розширеній адресації в рамках IEEE 802.15.4.

Доступ до каналу IEEE 802.15.4 побудований на базі Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance (CSMA/CA) – множинний доступ з прослуховуванням несучої хвилі та уникненням колізій (але не їх виявленням). При цьому колізії схильні виключно до jam-сигналів, що передують передачу.

Коли пристрій планує почати передачу, він відправляє в мережу jam-сигнал і певний час чекає на подібні сигнали від інших джерел випромінювання. Якщо jam-сигналів інших передавальних пристроїв немає, пристрій здійснює передачу. Якщо помічено «чужий» сигнал, то передавач «засинає» на випадковий відрізок часу, а потім знову намагається почати передачу. У цьому випадку одночасно передача може бути здійснена лише від одного пристрою, що збільшує продуктивність мережі. Проте, необхідність очікування вільного каналу впливає швидкість обміну даними. Тому стандарт IEEE 802.15.4 – не високошвидкісний бездротовий зв'язок, але стандарт має свою власну і дуже значну область застосування. Передача даних проводиться щодо маленькими пакетами, що притаманно мереж управління та моніторингу. Обов'язкове підтвердження отримання даних є характерною рисою стандарту.

Протокол передачі має на увазі «засинання» передавача за відсутності даних для пересилання, за рахунок чого досягається низьке енергоспоживання пристроїв, що взаємодіють за стандартом IEEE 802.15.4. У зв'язку з цим час автономної роботи кінцевих пристроїв може становити кілька років. Важливо, що такі «засинання» не впливають на збереження підключення. Створюючи стандарт, основний акцент був спрямований на швидкість процесів конфігурування та переконфігурування мережі; і розробники в цьому дуже досягли успіху. Наприклад, перехід приймача до активного стану становить близько 15 мс; а додавання нового пристрою до мережі – близько 30 мс. Мережі Wi-Fi та Bluetooth не можуть надати цю швидкодію.

Отже, виходячи з вищесказаного можна виділити наступні переваги та недоліки даної технології.

Переваги:

- здатність до самоорганізації і самовідновлення;
- простота розгортання;
- висока стійкість;
- висока безпека;
- низький рівень енергоспоживання.

Недоліки:

- невисока швидкість;
- більша частина трафіку витрачається під час передачі пакетів з адресними даними та даними по синхронізації;
- невисока проникна здатність в міській забудові.

1.3.4 Технологія NB-IoT

Інноваційною технологією Інтернету речей є рішення вузькосмугового IoT (Narrow-Band IoT або NB-IoT). Це бездротовий вузькосмуговий різновид глобальних мереж з низьким енергоспоживанням (Low Power Wide Area, LPWA), який насамперед призначений для додатків міжмашинної взаємодії (M2M). Стандарт NB-IoT відкриє компаніям, що спеціалізуються на наданні телекомунікаційних послуг, широкий спектр нових можливостей. Зокрема, суттєво збільшить доходність операторів від одного абонента (Average revenue per user, ARPU). Технологія NB-IoT займає свою низькошвидкісну нішу у класі рішень, де пріоритетне значення має безперебійна передача даних та низьке енергоспоживання.

Стандарт NB-IoT був специфікований консорціумом 3GPP у 2016 році в Release 13 (LTE Advanced Pro) і зараз проходить тестування. Фахівці вважають, що технологія NB-IoT набуде популярності серед операторів, тому що її обслуговування та експлуатація обійдеться їм дешевше, ніж передових на сьогоднішній день мереж LTE та GSM. Це зумовлено її характеристиками. Стандарт NB-IoT є двосторонній зв'язок, що діє в частотному каналі шириною 200 кГц. Для того, щоб запустити мережу в експлуатацію, оператору лише необхідно встановити на базовій станції спеціальне програмне забезпечення. Це актуально, якщо розгортати мережу IoT вже на існуючих частотах.

3GPP продумує модель функціонування мережі. Консорціум пропонує три варіанти розгортання мережі NB-IoT.

Перший – це NB-IoT Guard Band, тобто для Narrowband IoT буде виділено окремий частотний спектр.

Другий – це In Band, тобто. технологія буде розміщена у захисному частотному інтервалі мереж LTE.

Третій – отримав назву Stand Alone. Згідно з його концепцією, NB-IoT та LTE працюють в одному частотному діапазоні. Таким чином, мережу NB-IoT можна розгорнути в частотних діапазонах, в яких в даний час функціонує стандарт GSM, після їх реформування в LTE, або в захисних інтервалах між мережами GSM і LTE. Швидкість передачі даних NB-IoT досягає 200 кбіт/с, що є достатнім для пристроїв, що періодично передають однотипні дані невеликого обсягу.

У свою чергу, розробники обіцяють, що термін служби елемента живлення обладнання NB-IoT без підзарядки досягатиме 10 років.

Наступною найважливішою особливістю технології NB-IoT є можливість підключати до однієї базової станції до 100 тисяч пристроїв NB-IoT, що в десятки разів перевищує можливості чинних стандартів мобільного зв'язку. Це дозволяє отримати додаткову комерційну вигоду на основі застосування аналізу IoT-даних методами великих даних (Big Data). У рамках співробітництва із суміжними галузями оператори, на додаток до продажу послуг зв'язку, мають можливість продавати аналітичні дані третім особам.

Такі переваги стандарту NB-IoT дозволяють значно збільшити зону покриття, забезпечивши зв'язок важкодоступних місць та регіонів.

1.3.5 Технологія LoRaWAN

LoRaWAN – мережевий протокол, що характеризується низьким енергоспоживанням, що використовує фізично широкосмугову модуляцію LoRa. Безпосередньо модуляція LoRa забезпечує дальність передачі даних (до 15 км на відкритій місцевості, до 5 км у міській забудові), високу проникаючу здатність у міській забудові (можливе використання у глибоких підвалах без додаткових витрат), забезпечує захист сигналу від перешкод.

Протокол LoRaWAN – це програмний рівень, що визначає процес використання обладнання LoRa під час надсилання або отримання повідомлень.

Він розроблений, щоб дозволити малопотужним пристроям обмінюватися даними з підключеними до Інтернету програмами бездротового зв'язку на великій відстані.

Популярність технології LoRaWAN у промисловості, "розумних містах", сільському господарстві зростає за рахунок того, що це доступний протокол бездротового двостороннього зв'язку, що покриває великий радіус за низького енергоспоживання (деякі пристрої працюють від батареї до 10 років).

Таким чином, LoRaWAN вирішує найбільш гострі проблеми Інтернету речей для бізнесу:

- збирання даних з великої кількості пристроїв на великій території;
- збільшений термін служби кінцевих пристроїв (за рахунок низького енергоспоживання можлива робота до 10 років);
- економія коштів та часу (мережа розгортається швидко, легко масштабується, можливе дистанційне обслуговування).

Кінцевий IoT-пристрій у мережі LoRaWAN (датчик, виконавчий механізм або те й інше) підключається до бездротової мережі LoRaWAN через шлюзи, що працюють за модуляцією LoRa. При цьому передача даних йде відразу на всі доступні в локації базові станції, а не на одну. Відсутність прив'язки до конкретного шлюзу дозволяє гарантувати передачу інформації та, при необхідності, контролювати датчик, що знаходиться в русі. Вся інформація, що передається з кінцевого IoT-пристрою, захищена наскрізним шифруванням за допомогою двох рівнів криптографічного захисту: 128-бітового мережевого ключа та 128-бітного ключа сесії програми.

Кожен шлюз (базова станція) зареєстрований у мережі LoRaWAN і безпосередньо пересилає отримані пакети даних на мережевий сервер (Network Server), використовуючи найбільш підходящий варіант підключення до мережі (3G, 4G, Wi-Fi, Ethernet, оптоволоконном або радіолінійним зв'язком).

Мережевий сервер (Network Server) керує всією мережею. Він отримує дані від шлюзів, видаляє дублікати повідомлень, пересилає отримані дані відповідний сервер додатків (Application server), контролює швидкість передачі.

Сервер програми (Application server) здійснює обробку отриманих даних і направляє їх на підключені кінцеві пристрої. Отримані дані можна інтерпретувати та використовувати для вирішення бізнес-завдань.

Як і будь-яка інша технологія, LoRaWAN має свої переваги та недоліки, що визначають можливість використання для конкретного завдання.

До переваг технології LoRaWAN відносяться:

- висока дальність передачі, порівняно з іншими бездротовими технологіями;
- висока проникаюча здатність у міській забудові;
- швидкість та простота розгортання мережі. Топологія "зірка" дозволяє швидко покривати великий радіус однією базовою станцією (шлюзом), не використовуючи додаткового обладнання;
- тривалий термін служби акумулятора. Залежно від класу пристрою і заданих параметрів виходу в мережу, термін служби елемента живлення може досягати 10 років;
- простота масштабування;
- невисока вартість базових станцій та кінцевих пристроїв, порівняно зі системами низького струму.

Як у будь-якої іншої системи, у LoRaWAN є й недоліки:

- затримка передачі даних від кінцевих пристроїв до програми: від кількох секунд до кількох десятків секунд;
- невисока пропускна здатність: від кількох сотень біт/с за кілька десятків кбіт/с.

Переваги LoRaWAN дозволяють застосовувати технологію в різних сферах: послуги, промисловість, сільське господарство і т.д. [17].

Велика дальність зв'язку, енергоефективність, висока проникаюча здатність дають можливість вирішувати і спрощувати різні завдання:

- зібрати у єдину систему дані з усіх приладів обліку витрати ресурсів;
- моніторити протікання, поломки, задимленість;
- контролювати стан довкілля;

- відстежувати знаходження та переміщення співробітників;
- керувати вуличним освітленням;
- створювати оптимальні умови для тварин та рослин у теплицях, на полях, у силосних ямах;
- організовувати контроль за механізмами та вузлами тощо.

1.4 Аналіз сучасних автоматизованих систем управління ресурсами на базі бездротових сенсорних мереж

1.4.1 Автоматизовані системи та засоби енергоменеджменту від компанії «Smartico»

Компанія «Smartico» – це науково-виробничий комплекс із власним конструкторським бюро, виробничою базою, відділом розробки спеціалізованого програмного забезпечення. Головний офіс знаходиться у м. Дніпро (Україна).

З 2016 року «Smartico» активно розробляє та виробляє апаратні пристрої для IoT. Ці пристрої дозволяють вирішити безліч технологічних завдань як у промисловому, і комунальному секторах. Робота пристроїв здійснюється з використанням найновіших алгоритмів роботи енергоефективних LPWAN радіомереж – LoRaWAN та NB-IoT.

Основні напрямки діяльності:

- розробка та виробництво «розумних лічильників» газу, води, електроенергії, тепла з функцією бездротової передачі даних та можливістю віддаленого блокування подачі енергоносія;
- телеметричні системи енергоменеджменту (АСКОЕ, АСТУЕ) для забезпечення контролю споживання газу, тепла, води, електроенергії з подальшою аналітикою при обробці одержуваних даних, побудови звітів та передачі даних до облікових систем підприємства;
- комплекси контролю надходження, зберігання та видачі палива для технологічного автотранспорту підприємства (обладнання складів ПММ);

- розробка телеметричних радіо-терміналів для задач дистанційного контролю технологічних об'єктів (рухливі та стаціонарні об'єкти, GPS моніторинг);
- контроль технологічних параметрів кар'єрної спецтехніки (системи автомобільного відеоспостереження та адаптивної допомоги водію);
- контроль роботи паливозаправників (обладнання автоматизованими мобільними паливозаправними модулями);
- розробка та виробництво пристроїв для «Інтернету речей». Виробництво сенсорів з автономним живленням та бездротовою передачею даних;
- впровадження комплексних рішень щодо організації інтелектуального промислового та вуличного освітлення («розумне світло»);
- контрактне серійне виробництво радіоелектронного обладнання із використанням власних виробничих ліній;
- розробка обладнання за технічним завданням замовника;
- побудова систем бездротової широкосмугової передачі (організація бездротових систем у діапазонах від 2 ГГц до 5 ГГц на швидкості до 200 Мбіт/с);
- допомога у розробці технічного завдання на побудову контролюючих систем та систем управління технологічним обладнанням різної категорії складності;
- системи автоматизації технологічних процесів АСУТП (рішення щодо автоматизації процесів контролю, управління, аналітики на підприємстві);
- системи автоматизованого та диспетчерського управління технологічними процесами SCADA (системи автоматизованого управління технологічними процесами при використанні логічних контролерів та програмного забезпечення);
- системи із застосуванням людино-машинних інтерфейсів (HMI, Human-machine interface) для вирішення завдань моніторингу, управління та програмування технологічних процесів;
- розробка програмного забезпечення рішень для автоматизації широкого кола технологічних процесів для підприємства [18].

1.4.2 Автоматизовані системи енергомоніторингу від компанії «YASNO»

Система енергоменеджменту дозволяє підвищити контроль над використанням енергоресурсів і забезпечити зниження енергоспоживання за рахунок організаційних заходів, навчання персоналу, впровадження енергоефективних підходів в усі ключові бізнес-процеси підприємства.

Енергоменеджмент передбачає побудову механізму постійного вдосконалення в сфері зниження енергоспоживання за принципом «Плануй-Виконуй-Перевірй-Корегуй».

Переваги систем енергомоніторингу від «YASNO»:

- кроссплатформеність – системи здатні працювати на різних пристроях та можуть бути інтегровані в існуючу інфраструктуру;
- бездротова передача – інформація щодо енергоспоживання від об'єкту вимірювання передається за допомогою GSM зв'язку;
- універсальність – контроль споживання електроенергії, води, газу, тепла, аналіз температури, вологості, тиску, CO₂, та інших ресурсів;
- візуалізація – гнучкі та персоналізовані під клієнта панелі приладів (дашборди) для аналізу і відстеження трендів споживання;
- точність вимірювання – можливість використання повірених приладів для комерційного обліку із гарантовано низьким рівнем похибки;
- повідомлення – попереджуючі повідомлення у разі надзвичайних ситуацій, сповіщення через e-mail та месенджери;
- архівація та експорт – забезпечення архівації даних вимірювання від трьох років та можливість експорту інформації в файли.

Також можлива інтеграція систем моніторингу під потреби замовника.

Вона використовується, коли існують певні вимоги до:

- гнучкості налаштування інтерфейсу;
- можливості підключення існуючого обладнання;
- високої метрологічної точності.

До складу всіх пропозицій компанії входять:

- проєкт системи – моніторинг споживання енергії приладів від малого бізнесу до великих індустріальних підприємств;
- комплект обладнання – в залежності від проєкту система може включати розумні лічильники, датчики, модеми, контролери, та інше;
- інсталяція та інтеграція – монтаж обладнання, інтеграція в існуючу інфраструктуру, налаштування програмного забезпечення;
- аналітика та звіти – оцінка потенціалу економії при зміщенні споживання або зміні обладнання. Рекомендації з оптимізації споживання;
- сервісна підтримка – наші експерти з енергоефективності готові відповісти на питання і допомогти із вирішенням технічних моментів [19].

1.5 Висновки до розділу

У даному розділі кваліфікаційної роботи розглянуто особливості будови та функціонування бездротових сенсорних мереж. Визначено поняття бездротової сенсорної мережі, її основних компонентів та їх функціональні особливості. Розглянуто класифікацію бездротових сенсорних мереж, різновиди та особливості їх топології.

Проаналізовано сучасні автоматизовані системи управління ресурсами, досліджено їх структуру, технічні параметри, функціональні можливості та особливості їх використання, а також виявлено переваги та недоліки цих систем.

Переважно всі сучасні системи контролю витрат води являють собою комплекс функціонально об'єднаних технічних засобів і програмного забезпечення та мають у своєму складі сенсорні вузли (витратоміри, лічильники) з вбудованими пристроями збору та передачі даних на базі бездротових технологій (Wi-Fi, GSM, LoRa, NB-IoT та ін.), що надсилають інформацію до блоків керування та передачі даних (шлюзів або базових станцій), які зчитують, обробляють та передають результати вимірів витратомірів на мережевий сервер для подальшого надання зовнішнім програмним додаткам, включаючи автоматизовані робочі місця диспетчерського керування.

Також у цьому розділі розглянуто основні сучасні технології та стандарти бездротової передачі інформації. Проведено їх порівняльний аналіз і визначено основні переваги та недоліки при використанні їх в існуючих сучасних комерційних бездротових системах моніторингу та управління енергоресурсами, представлені на українському ринку.

Для досягнення поставленої мети проведено аналіз предмета досліджень, а саме розроблення автоматизованої системи управління ресурсами для комунального сектора на базі бездротових сенсорних мереж.

2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ

2.1 Загальний опис та технічні вимоги до автоматизованої системи управління ресурсами

2.1.1 Загальний опис автоматизованої системи управління ресурсами

Головною задачею АСУР є повна або часткова автоматизація процесів моніторингу та управління інформацією про об'єми спожитих енергоресурсів на об'єктах ЖКГ з використанням спеціальних засобів обліку, створення бази даних отриманих за попередні періоди, а також контроль стану енергосистеми об'єктів ЖКГ.

АСУР грає головну роль в інформаційному забезпеченні політики енергозбереження та раціоналізації енерговитрат при взаємодії органів виконавчої влади, компаній-енергопостачальників та споживачів.

2.1.2 Задачі автоматизованої системи управління ресурсами

Перед даною системою ставляться наступні задачі:

- якісний дистанційний моніторинг енергоспоживання, а також зчитування та передача даних з засобів обліку теплоенергії, гарячого та холодного водопостачання, електроенергії та газопостачання;
- оперативно-диспетчерське управління та контроль стану енергосистеми об'єкту ЖКГ.

2.1.3 Склад автоматизованої системи управління ресурсами

Автоматизована система управління ресурсами складається з:

- приладів обліку енергоспоживання (сенсорів, витратомірів та інше);
- імпульсний радіомодем (шлюз);

- концентратор (базова станція);
- сервер АСУР.

Дана система управління енергоресурсами складається з сенсорів, реєстраторів, засобів збору, передачі, відображення та обробки даних.

До засобів обліку належать витратоміри, лічильники та смарт-сенсори, що використовуються для підрахунку об'ємів енерговитрат та зчитування показань.

Радіомодем (шлюз) – пристрій, що використовується для передачі даних від приладів обліку до концентратора. Він містить в собі вбудований таймер та зберігає поточні дані з витратомірів, а також може відповідати на команди, що надходять з концентратора. Також радіомодем може виконувати функцію ретранслятора для ланцюга приладів, і таким чином, забезпечувати передачу інформації від приладу обліку до концентратора.

Концентратор (базова станція) виконує функції збору, зберігання та передачі інформації мережею зв'язку на сервер.

2.1.4 Переваги використання автоматизованої системи управління ресурсами

Впровадження АСУР на об'єкти ЖКГ надає наступні переваги:

- зменшення об'ємів енергоспоживання;
- передача інформації в різних режимах з заданою періодичністю, або на вимогу сервера;
- вільний доступ до перегляду об'ємів енерговитрат як для диспетчерів обслуговуючих організацій та і для споживачів;
- повідомлення про виникнення позаштатних ситуацій і швидка реакція на них;
- підвищення енергоефективності об'єктів ЖКГ;
- створення ефективної системи диспетчеризації;
- зниження експлуатаційних витрат об'єкта ЖКГ;
- прогнозування енерговитрат на будь-який період;
- можливе підключення до пристроїв з цифровими інтерфейсами.

2.1.5 Загальні технічні вимоги, що пред'являються до системи

Для реалізації функції збору даних з засобів обліку та управління в АСУР передбачена двонаправлена передача сигналів на ділянках засіб обліку – радіомодем – концентратор – сервер.

Передача інформації з засобів обліку на сервер відбувається автоматично з заданою періодичністю або за запитом від сервера.

АСУР передає збережені показання з приладів обліку зовнішнім автоматизованим системам, обслуговуючим компаніям та споживачам.

ПО сервера, концентраторів та радіомодемів має бути адаптивним для реалізації функціонування з різними приладами обліку через цифровий інтерфейс.

Для реалізації інформаційного захисту повинно бути виконано шифрування каналів передачі інформації на ділянках радіомодем – концентратор – сервер, а також застосовано завадостійке кодування при передачі цих даних.

Радіомодеми і концентратор мають в своєму складі універсальний блок управління і бездротового зв'язку, призначений для бездротової передачі даних.

2.2 Вибір технології бездротового зв'язку для автоматизованої системи управління ресурсами

2.2.1 Порівняльний аналіз технологій бездротового зв'язку

Комунікація є однією з найважливіших частин будь-якої системи управління ресурсами. На даний час існує велика кількість бездротових стандартів зв'язку, але не всі з них відповідають необхідним вимогам для застосування їх в АСУР. Основними з яких є енергоспоживання, радіус покриття і пропускна здатність. Порівняння технологій за радіусом дії та діапазоном робочих частот зображено на рисунках 2.1 та 2.2.

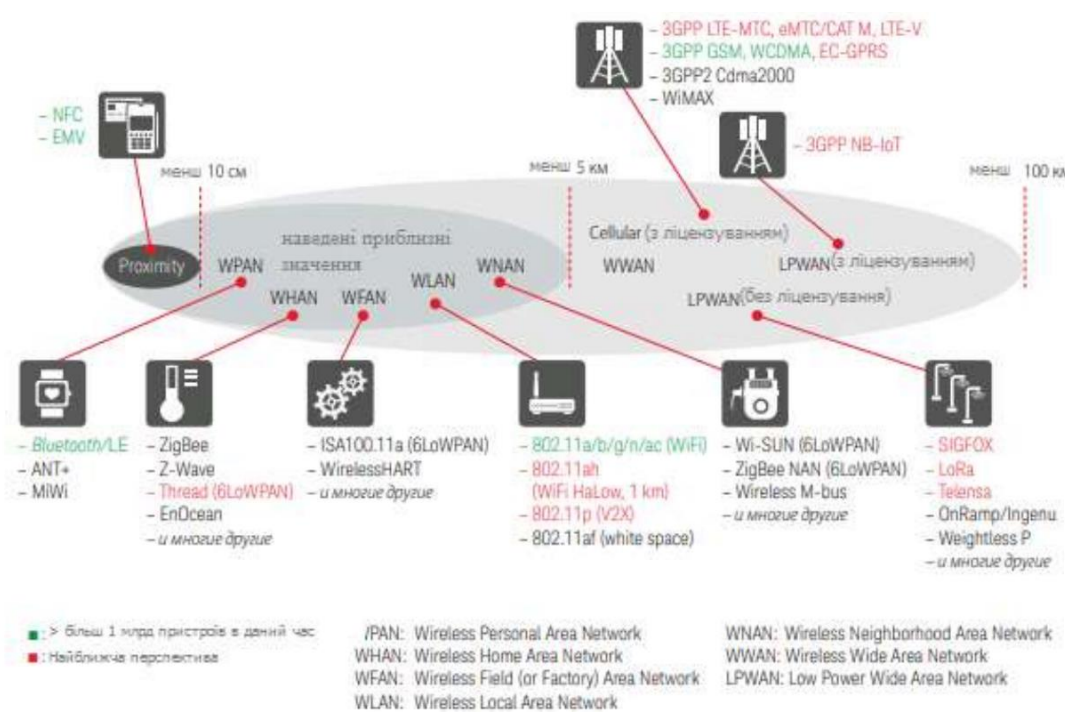


Рисунок 2.1 – Технології бездротового зв’язку за радіусом дії

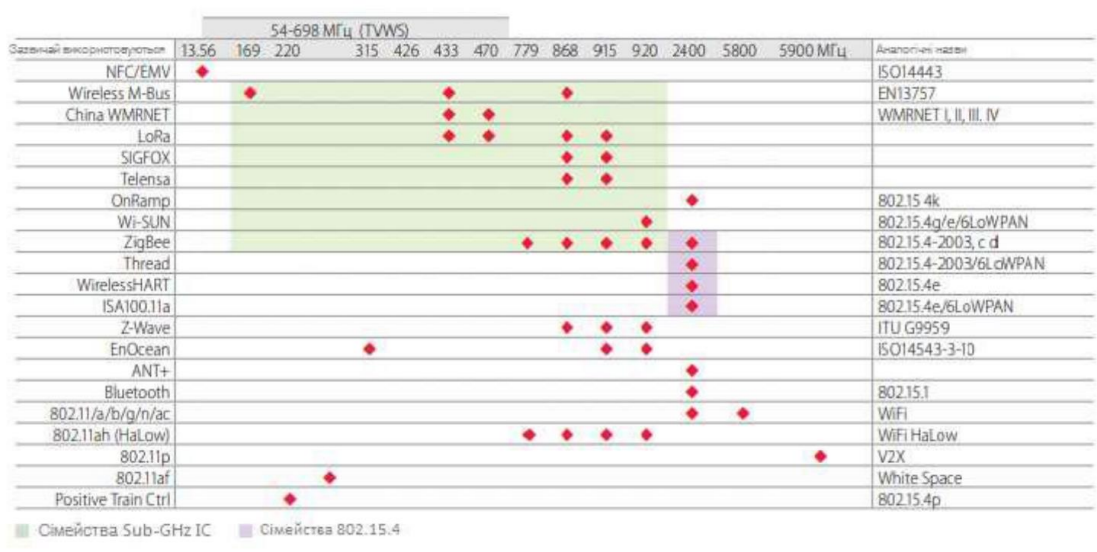


Рисунок 2.2 – Діапазони робочих частот бездротових технологій

Більшість стандартів, таких як ZigBee, WiFi та інші, мають невеликий радіус дії. А інші, такі як 3G і LTE, є дуже енерговитратними, і дальність їх дії не гарантована. Попри те, що ці технології і режими зв'язку підходять для певних проєктів, вони мають обмеження, наприклад, труднощі з використанням в

областях без стільникового зв'язку (GPRS, EDGE, 3G, LTE/4G) та необхідність ліцензування. Параметри технологій приведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри бездротових технологій

Параметр	LoRaWan	LTE-M	Sigfox	NB-IoT	BLE	Wi-Fi	Z-Wave	ZigBee
Стандарт зв'язку	Власний	3GPP	Власний	3GPP	Bluetooth SIG	802.11	Власний	IEEE 802.15.4
Частота	433 МГц, 868 МГц, 915 МГц.	від 700 МГц до 2,2 ГГц, від 452,5 МГц до 467,5 МГц	868 МГц, 915 МГц, 921 МГц.	від 700 МГц до 2,2 ГГц, від 452,5 МГц до 467,5 МГц	13,56 МГц.	2,4/5,0 ГГц	від 868 МГц до 926 МГц.	2,4 ГГц
Швидкість передачі	RX 290 біт/с TX 50 Кбіт/с	1 Мбіт/с	0,1 Кбіт/с	~200 Кбіт/с	Від 125 Кбіт/с до 2 Мбіт/с	до 150 Мбіт/с	100 Кбіт/с	250 Кбіт/с
Топологія мережі	Зірка	Зірка	Зірка	Зірка	P2P	Зірка	Mesh	Mesh
Кількість пристроїв	Дуже велике	Дуже велике	Дуже велике	Дуже велике	20	100	232	250+
Радіус дії	від 5 км до 15 км	5 км	від 10 км до 50 км	5 км	від 40 м до 1000 м	від 40 м до 100 м	від 40 м до 100 м	від 40 м до 100 м
Потужність	середня	висока	середня	висока	низька	середня	середня	середня
Спосіб застосування	Мобільний/Локальний	Мобільний/Локальний	Мобільний/Локальний	Мобільний/Локальний	Локальний	Локальний	Локальний	Локальний

Проаналізувавши характеристики сучасних бездротових технологій зв'язку, а також враховуючи технічні вимоги до сучасних систем управління ресурсами, можна зробити висновок, що для створення розроблюваної АСУР необхідне ефективне комунікаційне середовище, яке відповідатиме технічним

вимогам. Зокрема, щодо низької потужності і широкого радіусу дії, а також відносно невисокої вартості, захищеності та простоти в розгортанні.

Технології LPWAN найкраще підходять для з'єднання пристроїв, які мають передавати невеликі об'єми даних на далекі відстані, забезпечуючи при цьому довгий термін служби батареї. Низький рівень енергоспоживання цих пристроїв дозволяє виконувати задачі при низькій собівартості і дуже низькій частоті заміни акумуляторів. Це відрізняє LPWAN від інших стандартів бездротової мережі, таких як Bluetooth, RFID і ZigBee.

На рисунку 2.3 зображена схема пропускну здатності й дальності дії різних бездротових стандартів. Наприклад, Wi-Fi, маючи високу пропускну здатність в кілька Мбіт/с при обмеженому радіусі дії в межах від 100 м до 200 м, найчастіше застосовується для формування бездротових локальних мереж в межах офісу або квартири, але при цьому буде неефективним при використанні у обширних мережах систем управління ресурсами.

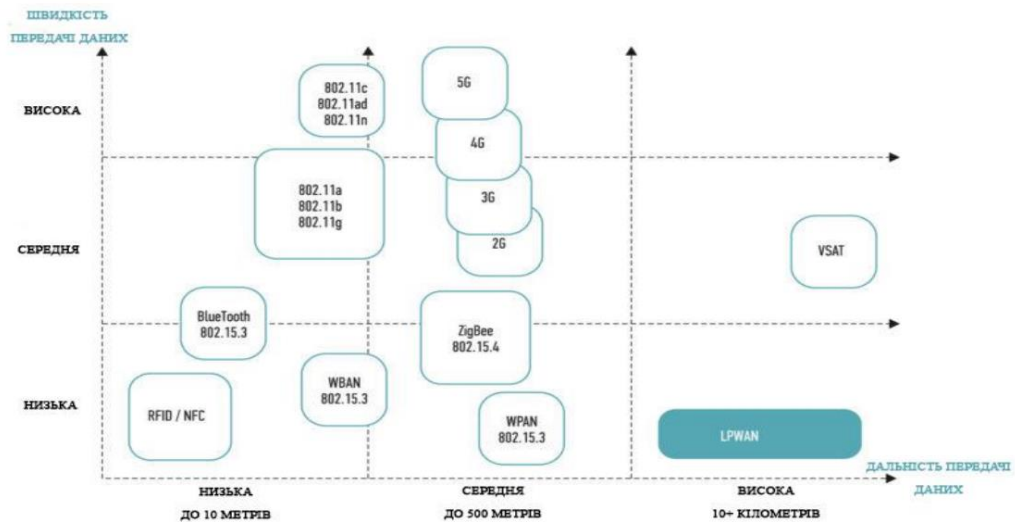


Рисунок 2.3 – Бездротові технології за радіусом дії та швидкістю передачі даних

2.2.2 Порівняння технологій LoRaWAN та NB-IoT

Під час вибору оптимальної технології LPWAN для АСУР необхідно врахувати наступні фактори: якість обслуговування, час автономної роботи,

затримку, масштабованість, тривалість корисного навантаження, зону покриття, дальність дії, розгортання та вартість.

Розглянемо детально характеристики двох більш схожих сучасних LPWAN-стандартів – LoRaWAN і NB-IoT, які найкраще підходять для розроблюваної системи управління ресурсами.

LoRaWAN – це LPWAN система з відкритою архітектурою, розроблена і стандартизована некомерційною асоціацією компаній LoRa Alliance, яка налічує понад 500 учасників. LoRa – це технологія модуляції, що використовується на фізичному рівні та дає змогу передавати інформацію на далекі відстані з використанням CSS (Chirp Spread Spectrum) модуляції, яка поширює вузькосмугові сигнали по розширеному каналу, а також забезпечує високу стійкість і низькі рівні відношення сигнал/шум.

NB-IoT в свою чергу, функціонує в ліцензованому діапазоні і подібно LTE застосовує багатостанційний доступ з частотним поділом каналів (FDMA) в висхідній лінії зв'язку, ортогональний FDMA (OFDMA) в низхідній лінії зв'язку і QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) модуляцію.

І LoRaWAN, і NB-IoT пристрої знижують власне енергоспоживання, коли переходять в сплячий режим. Але під час роботи в якості синхронного протоколу NB-IoT витрачає більше енергії, ніж LoRaWAN, що є асинхронним протоколом, і при вимірюваннях з однаковою пропускну здатністю NB-IoT використовує вищий піковий струм, необхідний для модуляції OFDM/FDMA.

Одним з факторів, який впливає на вартість і ефективність LoRaWAN і NB-IoT, є краща проникаюча здатність LoRaWAN в будівлях. Найбільша втрата зв'язку (MCL) для висхідної і низхідної ліній LoRaWAN становить 165 дБ. При цьому втрати для NB-IoT становлять від 145 дБ до 169 дБ для висхідної лінії зв'язку і 151 дБ для низхідної залежно від класу приладу.

Нижчі показники енергетичного потенціалу лінії зв'язку у NB-IoT призводять до того, що термін служби батареї значно зменшується.

Крім того, суттєвою перевагою технології LoRaWAN є гнучкість. На відміну від NB-IoT, LoRaWAN пропонує розгортання локальної мережі, тобто

локальної мережі з використанням шлюзу LoRa, а також функціонування загальнодоступної мережі через базові станції.

LoRaWAN володіє досить широким радіусом дії (до 20 км), тобто, діапазоном який вимагає лише три базові станції для покриття цілого міста.

NB-IoT має менший радіус покриття (тобто діапазон становить менше 10 км). Основна увага приділяється класу пристроїв, які встановлюються в місцях, віддалених від типової досяжності стільникових мереж. Також проблемою є те, що розгортання NB-IoT обмежено базовими станціями LTE. Тобто, його не вдасться застосувати для сільських або приміських регіонів, де немає покриття LTE.

Обидві технології можуть конкурувати в якості обслуговування, як показано на таблиці 2.2 та на рисунку 2.4.

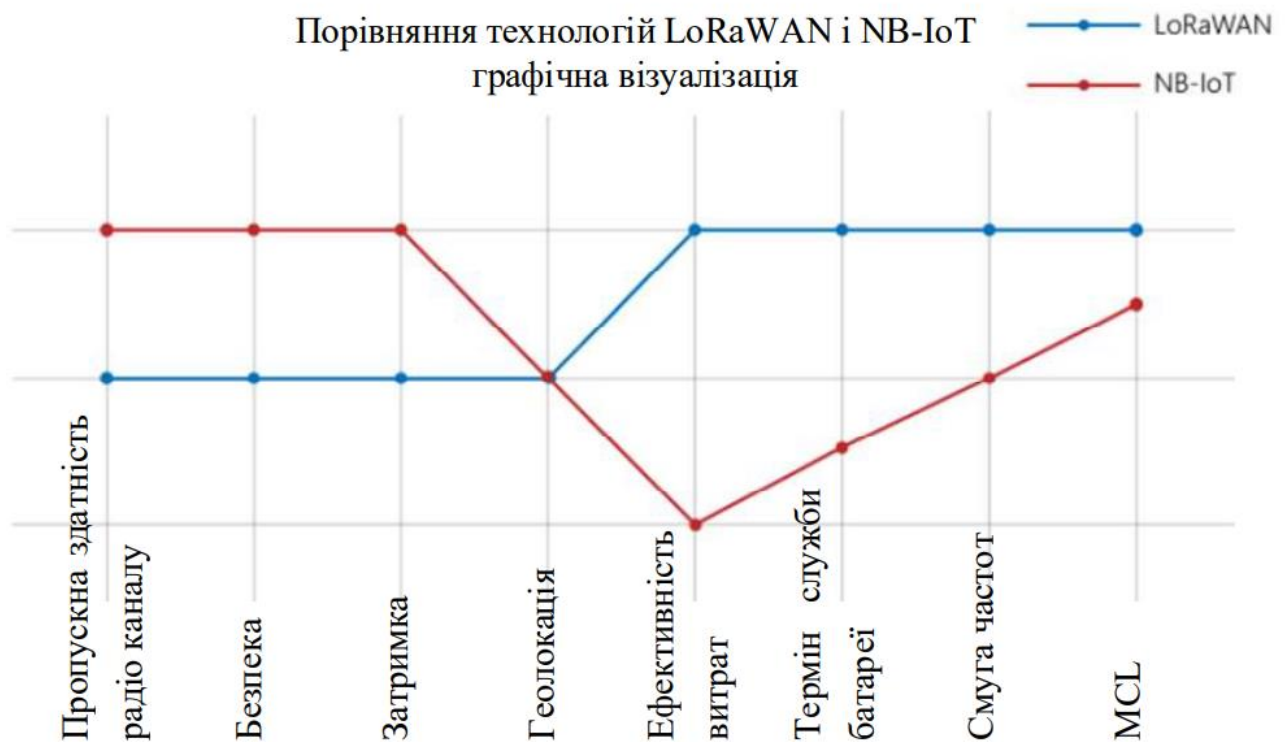


Рисунок 2.4 – Графічна візуалізація порівняння технологій LoRaWAN та NB-IoT

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики LoRaWAN та NB-IoT

Технічні характеристики	LoRaWAN	NB-IoT
Метод модуляції	CSS	OFDMA/DSSS
Діапазон	ISM	ліцензований
Швидкість	від 0,3 кбіт/с до 50 кбіт/с	UL: від 1 кбіт/с до 144 кбіт/с DL: від 1 кбіт/с до 200 кбіт/с
Автономність	більше 10 років	до 10 років
Радіус дії, км	5 (міський), 20 (сільський)	1 (міський), 10 (сільський)
Частотна смуга, кГц	125	180
MCL, дБ	165	164
Піковий струм, мА	32	120
Струм в сплячому режимі, мкА	1	5
Безпека	AES 128 біт	3GPP від 128 біт до 256 біт
Ефективність витрат	висока	середня
Підтримка	LoRa Alliance, IBM, Cisco, Actility, Semtech...	3GPP, Ericson, Nokia, Huawei, Intel...
Дозвіл на приватну мережу	Так	Ні
Екосистема	Послуги зв'язку доступні в 40 країнах світу і 250 містах. LoRaWAN вже прийнятий в якості стандарту мережі IoT в багатьох країнах. В LoRa Alliance входить більше 500 компаній.	За даними GSMA, в квітні 2017 року світі тестувалися 40 NB-IoT мереж і тільки чотири мережі почали повноцінну роботу.

Також важливо враховувати наступні аспекти витрат: вартість спектру (ліцензія), вартість мережі/розгортання та вартість пристроїв (табл. 2.3)

Таблиця 2.3 – Аспекти витрат на LoRaWAN та NB-IoT

	LoRaWAN	NB-IoT
Вартість спектру, €	безкоштовно	> 500 / МГц
Вартість розгортання, €	> 100 / шлюз > 1000 / базова станція	> 15 000 / базова станція
Вартість кінцевого пристрою, €	від 3 до 5	> 20

Проаналізувавши дані з таблиць та порівнявши ці дві технології, стає очевидним те, що LoRaWAN є оптимальною за більшістю параметрів для впровадження її в розроблювану АСУР, ніж NB-IoT.

2.3 Розроблення структурної схеми автоматизованої системи управління ресурсами

Наступним етапом розробки автоматизованої системи управління ресурсами після етапу вибору стандарту зв'язку є створення структурної схеми АСУР, визначення та аналіз основних робочих функцій кожного структурного елемента системи.

На рисунку 2.5 зображено розроблену структурну схему бездротової сенсорної мережі АСУР.

Аналізуючи дану схему, бачимо, кінцеві пристрої (сенсорні вузли) зв'язані зі шлюзом LoRaWAN топологією «зірка», а передача сигналів між ними забезпечується за допомогою модуляції LoRa. У рамках технології LoRaWAN дана топологія дає змогу під'єднувати нові сенсорні вузли, і їх кількість не визначається рівнем енергоспоживання останніх. Завдяки одноранговому з'єднанню «точка – точка» топологія «зірка» більш ефективна і дешева в реалізації у порівнянні з топологією «сітка». Рівень безпеки мережі значно вищий, оскільки кінцеві точки функціонують незалежно. У випадку атаки на вузол, інша частина мережі залишиться неушкодженою.

Окрім того, слід зазначити, що дана топологія дозволяє розвантажити сервер, а вірогідність колізій дуже низька завдяки особливостям функціонування БС. Тому що в такому разі відбувається перемикання частотних каналів у неліцензованому діапазоні частот.

Отже, дана мережа топології «зірка» є оптимальною для мінімального енергоспоживання і забезпечує найдовший термін служби батареї на стороні сенсорного вузла.

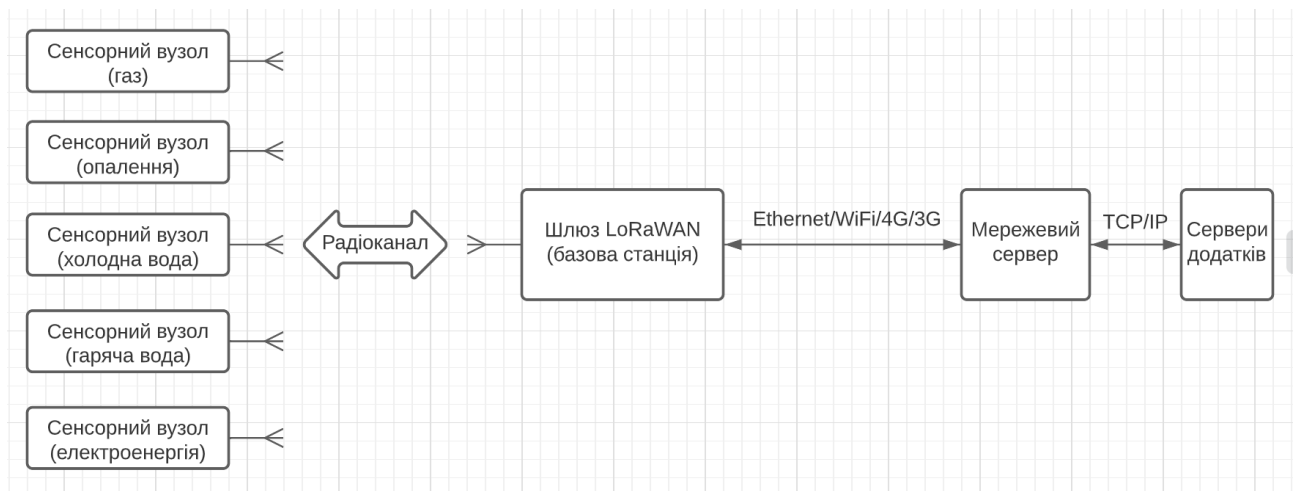


Рисунок 2.5 – Структурна схема автоматизованої системи управління ресурсами

Кінцеві пристрої (сенсорні вузли) здійснюють керуючі та вимірювальні функції. Вони мають в своєму складі необхідні датчики та елементи управління. Сенсорні вузли можуть знаходитися на великій відстані від шлюзу та живляться від акумулятора. Кожен з них налаштовує зв'язок зі шлюзом через радіоканал LoRaWAN, що дозволяє здійснювати велику кількість підключень.

Шлюз (БС або концентратор) – пристрій, що приймає сигнали від сенсорних вузлів через радіоканал і відправляє їх в транзитну мережу. В ролі транзитної мережі можуть виступати Ethernet, WiFi, 3G, 4G або мережі рухомого радіотелефонного зв'язку. Шлюз і сенсорні вузли формують мережеву топологію типу «зірка». Шлюз має багато багатоканальних приймачів для обробки сигналів в декількох каналах одночасно або навіть, кількох сигналів в одному каналі.

Відповідно, кілька таких пристроїв забезпечують покриття мережі та прозору двосторонню передачу даних між сенсорними вузлами і сервером.

Мережевий сервер здійснює в мережі наступні керуючі функції: адаптацію швидкості, зберігання і обробку інформації.

Сервер додатків також може дистанційно контролювати функціонування сенсорних вузлів, а також збирати з них необхідну інформацію.

2.4 Вибір елементної бази для автоматизованої системи управління ресурсами

2.4.1 Вибір шлюзу

У якості головної базової станції або шлюзу було обрано LoRaWAN Conduit IP67 від Multi-Tech (рис. 2.6). У комплект поставки шлюзу входять: блок живлення 12В, антена 3G/LTE, кабелі microUSB і Ethernet, інструкція та модуль LoRaWAN (MTACLORA-868) [20].



Рисунок 2.6 – Базова станція Conduit IP67

Даний пристрій має наступні технічні характеристики:

- процесор – RM9, 400 МГц;
- підтримує мережі 3G/LTE;
- живлення – від 9 В до 32 В;

- Ethernet 10/100 (RJ-45);
- USB Host (Type A), Micro USB D;
- габаритні розміри – 161 мм × 107 мм × 43 мм;
- діапазон робочих температур – від -30 °C до 70 °C.

Необхідна кількість шлюзів для підключення кінцевих вузлів – 1 шт.

Вартість контролера – 40 000 грн.

2.4.2 Вибір антени

Штирові антени для діапазону 868 МГц застосовуються в приладах охоронної сигналізації, які працюють в діапазоні від 868 МГц до 868,2 МГц. Антена W1063 (рис. 2.7) рекомендована компанією MultiTech для використання з модулями LoRa MTDOT-868 і шлюзами LoRaWAN. Антена діапазону 868 МГц з круговою діаграмою спрямованості і посиленням 5 дБ використовується в якості «базової» в системах збору даних при невеликій дальності зв'язку.



Рисунок 2.7 – Антена W1063

Антена W1063 представляє собою колінеарну $5/8$ лямбда випромінює систему з гамма-узгодженням (j-образна антена). Антена заземлена за постійним струмом і не має виступаючих противаг завдяки використанню чвертьхвильової відсікаючої склянки. Стійка до впливу атмосферних явищ і УФ випромінювання. Антена має довжину 198,6 мм [21].

Необхідна кількість – 1 шт.

Вартість антени – 300 грн.

2.4.3 Вибір лічильника води

Metromatic™ WSII – ультразвуковий витратомір для вимірювання споживання холодної та гарячої води в житлових або комерційних приміщеннях.

Лічильник поставляється з інтегрованою системою зв'язку з низьким енергоспоживанням на великій відстані, LoRaWAN або NB-IoT, включаючи бездротовий запасний OMS. Дані збираються в режимі реального часу, обробляються автоматично та доступні у постачальника послуг IoT [22].



Рисунок 2.8 – Витратомір Metromatic WS-II

Обраний пристрій має наступні характеристики:

- температурний клас – T30, T90;
- номінальний потік – 1,6 м³/год / 2,5 м³/год;
- не потрібно прямих ділянок (U0D0);
- установка в будь-якому положенні;
- двонаправлене вимірювання потоку;
- індикація напрямку потоку;
- екологічний клас E1/ M1;
- клас захисту IP68;
- номінальний тиск PN16;
- реєстрація архіву вимірювання;
- термін служби акумулятора 16 років.

2.4.4 Вибір газового лічильника

Лічильники газу ультразвукові «Smartico Gas Meter» побутового призначення випускаються типорозмірним рядом G-1.6, G-2.5, G-4, G-6 і застосовуються для вимірювання обсягу природного і зрідженого газу (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Газовий лічильник «Smartico Gas Meter»

Лічильник виконаний у компактній конструкції, яка не має рухомих механічних частин та дозволяє виконувати монтаж в умовах обмеженого простору. Інтегрований в проточну частину лічильника малоінерційний датчик температури забезпечує точний вимір поточної температури робочого середовища. Лічильник забезпечує можливість як візуального, так і дистанційного знімання інформації [23].

Даний пристрій має наступні характеристики:

- параметри – G-1.6/G-2.5/G-4/G-6;
- мінімальна витрата $Q_{\min}$, м³/год – 0,016/0,025/0,04/0,06;
- максимальна витрата $Q_{\max}$, м³/год – 2,5/4,0/6,0/10;
- відносна похибка вимірювань об'єму, $Q_{\min} \leq Q \pm 3,0$;
- надлишковий тиск навколишнього середовища, кПа – ≤ 50 ;
- температура довкілля – від 25 °C до 75 °C;
- температура газу – від -25 °C до 55 °C;

- втрата тиску – <100 Па / <250 Па;
- напруга живлення літієвої батареї – 3,6 В;
- габаритні розміри – 193 мм × 85 мм × 82 мм;
- вага – 0,9 кг;
- середній термін служби – до 15 років;
- клас захисту – IP54.

2.4.5 Вибір лічильника електроенергії

Трифазний лічильник електроенергії МТХ прямого включення з вбудованим радіомодулем LoRaWAN (рис. 2.10). Призначений для вимірювання спожитої та згенерованої активної та реактивної електроенергії в мережах змінного струму з номінальною напругою 3х220/380 В і автоматичного передавання показників постачальникові [24].



Рисунок 2.10 – Електролічильник з вбудованим радіомодулем LoRaWAN

LoRaWAN-модуль із заданою частотою зчитує дані та передає їх через шифрований радіоканал на базову станцію. Потім через IP-канал дані надходять в програмне забезпечення, де постачальник електроенергії отримує до них доступ.

Трифазний лічильник електроенергії МТХ із вбудованим радіомодулем дає змогу вести облік електроенергії, застосовуючи блоковий тариф чи диференційовані тарифи: за часом доби, типами днів і сезонами.

2.4.6 Вибір лічильника теплопостачання

HYDROCAL-M4 – компактний лічильник теплової енергії для вимірювання енергії, що використовується для опалення та/або охолодження у користувачів, що обслуговуються централізованими системами (рис. 2.11).

Обробка даних, що стосуються різниці температур рідини-носія між подачею та зворотним трубопроводом (DT), в поєднанні з даними, що стосуються обсягу рідини-теплоносія, що використовується кожним користувачем, дозволяє точно розрахувати кількість енергії, яка використовується [24].



Рисунок 2.11 – Лічильник теплоенергії HYDROCAL-M4

Даний пристрій має наступні характеристики:

- номінальний діаметр – G 1;
- довжина – 130 мм;

- номінальна витрата – 2,5 м³/год;
- макс. витрата – 5,0 м³/год;
- мінімальна витрата – 50 л/год;
- клас точності – 2;
- діапазон Q_p/Q_i (H/V) – 50;
- клас навколишнього середовища – A (E1; M1);
- втрата тиску при Q_p – $\leq 0,25$ бар;
- номінальний тиск – 16 бар.

2.4.7 Вибір універсального інтерфейсного радіомодуля

Радіомодуль Jooby з лічильником імпульсів призначено для зчитування імпульсів з усіх видів лічильників ресурсів (рис. 2.12). Дані передаються на сервер через бездротову мережу LoRaWAN, де вони перетворюються на показники. Інтелектуальні сенсори розпізнають стороннє втручання в роботу радіомодуля та негайно сигналізують про це.

Радіомодуль фіксується біля приладів обліку кількома способами: за допомогою DIN-рейки, кабельної стяжки чи саморізами до стіни. Після цього прилад активують у мобільному додатку інсталятора. Увесь процес триває кілька хвилин і не вимагає зняття лічильника [25].



Рисунок 2.12 – Інтерфейсного радіомодуля Jooby

Радіомодуль під'єднують до лічильників ресурсів (вода, газ, тепло, електроенергія), оснащених імпульсним виходом, і він зчитує імпульси, які генерують лічильники. Дані про кількість імпульсів накопичуються в пам'яті радіомодуля й з заданою частотою передаються через бездротову мережу LoRaWAN на сервер, де перетворюються на показники.

Даний прилад має наступні технічні характеристики:

- робоча частота, МГц – EU868;
- потужність передавача – 25 мВт;
- чутливість приймача – до -148 дБм;
- швидкість передачі даних – від 250 біт/с до 50000 біт/с;
- дальність зв'язку в умовах міської забудови – до 5 км;
- дальність зв'язку в умовах прямої видимості – до 15 км.

2.5 Розроблення алгоритму роботи автоматизованої системи управління ресурсами

Розроблено алгоритм роботи автоматизованої системи управління ресурсами (рис. 2.13).

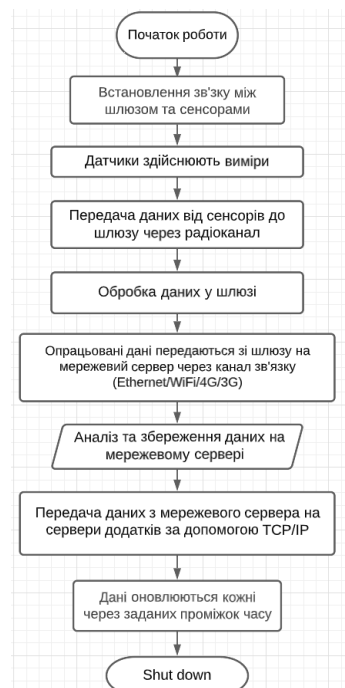


Рисунок 2.13 – Алгоритм роботи АСУР

Алгоритм складається з шести основних послідовних етапів: вимірювання енерговитрат кінцевими пристроями, передачі даних до шлюзу через радіоканал, обробки даних шлюзом, передачі даних зі шлюзу на мережевий сервер, обробки інформації сервером та подальшої її передачі на сервери додатків. Після виконання даних етапів відбувається оновлення даних через заданий проміжок часу.

2.6 Висновки до розділу

У даному розділі проведено загальний опис розроблюваної автоматизованої системи управління ресурсами, визначено її склад та основні задачі, а також встановлено технічні вимоги до неї. Далі обрано технологію бездротової передачі даних на основі якої буде побудована розроблювана автоматизована система управління ресурсами. Для цього було проведено глибокий порівняльний аналіз найефективніших сучасних бездротових технологій для побудови такої системи – LoRaWAN та NB-IoT. В результаті, для створення автоматизованої системи управління ресурсами обрано технологію LoRaWAN, яка виявилась оптимальнішою за більшістю поставлених перед нею технічних вимог, а саме:

- енергоефективність;
- великий радіус дії;
- надійність;
- простота розгортання;
- невисока вартість модулів;
- захищеність;
- термін служби батареї;
- велика кількість вузлів у мережі.

Крім того, у даному розділі розроблено структурну схему автоматизованої системи управління ресурсами та визначено функціональні задачі кожного

елемента системи. Побудовано алгоритм функціонування системи, наведено послідовність його етапів та суті процесів, що відбуваються на кожному з них.

Також здійснено підбір елементної бази АСУР на основі технічних вимог до неї та з урахуванням обраної технології бездротового з'єднання LoRaWAN.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ КОМУНАЛЬНОГО СЕКТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA

Для LoRaWAN на стадії проектування критично важливе визначення місць встановлення та кількості базових станцій для обраного сектора [26], на якому планується розгортання сегмента мережі, що забезпечує якісний прийом у будь-якій точці даного сектора. Так як LoRa – це радіотехнологія, то сигнал природним чином згасає на шляху свого поширення через різні причини – відстані між базовою станцією і кінцевим пристроєм, наявності перешкод між ними, взаємовпливу з іншими сигналами, що передаються на тій же частоті і тому подібне.

Не менш важливим є і розрахунок ємності БС, що забезпечує зв'язок кінцевих пристроїв та базової станції, а також визначення факторів, що впливають на цей параметр. Це питання традиційно розглядається для кожної технології, що реалізується на практиці, і LoRa не є винятком.

Даний розділ ставить собі за мету відповісти на ці важливі питання, для чого розглянуті різні моделі загасання, які враховують безліч різних факторів. Зроблено розрахунок часу передачі пакетів у мережі LoRa та розрахунок радіусу дії БС для умов щільної міської забудови з використанням рекомендацій ITU-RP.1238-5. Також виконано розрахунок інтенсивності надходження пакетів.

На підставі отриманих даних буде проведено аналіз та зроблено відповідні висновки.

3.1 Розрахунок часу передачі одного пакета через радіоінтерфейс LoRaWAN.

Будь-який пакет, що передається по мережі LoRaWAN, включає блок даних фізичного рівня і преамбулу. Поле преамбули займає 8 байт і складається

з однобайтної послідовності 10101011, яка вказує на початок пакета, та семи байтів, у яких чергується 1 та 0 (кожен байт – послідовність виду 101010). Вони служать для синхронізації приймального терміналу. Кількість символів у преамбулі $n_{preamble}$ конфігурується в діапазоні від 6 до 65535.

Швидкість обміну даними в мережі LoRaWAN визначається рівнями модуляції та коефіцієнтів SF (Spreading Factors) у комбінації із шириною смуги каналу. Зазначені параметри впливають на фізичну бітову швидкість та час в ефірі. SF – це ціле число, яке задається в інтервалі від 7 до 12 (може бути рівним 6, але тільки для чіпів SX1276/77/78/79, які не застосовувалися в даній роботі). Чим вище задано значення SF , тим вище схибленість лінії зв'язку [27].

Кількість символів у блоці даних фізичного рівня визначається за формулою (3.1)

$$payloadSymbNb = 8 + ceil\left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2ADR)}\right)(CR + 4), \quad (3.1)$$

де $PL = 12 + FRM$ – кількість байт корисних даних у блоці фізичного рівня ($PHPPayload$);

SF – коефіцієнт розширення спектра;

CRC – перевірка надлишковості циклічної суми ($CRC = 1$, коли передача поля CRC блоку корисного навантаження включена, і $CRC = 0$ – коли вимкнена);

H – параметр, що відображає наявність заголовка в радіопакеті ($H = 0$, коли передача заголовка ($PHDE + PHDE_CRC$) включена, і $H = 1$ – коли заголовок відсутня);

ADR – оптимізація швидкості передачі даних ($ADR = 1$, коли оптимізація для низьких швидкостей передачі включена, та $ADR = 0$ – коли вимкнена) (для $SF = 11$ та $SF = 12$ оптимізація швидкостей передачі має бути вимкнена);

CR – від 1 до 4 – швидкість коду;

$ceil$ – операція округлення до найближчого цілого числа.

Тривалість передачі преамбули розраховується за формулою (3.2)

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4,25) \cdot T_{sym}, \quad (3.2)$$

де T_{sym} – тривалість передачі одного символу, що розраховується за формулою (3.3) [28]

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad (3.3)$$

де BW – полоса одного радіоканала.

Тривалість передачі блоку даних фізичного рівня розраховується за формулою (3.4) [28]

$$T_{payload} = payloadSymb \cdot T_{sym}. \quad (3.4)$$

Тривалість передачі всього пакета мережі LoRaWAN розраховується за формулою (3.5) [28]

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload}. \quad (3.5)$$

Розрахунок будемо проводити передачі одного UL-пакета (з корисним навантаженням 10 байт) між кінцевим пристроєм (End Node) і сервером додатків (Application Server) [29]. Вихідні значення:

- смуга радіоканалу $BW = 125$ кГц (для $SF7 - SF12$);
- кількість символів у преамбулі $n_{preamble} = 6$ (для $SF7 - SF12$);
- корисні дані ($FRMPayload$) $FRM = 10$ байт (для $SF7 - SF12$);
- фізичний блок даних ($PHYPayload$) $PL = 22$ (для $SF7 - SF12$);
- прапор включення заголовка в пакет $H = 0$ (для $SF7 - SF12$);
- прапор включення CRC у пакет $CRC = 1$ (для $SF7 - SF12$);
- прапор включення оптимізації швидкостей $ADR = 0$ (для $SF7 - SF12$);

– швидкість кодування $CR = 1$ (для $SF7 - SF12$).

Результати розрахунків представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків

Коефіцієнт розширення спектра	SF	7	8	9	10	11	12
Тривалість передачі 1-го символу, мс	T_{sym}	1,03	2,05	4,10	8,20	16,39	32,77
Прапор включення оптимізації швидкостей	ADR	0	0	0	0	1	1
Кількість символів в блоці даних	$payloadSymbNb$	42	33	33	28	28	26
Тривалість передачі преамбули, мс	$T_{preamble}$	10,5	20,99	41,99	83,97	167,94	335,88
Тривалість передачі блока даних	$T_{payload}$	43,01	67,59	135,17	229,38	458,75	851,97
Тривалість передачі усього пакета	T_{packet}	53,51	88,58	177,2	313,3	626,69	1187,97

Для всіх розглянутих випадків незмінними були значення параметрів швидкість кодування $CR = 1$; прапор включення CRC у пакет $CRC = 1$; прапор включення заголовка пакет $H = 0$; фізичний блок даних ($PHYPayload$) $PL = 22$ байт; корисні дані ($FRMPayload$) $FRM = 10$ байт; кількість символів у преамбулі $n_{preamble} = 6$; смуга радіоканалу $BW = 125$ кГц.

Насправді в основному використовується $SF = 12$, оскільки він має найкращу завадозахищеність, з таблиці 3.1 видно, що для даного коефіцієнта

розширення спектра тривалість передачі пакета найбільша і становить 1186,97 мс.

3.2 Розрахунок пропускної здатності мережі LoRaWAN

Всі LoRaWAN-пристрої, включаючи кінцеві, а також БС, використовують довільний (несинхронізований) доступ до загального середовища передачі. У цьому тимчасові інтервали відправлення пакетів плануються кінцевими пристроями з урахуванням потреб. Даний механізм доступу представляє собою протокол типу «pure ALOHA».

Оцінка пропускної спроможності системи «pure ALOHA» визначається за таких припущень:

- дані користувача, призначені для передачі, надходять на термінали випадково, утворюючи пуассонівський потік;
- відкинуті через помилки передачі пакети передаються повторно, утворюючи також пуассонівський потік;
- усі пакети даних мають однакову довжину та передаються однакою час;
- у мережі знаходиться нескінченна кількість віддалених терміналів (при цьому якщо певний термінал вже передає дані, це ніяк не впливає на можливість передачі даних іншими терміналами).

У цьому випадку ймовірність того, що за час передачі одного пакета T надійде ще k пакетів від усіх терміналів мережі, визначається формулою Пуассона (3.6)

$$\Pr(k) = \frac{G^k \cdot e^{-G}}{k!}, \quad (3.6)$$

де G – середня кількість повідомлень передачі, що з'явилося всіх терміналах мережі за час T .

Колізія не виникає, якщо на інтервалі передачі повідомлення, а також на одному попередньому інтервалі не з'являться пакети для передачі від інших кінцевих пристроїв мережі ($k = 0$). Отже, ймовірність успішної передачі становить (3.7) [30]

$$P = e^{-2G}. \quad (3.7)$$

Середня кількість успішно переданих за час T пакетів, тобто пропускна спроможність мережі, становить (3.8) [30]

$$S = G * P. \quad (3.8)$$

Проведемо розрахунок пропускної здатності для проектованої системи за допомогою формул (3.7) і (3.8) для $G =$ від 0 до 1,5 (з кроком 0,1) та побудуємо графік (рис. 3.1).

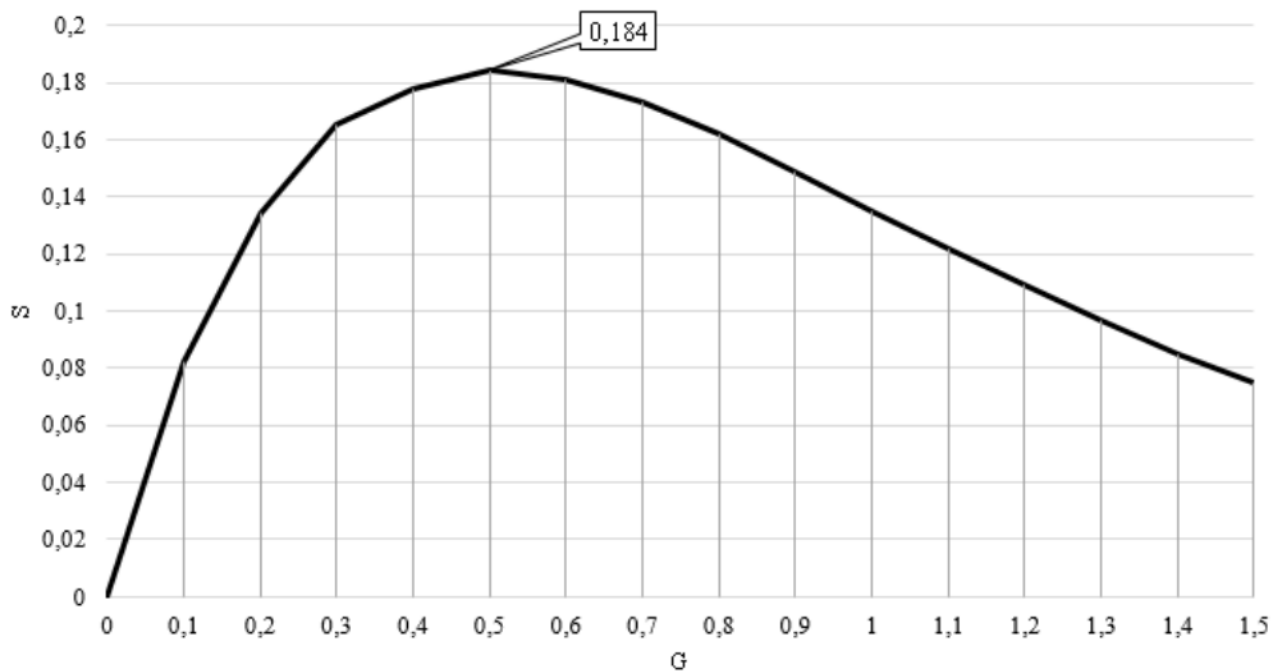


Рисунок 3.1 – Графік пропускної здатності мережі LoRaWAN

Як бачимо на рисунку 3.1, максимальне значення пропускної здатності досягається при інтенсивності надходження пакетів (G), що дорівнює 0,5 і становить 0,184.

Використовуючи формулу (3.7), розрахуємо ймовірність успішної передачі пакетів та побудуємо графік (рис. 3.2).

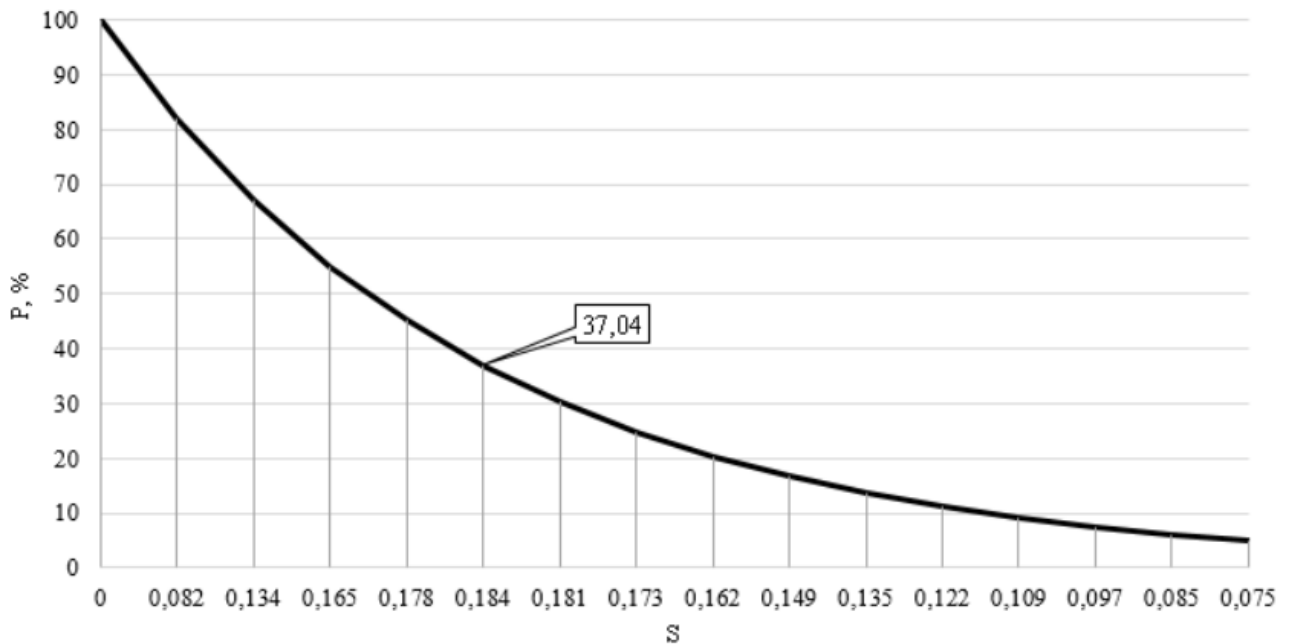


Рисунок 3.2 – Графік залежності успішної передачі пакетів даних від пропускної здатності

Як бачимо на рисунку 3.2, при найбільшому значенні пропускної спроможності мережі ймовірність успішної передачі пакетів через колізію становитиме 37,04%.

3.3 Визначення радіусу дії базової станції LoRa.

LoRa модуляція розширення спектра досягається генеруванням лінійної частотної модуляції (ЛЧМ), яка безперервно змінюється по частоті. Основна перевага цього методу полягає в тому, що синхронізація та зрушення частоти між передавачем та приймачем еквівалентні. Це зменшує складність конструкції

приймача. Широта смуги частот цієї ЛЧМ еквівалентна спектральній ширині смуги сигналу. Бітова швидкість модуляції LoRa (R_b) може бути розрахована за формулою (3.9)

$$R_b = SF \frac{1}{2^{SF}/BW}, \quad (3.9)$$

де SF – коефіцієнт розширення спектру (від 7 до 12);

BW – смуга пропускання каналу, Гц.

Швидкість передачі символів R_s розраховується за формулою (3.10)

$$R_s = \frac{1}{T_{sym}} = \frac{BW}{2^{SF}}. \quad (3.10)$$

А швидкість передачі чіпа R_c може бути визначена за допомогою виразу (3.11)

$$R_c = R_s \cdot 2^{SF}. \quad (3.11)$$

LoRa модуляції також включає змінну схему корекції помилок, що підвищує надійність передачі сигналу за рахунок його надмірності. Таким чином, мінімальна швидкість передачі даних сигналу R_b може бути визначена за формулою (3.12)

$$R_b = SF \frac{4/(4 + CR)}{2^{SF}/BW}, \quad (3.12)$$

де CR – кодова швидкість, яка може бути встановлена на 4/5, 4/6, 4/7 чи 4/8.

Іншим важливим параметром є чутливість приймача, що вказує на найнижчий рівень потужності сигналу LoRa, який приймач може виявити і

демодулювати. На основі керівництва дизайнера LoRaSemTech чутливість приймача LoRaWAN можна розрахувати за формулою (3.13)

$$S = -174 + 10 \log BW + NF + SNR, \quad (3.13)$$

де S – чутливість приймача;

NF – коефіцієнт шуму приймача;

SNR – відношення сигнал/шум для сигналу.

У таблиці 3.2 вказані номінальна швидкість передачі та чутливість приймача для смуги пропускання 125 кГц. Значення R_b та SF розраховані на основі наведених рівнянь.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків

Смуга пропускання, кГц	Коефіцієнт розширення спектра SF	Швидкість передачі R_b , біт/с	Чутливість приймача, дБм
125	7	5469	-123
125	8	3125	-126
125	9	1758	-129
125	10	977	-132
125	11	537	-134
125	12	293	-137

Для значень таблиці 3.2 максимальна дальність зв'язку LoRaWAN становить близько 10 км. Однак у поданому виразі не враховуються радіоперешкоди та перешкоди на шляху розповсюдження сигналу. У міських умовах, де є щільна забудова, можна застосувати модель загасання ITU-RP.1238-5 для приміщень за формулою (3.14) [31]

$$A(d) = 20 \log(f) + N \log(d) + Lf(n) - 28, \quad (3.14)$$

де d – відстань, м;

$N = 33$ – дистанційний коефіцієнт втрат потужності;

f – центральна частота сигналу, МГц;

$Lf(n) = 24$ – коефіцієнт втрат за рахунок проходження сигналу через перешкоду, дБ.

У такому разі потужність сигналу на вході приймача визначатиметься за формулою (3.15)

$$P_{\text{вх}}(d) = P_{\text{вих}} - A(d), \quad (3.15)$$

де $P_{\text{вих}}$ – потужність сигналу на виході передавача, дБм;

$A(d)$ – загасання сигналу від відстані згідно з (3.14).

На рис. 3.3 можна побачити, що при потужності сигналу 137 дБм сигнал досягає відстані приблизно 800 м.

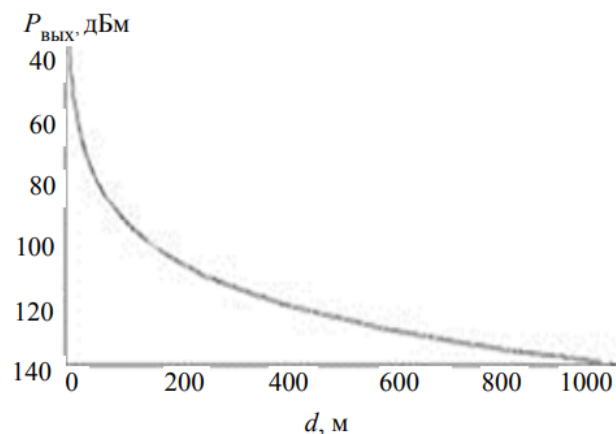


Рисунок 3.3 – Графік залежності потужності сигналу від відстані

В таблиці 3.3 показана залежність різних параметри коефіцієнта розширення спектра SF .

Використовуючи дані з таблиці 3.3, на основі (3.15) можна побудувати графік залежності швидкості передачі даних від відстані (рис. 3.4).

Таблиця 3.3 – Параметри передачі даних

Параметр	Фактор розповсюдження SF					
	7	8	9	10	11	12
Індикатор рівня прийнятого сигналу RSSI, дБм	-123	-126	-129	-132	-134	-137
Швидкість передачі даних, біт/с	5469	3125	1758	977	537	293
Радіус дії базової станції, м	333	410	506	623	716	824

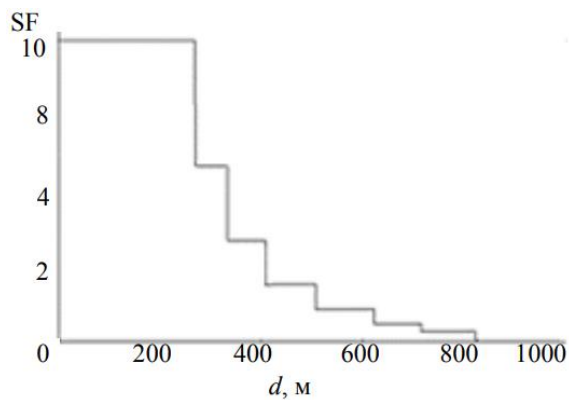


Рисунок 3.4 – Графік залежності швидкості передачі даних від відстані

3.4 Кластеризація вузлів навколо базових станцій за допомогою методів FOREL та K-means

Розглянемо мережу із 20 тис. вузлів на ділянці міста зі сторонами 7 км. Усі вузли розподілені випадково за рівномірним законом розподілу. Максимальний радіус дії шлюзу дорівнює 824 м (табл. 3.3). Для визначення точок розміщення шлюзів використаємо метод кластеризації FOREL.

Цей метод вирішує задачу мінімізації сумарної відстані між центрами мас кластерів та елементами цих кластерів.

$$\{x_i, y_i\} = \operatorname{argmin}_{x_i, y_i} \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^{n_j} d(C_j, e_{j,r}), \quad i = 1 \dots k, \quad (3.16)$$

де $(C_j, e_{j,r})$ – відстань між центром мас j -го кластера C_j і r -м елементом j -го кластера $e_{j,r}$.

Координати центру мас j -го кластера

$$C_j = \{x_j, y_j\}, x_j = \frac{1}{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} x_{j,r}, \quad y_j = \frac{1}{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} y_{j,r}, \quad (3.17)$$

де n_j – кількість елементів у j -му кластері;

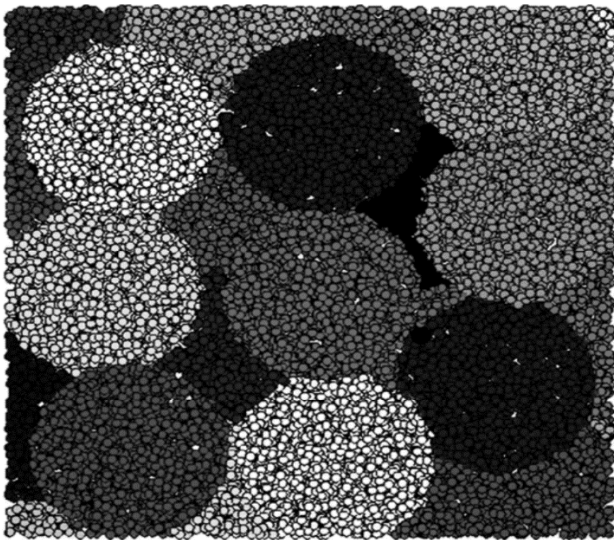
$x_{j,r}, y_{j,r}$ – координати r -го елемента j -го кластера.

При використанні даного алгоритму мінімізується (3.16), у результаті визначаються координати центрів мас кластерів, які можуть бути прийняті як позиції для розміщення шлюзів.

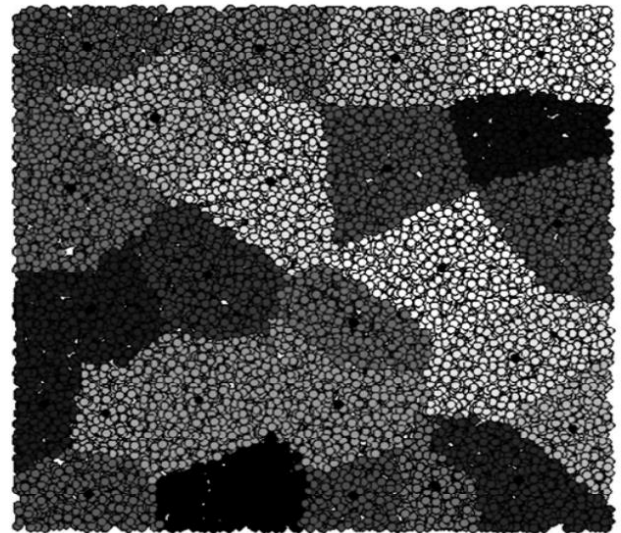
В результаті моделювання методом кластеризації FOREL отримали мережу, що складається з 25 кластерів (базових станцій). Результат такого моделювання проілюстровано на рисунку 3.5, а.

Також було змодельовано кластеризацію мережі методом К-середніх (K-means) [32]. Для 25 БС даний метод розділив мережу на кластери у вигляді, наведеному на рисунку 3.5, б.

На рисунку 3.6 (а – для методу кластеризації К середніх, б – для методу кластеризації FOREL (формальний елемент)) показано відносне розподілення пристроїв IoT розглянутої мережі LoRaWAN для обох розглянутих алгоритмів. Вертикальна вісь, як і на рисунку 3.5, представляє кількість пристроїв IoT, а горизонтальна вказує відносну відстань між пристроєм IoT та центром кластера.

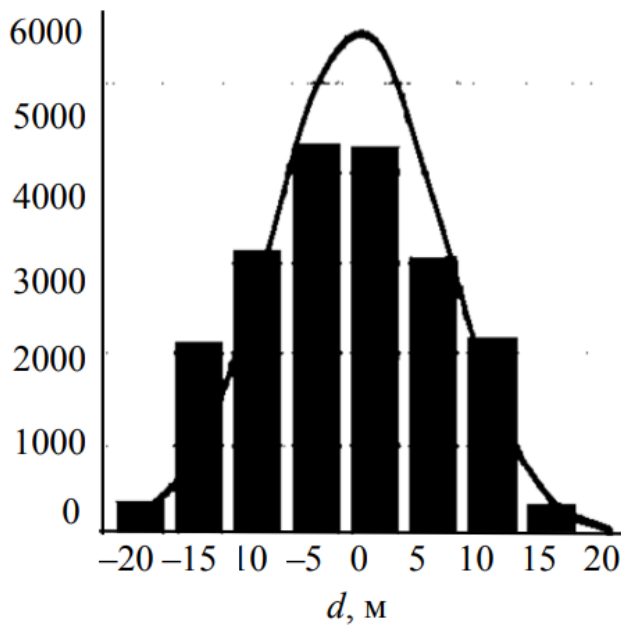


а)

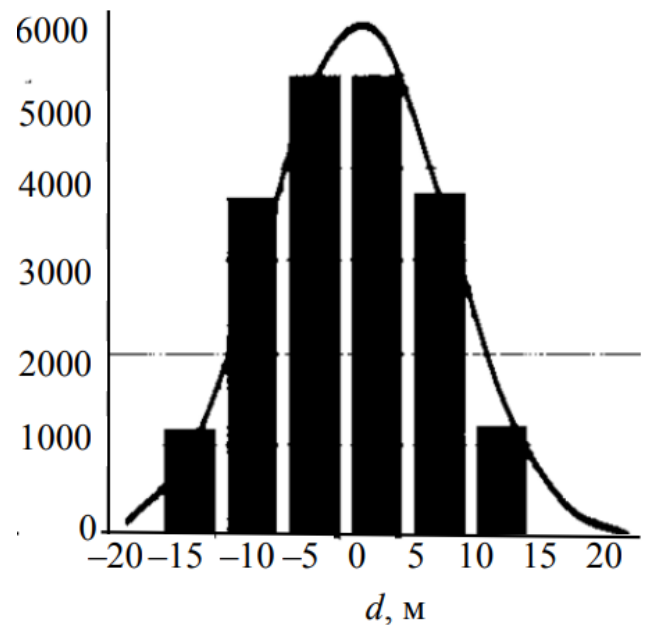


б)

Рисунок 3.5 – Результати моделювання: а) методом кластеризації FOREL;
б) методом кластеризації K-means



а)



б)

Рисунок 3.6 – Відносне розподілення пристроїв IoT розглянутої мережі:
а) для методу кластеризації K-середніх; б) для методу кластеризації FOREL

Вертикальна вісь, як і рисунку 3.5, представляє кількість пристроїв IoT, а горизонтальна вказує відносну відстань між пристроєм IoT та центром кластера. Від'ємне значення відносної відстані на рисунках говорить про те, що пристрій

розташований праворуч від центру кластера. Як бачимо на рисунку 3.6, пристрої IoT в основному розподілені навколо центру кластеру для обох методів кластеризації.

Таким чином, можна визначити середню кількість вузлів у кожній зоні SF відповідно до таблиці 3.3. На рисунку 3.7 показано середню кількість вузлів у кожній зоні SF для різних методів кластеризації: а – для методу К-середніх кластеризації, б – для методу кластеризації FOREL.

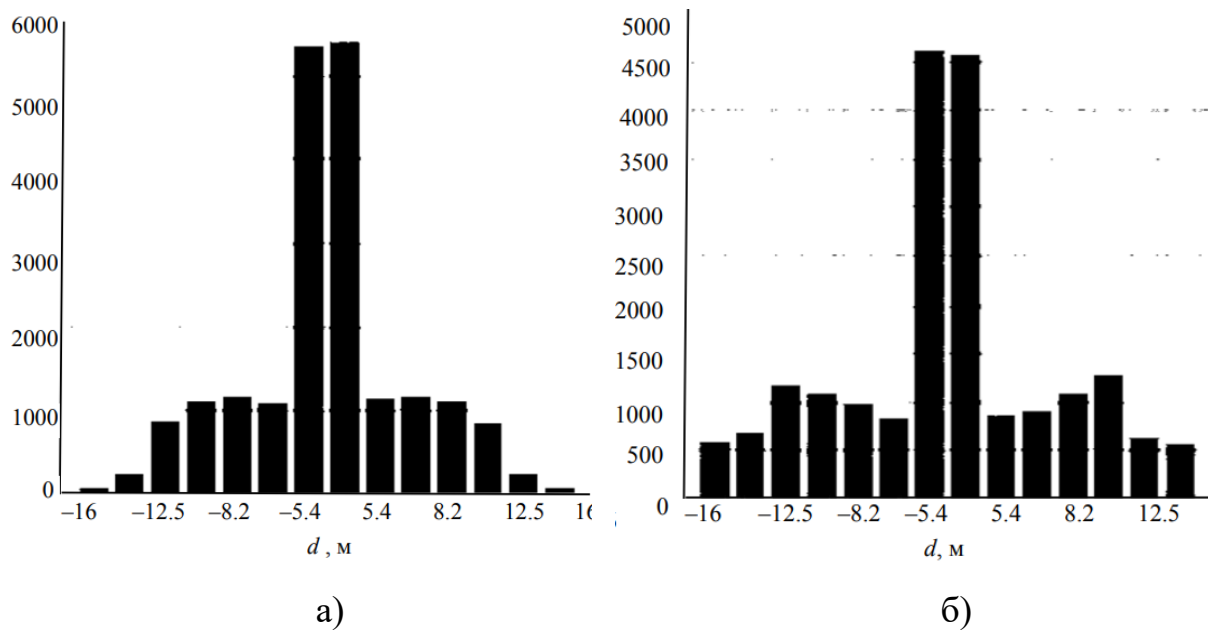


Рисунок 3.7 – Середня кількість вузлів у кожній зоні SF для різних методів кластеризації: а) для методу К-середніх; б) для методу FOREL

3.5 Розрахунок ємності базової станції

Розглянемо мережу LoRa, що працює на частоті 868 МГц зі смугою пропускання 125 кГц. Кількість радіочастотних каналів N_f дорівнює 8. Передбачається, що вузли передають пакети з 8 байт корисного навантаження і преамбулою 6 символів з інтенсивністю передачі 2 пак./год. Допустима ймовірність втрати через колізії $P_{\text{втр}} = 2\%$. Колізія виникає лише тоді, коли два вузли і більше одночасно передають свої пакети з однаковим коефіцієнтом розширення спектра SF.

Час передачі одного пакета розраховується за формулою (3.18)

$$T_{SF} = T_{SF-UL-pack} + T_{SF-DL-pack}, \quad (3.18)$$

де $T_{SF-UL-pack}$ – сумарний час передачі пакета від вузла до БС;

$T_{SF-DL-pack}$ – час передачі пакету з підтвердженням від БС до вузла.

Коефіцієнт розширення спектра визначається з допомогою (3.18) при використанні даних з таблиці 3.1.

Продуктивність БС LoRa, тобто кількість пакетів, які обслуговує шлюз на добу, визначається виразом (3.19)

$$\text{Пропускна здатність} = N_f \sum_{SF} P_{SF} \frac{N_{EN\text{пак}} \cdot 3600 \lambda_{2\%}}{T_{SF}}, \quad (3.19)$$

де $N_{EN\text{пак}}$ – кількість пакетів, що передаються одним кінцевим вузлом на добу;

$\lambda = 0,01$ – інтенсивність надходження пакетів при $P_{\text{втр}} = 2\%$;

P_{SF} – можливість використання відповідного SF;

N_f – загальна кількість радіоканалів, розгорнутих мережею LoRaWAN.

Розрахуємо ємність базової станції LoRa для двох розглянутих методів кластеризації, де по-різному розподілені вузли за площею зон радіопокриття.

На рисунку 3.8 показана ймовірність використання вузлів у різних зонах SF при їх розподілі за методом FOREL, яка дорівнює (45,96 %; 8,54 %; 9,47 %; 11 %; 12,34 %; 6,7 %), а для методу К-середніх вона становитиме (53,75 %; 11,25 %; 11,76 %; 11,24 %; 8,7 %; 2,3 %).

Використовуючи (3.19) та дані таблиці 3.1, можна обчислити ємність БС LoRa для кожного з методів кластеризації і, відповідно, кількість кінцевих вузлів на одну БС. Результати розрахунку ємності БС LoRa наведено у таблиці 3.4.

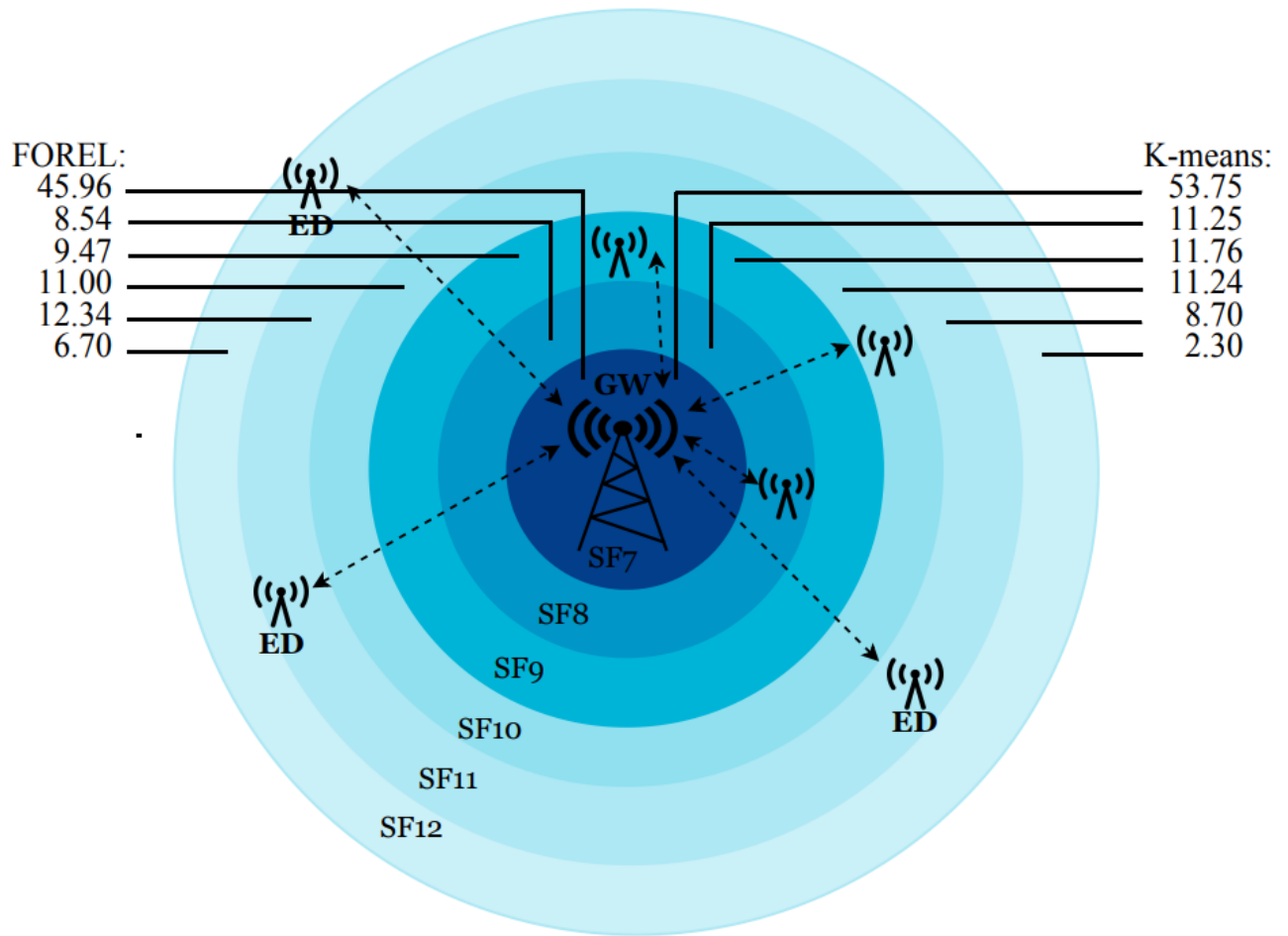


Рисунок 3.8 – Ймовірність використання вузлів у різних зонах SF при їх розподілі двома методами кластеризації

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку ємності БС

Метод кластеризації	$N_{\text{ЕНпак}}$ на добу	Інтенсивність потоку λ при $P_{\text{втр}} = 2\%$	Кількість пакетів на добу	Кількість пристроїв на одну БС
FOREL	24	0,01	79223	3300
K-means	24	0,01	92292	3845

3.6 Розрахунок кількості базових станцій

Проаналізувавши результати вищевказаних розрахунків (табл. 3.4), можна зробити висновок, що для обслуговування 20 тис. кінцевих вузлів з розглянутими характеристиками достатньо 5 або 6 базових станцій (при кластеризації методом K-means або FOREL відповідно). Але слід звернути увагу на те, що радіус дії БС не дозволяє покрити цією кількістю базових станцій всю мережу.

Тому для визначення достатньої кількості БС для повного покриття заданої площі ділянки міста (7 км на 7 км) скористаємося альтернативною формулою розрахунку кількості базових станцій (3.20)

$$N_{\text{БС}} = \frac{2S}{R_{\text{БС}}^2 \cdot 3\sqrt{3}}, \quad (3.20)$$

де S – площа заданої ділянки, км²;

$R_{\text{БС}}$ – радіус дії базової станції, км.

Виконаємо обчислення кількості БС:

$$N_{\text{БС}} = \frac{2 \cdot 49}{0,824^2 \cdot 3\sqrt{3}} = 27.$$

Розраховано, що достатня кількість БС для повного покриття заданої площі ділянки міста становить 27 одиниць.

Отже, результати моделювання методами кластеризації FOREL та K-середніх під час якого створено мережу, що має в своєму складі 25 БС, можна вважати коректними та оптимальними для побудови даної БСМ.

Крім цього, слід зазначити, що за такої кількості БС, розміщених на даній території, також збільшиться число кінцевих вузлів з 20 тис. одиниць до 90 тис. одиниць.

3.7 Висновки до розділу

У третьому розділі проведено моделювання бездротової сенсорної мережі за допомогою методів кластеризації FOREL та K-means. Для здійснення моделювання попередньо були виконані розрахунки наступних параметрів бездротової сенсорної мережі: часу передачі одного пакета даних через радіоінтерфейс LoRaWAN, пропускної здатності мережі, радіусу дії базової станції LoRa, потужність сигналу та втрати на лінії в умовах щільної міської забудови за моделлю згасання ITU-RP.1238-5.

Результати моделювання дали можливість розрахувати ємність базової станції LoRa для двох розглянутих методів кластеризації і, відповідно, кількість кінцевих вузлів на одну базову станцію.

Проаналізувавши результати проведених розрахунків та моделювання бездротової сенсорної мережі, стало можливим визначення необхідної кількості базових станцій LoRa для охоплення системою ділянки міста з щільною забудовою розміром 7 км на 7 км.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці в лабораторії

Приміщення, де ведеться проектування, являє собою лабораторію. Площа даного приміщення становить – 35 м^2 , об'єм – 105 м^3 , має чотири робочих місця. Розміри приміщення $5 \text{ м} \times 7 \text{ м} \times 3 \text{ м}$.

Електроживлення здійснюється від трифазної мережі з глухозаземленою нейтраллю та напругою 220 В , з частотою 50 Гц .

Для забезпечення нормальних умов праці ДСанПіН 3.3.2–007–98 встановлює на одне робоче місце площу виробничого приміщення не менше 6 м^2 , висота приміщення повинна бути не менше $3,2 \text{ м}$, об'єм повітряного простору 20 м^3 . В даному випадку реальна площа на одного працюючого становить 10 м^2 , об'єм – 25 м^3 , що відповідає санітарним нормам.

Розглядаючи людину в нерозривному зв'язку і в безперервній взаємодії з навколишнім середовищем, як об'єкт вивчення можна виділити систему «Людина-машина-середовище» («Л-М-С»), а предметом вивчення – небезпеки і їх вплив на людину в процесі функціонування і розвитку системи «Л-М-С». Головним в системі «Л-М-С» є безпека людини.

Згідно ДСТУ 12.0.003–74 можна виділити небезпечні та шкідливі виробничі фактори в приміщенні.

Фізичні:

- підвищена рухливість повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищення значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини.

Психофізіологічні:

- фізичні (статичні) перевантаження;

- розумове перенапруження;
- перенапруження зорових аналізаторів.

4.2 Промислова безпека в лабораторії

Електричне живлення устаткування здійснюється від трифазної мережі з глухозаземленою нейтраллю напругою 220 В, частотою 50 Гц. Захист персоналу від ураження електричним струмом, необхідно здійснювати за допомогою занулення НПАОП 40.1–1.32–01. Для цього треба з'єднати металеві неструмоведучі частини обладнання з нульовим дротом мережі, за допомогою алюмінієвого дроту, перетин якого дорівнювати перерізу фазного дрота мережі.

При замиканні фази на занулення корпус електроустановки автоматично відключається, якщо значення струму однофазного короткого замикання I_k , А, задовольняє умові [33]

$$I_k \geq kI_{\text{ном}}, \quad (4.1)$$

де $I_{\text{ном}}$ – номінальний струм плавкої вставки запобіжника або струм спрацьовування автоматичного вимикача, А;

k – коефіцієнт кратності струму.

Він приймається в залежності від типу захисту електроустановки. Якщо захист здійснюється автоматичним вимикачем, що має тільки електромагнітне відсічення, тобто, який спрацьовує без витримки часу, то $k = 1,25$. Якщо установка захищена плавкими запобіжниками, час перегорання яких залежить від величини струму, то $k \geq 3$ (у вибухонебезпечних приміщеннях ≥ 4) [33].

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\Pi}}, \quad (4.2)$$

де $\frac{Z_T}{3}$ – повний опір обмоток трансформатора, визначається з [33], виходячи з потужності трансформатора, $\frac{Z_T}{3} = 0,075 \text{ Ом}$;

Z_{Π} – опір петлі "фаза-нуль", $Z_{\Pi} = 0,8 \text{ Ом}$.

Розрахуємо $I_{\text{кз}}$ за формулою (4.2)

$$I_{\text{кз}} = \frac{220}{0,075 + 0,8} = 251 \text{ А}.$$

З умови формули (4.1)

$$I_{\text{н}} \leq \frac{I_{\text{кз}}}{k}, \quad (4.3)$$

де $k = 1,25$ – коефіцієнт кратності струму.

$$I_{\text{н}} \leq \frac{251}{1,25} = 200 \text{ А}.$$

Вибираємо автоматичний вимикач TemBreak від 50 А до 250 А у якого, $I_{\text{н}} = 100 \text{ А}$, який має тільки напівпровідниковий розчеплювач (відсічення).

Відповідно до НПАОП 0.00–4.12–05, всі працівники проходять інструктажі з охорони праці: вступний, первинний на робочому місці, повторний і, при необхідності, позаплановий та цільовий.

ВИСНОВКИ

Головною метою кваліфікаційної роботи є забезпечення якісного контролю енерговитрат на об'єктах житлово-комунального сектору, оскільки сучасний стан житлово-комунального сектору України потребує інноваційних підходів у технологічних аспектах енергоменеджменту.

Досліджувана концепція автоматизованої системи управління ресурсами на базі бездротових сенсорних мереж служить для модернізації системи обліку побутових абонентів та технічного обслуговування внутрішньобудинкових мереж енергопостачання, управління постачанням енергоресурсів та інформаційного обслуговування споживачів енергопостачальної компанії.

Враховуючи нинішню складну економічну ситуацію в Україні, що склалася у воєнний час, виникла необхідність ініціювати режим раціонального та економного використання енергоресурсів. Тому об'єктом дослідження визначено процес контролю витрат ресурсів на об'єктах житлово-комунального господарства.

Сучасним методом вирішення проблеми регулювання витрати енергоносіїв є створення автоматизованої системи управління ресурсами (АСУР) на базі бездротових сенсорних мереж з можливістю дистанційного моніторингу енерговитрат та зберігання отриманої інформації у базі даних незалежного сервісного центру енергоаудиту та контролю.

Таким чином, об'єднання функціонально різних бездротових пристроїв (лічильники, датчики, сенсори) в єдину систему обліку та управління енергоспоживанням відповідає світовій тенденції побудови «розумних мереж» на об'єктах житлово-комунального господарства, що ґрунтуються на принципах енергозбереження та енергоефективності.

У першому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто особливості будови та функціонування бездротових сенсорних мереж. Визначено поняття бездротової сенсорної мережі, її основних компонентів та їх функціональні

особливості. Розглянуто класифікацію бездротових сенсорних мереж, різновиди та особливості їх топології.

Проаналізовано сучасні автоматизовані системи управління ресурсами, досліджено їх структуру, технічні параметри, функціональні можливості та особливості їх використання, а також виявлено переваги та недоліки цих систем.

Переважно всі сучасні системи контролю витрат води являють собою комплекс функціонально об'єднаних технічних засобів і програмного забезпечення та мають у своєму складі сенсорні вузли (витратоміри, лічильники) з вбудованими пристроями збору та передачі даних на базі бездротових технологій (Wi-Fi, GSM, LoRa, NB-IoT та ін.), що надсилають інформацію до блоків керування та передачі даних (шлюзів або базових станцій), які зчитують, обробляють та передають результати вимірів витратомірів на мережевий сервер для подальшого надання зовнішнім програмним додаткам, включаючи автоматизовані робочі місця диспетчерського керування.

Також у цьому розділі розглянуто основні сучасні технології та стандарти бездротової передачі інформації. Проведено їх порівняльний аналіз і визначено основні переваги та недоліки при використанні їх в існуючих сучасних комерційних бездротових системах моніторингу та управління енергоресурсами, представлені на українському ринку.

Для досягнення поставленої мети проведено аналіз предмета досліджень, а саме розроблення автоматизованої системи управління ресурсами для комунального сектора на базі бездротових сенсорних мереж.

У другому розділі проведено загальний опис розроблюваної автоматизованої системи управління ресурсами, визначено її склад та основні задачі, а також встановлено технічні вимоги до неї. Далі обрано технологію бездротової передачі даних на основі якої буде побудована розроблювана автоматизована система управління ресурсами. Для цього було проведено глибокий порівняльний аналіз найефективніших сучасних бездротових технологій для побудови такої системи – LoRaWAN та NB-IoT. В результаті, для створення автоматизованої системи управління ресурсами обрано технологію

LoRaWAN, яка виявилась оптимальнішою за більшістю поставлених перед нею технічних вимог, а саме:

- енергоефективність;
- великий радіус дії;
- надійність;
- простота розгортання;
- невисока вартість модулів;
- захищеність;
- термін служби батареї;
- велика кількість вузлів у мережі.

Крім того, у даному розділі розроблено структурну схему автоматизованої системи управління ресурсами та визначено функціональні задачі кожного елемента системи. Побудовано алгоритм функціонування системи, наведено послідовність його етапів та суті процесів, що відбуваються на кожному з них.

Також здійснено підбір елементної бази АСУР на основі технічних вимог до неї та з урахуванням обраної технології бездротового з'єднання LoRaWAN.

У третьому розділі проведено моделювання бездротової сенсорної мережі за допомогою методів кластеризації FOREL та K-means. Для здійснення моделювання попередньо були виконані розрахунки наступних параметрів бездротової сенсорної мережі: часу передачі одного пакета даних через радіоінтерфейс LoRaWAN, пропускну здатності мережі, радіусу дії базової станції LoRa, потужність сигналу та втрати на лінії в умовах щільної міської забудови за моделлю згасання ITU-RP.1238-5.

Результати моделювання дали можливість розрахувати ємність базової станції LoRa для двох розглянутих методів кластеризації і, відповідно, кількість кінцевих вузлів на одну базову станцію.

Проаналізувавши результати проведених розрахунків та моделювання бездротової сенсорної мережі, стало можливим визначення необхідної кількості базових станцій LoRa для охоплення системою ділянки міста з щільною забудовою розміром 7 км на 7 км.

Під час аналізу предмета розробки виникли проблемні питання, серед яких слід виділити наступні.

По-перше, значне обмеження дальності дії мережі LoRaWAN в умовах високої щільності міської забудови. Заявлений розробниками радіус дії пристроїв LoRaWAN становить більше 10 км, але на практиці виявляється, що ця величина в умовах міської забудови зменшується до 1,5 км або 2 км, а в окремих випадках до 500 м. Це відбувається через стрімке згасання радіосигналу під час його поширення крізь матеріали великої кількості будівель (бетон, цегла, залізо та скло). В результаті для вирішення даної проблеми необхідно збільшувати кількість базових станцій та щільність їх розміщення, що в свою чергу збільшує вартість розгортання мережі LoRaWAN у містах.

По-друге, під перед розгортанням системи необхідно проводити моделювання радіопокриття для визначення необхідної кількості базових станцій та максимальної кількості сенсорних вузлів яку зможе підтримувати мережа. Крім того, під час безпосереднього розгортання мережі необхідно враховувати рельєф місцевості, адже базові станції повинні бути розміщені на домінуючих висотах району та вище рівня розміщення сенсорних вузлів. Бажано також, аби кожен вузол знаходився в радіусі дії двох базових станцій.

По-третє, серйозною причиною завад у радіозв'язку мережі можуть стати розміщені поряд з LoRaWAN-пристроями стільникові антени GSM-900. Вирішення цієї проблеми можна досягти шляхом віддалення базових станцій та сенсорних вузлів мережі LoRaWAN від антен GSM-900 на відстань 100 м.

В подальшому можливе удосконалення автоматизованої системи управління ресурсами шляхом модернізації, розширення її функціоналу та підвищення загальної ефективності. Досягти цього можна за рахунок додавання до системи додаткових видів сенсорних вузлів (пристроїв керування вентиляцією, освітленням, пожежної сигналізації, датчиків протікання і т. і.), розширення та оптимізації програмного забезпечення, додавання резервних засобів живлення та заміни штатних антен на більш потужні.

Таким чином, завдання кваліфікаційної роботи вирішено. Мета роботи, що

полягала у забезпеченні якісного контролю енерговитрат на об'єктах житлово-комунального сектора досягнута завдяки розробленій автоматизованій системі управління ресурсами, використання якої дає змогу контролювати їх об'єм, проводити моніторинг та аналіз даних про енерговитрати, керувати всією мережею енергопостачання як єдиною системою, що особливо необхідно в умовах воєнного часу. Це в свою чергу дозволить раціоналізувати споживання ресурсів побутовими споживачами, а це означає, що їх фінансові витрати за енергопостачання зменшаться, а рівень економії енергоресурсів у державі загалом – зросте. Отже, з вищесказаного можна зробити висновок, що задача розробки автоматизованої системи управління ресурсами для комунального сектора на базі бездротових сенсорних мереж є актуальною.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. A. Sliusar Resource Management System for of the Utility Sector at The Base Wireless Sensor Networks // Manufacturing & Mechatronic Systems 2022: Proceedings of VIst International Conference, (Kharkiv, October 21-22, 2022). – P. 78-80

2. Невлюдов, І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2018 - 320с.

3. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

4. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки, структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

5. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://tapr.nure.ua>. – 25.10.2022.

6. Recommendation Y.2060. Overview of Internet of Things. ITU-T, Geneva. – February 2018.

7. #Сенсор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://indicator.com/label/sensor>. – 25.10.2022.

8. I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine. 40 (8) (2020) 102–114.
9. Бездротові сенсорні мережі [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://ozlib.com/950124/tehnika/besprovodnye_sensornye_seti. – 25.10.2022.
10. Гольдштейн, Б.С. Мережі зв'язку – NGN / Б.С. Гольдштейн, А.Е. Кучерявий // БХВ – 2017.
11. Кучерявий Е.А. Принципи побудови сенсорів і бездротових сенсорних мереж / Е.А. Кучерявий, С.А. Молчан, В.В. Кондрат'єв // Електрозв'язок. – 2019. № 6.
12. Алгулієв Р.М. Сенсорні мережі: стан, рішення і перспективи / Р.М.Алгулієв, Т.Х. Фаталієв, Б.С. Агаєв, Т.С. Алієв // ISSN 1684-2588 Телекомунікації. Щомісячний науково-технічний інформаційно-аналітичний і навчально-методичний журнал. – 2018. – № 4. – С. 27–32.
13. Варгаузін В. Радіомережі для збору даних від сенсорів, моніторингу і управління на основі стандарту IEEE 802.15.4 / В. Варгаузін // ТелеМультиМедіа. – 20021. – № 6.
14. Горяєва С.Н. Особливості побудови сенсорних мереж / С.Н. Горяєва // 2-а міжнародна наукова конференція «Сучасні інформаційні системи. Проблеми та тенденції розвитку.»: Зб. матеріалів конференції – Х.: ХНУРЕ, – 2017. – С. 145–146.
15. Akyildiz I.F. Wireless Sensor Networks /I.F. Akyildiz// Tutorial at IEEE INFOCOM. – 2020. – March 14.
16. Загальні відомості про WiFi [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://1234g.com/wifi/obshchie-svedeniya-o-wifi>. – 25.10.2022
17. Огляд технології LoRaWAN [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.atiko.com.ua/articles/obzor-tekhnologii-lorawan/>. – 22.10.2022
18. Про нас [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://smartico.biz/o-nac/>. – 26.10.2022

19. Енергоменеджмент [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://yasno.com.ua/business/energymanagement>. – 26.10.2022
20. Multitech [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.multitech.com>. – 27.10.2022
21. W1063 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://eu.mouser.com>. – 28.10.2022
22. Metromatic-ws-ll [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nasys.no/product/metromatic-ws-ll/>. – 28.10.2022
23. Ultrasonic gas meter [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://smartico.biz/ultrasonic-gas-meter/>. – 28.10.2022
24. Hydrocal M4 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.bmeters.com/uk/products/hydrocal-m4/>. – 30.10.2022
25. Радіомодуль інтерфейсний [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://jooby.eu/uk/rdc/radiomodul-interfejsnij/>. – 30.10.2022
26. Neumann P., Montavont J.; Noël T. Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study // Proc. of the 2016 IEEE 12th Intern. Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), New York, NY, USA, 2016. P. 1–8.
27. Semtech wireless&sensing products: SX1276/77/78/79 datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://vltiq.com/datasheets/SX1276-lora-module.pdf>. – 15.11.2022
28. N. Sornin (Semtech), M. Luis (Semtech), T. Eirich (IBM), T. Kramp (IBM), O. Hersent (Actility). LoRaWAN™ Specification, V1.0. LoRa Alliance, 2019 January
29. Гусєв О. Експеримент із створення системи моніторингу господарських об'єктів з використанням LoRaWAN // Бездротові технології. 2016. №2.
30. Mo Y. et al. Optimization of the predefined number of replications in a Ultra Narrow Band based IoT network // 2016 Wireless Days (WD). IEEE, 2016. P. 1–6.
31. ITU-R P.1238-5 Recommendations. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900MHz to 100GHz. [Електронний ресурс] – Режим

доступу до ресурсу: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC.1238-3-200304-S!!PDF-E.pdf. – 25.11.2022

32. Kim J.-O., Mueller C. W. Factor analysis: Statistical methods and practical issues. USA: Sage Publications, Newbury Park, Calif, 1978.

33. ДСТУ 12.1.009–95. Електробезпека. Терміни та визначення. – Офіц. вид. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 8 с.