

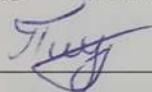
Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії  
Кафедра обчислювальної техніки

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

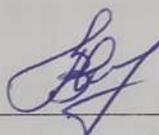
### ІОТ-ІНФРАСТРУКТУРА МЕРЕЖІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Виконав студент 2 курсу, групи ІКІ-24м  
Спеціальності 123 — Комп'ютерна інженерія



Півнюк М. П.

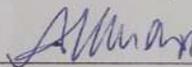
Керівник к.т.н., доц. каф. ОТ



Богомолов С. В.

"10" 12 2025 р.

Опонент к.ф.-м.н., проф. каф. МБІС



Шиян А. А.

"10" 12 2025 р.

Допущено до захисту

завідувач кафедри ОТ

д.т.н., проф. Азаров О.Д.



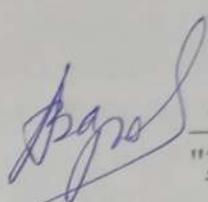
"19" 12 2025 р.

# ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії  
Кафедра обчислювальної техніки  
Галузь знань — Інформаційні технології  
Освітній рівень — магістр  
Спеціальність — 123 Комп'ютерна інженерія  
Освітньо-професійна програма — Комп'ютерна інженерія

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
обчислювальної техніки

  
проф., д.т.н. Азаров О.Д.  
"25" \_\_\_\_\_ 09 \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Півнюку Миколі Павловичу

1 Тема роботи «IoT-інфраструктура мережі із застосуванням штучного інтелекту» керівник роботи Богомолів Сергій Віталійович к.т.н., доцент, затверджено наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 року № 313.

2 Строк подання студентом роботи 04.12.2025

3 Вихідні дані до роботи: параметри енергоспоживання кінцевих IoT-пристроїв, структура та параметри нейронної мережі для прогнозування, програмні модулі та функції для моделювання в Matlab/Simulink, сценарії тестування та моделювання, вхідні дані для побудови структурної схеми IoT-інфраструктури та симуляції її енергоефективності.

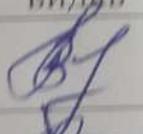
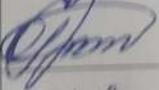
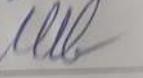
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, огляд та аналіз підходів до створення IoT-інфраструктури, підходи й технології для побудови iot інфраструктури мережі, метод побудови IoT інфраструктури для мереж із інтеграцією Big Data,

експериментальні дослідження та тестування IoT-інфраструктури мережі засобами штучного інтелекту, висновки, перелік джерел посилання, додатки.

5 Перелік графічного матеріалу: загальна архітектура IoT, архітектура сенсорної мережі IoT, IoT та архітектура великих даних.

6 Консультанти розділів роботи приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 — Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	Богомолов Сергій Віталійович к.т.н., доцент		
5	Ратушняк Ольга Георгіївна к.т.н., доцент		
Нормоконтроль	Швець Сергій Ілліч асистент каф. ОТ		

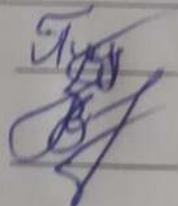
7 Дата видачі завдання 25.09.2025

8 Календарний план виконання МКР приведений в таблиці 2.

Таблиця 2 — Календарний план

№ з/п	Назва етапів МКР	Строк виконання	Примітка
1	Постановка задачі	10.09.2025	виконано
2	Огляд та аналіз підходів до створення IoT інфраструктури	17.09.2025	виконано
3	підходи й технології для побудови iot інфраструктури мережі	26.09.2025	виконано
4	Метод побудови IoT інфраструктури для мереж із інтеграцією Big Data	01.10.2025	виконано
5	Експериментальні дослідження та тестування IoT-інфраструктури мережі засобами штучного інтелекту	03.10.2025	виконано
6	Розрахунок економічної частини	15.10.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	17.10.2025	виконано
8	Перевірка якості виконання роботи	25.10.2025	виконано
9	Підписи супроводжувальних документів	03.11.2025	виконано
10	Перевірка «антиплагіат»	05.11.2025	виконано
12	Попередній захист	10.11.2025	виконано

Студент



Микола ПІВНІОК

Керівник

Сергій БОГОМОЛОВ

## АНОТАЦІЯ

УДК 004.056.53

Півнюк М. П. IoT-інфраструктура мережі із застосуванням штучного інтелекту. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 123 — Комп'ютерна Інженерія, Вінниця: ВНТУ, 2025 — 123 с. На укр. мові. Бібліогр.: 24 назв; рис.: 36; табл. 16.

У роботі розглянуто принципи побудови IoT-інфраструктури для сенсорних мереж із інтеграцією засобів штучного інтелекту та Big Data. Проведено аналіз сучасних підходів до організації сенсорних мереж, зокрема виявлено обмеження традиційних методів обробки даних та управління енергоспоживанням. Штучний інтелект використовується для оцінки стану сенсорних вузлів, прогнозування їх поведінки та виявлення потенційних проблем, а також для оптимізації енергетичної ефективності та підвищення автономності пристроїв. Запропоновано комплексний підхід, який поєднує збір і обробку даних у реальному часі з прогнозуванням стану мережі за допомогою AI-алгоритмів. Розроблено структурну та функціональну схеми IoT-інфраструктури, а також алгоритми, що реалізують запропонований метод.

Ключові слова: IoT-інфраструктура, сенсорні мережі, штучний інтелект, Big Data, оцінка стану вузлів, енергетична ефективність, автономність пристроїв, інтелектуальні системи.

## **ABSTRACT**

Pivnyuk M. P. IoT Infrastructure of Networks with Artificial Intelligence Integration. Master's Thesis in the specialty 123 — Computer Engineering, Vinnytsia: VNTU, 2025 — 123 pages. Language: Ukrainian. Bibliography: 24 sources; figures: 36; tables: 16.

The thesis examines the principles of building an IoT infrastructure for sensor networks with the integration of artificial intelligence (AI) and Big Data technologies. The study analyzes current approaches to organizing sensor networks, identifying the limitations of traditional data processing methods and energy management techniques. Artificial intelligence is applied for assessing the state of sensor nodes, predicting their behavior, and detecting potential issues, as well as for optimizing energy efficiency and enhancing device autonomy. A comprehensive approach is proposed, combining real-time data collection and processing with AI-based network state prediction. Structural and functional schemes of the IoT infrastructure have been developed, along with algorithms that implement the proposed methods.

Keywords: IoT infrastructure, sensor networks, artificial intelligence, Big Data, node state assessment, energy efficiency, device autonomy, intelligent systems.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ</b> .....	4
<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО СТВОРЕННЯ ІОТ-ІНФРАСТРУКТУРИ</b> .....	7
1.1 Поняття Інтернету речей та особливості функціонування сенсорних мереж .....	7
1.2 Концепції та архітектурні підходи побудови IoT-рішень.....	18
<b>2 ПІДХОДИ Й ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ ІОТ-ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖІ</b> .....	24
2.1 Підходи до побудови IoT-систем та особливості їх використання .....	24
2.2 Технології Big Data для інтеграції IoT у сенсорні мережі .....	28
<b>3 МЕТОД ПОБУДОВИ ІОТ-ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ МЕРЕЖ ІЗ ІНТЕГРАЦІЄЮ BIG DATA</b> .....	46
3.1 Порівняння технологічних рішень .....	46
3.2 Структурна схема IoT-інфраструктури.....	56
3.3 IoT-інфраструктура з інтеграцією Big Data.....	61
3.4 Математична модель IoT- інфраструктури .....	64
3.5 Задача енергоефективності та її вирішення .....	69
<b>4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ІОТ-ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖІ ЗАСОБАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ</b>	75
4.1 Аналіз енергоспоживання кінцевих пристроїв .....	75
4.2 Комп'ютерна реалізація математичної моделі.....	79
4.2 Порівняльний аналіз результатів моделювання .....	87
<b>5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ</b> .....	90
5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	90
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи .....	98
5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки .....	106
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності	107

<b>ВИСНОВКИ</b> .....	110
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ</b> .....	112
<b>ДОДАТОК А</b> Технічне завдання .....	115
<b>ДОДАТОК Б</b> Протокол перевірки на плагіат .....	120
<b>ДОДАТОК В</b> Графічні матеріали .....	121

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AMQP — Advanced Message Queuing Protocol  
AWS — Amazon Web Services  
BLE — Bluetooth Low Energy  
CoAP — Constrained Application Protocol  
DBA — Database Administrator  
EMR — Elastic MapReduce  
HDFS — Hadoop Distributed File System  
HPE — Hewlett Packard Enterprise  
IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers  
IETF — Internet Engineering Task Force  
IIoT — Industrial Internet of Things  
IoT — Internet of Things (Інтернет Речей)  
LoRaWAN — Long Range Wide Area Network  
MAS — Multi-Agent System  
SQL — Structured Query Language  
UID — User Identifier  
WAN — Wide Area Network  
WPAN — Wireless Personal Area Network  
АЦП — аналого-цифровий перетворювач  
БСМ — безпроводова сенсорна мережа  
ЕБ — ексабайти  
ОС — операційна система  
ПБ — петабайти  
ТБ — терабайти  
ТЕЦ — теплоелектроцентраль  
ЦОД — центр обробки даних  
ШІ — штучний інтелект

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження** обумовлена стрімким розвитком Інтернету речей та зростаючим впровадженням сенсорних мереж у різних сферах діяльності, зокрема в промислових системах, енергетиці, транспорті, житлово-комунальному господарстві та системах моніторингу навколишнього середовища. Збільшення кількості IoT-пристроїв і обсягів даних, що генеруються ними, призводить до формування складних IoT-інфраструктур, для яких характерні високі вимоги до масштабованості, надійності, продуктивності та енергоефективності.

Традиційні підходи до побудови сенсорних мереж і обробки даних не завжди забезпечують ефективну роботу в умовах великих потоків інформації, обмежених обчислювальних ресурсів кінцевих пристроїв та необхідності тривалої автономної роботи. У зв'язку з цим актуальним є застосування технологій Big Data та методів штучного інтелекту, які дозволяють виконувати інтелектуальний аналіз даних, оцінювати стан елементів мережі, прогнозувати їхню поведінку та оптимізувати енергоспоживання IoT-інфраструктури.

**Метою роботи** є розробка методу побудови IoT-інфраструктури сенсорної мережі із застосуванням технологій Big Data та засобів штучного інтелекту для аналізу даних і оцінки енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати поняття Інтернету речей та особливості функціонування сенсорних мереж;
- дослідити сучасні концепції та архітектурні підходи побудови IoT-інфраструктур;
- розглянути підходи й технології інтеграції Big Data в IoT-системи;
- розробити структурну схему IoT-інфраструктури сенсорної мережі;
- побудувати математичну модель IoT-інфраструктури та сформулювати задачу оцінки енергоефективності;

— виконати комп'ютерне моделювання та провести порівняльний аналіз отриманих результатів з використанням методів штучного інтелекту.

**Об'єктом дослідження** є процес функціонування IoT-інфраструктури сенсорних мереж.

**Предметом дослідження** є методи, моделі та алгоритми побудови IoT-інфраструктури з інтеграцією технологій Big Data та застосуванням засобів штучного інтелекту.

У процесі виконання роботи використано **методи дослідження:**

— системного аналізу;

— математичного моделювання;

— статистичної обробки даних;

— комп'ютерного моделювання та методи штучного інтелекту.

**Наукова новизна** роботи полягає у розробці методу побудови IoT-інфраструктури сенсорної мережі з використанням технологій Big Data та алгоритмів штучного інтелекту для оцінки енергоефективності та прогнозування стану мережевих вузлів.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в можливості застосування запропонованого підходу під час проектування та експлуатації IoT-інфраструктур сенсорних мереж з метою підвищення їх автономності, надійності та ефективності використання ресурсів.

**Апробація результатів роботи** здійснена в доповіді на Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)».

Матеріали роботи опубліковувались [1]: Богомолів С. В., Півнюк М. П., Степанюк Д. В. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОТОКОЛІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ДЛЯ СИСТЕМ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ ІОТ-ПРИСТРОЇВ. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026). Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/view>

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО СТВОРЕННЯ ІОТ-ІНФРАСТРУКТУРИ

## 1.1 Поняття Інтернету речей та особливості функціонування сенсорних мереж

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) являє собою сукупність взаємопов'язаних фізичних та віртуальних об'єктів, які оснащені засобами ідентифікації, обчислювальними ресурсами та можливостями мережевої взаємодії. Такі об'єкти можуть бути представлені електронними пристроями, сенсорами, виконавчими механізмами, машинами або іншими елементами, здатними автоматично збирати та передавати дані через мережу без безпосередньої участі людини. Кожному об'єкту в IoT-середовищі надається унікальний ідентифікатор, що забезпечує його однозначне розпізнавання в мережі [2-6].

Функціонування IoT ґрунтується на використанні вбудованих систем, до складу яких входять мікропроцесори, датчики, модулі зв'язку та програмне забезпечення. Такі пристрої здійснюють вимірювання параметрів навколишнього середовища або технічних процесів, попередню обробку даних та їх передавання до вузлів агрегації. Зазвичай інформація надходить до шлюзів або проміжних серверів, звідки передається до хмарної або розподіленої обчислювальної інфраструктури для подальшого аналізу та зберігання.

Характерною рисою IoT-систем є високий рівень автоматизації. Основні операції виконуються без втручання користувача, однак людина може здійснювати керування пристроями, змінювати їх конфігурацію, задавати режими роботи або отримувати результати обробки даних за допомогою прикладних інтерфейсів. Вибір мережевих протоколів, способів підключення та технологій обміну даними визначається вимогами конкретного застосування, зокрема дальністю зв'язку, пропускну здатністю, енергоспоживанням та затримками передачі.

Важливу роль у розвитку IoT відіграють сенсорні мережі, які складаються з великої кількості автономних вузлів, здатних до самоорганізації та спільної роботи. Такі мережі забезпечують збір значних обсягів даних у реальному часі, що створює передумови для застосування методів аналізу великих даних. Додаткове використання алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання дозволяє підвищити ефективність обробки інформації, адаптувати роботу мережі до змінних умов та здійснювати прогнозування стану системи.

Застосування Інтернету речей сприяє оптимізації бізнес-процесів, зменшенню витрат на експлуатацію обладнання та підвищенню якості надання послуг. IoT-рішення широко використовуються для моніторингу технічного стану обладнання, управління виробничими процесами, логістикою та енергоресурсами. Завдяки можливості отримання даних у режимі реального часу забезпечується прозорість процесів та оперативне прийняття управлінських рішень.

Отже, Інтернет речей є однією з ключових технологій сучасного інформаційного суспільства, розвиток якої безпосередньо пов'язаний зі зростанням кількості підключених пристроїв та вдосконаленням сенсорних мереж. Подальше поширення IoT сприятиме формуванню ефективних, масштабованих і інтелектуальних інфраструктур, здатних підтримувати конкурентоспроможність організацій у різних галузях.

Інтернет речей надає організаціям численні переваги, які можуть відрізнятися залежно від галузі застосування, хоча існують і універсальні вигоди, спільні для більшості сфер. Серед основних переваг IoT-систем можна виділити:

- контроль над ключовими бізнес-процесами;
- підвищення якості обслуговування клієнтів;
- оптимізацію витрат часу та фінансових ресурсів;
- збільшення продуктивності праці персоналу;
- інтеграцію та адаптацію бізнес-моделей;

- підтримку прийняття більш ефективних управлінських рішень;
- можливість отримання додаткового доходу завдяки новим сервісам та продуктам.

Додатково IoT забезпечує:

- доступ до даних у будь-який час та з будь-якого пристрою;
- покращену комунікацію між підключеними пристроями;
- передачу інформації через мережу з мінімальними витратами часу та ресурсів;
- автоматизацію рутинних процесів, що підвищує ефективність послуг і зменшує необхідність людського втручання.

Разом із перевагами існують певні виклики та обмеження впровадження IoT:

- із ростом кількості підключених пристроїв збільшується ймовірність витоку конфіденційної інформації через кіберзагрози;
- управління великими масивами пристроїв та даних стає складним завданням, особливо коли мова йде про сотні тисяч або мільйони вузлів;
- наявність помилки в системі може вплинути на роботу всіх підключених пристроїв;
- відсутність єдиного міжнародного стандарту сумісності ускладнює взаємодію пристроїв різних виробників.

IoT спонукає компанії переосмислювати бізнес-процеси та надає інструменти для вдосконалення стратегій розвитку. Найбільше поширення технологія отримала у виробництві, транспорті та комунальному секторі, де застосовуються сенсори та інші підключені пристрої. Водночас концепція активно впроваджується у сільському господарстві, інфраструктурі та домашній автоматизації, що сприяє цифровій трансформації підприємств.

Наприклад, у сільському господарстві IoT допомагає фермерам автоматизувати роботу: датчики відстежують опади, вологість ґрунту, температуру та інші параметри, що дозволяє оптимізувати методи ведення сільськогосподарських процесів.

У сфері інфраструктури сенсори можуть контролювати стан будівель, мостів та інших конструкцій, що забезпечує економію ресурсів, скорочення часу на обслуговування та підвищення якості робочих процесів.

Домашня автоматизація використовує IoT для моніторингу і керування механічними та електричними системами, а на рівні міст технологія сприяє зниженню енергоспоживання та скороченню відходів. Загалом IoT охоплює різні галузі, включаючи охорону здоров'я, фінанси, роздрібну торгівлю та виробництво, і поступово стає ключовою складовою сучасних інтелектуальних систем.

Існує ряд сучасних стандартів для реалізації IoT, серед яких можна виділити наступні:

1) 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) — відкритий стандарт, розроблений Інженерною групою Інтернету (IETF), який дозволяє малопотужним радіо-модуль обмінюватися даними через Інтернет. Він підтримує технології, такі як IEEE 802.15.4, Bluetooth Low Energy (BLE) та Z-Wave, що використовується у домашній автоматизації.

2) ZigBee — бездротова мережа з низьким енергоспоживанням та невеликою швидкістю передачі даних, зазвичай застосовується в промислових середовищах. ZigBee базується на стандарті IEEE 802.15.4. Консорціум ZigBee Alliance розробив Dotdot — універсальну мову для IoT, що забезпечує безпечну взаємодію та сумісність інтелектуальних пристроїв у будь-якій мережі.

3) LiteOS — операційна система, подібна до Unix, для бездротових сенсорних мереж. LiteOS підтримує роботу з розумними виробничими додатками, домашньою автоматизацією та автомобільним IoT (IoV), а також слугує платформою для розробки інтелектуальних пристроїв.

4) OneM2M — сервісний рівень "машина-машині", який інтегрується у програмне та апаратне забезпечення для підключення пристроїв. Організація OneM2M займається розробкою стандартів багаторазового використання для забезпечення сумісності додатків у різних вертикалях.

5) DDS (Data Distribution Service) — стандарт IoT від Object Management Group (OMG) для високопродуктивного та масштабованого обміну даними M2M у реальному часі.

6) AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) — відкритий стандарт для асинхронного обміну повідомленнями, що забезпечує захищений і сумісний обмін інформацією між організаціями та додатками. Використовується для клієнт-серверної взаємодії та управління пристроями.

7) CoAP (Constrained Application Protocol) — протокол, розроблений IETF, що дозволяє малопотужним пристроям з обмеженими ресурсами ефективно працювати в IoT-мережах.

8) LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) — протокол WAN, розроблений для підтримки великих мереж, таких як розумні міста, з численними низькопотужними пристроями.

Крім стандартів, активно використовуються різні IoT-фреймворки та платформи:

1) Amazon Web Services (AWS) IoT — хмарна платформа для підключення та безпечної взаємодії інтелектуальних пристроїв із хмарою AWS і іншими підключеними пристроями.

2) Arm Mbed IoT — платформа для розробки IoT-додатків на базі мікроконтролерів ARM, що забезпечує безпечне і підключене середовище для пристроїв через інтеграцію інструментів і сервісів Mbed.

3) Microsoft Azure IoT Suite — набір сервісів, що дозволяє користувачам отримувати дані з IoT-пристроїв, виконувати їх обробку, багатовимірний аналіз, трансформацію, агрегування та візуалізацію результатів.

4) Brillo / Weave (Google) — платформа для швидкої розробки IoT-додатків, що включає ОС Brillo на базі Android для вбудованих пристроїв і протокол Weave для комунікації між пристроєм і хмарою.

5) Calvin (Ericsson) — відкрита платформа для створення розподілених додатків, що дозволяє пристроям взаємодіяти між собою. Включає середовище розробки та виконання для обробки запущених додатків.

Сфери застосування IoT дуже широкі — від побутових і корпоративних рішень до промислового Інтернету речей (IIoT). Технологія використовується у автомобільній промисловості, телекомунікаціях, енергетиці, а також у сільському господарстві, інфраструктурі та управлінні розумними містами, надаючи можливості для підвищення ефективності, економії ресурсів та цифрової трансформації організацій.

Пристрої, оснащені датчиками та спеціалізованим програмним забезпеченням, здатні збирати та аналізувати інформацію про користувачів і передавати її іншим технологіям для підвищення комфорту та зручності повсякденного життя. Переносні пристрої активно застосовуються й у сфері громадської безпеки, зокрема для скорочення часу реагування служб екстреної допомоги під час надзвичайних ситуацій через надання оптимальних маршрутів до місця події або моніторинг життєвих показників персоналу, який працює у небезпечних умовах [6].

У медицині Інтернет речей відкриває широкі можливості для дистанційного спостереження за станом пацієнтів та управління медичними процесами. Лікарні інтегрують IoT-системи для контролю запасів лікарських засобів, медичних інструментів та іншого обладнання, що підвищує ефективність та безпеку медичних процедур.

У сегменті розумних будинків IoT дозволяє економити енергію, використовуючи датчики, що визначають присутність людей у приміщенні. Системи автоматично регулюють температуру, наприклад, включаючи кондиціонер у заповненому конференц-залі або вимикаючи обігрів, якщо приміщення порожнє.

Сільське господарство також отримує вигоди від IoT-технологій: датчики контролюють освітленість, температуру, вологість ґрунту та інші параметри, що дозволяє автоматизувати зрошення та підвищувати ефективність виробництва.

У побутовому сегменті розумні будинки оснащуються термостатами, підключеними приладами, системами опалення та освітлення, якими можна керувати віддалено через комп'ютери чи смартфони.

У рамках концепції «розумного міста» датчики та підключені пристрої, такі як розумні лічильники чи вуличні ліхтарі, сприяють зменшенню трафіку, економії енергії, моніторингу екологічної ситуації та поліпшенню санітарних умов.

Прикладом є місто Боулдер у штаті Колорадо (США), населення якого становить близько 100 тисяч осіб. Воно стало першим у світі «розумним містом», де активно впроваджуються енергозберігаючі та екологічні технології [7]. Близько 50 тисяч будинків обладнані сучасними системами, включаючи сонячні панелі, електромобілі, а також автоматизовані системи обігріву, охолодження та освітлення, які інтегровані в єдину мережу моніторингу, що дозволяє домовласникам відстежувати вуглецевий слід їхніх будинків.

Системи дозволяють ефективно контролювати енергоспоживання та управляти ним віддалено, включаючи регулювання термостатів або вимкнення приладів через інтернет. Подібні рішення формують майбутнє енергетики та визначають стандарти для нових будинків із нульовим споживанням енергії.

Активно впроваджується подібна концепція й у Європі. Наприклад, у столиці Нідерландів — Амстердамі, влада планує до 2026 року довести частку відновлюваних джерел енергії в міській інфраструктурі до 20% і скоротити викиди CO<sub>2</sub> на 40% порівняно з 1990 роком.

В останні роки в Україні державні органи, місцеве самоврядування та бізнес активно інвестують у модернізацію та реконструкцію міської

інфраструктури. Завдяки цим зусиллям забезпечується стабільне функціонування електромереж, водопостачання, доріг та соціальних об'єктів.

Проте, навіть значне фінансування не завжди призводить до помітного покращення якості життя населення. Існуюча структура інфраструктури побудована так, що без радикальної зміни підходу до її розвитку істотного ефекту досягти важко. Сучасне місто XXI століття має формуватися насамперед для людей, а не для бізнесу, а міські системи повинні адаптуватися під потреби жителів.

Новітні «розумні» технології, що з'явилися протягом останніх 10—15 років, відкривають широкі можливості для реалізації соціальних проєктів. Наприклад, «розумні» сервіси дозволяють громадянам отримувати послуги швидко, без черг і надлишку паперової документації [4].

У сучасних умовах конкуренції міст за мешканців та інвестиції ключовою стає людина — мешканець чи гість міста. Від того, наскільки міські системи відповідають потребам громадян, значною мірою залежить конкурентоспроможність міста та його розвиток.

Концепція «Розумного міста» дозволяє уповільнити зростання тарифів, зменшити витрати на послуги ЖКГ, підвищити якість муніципальних сервісів та ефективність роботи міських служб, що позитивно позначається на всіх сферах життя.

Приклади технічного оснащення «Розумного міста» включають автоматизовані системи управління дорожнім рухом. Так, «розумна дорога» використовує мережу радіодетекторів, які передають на сервер дані про швидкість, завантаженість і кількість транспортних засобів у режимі реального часу. Якщо датчики фіксують затори, дорожні знаки автоматично змінюють схему руху, а інформація про дорожню ситуацію транслюється на міські монітори та радіостанції.

Американська компанія «Solar Roadways» реалізує проєкти доріг нового покоління, що включають нагрівачі для автоматичного розтоплення снігу та світлодіодні панелі для динамічного відображення дорожніх знаків. Такі дороги

здатні інтегруватися з «розумними» будинками та автомобілями для більш ефективного енергоспоживання [7].

Старі інфраструктури промислово розвинених країн часто складаються з різнорідних елементів. Головне завдання — перетворити їх у розподілену мережу, здатну взаємодіяти зі споживачами, виявляти й усувати власні недоліки та інтегрувати локальні джерела відновлюваної енергії, зокрема сонячні та вітрові.

Перші розумні енергомережі з'явилися у Західній Європі, де нестача електроенергії гостро відчувалася ще в 1970-х роках. Данія, наприклад, у 1980-х використовувала великі централізовані електростанції, що не задовольняли потреби країни, і імпортувала енергію з Німеччини та Швеції. Згодом були встановлені вітрові установки і побудовані невеликі комбіновані теплоелектроцентралі (ТЕЦ), що дозволило перейти до розподіленої енергосистеми.

Сьогодні Данія має густу мережу ТЕЦ потужністю від 4 до 25 МВт і продає надлишок електроенергії сусіднім країнам. Аналогічно, у містах, що активно впроваджують електромобілі, набуває популярності концепція Vehicle-to-Grid (V2G), яка дозволяє використовувати акумулятори транспортних засобів для зберігання та повернення електроенергії у мережу у пікові години.

Впровадження таких систем неможливе без нових інформаційно-технологічних інфраструктур та сучасних інтернет-технологій. В результаті модернізації традиційні енергомережі перетворюються на комп'ютеризовані системи реального часу, здатні самостійно приймати рішення на основі даних з мільйонів сенсорів, що знімає потребу у ручному обліку енергоспоживання.

Схематично концепцію «Розумного міста» можна зобразити на рисунку 1.1.

Загалом потенціал «розумних» мереж значно ширший, ніж здається на перший погляд. Уже сьогодні реалізуються системи, здатні, отримуючи дані від мільйонів індивідуальних лічильників, автоматично регулювати тарифні ставки щогодини, залежно від наявності та попиту на енергоресурси.

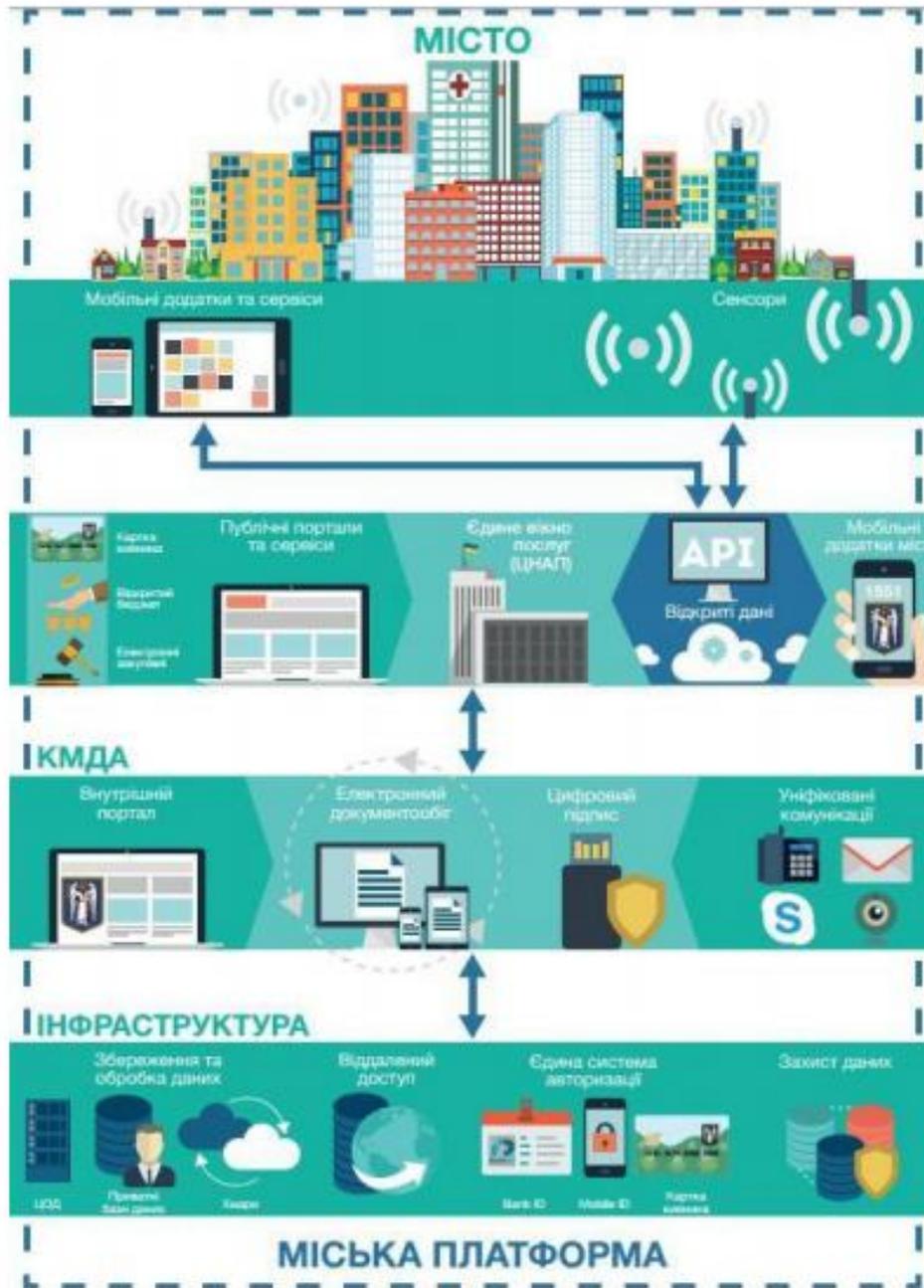


Рисунок 1.1 — Головна ідея концепції «Розумного міста»

У деяких випадках лічильники можуть реагувати на нестачу енергії, тимчасово призупиняючи роботу певних побутових приладів, наприклад сушарок або посудомийних машин, до відновлення нормального постачання електроенергії.

Завдяки впровадженню таких інформаційних технологій підвищується «інтелект» мережі та загальна її ефективність, проте зростає й ризик кібератак, що робить систему більш уразливою.

Наступним етапом розвитку високопродуктивних мереж стало використання безпроводових технологій для передачі даних у сенсорних мережах, які отримали назву Безпроводові Сенсорні Мережі (БСМ).

Безпроводова сенсорна мережа (WSN) передбачає розгортання великої кількості компактних вузлів, які можуть об'єднуватися для досягнення спільної мети. Такі вузли здатні динамічно підлаштовуватися під зміни у навколишньому середовищі та адаптуватися до змін топології мережі.

Основні компоненти безпроводової сенсорної мережі включають:

- модуль датчика — збір фізичних або хімічних параметрів;
- модуль обробки (процесор) — аналіз і первинна обробка даних;
- джерело живлення — акумулятори або інші енергетичні рішення;
- трансивер — модуль для безпроводової передачі інформації.

За потреби до вузла можна додавати приводи, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) та монітори, залежно від специфіки застосування мережі.

На рисунку 1.2 наведено схематичне зображення архітектури вузла сенсорної мережі.

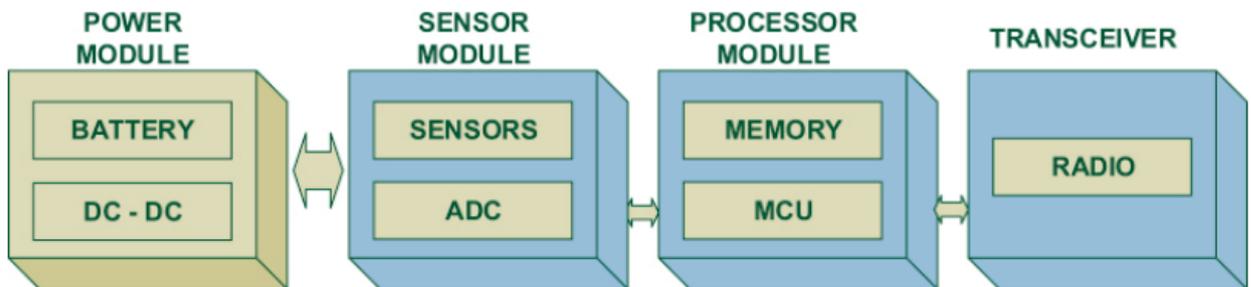


Рисунок 1.2 — Архітектура вузла сенсорної мережі

Безпроводова мережа формується за спеціальними принципами, за яких сенсорні вузли можуть об'єднуватися без централізованої координації, що є характерним для більшості застосувань безпроводових сенсорних мереж (WSN). Такий підхід забезпечує гнучкість розгортання та масштабованість мережі в умовах динамічного середовища.

Живлення сенсорних вузлів, як правило, здійснюється від автономних батарей, які у більшості випадків не передбачають підзарядки або заміни. Це особливо актуально для сценаріїв, де вузли повинні функціонувати тривалий час без участі людини, що висуває жорсткі вимоги до енергоспоживання елементів мережі [6-9].

У зв'язку з цим ключовим завданням при проєктуванні безпроводових сенсорних мереж є ефективне управління обмеженими ресурсами. Досягнення цього забезпечується застосуванням енергозберігаючих підходів, зокрема оптимізацією радіообміну, зменшенням обсягу передаваних даних, використанням режимів сну та пробудження, впровадженням енергоефективних протоколів маршрутизації, а також технологій збору енергії з навколишнього середовища.

## 1.2 Концепції та архітектурні підходи побудови IoT рішень

Незважаючи на відмінності між окремими реалізаціями систем Інтернету речей, базові принципи побудови IoT-архітектури, а також загальна схема обробки даних у більшості випадків є подібними [7].

Типова архітектура IoT включає декілька ключових складових, які умовно поділяються на три основні частини (див. рис. 1.3):

- граничний рівень, що охоплює первинні елементи системи (ліва частина);
- рівень обробки подій та аналітики (центральна частина);
- рівень прикладних сервісів і кінцевих застосунків (права частина).

Основою будь-якої IoT-системи є підключені пристрої, які забезпечують формування та передавання даних, що і становить сутність концепції Інтернету речей. Для отримання інформації про фізичні процеси зовнішнього середовища або параметри самого об'єкта такі пристрої оснащуються датчиками (див. рис. 1.4). Сенсори можуть бути інтегровані безпосередньо в апаратні модулі або функціонувати як окремі автономні елементи, призначені для збору телеметричних даних.

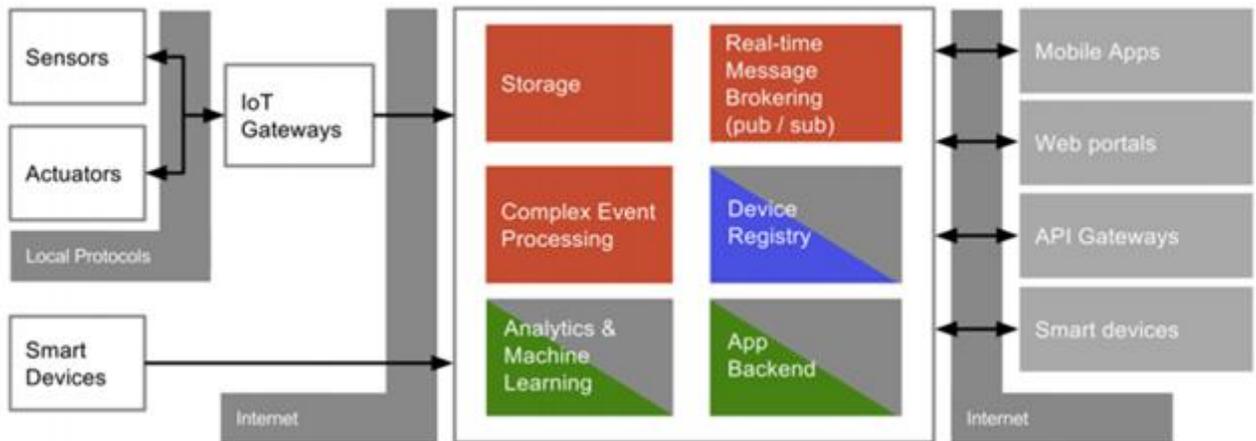


Рисунок 1.3 — Типова архітектура IoT

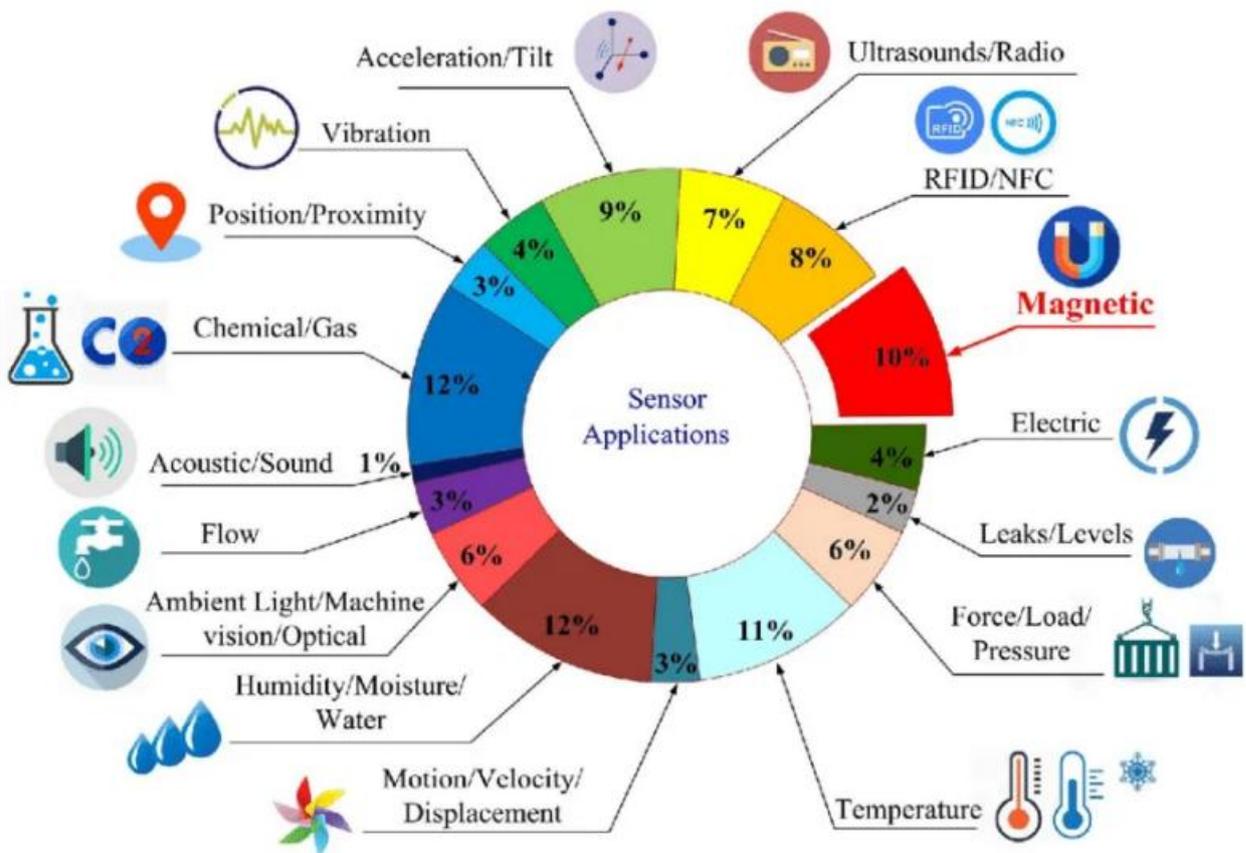


Рисунок 1.4 — Сфери застосування датчиків

Прикладом є датчики, що застосовуються в аграрній сфері, де здійснюється вимірювання температури та вологості повітря і ґрунту,

кислотності ґрунту, а також рівня сонячного випромінювання, що впливає на розвиток рослин.

Важливою складовою IoT-систем є виконавчі механізми, які тісно взаємодіють із датчиками та забезпечують перетворення отриманих даних у відповідні фізичні дії. Наприклад, у розумній системі зрошення інформація, що надходить від сенсорів, аналізується в режимі реального часу, після чого формується керуючий сигнал для відкриття водяних клапанів у зонах із недостатнім рівнем вологості ґрунту. Робота виконавчих пристроїв триває доти, доки параметри не досягнуть встановлених значень, і весь процес відбувається без прямого втручання оператора [7].

Крім цього, підключені об'єкти повинні підтримувати не лише двонаправлений обмін даними з відповідними шлюзами або системами збору інформації, але й мати здатність взаємодіяти між собою. Така взаємодія необхідна для колективного збору даних, їх обміну та спільної роботи пристроїв у реальному часі.

Особливо складною ця задача є для малопотужних пристроїв з обмеженими обчислювальними ресурсами та автономним живленням. Організація постійного зв'язку вимагає значних витрат енергії, обчислювальних потужностей і пропускну здатності каналу. Тому ефективне функціонування IoT-архітектури можливе лише за умови використання оптимізованих, безпечних і малоресурсних протоколів зв'язку.

Таким чином, датчики (Sensors) виконують функцію виявлення змін фізичних величин та формування вхідних даних, будучи невід'ємною частиною різноманітних IoT-пристроїв і застосовуючись у широкому спектрі галузей.

Усі типи датчиків здійснюють збирання аналогових сигналів, які мають безперервний характер і можуть бути представлені у вигляді плавної лінії або неперервного потоку інформації. Передача таких сигналів безпосередньо через дротові або безпроводові канали зв'язку є неможливою, тому на початковому етапі вони підлягають перетворенню в цифрову форму. Загальний принцип обробки сигналів наведено на рисунку 1.5.

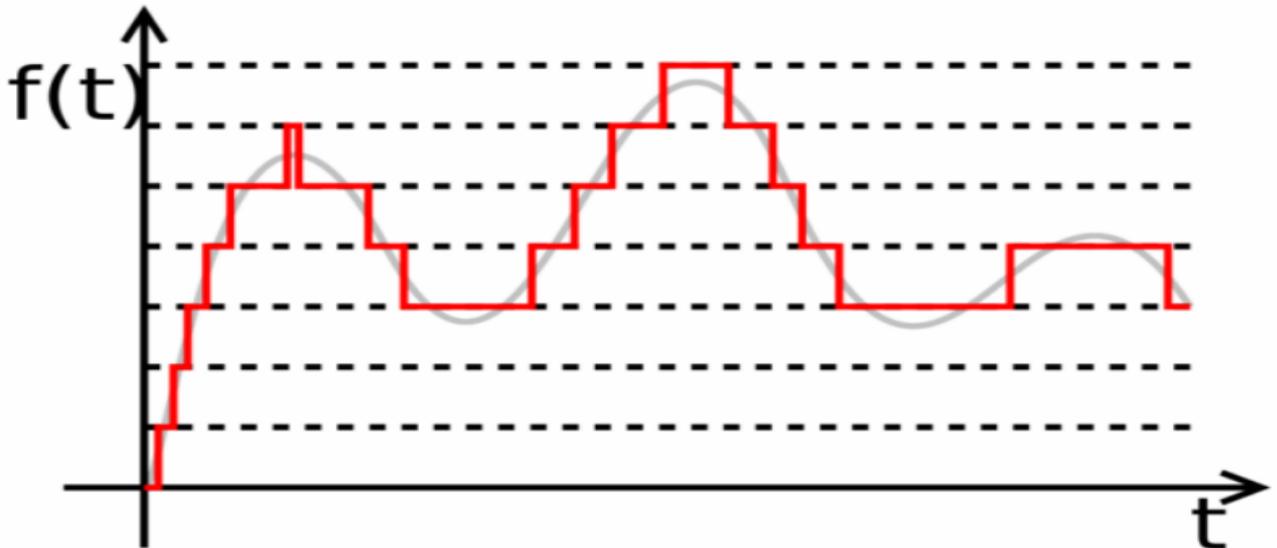


Рисунок 1.5 — Аналого-цифрове перетворення

Цифрова інформація подається у вигляді дискретної послідовності двійкових значень — нулів і одиниць. Процес аналого-цифрового перетворення полягає в розбитті безперервного аналогового сигналу на окремі інтервали, кожному з яких відповідає певне числове значення.

На ілюстрації хвиляста крива відображає аналоговий сигнал, тоді як червона пунктирна лінія демонструє його цифрове представлення. Кожен рівень цифрового сигналу кодується у вигляді певної комбінації двійкових розрядів, що робить можливим подальшу передачу даних каналами зв'язку — як дротовими, так і безпроводовими.

Перелік типових IoT-датчиків наведено на рисунку 1.6.

Актuatorи (Actuators), на відміну від датчиків, працюють з вихідними даними та забезпечують виконання фізичних дій у відповідь на отримані команди. Показовим прикладом взаємодії датчиків і актуаторів є людський організм: органи чуття виконують функції сенсорів, а м'язи — виконавчих механізмів. При цьому головний мозок відіграє роль своєрідного мікроконтролера, який об'єднує інформацію, зібрану від численних сенсорів, аналізує її та формує коректну й обґрунтовану реакцію системи.

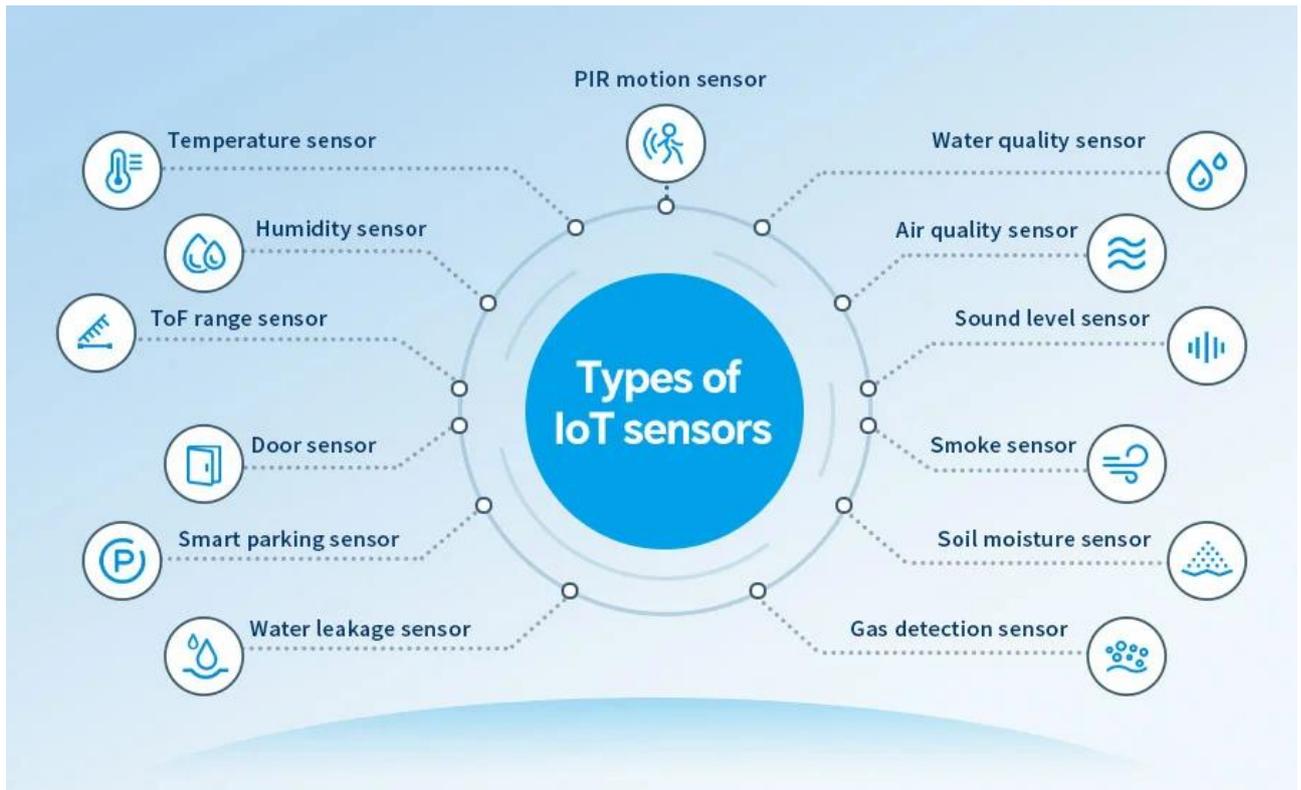


Рисунок 1.6 — Найпоширеніші IoT-датчики

Наведений вище аналіз свідчить про те, що технології IoT на сучасному етапі розвиваються інтенсивними темпами, паралельно з чим істотно розширюється спектр їх практичного використання. Одним із важливих напрямів застосування Інтернету речей є сенсорні мережі, функціонування яких тісно пов'язане з обробкою великих обсягів даних за допомогою технологій Big Data. Особливості такого поєднання будуть детально розглянуті в наступному розділі роботи.

IoT-платформа виконує роль проміжної ланки між мережею передачі даних та сенсорними пристроями. Останніми роками спостерігається активний розвиток IoT-платформ із різноманітними корпоративними рішеннями, що спрямовані на розширення можливостей підключення та керування пристроями. Для стабільного функціонування IoT-інфраструктури критично важливою є оперативна сумісність між компонентами системи: взаємодія пристроїв має бути відмовостійкою, а платформа та прикладні оболонки, створені на її основі, — надійними й масштабованими.

Паралельно з розвитком IoT-інфраструктури відбувається стрімке вдосконалення сенсорних мереж, які є базовим елементом сучасних кіберфізичних систем.

До основних складових сенсорної мережі належать:

1) Мережа датчиків. Датчик є первинною одиницею формування сенсорної мережі та являє собою пристрій, що реагує на фізичні впливи або явища, зокрема світло, температуру, звук, рух, тиск тощо. Датчики, інтегровані з мікропроцесором для попередньої обробки даних, визначаються як інтелектуальні датчики.

2) Мережа доступу. До цієї складової належать проміжні вузли та шлюзи, призначені для агрегації інформації від групи датчиків з метою оптимізації подальшої передачі даних до центрів управління або зовнішніх інформаційних систем.

3) Мережева інфраструктура. Включає активне та пасивне обладнання існуючих телекомунікаційних мереж, що забезпечує транспортування даних.

4) Програмне забезпечення. Забезпечує збір, зберігання та аналіз великих обсягів інформації, включаючи хмарні сервіси, IoT-платформи та інструменти обробки Big Data.

Ключовими вимогами до побудови сенсорних мереж є мінімальне енергоспоживання кінцевих пристроїв та здатність мережі до самоорганізації, що дозволяє забезпечити її масштабованість, автономність і ефективну роботу в динамічних умовах.

## 2 ПІДХОДИ Й ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ ІОТ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖІ

### 2.1 Підходи до побудови ІоТ систем та особливості їх використання

Мультиагентні технології є одним із сучасних підходів до розв'язання складних інженерних і прикладних задач та дедалі активніше застосовуються в концепції Інтернету речей. Основою таких технологій є використання механізмів самоорганізації, адаптації та еволюційного розвитку, що дозволяє системам функціонувати в умовах динамічного та слабо формалізованого середовища.

Ключова ідея мультиагентного підходу полягає у відмові від централізованих алгоритмів управління на користь розподіленої взаємодії автономних компонентів. Це дає змогу ефективно вирішувати задачі, які є надто складними або практично нереалізовними при використанні класичних математичних методів оптимізації та керування. Саме тому мультиагентні технології знаходять широке застосування в ІоТ-системах [9].

У рамках ІоТ кожен агент виконує низку функціональних ролей. По-перше, агент формує цільову установку, яка визначає зміну параметрів системи відповідно до поточного стану середовища. По-друге, відбувається визначення основних та допоміжних функцій, зокрема формування та обробка запитів між агентами. Крім того, агенти здійснюють вибір можливих дій, що включає операції обміну даними, їх шифрування та дешифрування, а також досягнення поставленої мети. Важливою складовою є аналіз поточних або прогнозованих змін зовнішнього середовища з подальшою адаптацією поведінки системи.

Фізичні параметри в ІоТ-системах вимірюються за допомогою датчиків, сигнали з яких надходять до мікроконтролерів для попередньої обробки. Після цього результати передаються до регулювальних пристроїв, які враховують керуючий вплив та надсилають команди на виконавчі механізми. Такий підхід забезпечує замкнений цикл управління та дозволяє системі реагувати на зміни в режимі реального часу.

Окрім локальної обробки, в концепції Інтернету речей актуальні дані можуть передаватися на віддалені веб-сервіси або хмарні платформи. Обмін інформацією між мікроконтролером і веб-сервісом здійснюється через мережеву інфраструктуру, тоді як взаємодія з кінцевим користувачем відбувається за допомогою клієнтських застосунків, які можуть підтримувати, зокрема, голосове управління.

Таким чином, мультиагентні системи (MAS) розглядаються як перспективний напрям розвитку IoT. Вони складаються з множини відносно незалежних та інтелектуальних компонентів — агентів, що взаємодіють між собою для досягнення спільної мети. У науковій літературі поняття «агент» має декілька трактувань. Згідно з визначенням, наведеним у [10], агент — це комп'ютерна система апаратної або, найчастіше, програмної реалізації, яка характеризується автономністю, здатністю до соціальної взаємодії, реактивністю та проактивною поведінкою.

Автономність означає можливість функціонування без безпосереднього втручання людини, соціальна здатність — взаємодію з іншими агентами або користувачами за допомогою спеціалізованих протоколів обміну, реактивність — своєчасну реакцію на зміни середовища, а проактивність — здатність ініціювати дії для досягнення поставлених цілей. При цьому розміри та складність агентів можуть суттєво відрізнятися: від окремих програмних модулів до складних експертних систем. Агенти також можуть бути як статичними, так і мобільними, переміщуючись між вузлами комп'ютерної мережі.

У межах IoT-систем агенти виступають автономними та адаптивними програмними компонентами, призначеними для сприйняття та інтерпретації стану середовища, у якому вони функціонують. Використовуючи дані, що надходять від датчиків, а також попередньо накопичені знання, агенти формують уявлення про навколишнє середовище. У процесі роботи вони накопичують як позитивний, так і негативний досвід, що дозволяє уточнювати модель поведінки системи та підвищувати ефективність прийняття рішень. На

основі отриманої та проаналізованої інформації агенти приймають управлінські рішення та реалізують їх за допомогою виконавчих механізмів.

Важливою складовою функціонування агентів є механізм допоміжного навчання. Під допоміжним навчанням розуміють процес, у межах якого агент отримує зворотний зв'язок від користувача або від самої системи в умовах невизначеності та нестачі попередньої інформації. Поступово формується база знань, яка дозволяє агенту коректно реагувати на ситуації, що повторюються. При цьому алгоритми навчання та прийняття рішень не є статичними — вони постійно адаптуються та вдосконалюються відповідно до нових даних і умов експлуатації.

Приклад IoT-системи з інтегрованим агентом наведено на рисунку 2.1.

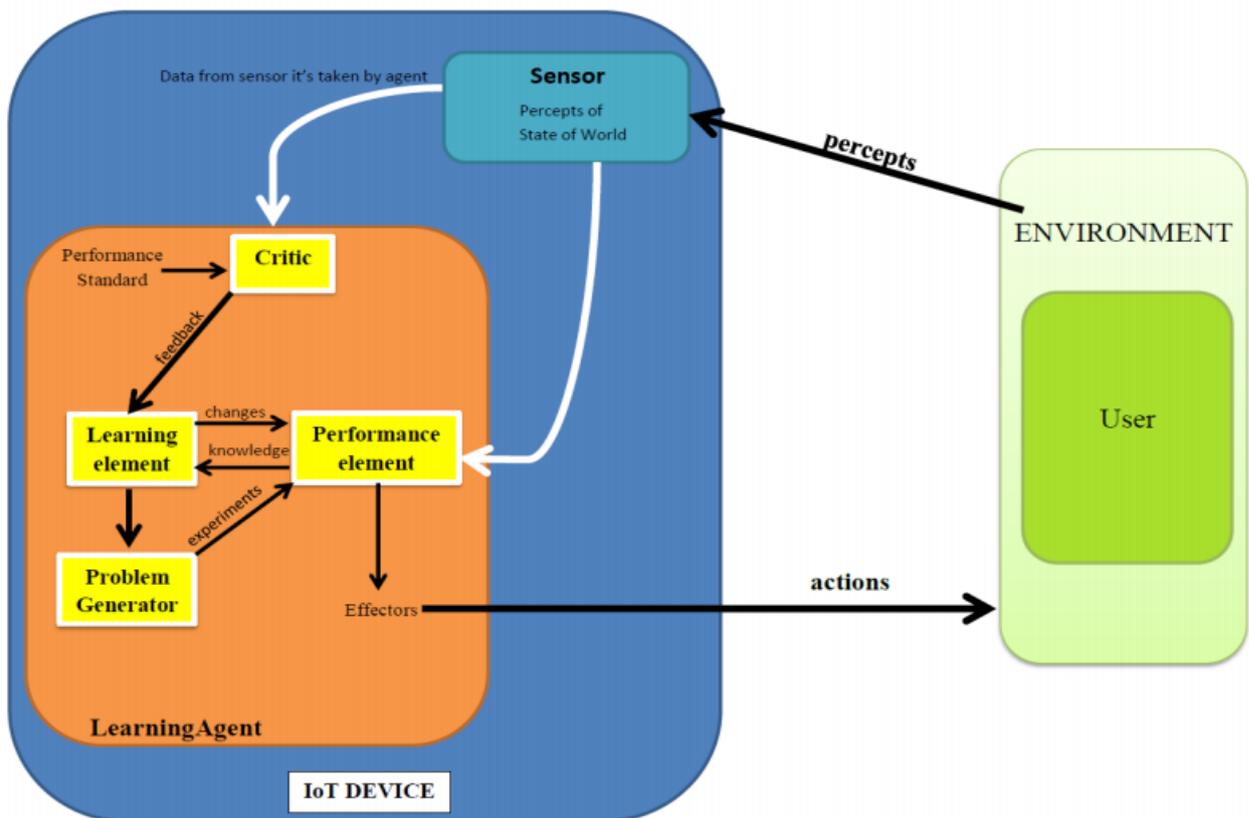


Рисунок 2.1 —IoT-система з інтегрованим агентом

Ключову роль у структурі інтелектуального агента відіграє елемент навчання (Learning Element). Його основне завдання полягає в удосконаленні механізмів прийняття рішень таким чином, щоб елемент продуктивності

працював максимально ефективно. Оцінка правильності прийнятих рішень здійснюється за допомогою критичного елемента (Critic), який аналізує результати дій агента та визначає ступінь їх відповідності поставленим цілям. Сформований зворотний зв'язок передається до елемента навчання для подальшого коригування поведінки агента.

Елемент продуктивності (Performance Element) безпосередньо взаємодіє з генератором проблем (Problem Generator), який відповідає за дослідження нових або раніше не розглянутих ситуацій, що можуть виникнути під час функціонування системи. Генератор проблем стимулює агента до пошуку альтернативних рішень, що дозволяє підвищити адаптивність і гнучкість системи. Разом критичний елемент та генератор проблем формують основу механізму навчання агента.

Підсумовуючи, мультиагентні системи у межах IoT забезпечують високий рівень автономності та адаптивності, дозволяючи обробляти великі обсяги даних у реальному часі, коригувати поведінку системи відповідно до змін навколишнього середовища та ефективно взаємодіяти з іншими агентами і користувачами. Завдяки використанню механізмів навчання, критичного оцінювання рішень і генерації нових сценаріїв поведінки, MAS підвищують гнучкість і надійність IoT-систем, знижуючи потребу у безпосередньому втручанні людини та забезпечуючи можливість прийняття обґрунтованих рішень у складних умовах [9,10].

Водночас для інтеграції мультиагентних систем у практичні IoT-проекти необхідна ефективна робота з великими обсягами даних, що надходять від сенсорних мереж. Саме тут на допомогу приходять технології Big Data, які дозволяють збирати, зберігати, аналізувати та візуалізувати інформацію, отриману від численних підключених пристроїв, забезпечуючи ефективну підтримку рішень агентів.

Наступний підрозділ розглядає роль і застосування технологій Big Data для інтеграції IoT у сенсорні мережі, а також методи обробки великих потоків даних для підвищення ефективності систем Інтернету речей.

Отримавши оновлені знання, елемент навчання передає їх до елемента продуктивності, який визначає доцільні дії у конкретній ситуації та формує керуючі сигнали для ефекторів. Ефектори, у свою чергу, реалізують прийняті рішення у фізичному середовищі. Результати виконаних дій знову оцінюються елементом продуктивності, після чого відповідна інформація надходить до елемента навчання для подальшого оновлення бази знань агента.

## 2.2 Технології Big Data для інтеграції IoT у сенсорні мережі

Big Data, або великі дані, представляють собою поєднання структурованих, напівструктурованих і неструктурованих даних, які організації збирають для отримання цінної інформації та подальшого використання у проектах машинного навчання, прогнозного моделювання та інших аналітичних застосуваннях [11].

Системи для обробки та зберігання великих даних стали невід'ємною частиною архітектури управління даними в сучасних організаціях. Характерні ознаки великих даних часто виділяють за трьома параметрами:

- значний обсяг інформації, що накопичується у різних джерелах;
- різноманітність типів даних, які зберігаються та обробляються;
- швидкість, з якою дані генеруються, збираються та аналізуються.

Нещодавно до цих характеристик додано ще кілька аспектів, зокрема достовірність, цінність та мінливість даних [12].

Хоча термін «великі дані» не визначає точного обсягу інформації, на практиці вони часто охоплюють терабайти (ТБ), петабайти (ПБ) і навіть ексабайти (ЕБ) даних, що накопичуються протягом тривалого часу.

Застосування великих даних дозволяє компаніям підвищувати ефективність операцій, покращувати обслуговування клієнтів, створювати персоналізовані маркетингові кампанії та, в цілому, підвищувати прибутковість. Організації, що ефективно використовують великі дані, отримують конкурентну перевагу завдяки швидшому і обґрунтованішому прийняттю рішень. Наприклад, аналітика великих даних дозволяє глибше

зрозуміти поведінку клієнтів та оптимізувати маркетингові стратегії, підвищуючи залученість користувачів і коефіцієнт конверсії [13].

У медичній сфері великі дані застосовуються для виявлення факторів ризику хвороб, діагностики стану пацієнтів та відстеження епідеміологічних загроз на основі електронних медичних карт, соціальних мереж та інших джерел. У енергетиці та комунальній сфері Big Data допомагає прогнозувати ефективність роботи мереж, визначати оптимальні точки буріння чи маршрути поставок. Фінансові установи застосовують аналітику великих даних для управління ризиками і моніторингу ринкових показників у реальному часі, а виробники та логістичні компанії оптимізують ланцюги поставок і маршрути доставки. Уряди також використовують великі дані для управління надзвичайними ситуаціями, запобігання злочинності та реалізації концепцій «розумного міста» [13,14].

Джерела великих даних різноманітні: системи бізнес-транзакцій, клієнтські бази даних, медичні записи, журнали веб-відвідувань, мобільні додатки, соціальні мережі, наукові репозиторії, дані від датчиків та інші машинно-згенеровані потоки інформації. Дані можуть зберігатися в необробленому вигляді або попередньо оброблятися за допомогою аналітичних інструментів для подальшого використання.

Аналіз великих даних у комерційних сферах може включати:

- порівняльний аналіз — оцінку поведінки користувачів та взаємодії з продуктами або послугами у порівнянні з конкурентами;
- соціальний моніторинг — відстеження інформації про бренд або товари у соціальних мережах для точного визначення цільової аудиторії;
- маркетинговий аналіз — використання даних для розробки нових продуктів та вдосконалення сервісів;
- аналіз настроїв та задоволеності клієнтів — оцінка ставлення споживачів до бренду, виявлення проблем і підвищення лояльності [14].

Однією з ключових характеристик великих даних є обсяг. Джерела інформації, що регулярно генерують великі потоки даних — це кліки

користувачів, журнали систем, потоки подій та інші інтерактивні системи, які постійно створюють нові дані [14].

Великі дані охоплюють широкий спектр типів інформації, серед яких виділяють:

- структуровані дані, що зберігаються у традиційних базах даних або сховищах даних із застосуванням SQL;
- неструктуровані дані, такі як текстові документи або файли, що зберігаються у кластерах або базах даних NoSQL;
- напівструктуровані дані, наприклад журнали веб-серверів або потокова інформація від датчиків.

Інтернет речей (IoT) у поєднанні з аналітикою великих даних радикально трансформував комп'ютерну індустрію та вплинув на повсякденне життя користувачів. Різні типи даних можуть зберігатися разом у єдиному сховищі, часто побудованому на основі хмарних сервісів об'єктного зберігання. Крім того, сучасні аналітичні додатки інтегрують дані з кількох джерел, що інакше важко об'єднати. Наприклад, аналіз великих даних для оцінки успішності продукту може поєднувати історичні дані про продажі, інформацію про повернення та відгуки користувачів у мережі.

Ще однією ключовою характеристикою є швидкість — тобто темп, із яким дані генеруються, збираються та обробляються. У багатьох випадках великі дані оновлюються в режимі реального або майже реального часу, на відміну від традиційних сховищ, які оновлюються раз на день, тиждень чи місяць. Аналітичні системи здатні приймати, корелювати та обробляти ці дані, видаючи результат на основі комплексного запиту. Для ефективного використання даних аналітики повинні чітко розуміти структуру даних і знати, які відповіді їм необхідні. Контроль швидкості обробки особливо важливий у застосуваннях машинного навчання та штучного інтелекту, де автоматичні алгоритми виявляють закономірності та генерують аналітичні висновки.

На рисунку 2.2 представлена динаміка зростання обсягу великих даних.

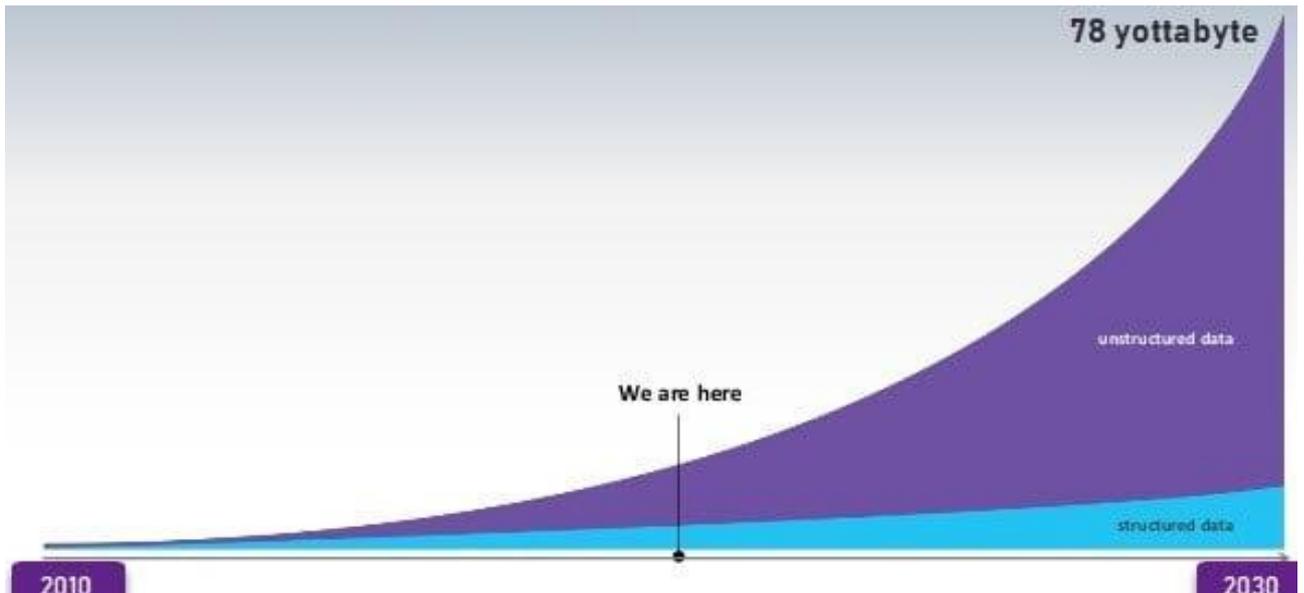


Рисунок 2.2 — Динамічне зростання обсягу великих даних

Достовірність даних визначає рівень надійності наборів даних. Дані, зібрані з різних джерел, наприклад соціальних мереж чи веб-сторінок, можуть бути неповними або неточними, що створює проблеми з якістю аналітики. Організаціям важливо відстежувати походження даних, щоб виправляти неточності та підтримувати високу точність аналізу. Погані дані можуть призвести до неправильних висновків і знизити довіру до аналітики в цілому.

Ще однією важливою характеристикою є цінність даних. Не всі зібрані дані мають практичну користь, а використання неточних або малозначущих даних може спотворити результати аналізу. Тому організації повинні застосовувати методи очищення даних і перевірки їх відповідності завданням перед аналітичним використанням.

Варіативність даних характеризує їхню неоднорідність: різні джерела можуть надавати дані у різних форматах або з різними значеннями. Це ускладнює обробку та аналіз інформації, що також є важливим фактором при роботі з великими даними.

Обробка великих обсягів даних висуває специфічні вимоги до обчислювальної інфраструктури. Потужності одного сервера або невеликого кластера часто недостатньо для швидкої обробки різноманітних і масштабних

наборів даних. Для забезпечення необхідної швидкості обробки організації можуть використовувати сотні або навіть тисячі серверів, об'єднаних у кластерну архітектуру, що дозволяє розподіляти обчислювальні навантаження.

Водночас досягнення високої продуктивності за розумну ціну є викликом. Не всі керівники готові інвестувати у великі серверні та сховищні інфраструктури для підтримки проектів з великими даними, особливо якщо навантаження не постійне. Через це загальнодоступні хмарні обчислення стали популярним рішенням для розгортання систем великих даних. Провайдери хмарних сервісів можуть зберігати петабайти інформації та масштабувати кількість серверів відповідно до потреб проекту.

Щоб спростити роботу з великими даними, постачальники хмарних платформ пропонують керовані сервіси, наприклад:

- Amazon EMR (Elastic MapReduce);
- Microsoft Azure HD Insight;
- Google Cloud Dataproc.

У хмарних середовищах дані можуть зберігатися у різних типах сховищ:

- розподілена файлова система Hadoop (HDFS);
- недорогі хмарні об'єктні сховища, такі як Amazon S3;
- бази даних NoSQL;
- реляційні бази даних.

Для користувачів, що віддають перевагу локальним системам, доступні технології з відкритим кодом. Вони можуть самостійно інстальувати потрібні компоненти або скористатися комерційними платформами, наприклад Cloudera (об'єднана з Hortonworks у 2019 році) або Hewlett Packard Enterprise (HPE), яка придбала активи MapR Technologies того ж року. Платформи Cloudera і MapR також підтримують хмарне розгортання.

Серед основних викликів великих даних — не лише необхідна обчислювальна потужність і витрати, а й розробка адаптованої архітектури. Системи великих даних повинні відповідати конкретним потребам, що вимагає від ІТ-команд і розробників створення набору інструментів із наявних

технологій. Для ефективного розгортання та управління такими системами потрібні нові навички порівняно з традиційним адмініструванням реляційних баз даних.

Керовані хмарні служби частково вирішують ці проблеми, але ІТ-менеджерам слід контролювати використання хмари, щоб уникнути перевитрат. Перенесення локальних даних у хмару та обробка робочих навантажень залишається складним процесом для багатьох організацій.

Додатковим завданням є забезпечення доступу до даних для аналітиків і фахівців з обробки інформації, особливо у розподілених середовищах із різними платформами та сховищами. Для цього створюються каталоги даних з функціями управління метаданими та інтеграції джерел. Забезпечення високої якості та правильного управління даними дозволяє підтримувати чисті, узгоджені та релевантні набори великих даних.

Зрештою, цінність і ефективність великих даних залежать від компетентності співробітників, які формують запити та здійснюють аналітичні проекти. Деякі інструменти дозволяють менш технічним користувачам працювати з даними у програмах прогнозу аналітики, тоді як інші, наприклад Hadoop-платформи, надають підприємствам потужну обчислювальну інфраструктуру для реалізації проектів із великими даними, мінімізуючи потребу у власному обладнанні та програмному забезпеченні.

Великі дані протиставляються невеликим даним (Small Data), які зазвичай легше обробляються та використовуються для самообслуговування [15]. Основне завдання аналітики великих даних — підтримка прийняття обґрунтованих бізнес-рішень за рахунок аналізу великих масивів транзакційних та інших даних, недоступних традиційними методами.

Основні напрямки використання великих даних ілюструє рисунок 2.3.

Хоча сфери застосування великих даних дуже різноманітні, у межах цієї роботи акцент робиться на їх інтеграції з Інтернетом речей (IoT). Згідно з дослідженнями, до 2025 року обсяг даних, створюваних пристроями IoT, досягне приблизно 5,5 трлн ГБ [16].

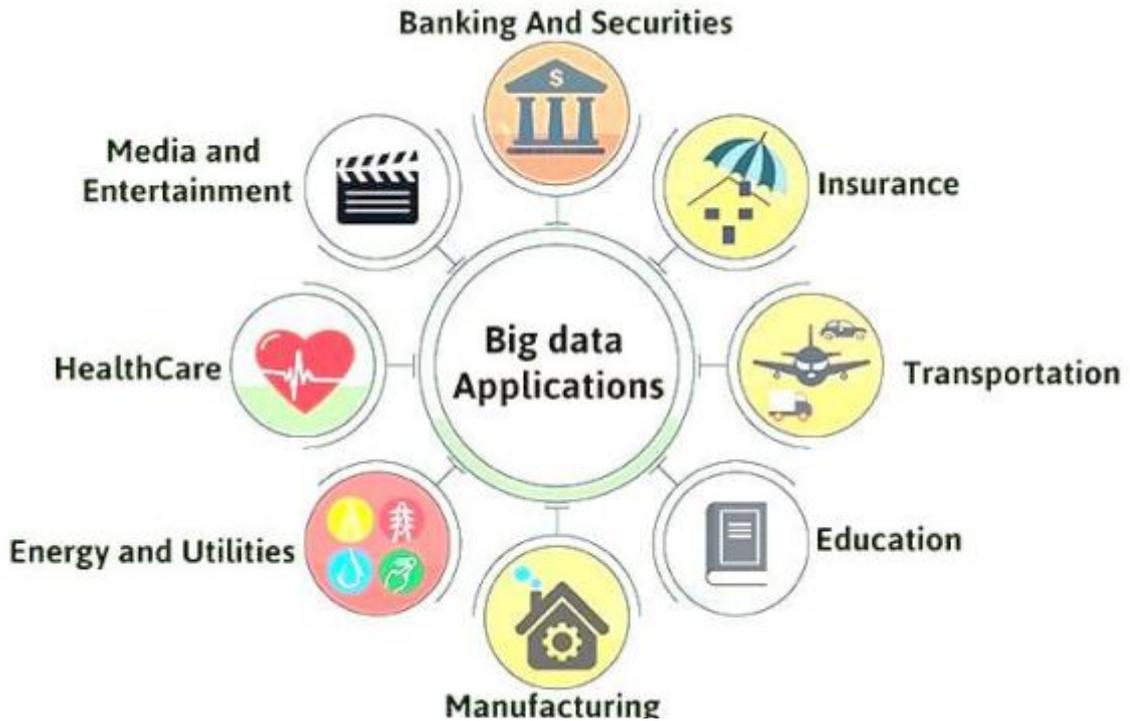


Рисунок 2.3 — Основні напрямки використання великих даних

Зі збільшенням кількості підключених пристроїв не дивно, що ще до 2020 року кількість IoT-датчиків і пристроїв перевищила десять мільярдів. Всі ці пристрої збирають, аналізують, обмінюються і передають дані в режимі реального часу. Без цих даних функціональні можливості IoT-пристроїв були б обмеженими, і вони не привертали б такої уваги у світі.

При зборі даних для аналітики IoT стає основним джерелом інформації, і тут важливість великих даних стає очевидною. Аналітика великих даних дозволяє обробляти інформацію, що генерується «підключеними пристроями», підтримуючи процес прийняття рішень.

Роль великих даних у IoT полягає у швидкій обробці значних обсягів інформації та їх надійному зберіганні за допомогою різних технологій. Процес обробки даних Інтернету речей можна умовно поділити на чотири етапи:

1) Збір великого обсягу неструктурованих даних, створених IoT-пристроями, що надходять у систему великих даних. Обсяг цих даних залежить від трьох основних характеристик: обсягу, швидкості та різноманітності.

2) Зберігання даних у системі великих даних, яка часто реалізується як розподілена база даних або файлове сховище.

3) Аналіз накопичених даних за допомогою аналітичних інструментів і алгоритмів обробки.

4) Формування звітів і візуалізацій на основі отриманих результатів.

Процес обробки великих даних в IoT наочно представлений на рисунку 2.4.

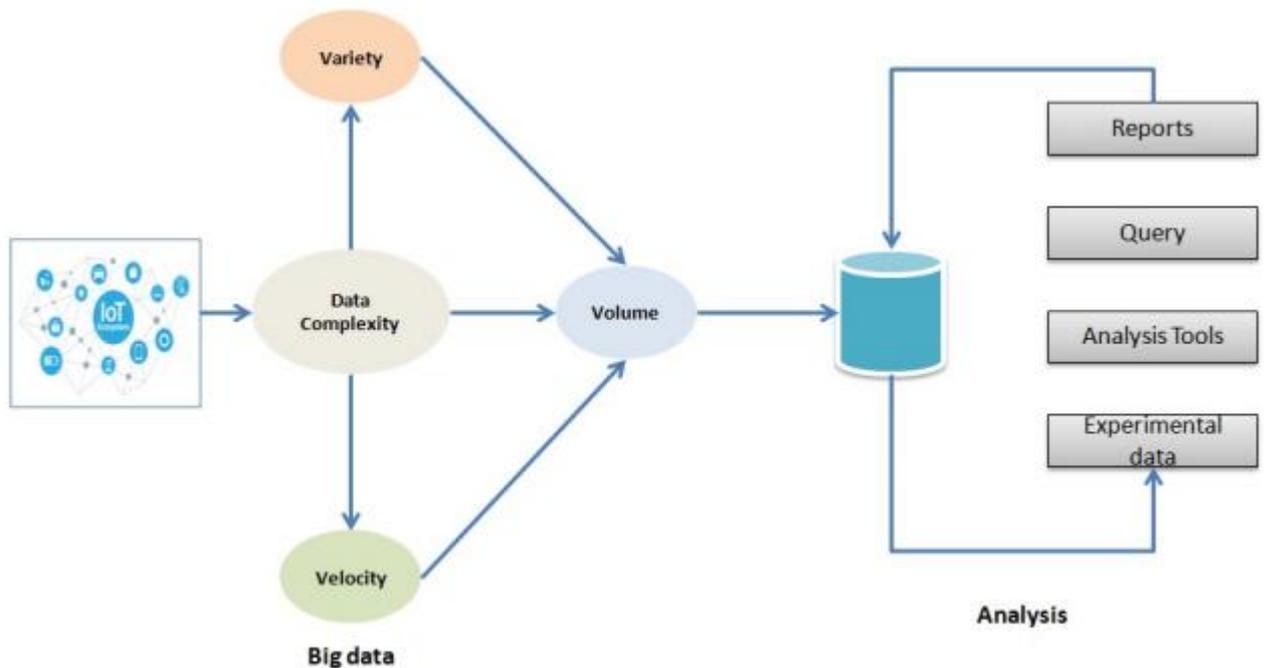


Рисунок 2.4 — Процес обробки великих даних в IoT

У IoT дані збираються переважно у неструктурованому вигляді через інтернет-підключення, що формує великі потоки інформації. Для ефективного використання таких даних необхідний швидкий і точний аналіз, що забезпечує оперативне прийняття рішень. Тому потреба у великих даних у сфері IoT є критичною.

Можна сказати, що великі дані виступають «паливом», що забезпечує функціонування Інтернету речей [17].

Зі збільшенням обсягів інформації виникає потреба в інноваційних рішеннях для її зберігання та обробки, що спричиняє модернізацію інфраструктури великих даних в організаціях. Інтегровані додатки IoT і Big

Data пришвидшують дослідження і розробки в обох сферах, демонструючи їх взаємозалежність та необхідність подальшого розвитку.

Аналітика великих даних у контексті IoT дозволяє:

- виявляти тенденції;
- знаходити закономірності;
- визначати приховані кореляції;
- розкривати нову інформацію.

Це дає компаніям можливість отримати цінну інформацію з IoT-даних, що допомагає підвищити ефективність управлінських рішень. Кожен сектор бізнесу та промисловості може отримати специфічні переваги, покращуючи розуміння даних і приймаючи більш обґрунтовані рішення.

Переваги інтеграції IoT і великих даних для різних секторів бізнесу

Інтернет речей у поєднанні з аналітикою великих даних надає компаніям різноманітні переваги:

1) Збільшення рентабельності інвестицій. Використання IoT і великих даних допомагає бізнесу отримувати максимальну інформаційну цінність із зібраних даних, що сприяє кращому розумінню бізнес-процесів та підвищенню ефективності прийняття рішень.

2) Хмарні сховища як економічне рішення. Зважаючи на підвищений попит на зберігання даних, компанії все частіше обирають хмарні платформи для великих даних, що дозволяє скоротити витрати на інфраструктуру.

3) Розвиток електронної охорони здоров'я. Комбінація IoT та великих даних відкриває нові можливості для медичних систем: перехід від досліджень на основі гіпотез до аналізу великих даних у реальному часі. IoT-сенсори дозволяють відстежувати й аналізувати взаємозв'язки сигналів різних датчиків, що сприяє розвитку дистанційної діагностики та впровадженню інноваційних рішень у медицині.

4) Виробничий сектор. Встановлення IoT-датчиків на обладнанні дає змогу збирати дані про його роботу, визначати потребу в технічному

обслуговуванні та запобігати серйозним поломкам. Це дозволяє зменшити витрати, уникнути простоїв і підвищити ефективність виробництва.

5) Аналітика самообслуговування. Сучасні IoT-рішення і інструменти великих даних стають більш автоматизованими та доступними, що дозволяє користувачам самостійно виконувати аналітичні завдання без глибоких IT-навичок. Це сприяє розвитку концепції «аналітика як послуга» у форматі самообслуговування.

б) Транспортна галузь. Датчики IoT у транспортних засобах дозволяють відстежувати їх рух, оцінювати використання палива, маршрути та ефективність роботи водіїв. Це допомагає оптимізувати автопарки та підвищити продуктивність компаній.

У промисловому IoT (IIoT) підключені пристрої забезпечують виконання таких функцій:

- моніторинг;
- збір даних;
- обмін інформацією;
- аналітика;
- дії на основі отриманої інформації.

Поєднання IoT і великих даних у IIoT є ключовим для ефективного управління промисловими процесами.

7) Периферійні обчислення (Edge Computing). Операції в режимі реального часу набувають особливої важливості. IoT і великі дані дозволяють швидко реагувати на запити, тому розгортання периферійних обчислень стає критично важливим для оперативного прийняття рішень.

Таким чином, тісна взаємодія IoT і великих даних надає організаціям численні переваги, які можна ефективно використовувати для підвищення продуктивності, оптимізації ресурсів та розвитку інновацій.

На рисунку 2.5 наведено динаміку зміни кількості підключених IoT-пристроїв в Україні та деяких сусідніх країнах.

## INDUSTRIAL IOT MARKET SIZE, 2022 TO 2032 (USD BILLION)

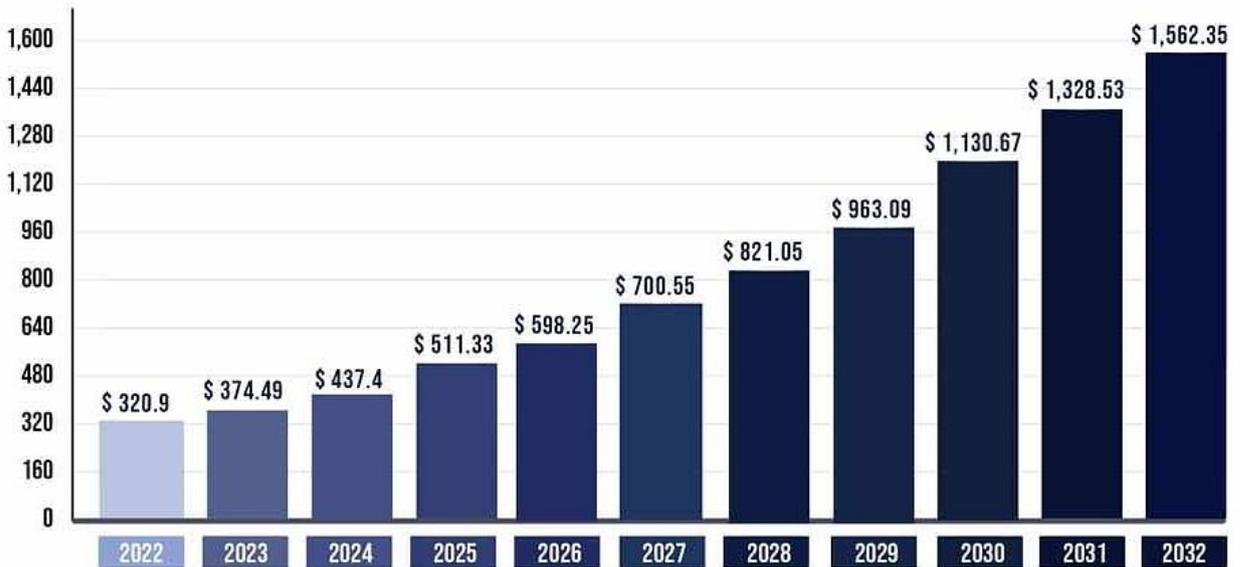


Рисунок 2.5 — Динаміку зміни кількості задіяних IoT-пристроїв

Таким чином, інструменти для роботи з великими даними і аналітики є незамінними для ефективного управління потоками даних, що надходять від пристроїв Інтернету речей. Розробники IoT створюють платформи, програмне забезпечення та додатки, які дозволяють підприємствам і організаціям контролювати підключені пристрої та обробляти згенеровані ними дані.

Завдяки розвитку інформаційних технологій і мікроелектроніки стало можливим виготовляти компактні сенсорні датчики, які відрізняються високою надійністю та низькою вартістю. Це сприяло широкому впровадженню сенсорних мереж, які дозволяють проводити постійний і точний моніторинг параметрів цільових об'єктів.

На початковому етапі розвитку сенсорних мереж дані передавалися за допомогою проводового з'єднання. Проте при великій кількості датчиків і близькому розташуванні вузлів система займала значний фізичний простір. Сучасні безпроводові сенсорні вузли у великих даних виконують ключову роль: вони збирають інформацію з сенсорного поля, обробляють її локально та

передають через радіомодуль до центрального вузла або іншої точки призначення.

Середовищем сенсорної мережі можуть виступати як її архітектурні компоненти, так і вплив фізичного рівня на комунікаційні лінії, а також моделі мережевого трафіку. Біологічні мережі відрізняються від запланованих тим, що в них співпраця між вузлами виникає природно завдяки кооперативному стимулу, тоді як у штучних мережах потрібні спеціальні механізми для активізації вузлів.

Важливим аспектом у безпроводових сенсорних мережах є метод передачі даних і запитів від вузла-джерела до вузла-приймача. Раніше дослідження зосереджувалися на аналізі можливостей спільної роботи датчиків, збору даних, їх обробки, координації та управлінні потоками інформації до пункту призначення.

На рисунку 2.6 представлена модель функціонування безпроводової сенсорної мережі з інтеграцією великих даних.

Приклад реалізації безпроводової сенсорної мережі наведено на рисунку 2.7. Загальна архітектура безпроводової сенсорної мережі представлена на рисунку 2.8.

Залежно від архітектурного підходу сенсорні мережі поділяються на такі основні типи:

- мережі з шаруватою архітектурою;
- мережі з кластерною організацією;
- мережі з мобільним стоком сенсорних вузлів.

Вибір конкретної архітектури безпроводової сенсорної мережі визначається сферою її застосування, умовами розгортання та вимогами до продуктивності й надійності.

Як приклад практичного використання можна розглянути стаціонарну сенсорну мережу типу «розумний будинок». Передача даних у таких системах здійснюється через окрему виділену мережу до центру обробки даних (ЦОД).

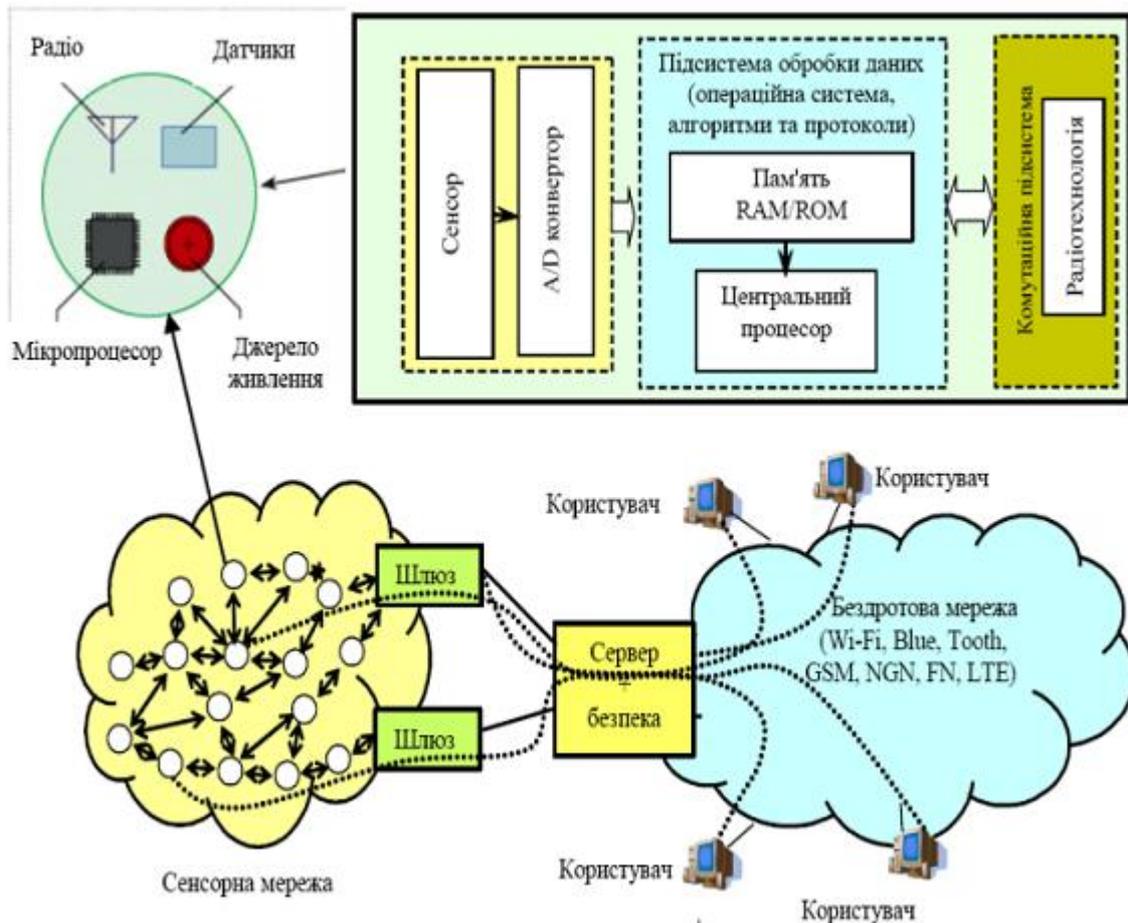


Рисунок 2.6 — Модель функціонування безпроводової сенсорної мережі з інтеграцією великих даних

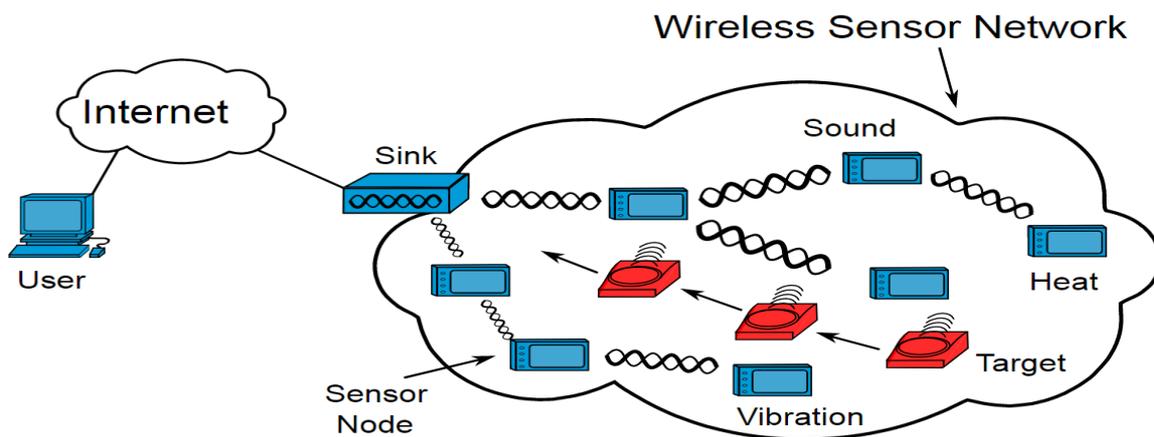


Рисунок 2.7 — Безпроводова сенсорна мережа

При цьому може використовуватися як спеціально створена телекомунікаційна інфраструктура, так і вже наявні мережі — телефонна

мережа загального користування, електромережі або безпроводові канали зв'язку.

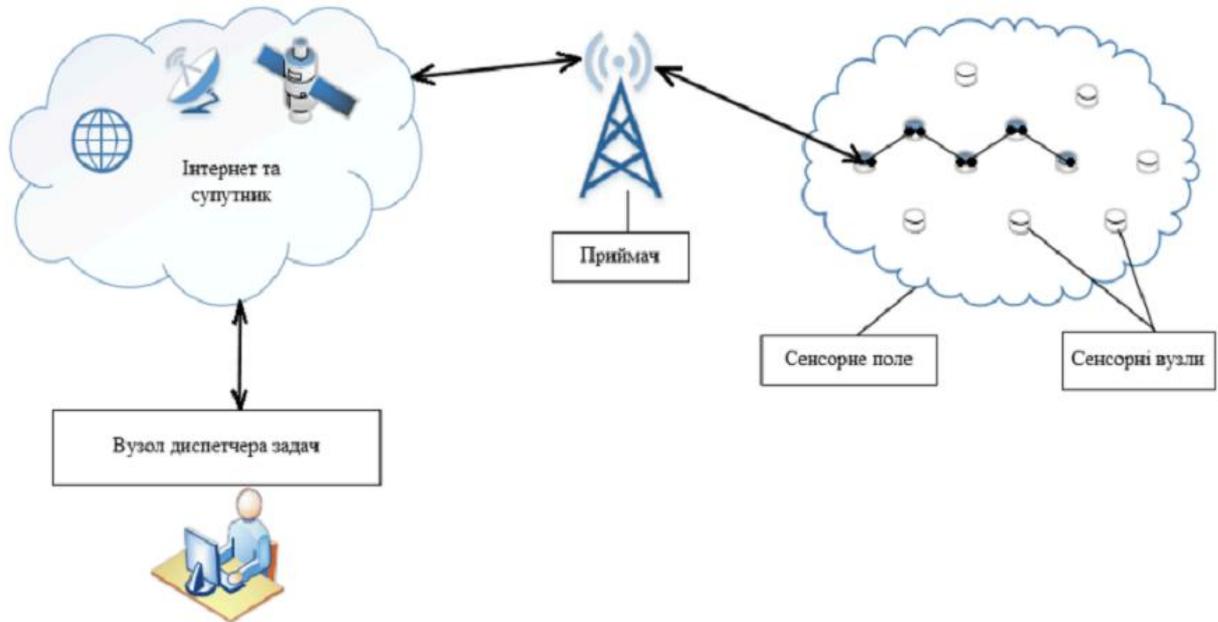


Рисунок 2.8 — Архітектура безпроводової сенсорної мережі

На сьогодні сенсорні мережі лише починають активно впроваджуватися у цивільні сфери діяльності. Можливість розгортання в складних умовах, відсутність потреби у прокладанні кабельних ліній та малі габарити сенсорних пристроїв роблять такі мережі надзвичайно гнучкими та практичними.

Зазначені характеристики є ключовими при виборі способу побудови нових мереж із використанням технологій Big Data. Завдяки великій кількості взаємопов'язаних інтелектуальних датчиків і засобів передавання даних сенсорні мережі демонструють високу стабільність, надійність і покращені експлуатаційні параметри. Це дозволяє розглядати їх як перспективне рішення для систем збору телеметричних даних, дистанційної діагностики та інформаційного обміну.

Керування сенсорною мережею, як правило, здійснюється за допомогою спеціального шлюзу, який розміщується між основними компонентами мережі. Модулі системи управління виконують приймання, обробку та збереження даних у базі даних, а також забезпечують реагування на події відповідно до

заданих алгоритмів. Наприклад, у разі виявлення займання контрольованого об'єкта від сенсорів надходить тривожний сигнал, після чого система автоматично активує локальні засоби оповіщення та передає повідомлення до пожежних служб [19].

Слід зазначити, що передавання інформації в сенсорних мережах здійснюється порівняно невеликими пакетами, що є характерною особливістю трафіку управління та моніторингу. Важливою вимогою стандартів сенсорних мереж також є обов'язкове підтвердження успішної доставки повідомлень.

Загалом існують два принципово різні підходи до побудови мереж зв'язку. Перший базується на використанні підтримуваної фізичної інфраструктури, яка надає користувачам мережеві сервіси, зокрема маршрутизацію. До цього класу належать традиційні телефонні мережі, мережі мобільного зв'язку, Інтернет, поштові та телевізійні системи. У таких мережах експлуатацію інфраструктури здійснюють спеціалізовані організації, відокремлені від кінцевих користувачів.

У сенсорних мережах, побудованих за цією парадигмою, застосовуються базові станції, які забезпечують інфраструктуру для сенсорних вузлів. Кожен вузол зазвичай має прямий канал зв'язку з базовою станцією та не взаємодіє безпосередньо з іншими вузлами, за винятком випадків ретрансляції повідомлень. Для мінімізації кількості базових станцій необхідне ретельне планування всієї мережі.

Другий тип мереж функціонує без централізованої інфраструктури. Усі вузли мають рівні права доступу та самостійно забезпечують надання мережевих сервісів. Прикладами таких систем є однорангові мережі, безпроводові ad-hoc мережі та радіомережі. Сенсорні мережі цього типу, як правило, простіші у розгортанні та масштабуванні.

Формування топології сенсорної мережі може здійснюватися за двома основними схемами: ієрархічною топологією типу «зірка» або однорідною топологією типу «точка—точка». У разі ієрархічної структури мережа складається з повнофункціональних вузлів і вузлів зі зменшеною

функціональністю. Повнофункціональні вузли виконують роль координаторів сегментів мережі та можуть обмінюватися даними між собою і з підлеглими вузлами. З огляду на підвищене навантаження такі вузли зазвичай є стаціонарними та мають зовнішнє джерело живлення.

Приклад організації безпроводової сенсорної мережі з використанням технологій великих даних наведено на рисунку 2.9.

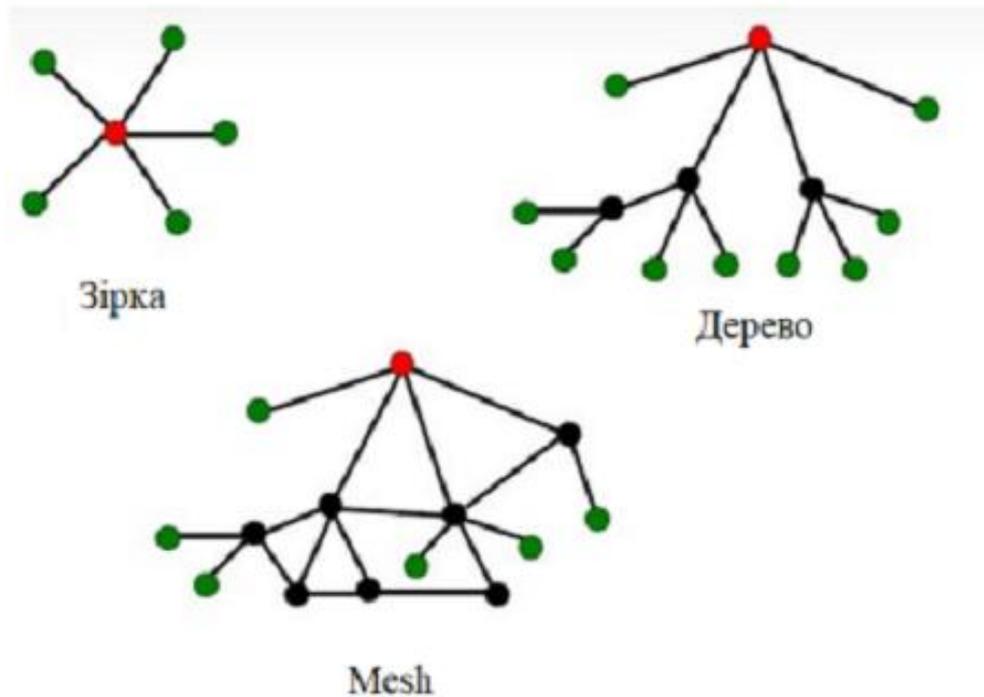


Рисунок 2.9 — Організація безпроводових сенсорних мереж

Такий підхід до побудови мережі доцільний для вирішення обмеженого кола завдань, зокрема у промислових системах моніторингу. Альтернативним варіантом є однорідна топологія, за якої всі вузли можуть безпосередньо взаємодіяти між собою в межах зони покриття. Такий підхід дозволяє створювати складніші та більш гнучкі конфігурації мереж, адаптовані до нестандартних задач.

Основними перевагами безпроводових сенсорних мереж із застосуванням Big Data є:

- здатність до самоорганізації та самовідновлення;

- можливість передавання даних на значні відстані за низької потужності передавачів;
- низька вартість і малі габарити сенсорних вузлів;
- мінімальне енергоспоживання та можливість автономного живлення;
- простота монтажу та відсутність необхідності прокладання кабельних ліній;
- низькі витрати на технічне обслуговування.

В інтелектуальних енергетичних системах сенсорні мережі інтегруються з платформами великих даних для управління енергоспоживанням. Такі системи підтримують моніторинг потужності, управління попитом, координацію розподілених систем зберігання енергії та інтеграцію відновлюваних джерел. У роботі [19] основна увага приділяється ефективному управлінню даними та вилученню корисної інформації з великих масивів даних.

Оскільки для інтелектуальних мереж ключовими вимогами є висока надійність і мінімальна затримка, все більшого значення набувають архітектури туманних обчислень, які забезпечують обробку даних у режимі реального часу.

Ще одним прикладом застосування є моніторинг фізичного стану людини за допомогою безпроводових мереж тіла (WBAN). Збір значних обсягів медичних даних через сенсорні мережі розглянуто в [20]. Для реалізації таких систем необхідні алгоритми розпізнавання активності, які включають етапи виділення ознак, класифікації, підтримки програмних платформ, а також механізми автентифікації датчиків і користувачів.

Таким чином, обсяги даних, що генеруються сенсорними мережами, зростають надзвичайно швидко. Традиційні інформаційні технології обробки та зберігання даних, зокрема сервери і реляційні бази даних, є недостатньо ефективними та економічно невиправданими для таких задач. Крім того, вони не здатні забезпечити необхідну продуктивність для обробки даних у реальному часі.

Водночас значна частина подій, що фіксуються сенсорами з регулярною періодичністю, є надлишковою або містить незначні зміни, що призводить до

перевитрати ресурсів зберігання та енергії передачі. Тому для сенсорних мереж, інтегрованих з системами Big Data, критично важливо забезпечити збір і передавання великих обсягів даних із мінімальною затримкою та оптимальним використанням ресурсів.

У підсумку, розглянуто основні підходи та технології побудови інфраструктури мереж Інтернету речей, а також особливості інтеграції IoT-систем із технологіями великих даних. Проаналізовано архітектурні рішення IoT, принципи функціонування сенсорних мереж та специфіку обробки великих обсягів даних, що генеруються підключеними пристроями.

Показано, що ефективне функціонування IoT неможливе без використання технологій Big Data, які забезпечують збирання, зберігання, аналіз і візуалізацію даних у режимі реального часу. Розглянуто роль хмарних, периферійних та туманних обчислень у зменшенні затримок і підвищенні масштабованості IoT-інфраструктури.

Окрему увагу приділено безпроводовим сенсорним мережам як базовому елементу IoT-систем. Проаналізовано їх архітектури, топології та способи організації обміну даними, а також переваги використання сенсорних мереж у поєднанні з аналітикою великих даних. Показано, що такі рішення є перспективними для промислових систем, інтелектуальних енергетичних мереж, транспортних і медичних застосувань.

Зроблено висновок, що конвергенція IoT, безпроводових сенсорних мереж і технологій Big Data формує основу для створення масштабованих, адаптивних та інтелектуальних систем моніторингу й управління, здатних працювати в умовах великих обсягів даних та жорстких вимог до часу обробки. Отримані результати є теоретичним підґрунтям для подальшого розроблення методів і моделей IoT-інфраструктури мережі.

## 3 МЕТОД ПОБУДОВИ ІОТ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ МЕРЕЖ ІЗ ІНТЕГРАЦІЄЮ BIG DATA

### 3.1 Порівняння технологічних рішень

Однією з ключових характеристик ІоТ-інфраструктур є рівень навантаження, який формується великою кількістю підключених пристроїв та обсягами даних, що генеруються ними у процесі функціонування. За умов високих навантажень традиційні підходи до збору та обробки інформації стають малоефективними, що зумовлює необхідність використання технологій Big Data. Водночас для значної частини ІоТ-застосувань критичним фактором є мінімізація енергоспоживання кінцевих пристроїв, більшість з яких працює автономно.

У зв'язку з цим ще у 2015—2016 роках почали активно розвиватися нові типи безпроводових мереж, орієнтованих на енергоефективну передачу даних на великі відстані. Такі технології забезпечують підключення великої кількості автономних ІоТ-пристроїв до глобальної мережі та поступово набувають широкого застосування в системах телеметрії, дистанційного моніторингу та обліку.

До найбільш поширених технологій цього класу належать LoRa, SIGFOX, NB-IoT, Weightless-P та інші рішення класу LPWAN (Low Power Wide Area Network). Їх поява була зумовлена потребою централізованого збору даних від великої кількості приладів обліку та сенсорних вузлів з подальшим зберіганням і аналізом інформації на хмарних платформах.

Технологія LoRa є одним із подальших етапів розвитку LPWAN-рішень і була розроблена та запатентована компанією *Semtech*. Основою LoRa є модифікований метод лінійної частотної модуляції, відомий як Chirp Spread Spectrum (CSS). Принцип роботи полягає у кодуванні інформації за допомогою широкосмугових імпульсів, частота яких змінюється в часі за зростаючим або спадним законом.

Використання CSS-модуляції забезпечує підвищену завадостійкість системи до частотних відхилень і зменшує вимоги до точності тактових генераторів приймально-передавальних модулів. Це, у свою чергу, дозволяє застосовувати недорогі кварцові резонатори та знижувати загальну вартість кінцевих пристроїв.

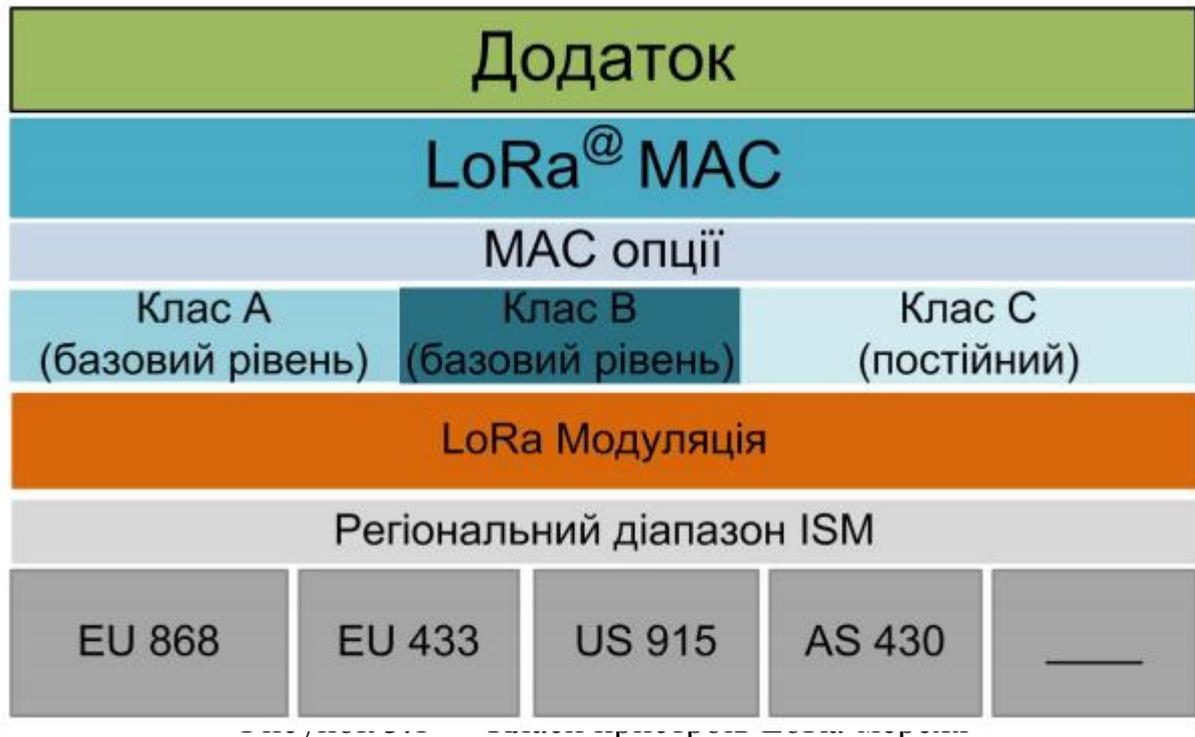
Для підвищення надійності передавання даних у LoRa застосовується механізм прямої корекції помилок (Forward Error Correction, FEC). Робота системи здійснюється в субгігагерцових діапазонах частот: 169, 433 і 915 МГц у США, а також у діапазоні 868 МГц у країнах Європи. Найбільш поширеними є частоти 868 і 915 МГц, тоді як використання діапазону 2,4 ГГц є обмеженим через підвищений рівень зовнішніх завад.

Швидкість передавання даних у мережах LoRa визначається компромісом між дальністю зв'язку та обсягом інформації, що передається. Повідомлення, надіслані з різними швидкостями, не створюють взаємних завад, що дозволяє одночасно обслуговувати пристрої з різними параметрами каналу. Типові значення швидкості передавання даних знаходяться в межах від 0,3 до 50 кбіт/с.

З метою оптимізації часу автономної роботи кінцевих пристроїв та підвищення загальної пропускної здатності мережі в LoRa реалізований механізм адаптивної швидкості передачі даних, який дозволяє мережевій інфраструктурі індивідуально налаштовувати параметри зв'язку для кожного вузла.

Характерною особливістю мереж LoRa є поділ кінцевих пристроїв на три класи, що відрізняються режимами прийому та передавання даних і орієнтовані на різні сценарії використання: клас А, клас В та клас С. Такий підхід забезпечує гнучкість архітектури мережі та дозволяє адаптувати її до вимог конкретних IoT-застосувань.

На рисунку 3.1 наведено класи пристроїв LoRa-мережі.



У мережах LoRa клас А є базовим і використовується за замовчуванням для всіх кінцевих пристроїв. У цьому режимі ініціатором сеансу зв'язку виступає сам IoT-вузол. Передавання даних здійснюється у вигляді коротких пакетів відповідно до визначеного графіка роботи пристрою. Після кожної передачі термінал відкриває одне або декілька приймальних вікон на обмежений проміжок часу, протягом якого очікує можливі команди або відповіді від мережевого сервера. Такий підхід забезпечує мінімальне енергоспоживання, що є критичним для автономних сенсорних вузлів.

У класі В реалізовано розширені можливості прийому даних за рахунок додаткового приймального вікна, яке активується за попередньо сформованим розкладом. Для синхронізації внутрішнього годинника пристрою з часовими параметрами мережі використовується спеціальний сигнал-маяк, що передається шлюзом. Завдяки цьому сервер отримує можливість ініціювати передавання даних у заздалегідь визначені часові інтервали, що розширює функціональність системи порівняно з класом А, зберігаючи при цьому прийнятний рівень енергоспоживання.

Пристрої класу С характеризуються майже безперервно відкритим приймальним вікном, яке закривається лише на час власної передачі даних. Такий режим забезпечує мінімальну затримку доставки інформації та дозволяє використовувати пристрої класу С у застосуваннях, що потребують частого або об'ємного обміну даними. Недоліком цього класу є підвищене енергоспоживання, що обмежує його використання у батарейних пристроях.

Мережі LoRa зазвичай будуються за топологією «зірка» (див. рис. 3.2), у якій кінцеві пристрої взаємодіють із мережею через LoRa-шлюзи. Шлюзи, у свою чергу, підключаються до центральної серверної інфраструктури (Network Server) з використанням стандартних IP-протоколів.

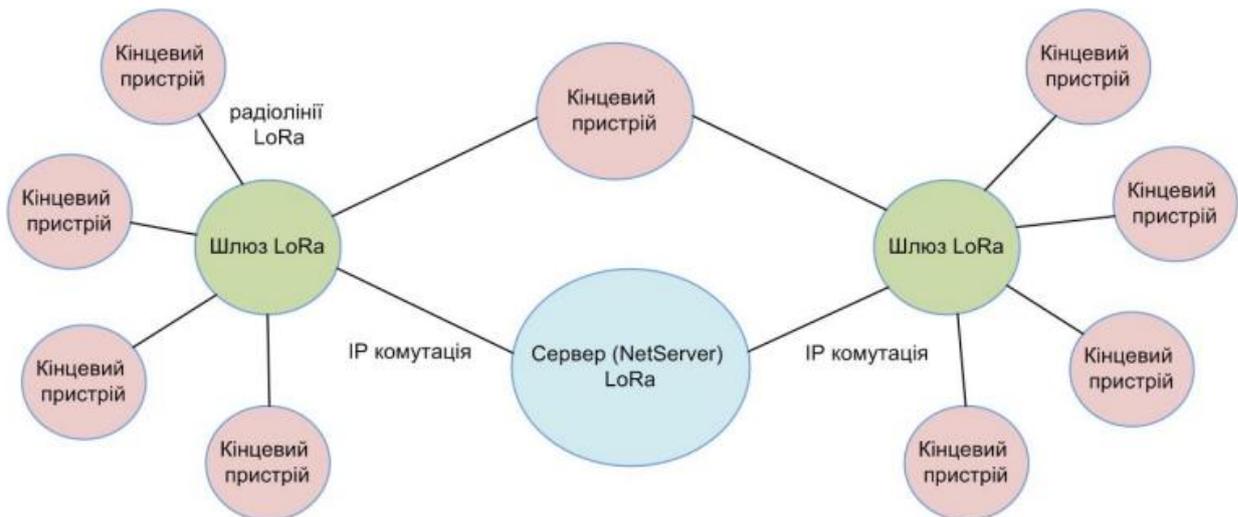


Рисунок 3.2 — Узагальнена архітектура мережі LoRa з використанням шлюзів та серверних компонентів

Важливою особливістю LoRaWAN є відсутність жорсткої прив'язки кінцевого пристрою до конкретного шлюзу, що підвищує надійність передачі даних і дозволяє ефективно масштабувати мережу.

Архітектура обміну повідомленнями між кінцевими пристроями, шлюзами та серверною частиною реалізується відповідно до відкритого протоколу LoRaWAN (див. рис. 3.3), який визначає механізми маршрутизації, автентифікації та керування мережею.

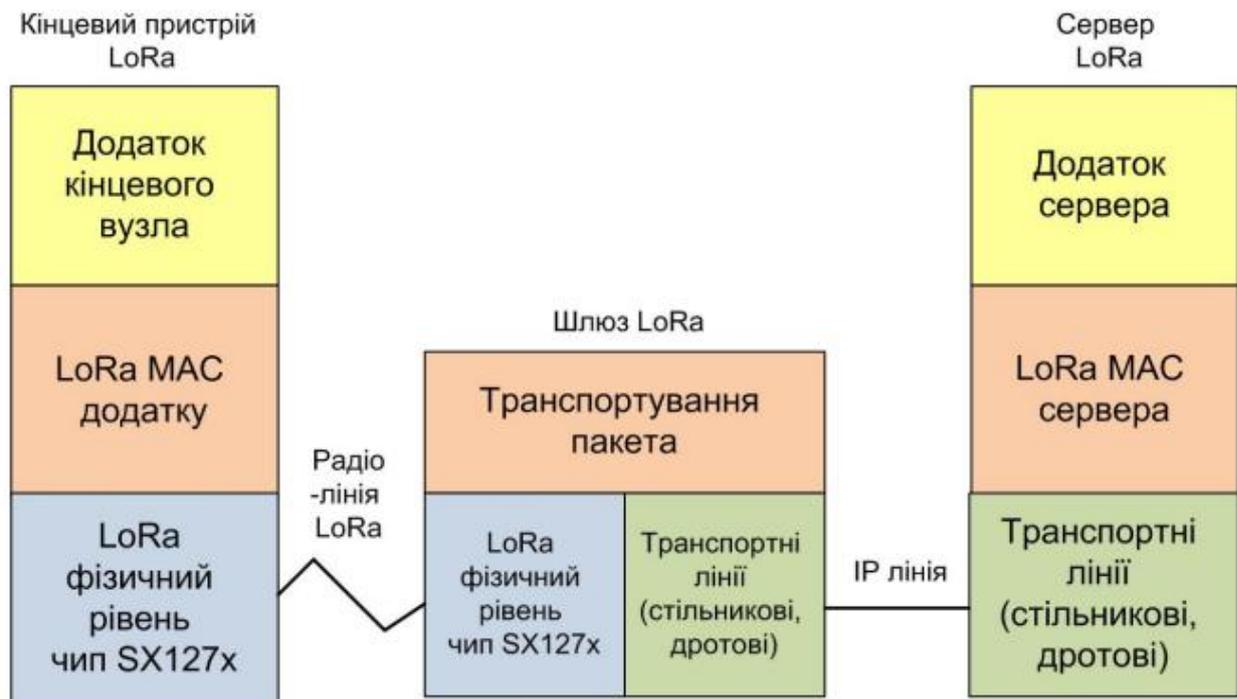


Рисунок 3.3 — Структура взаємодії вузлів у мережі LoRaWAN відповідно до відкритого протоколу

Технологія SIGFOX була розроблена однойменною приватною компанією з метою створення глобальної мережі, оптимізованої виключно для IoT-пристроїв. Основною перевагою SIGFOX є можливість передачі даних на значні відстані за умов надзвичайно низького енергоспоживання та використання джерел живлення малої ємності. Це робить технологію доцільною для простих автономних пристроїв, які передають незначні обсяги інформації з великою періодичністю.

За своєю архітектурою мережа SIGFOX має певну схожість із стільниковими системами зв'язку (GSM, 3G, 4G), однак характеризується значно нижчими витратами енергії та меншою вартістю розгортання. Для передачі даних використовується технологія ультравузькосмугового зв'язку (Ultra Narrow Band, UNB), яка є ключовим чинником досягнення низької потужності передавача та високої завадостійкості каналу, як показано на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 — Топологічна модель мережі SIGFOX з комерційною інфраструктурою

Топологія мережі SIGFOX також базується на принципі «зірка» і розроблена з урахуванням вимог до масштабованості, високої пропускної здатності та мінімального енергоспоживання. Комерційна структура інфраструктури забезпечує покриття великих територій при збереженні простої архітектури мережі.

У системах SIGFOX можливе використання двох основних режимів роботи вузлів: режиму прямого зв'язку P2P та гібридного режиму SIGFOX/P2P. У режимі P2P вузли можуть обмінюватися даними безпосередньо між собою без залучення глобальної мережі, що дозволяє уникнути додаткових витрат на передачу даних. Такий підхід спрощує створення локальних або вторинних мереж без необхідності зміни програмного забезпечення пристроїв.

Гібридний режим передбачає комбіноване використання прямого P2P-зв'язку та мережі SIGFOX. У цьому випадку один із вузлів виконує функції шлюзу, передаючи вибрані повідомлення до глобальної мережі, тоді як інші вузли працюють у режимі прямого обміну даними.

Технологія Weightless є відкритим стандартом LPWAN, орієнтованим на забезпечення високої продуктивності та масштабованості мережі. У межах спільноти Weightless Special Interest Group розроблено три протоколи: Weightless-W, Weightless-N та Weightless-P, кожен з яких призначений для різних сценаріїв використання.

Протокол Weightless-W працює в телевізійному діапазоні частот (TV White Space) та є доцільним для застосування в промислових секторах, зокрема в нафтовій і газовій галузях.

Weightless-N орієнтований на максимальне покриття території та мінімальне енергоспоживання, при цьому підтримує лише односторонній зв'язок. Такий підхід робить його придатним для сенсорних мереж, що виконують прості вимірювання, зокрема температури, рівня рідини або параметрів навколишнього середовища.

Найбільш функціональним є протокол Weightless-P, який реалізує двосторонній вузькосмуговий зв'язок і призначений для IoT-систем з високою щільністю пристроїв та тривалим терміном автономної роботи. Основними перевагами Weightless-P є масштабованість, оптимізовані висхідні та низхідні канали зв'язку, значна зона покриття та підтримка механізмів забезпечення якості обслуговування (QoS). На відміну від інших варіантів стандарту, Weightless-P не потребує використання температурно-компенсованих кварцових генераторів, що спрощує апаратну реалізацію пристроїв.

Завдяки високій ємності базових станцій технологія Weightless-P дозволяє обслуговувати значну кількість кінцевих вузлів, що знижує витрати на розгортання інфраструктури та робить її однією з найбільш масштабованих LPWAN-технологій у субгігагерцовому діапазоні.

NB-IoT (Narrow Band IoT) або LTE-Cat.M2 — це стандарт вузькосмугового безпроводового зв'язку, що характеризується широкою зоною покриття, швидкою інтеграцією в існуючу мережеву інфраструктуру, низьким енергоспоживанням, яке забезпечує термін служби батарей до 10 років, а також підвищеною надійністю та високим рівнем безпеки операторського класу. NB-

IoT відповідає критеріям LPWAN і дозволяє операторам масштабувати нові IoT-послуги.

Ця технологія підтримує широкий спектр додатків, включаючи системи інтелектуального обліку, відстеження об'єктів та промислові рішення, наприклад, концепцію «розумного міста». NB-IoT еволюціонує з традиційних стільникових мереж, надаючи можливість використання вузькосмугових безпроводових мереж для M2M-додатків із низьким енергоспоживанням.

Стандарт NB-IoT був визначений у 3GPP Release 13 (LTE Advanced Pro) і з 2016 року проходить етап тестування. На сьогодні він охоплює понад 50 варіантів застосування, зокрема:

- інтелектуальні лічильники (електрика, газ, вода);
- охоронно-пожежну сигналізацію житлових і комерційних об'єктів;
- медичні сенсорні пристрої для контролю здоров'я;
- системи відстеження людей, тварин і предметів;
- міську інфраструктуру, включаючи освітлення та контроль транспорту;
- промислові пристрої, наприклад, зварювальні апарати та компресори.

Сервіси з низьким енергоспоживанням потребують великої зони покриття та ефективного використання батарей, що характерно для близько 80% сценаріїв LPWAN. Основні функції та можливості NB-IoT наведено на рисунку 3.5.

Для порівняння продуктивності технологій LPWAN наведено таблицю 3.1, що демонструє ключові параметри LoRa, SIGFOX, NB-IoT та Weightless-P.

Багато операторів у світі використовують діапазон 900 МГц для GSM, що пояснюється його високою здатністю до проникнення в приміщення та великою зоною покриття. Це робить NB-IoT ефективним рішенням для широкого спектра IoT-додатків у міських і промислових середовищах.

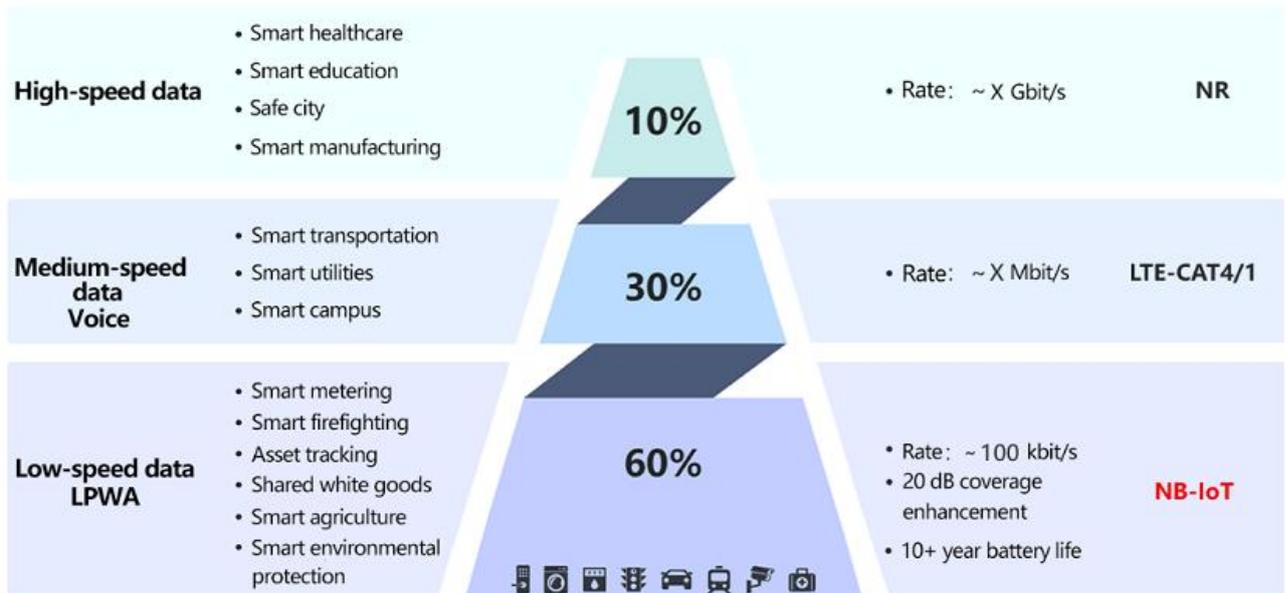


Рисунок 3.5 — Основні функціональні можливості NB-IoT

Таблиця 3.1 — Порівняння технологій сенсорних мереж IoT із підтримкою Big Data

Технічні характеристики	LoRa	SIGFOX	NB-IoT	Weightless-P
Метод модуляції	CSS	—	OFDMA/DSSS	FDMA/TDMA
Діапазон	ISM	ISM	Ліцензований	ISM
Швидкість	0,3—50 кбіт/сек	100 кбіт/сек	UL: 1—144 кбіт/сек DL: 1—200 кбіт/сек	0,2—100 кбіт/сек (адаптивна)
Смуга	Широкосмуговий до 500 кГц	Вузькосмуговий 100 кГц	Вузькосмуговий 200 кГц	Вузькосмуговий 12,5 кГц
Час автономії	> 10 років	—	До 10 років	3—5 років
Частота	868,8 МГц (Європа) 915 МГц (США) 433 МГц (Азія)	868,8 МГц (Європа) 915 МГц (США)	700 / 800 / 900 МГц	169/433/470/ 780/868/915/ 923 МГц

Проведене порівняння технологій LPWAN показує, що NB-IoT за сукупністю характеристик перевершує альтернативні рішення, такі як e-MTC, SIGFOX та LoRa, з точки зору продуктивності, надійності та масштабованості.

Аналіз параметрів мережеских інвестицій, сценаріїв покриття, балансу висхідного та спадного трафіку, а також рівня доступності сервісу дозволяє зробити висновок, що NB-IoT є найбільш універсальною та перспективною технологією для побудови сучасних IoT-інфраструктур із підтримкою Big Data.

Розгортання NB-IoT у діапазонах 700, 800 та 900 МГц є технічно та економічно обґрунтованим, оскільки ці частоти мають сприятливі характеристики поширення радіохвиль і вже активно використовуються в мережах UMTS та LTE. Наявність розвиненої екосистеми та підтримка з боку провідних світових операторів зв'язку значно спрощують впровадження NB-IoT та забезпечують його сумісність з існуючою телекомунікаційною інфраструктурою.

Кінцеві IoT-пристрої, розташовані на периферії мережі, підключаються до системи для подальшої інтелектуальної обробки та аналітики зібраних даних. Залежно від архітектури рішення, такі пристрої можуть взаємодіяти з мережею безпосередньо або через проміжні вузли — шлюзи. Шлюзи виконують функцію агрегації трафіку, поєднуючи енергоефективні мережі далекого радіусу дії з локальними або глобальними мережами більшої пропускної здатності. На відміну від кінцевих вузлів, шлюзи зазвичай мають стабільне джерело живлення та підвищені обчислювальні ресурси.

Обробка даних на рівні шлюзів реалізується за допомогою крайових або туманних обчислень, що дозволяє фільтрувати та попередньо аналізувати інформацію від сенсорів і виконавчих механізмів. Використання інтелектуальних порогових механізмів зменшує обсяг переданого трафіку та підвищує ефективність взаємодії з хмарними сервісами Big Data. Такий підхід є критично важливим для кінцевих пристроїв, орієнтованих на багаторічну автономну роботу з мінімальним енергоспоживанням.

Взаємодія між елементами IoT-інфраструктури може здійснюватися з використанням різних безпроводових технологій, як стільникових, так і нестільникових. Це надає розробникам можливість обирати оптимальні радіоінтерфейси залежно від вимог до зони покриття, затримки, пропускної

здатності, енергоефективності та вартості реалізації. Разом з тим, масштабне використання гетерогенних технологій зв'язку створює додаткові виклики, пов'язані з сумісністю, завадостійкістю та оптимізацією енергоспоживання.

Таким чином, при проектуванні IoT-систем необхідно комплексно враховувати не лише відповідність стандартам безпроводового зв'язку, але й вимоги до довговічності пристроїв, автономності та надійності роботи. Це обумовлює потребу у чітко визначеній архітектурі IoT-інфраструктури, яка забезпечує ефективну інтеграцію з платформами Big Data.

### 3.2 Структурна схема IoT- інфраструктури

Запропоновано структурну схему IoT-інфраструктури для сенсорної мережі з інтеграцією технологій великих даних. Основна увага приділяється взаємодії між рівнями збору, передачі, зберігання та інтелектуальної обробки даних, що формують єдину масштабовану систему.

Запропонована базова структурна модель IoT-рішення для сенсорних мереж із підтримкою Big Data представлена на рисунку 3.6, який ілюструє узагальнену архітектуру системи та основні інформаційні потоки між її компонентами.

Як показано на рисунку 3.1, нижній рівень системи формують сенсорні вузли, які здійснюють вимірювання фізичних або технологічних параметрів об'єкта спостереження. Такі вузли можуть бути оснащені датчиками температури, тиску, вологості, струму, напруги або інших величин і, як правило, працюють в умовах обмежених обчислювальних ресурсів та енергоспоживання.

Дані від сенсорних вузлів передаються до вузла-приймача або шлюзу збору інформації. Цей компонент виконує функції агрегації, первинної фільтрації та нормалізації даних, а також забезпечує їх доставку до вищих рівнів системи. Шлюз є ключовим елементом, що поєднує безпроводову сенсорну мережу з транспортною мережею передачі даних, яка може бути реалізована на основі IP-протоколів або стільникових технологій.

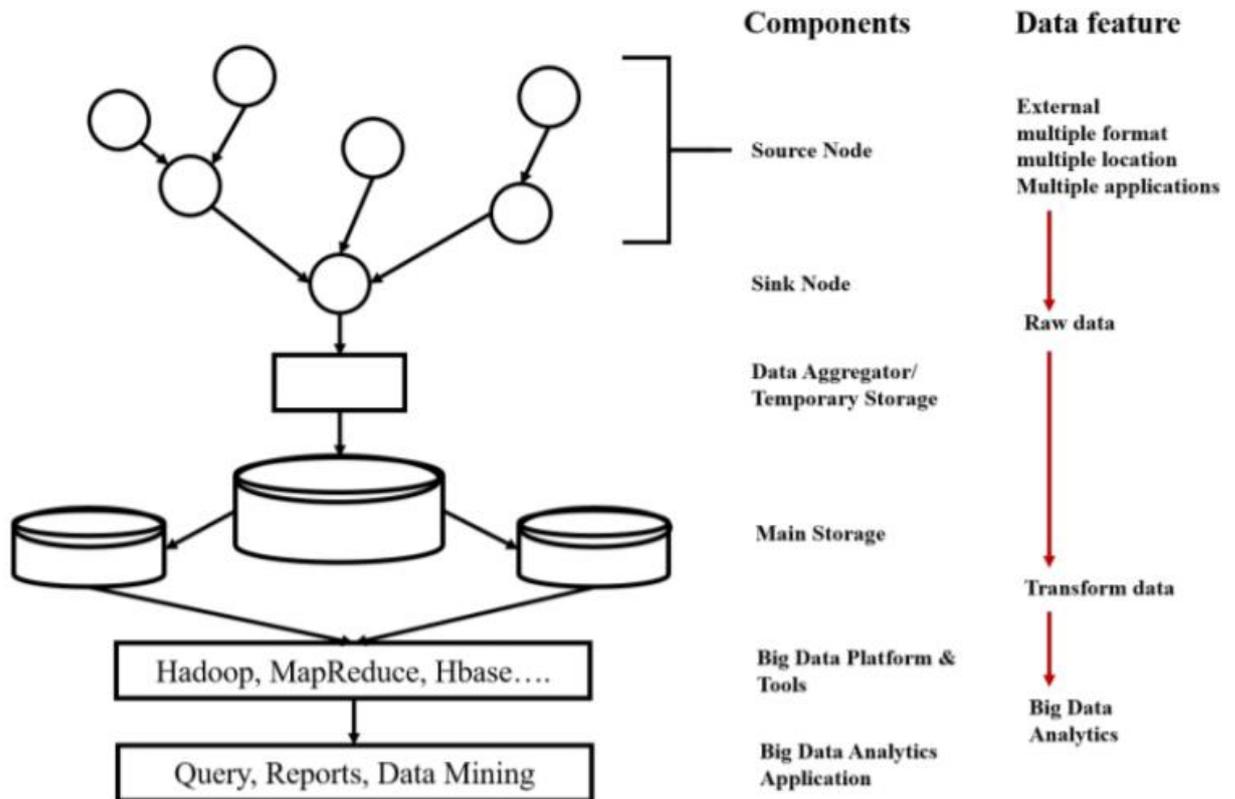


Рисунок 3.6 — Архітектура IoT-інфраструктури

На наступному етапі зібрані дані надходять до тимчасового сховища (буферного або потокового), яке використовується для попереднього накопичення та групування інформації. Такий підхід дозволяє ефективно працювати з великими обсягами потокових даних, зменшувати навантаження на канали зв'язку та оптимізувати подальші процеси обробки.

Після агрегування дані передаються до основного сховища великих даних, яке є ядром Big Data-інфраструктури. Це сховище забезпечує довготривале зберігання структурованих, напівструктурованих і неструктурованих даних, а також підтримує горизонтальне масштабування та високу відмовостійкість. Управління даними на цьому рівні здійснюється за допомогою спеціалізованих платформ великих даних, що реалізують функції розподіленої обробки, індексації та доступу до інформації.

Оброблені та трансформовані дані використовуються аналітичними платформами і прикладними сервісами Big Data. На цьому рівні реалізуються алгоритми інтелектуального аналізу, машинного навчання, прогнозування та виявлення закономірностей, що дозволяє отримувати цінну інформацію для прийняття управлінських рішень у реальному або близькому до реального часу.

Особливим прикладом застосування такої архітектури є інтелектуальні енергетичні мережі, у яких сенсорні мережі інтегруються з системами великих даних для управління енергоспоживанням [20]. У подібних рішеннях аналітичні додатки виконують моніторинг потужності, оптимізацію споживання на стороні попиту, координацію розподілених систем зберігання енергії та інтеграцію джерел відновлюваної генерації. Використання Big Data у таких системах забезпечує підвищення ефективності, надійності та адаптивності енергетичної інфраструктури.

Таким чином, структурна схема IoT-інфраструктури з інтеграцією Big Data є багаторівневою системою, у якій кожен компонент виконує чітко визначену функцію. Взаємодія сенсорних мереж, шлюзів, сховищ та аналітичних платформ створює основу для побудови масштабованих і високоефективних IoT-рішень, здатних обробляти великі обсяги даних у різних предметних областях.

Додатково слід зазначити, що структурна схема IoT-інфраструктури з інтеграцією Big Data може бути формалізована у вигляді багаторівневої моделі, де кожен рівень відповідає за окрему функціональну підсистему. Такий підхід спрощує проектування, масштабування та подальшу модернізацію IoT-рішень.

Фізичний рівень (рівень сприйняття) включає сенсорні вузли, виконавчі механізми та вбудовані контролери. Основним завданням цього рівня є безперервний або подієвий збір первинних даних з об'єктів спостереження. З огляду на обмежені ресурси сенсорних вузлів, на цьому рівні зазвичай реалізуються лише базові операції, такі як вимірювання, попередня фільтрація та кодування даних.

Рівень доступу та передачі даних забезпечує доставку інформації від сенсорних вузлів до вузлів агрегації або шлюзів. На цьому рівні використовуються енергоефективні безпроводові технології зв'язку (LPWAN, WSN, стільникові або гібридні рішення), вибір яких визначається вимогами до дальності, пропускну здатності, затримки та енергоспоживання. Саме цей рівень відіграє ключову роль у забезпеченні надійності та масштабованості всієї IoT-інфраструктури.

Рівень шлюзів і крайових обчислень (edge або fog level) виконує функції проміжної обробки даних. Шлюзи не лише агрегують потоки інформації, але й можуть реалізовувати алгоритми локальної аналітики, подієвого реагування та прийняття рішень у реальному часі. Це дозволяє зменшити обсяг переданих до хмарної інфраструктури даних, знизити затримки та підвищити загальну ефективність системи.

Рівень зберігання та обробки великих даних є центральним елементом IoT-інфраструктури. На цьому рівні реалізується довготривале зберігання даних, їх розподілена обробка та інтеграція з аналітичними інструментами. Архітектура Big Data дозволяє працювати з великими обсягами гетерогенних даних, що надходять від тисяч або мільйонів пристроїв, забезпечуючи високу доступність і відмовостійкість системи.

Прикладний рівень включає аналітичні сервіси, системи підтримки прийняття рішень та прикладні програми, орієнтовані на конкретні предметні області. Саме на цьому рівні результати аналізу великих даних перетворюються на корисну інформацію для користувачів або автоматизованих систем управління. Прикладні сервіси можуть виконувати функції прогнозування, оптимізації, виявлення аномалій або автоматичного керування процесами.

Важливою особливістю розглянутої структурної схеми є зворотний зв'язок між рівнями системи. Результати аналітики Big Data можуть використовуватися для адаптації параметрів сенсорної мережі, зміни режимів опитування датчиків або оптимізації маршрутів передачі даних. Таким чином, IoT-інфраструктура набуває властивостей самоналаштування та адаптивності.

Крім того, при побудові структурної схеми IoT-інфраструктури необхідно враховувати аспекти інформаційної безпеки. Захист даних має реалізовуватися на всіх рівнях системи — від автентифікації сенсорних вузлів і шифрування каналів зв'язку до контролю доступу та забезпечення цілісності даних у сховищах Big Data.

Отже, структурна схема IoT-інфраструктури з інтеграцією великих даних являє собою складну ієрархічну систему, у якій поєднуються сенсорні мережі, комунікаційні технології, крайові обчислення та аналітичні платформи. Така архітектура створює технологічну основу для реалізації масштабованих, енергоефективних і інтелектуальних IoT-рішень, що здатні ефективно працювати з великими потоками даних у різних сферах застосування.

Таким чином, розглянута структурна схема IoT-інфраструктури демонструє комплексний підхід до побудови сенсорних систем із підтримкою технологій великих даних. Запропонована багаторівнева архітектура забезпечує послідовний збір, передачу, агрегацію, зберігання та інтелектуальну обробку даних, що надходять від великої кількості розподілених сенсорних вузлів.

Поєднання енергоефективних безпроводових мереж, шлюзів із функціями крайових обчислень та централізованої інфраструктури Big Data дозволяє досягти високої масштабованості, надійності та гнучкості IoT-систем. Такий підхід не лише знижує навантаження на магістральні канали зв'язку, але й створює передумови для оперативного реагування на події, підвищення ефективності аналізу та оптимізації використання ресурсів.

Разом з тим, зростання кількості підключених пристроїв і обсягів оброблюваних даних вимагає особливої уваги до питань управління потоками інформації, інтеграції різномірних джерел даних та забезпечення безпеки на всіх рівнях IoT-інфраструктури. Саме ці аспекти визначають подальший розвиток архітектур IoT і їх тісний зв'язок з платформами великих даних.

У зв'язку з цим доцільно детальніше розглянути підходи до обробки, зберігання та аналітики даних, що генеруються IoT-пристроями, з використанням сучасних технологій Big Data.

### 3.3 IoT інфраструктура з інтеграцією Big Data

Стрімке зростання кількості IoT-пристроїв та обсягів даних, які вони генерують, зумовлює необхідність побудови високопродуктивних і водночас енергоефективних систем, зокрема на основі технології NB-IoT. Сучасні IoT-рішення вже не обмежуються періодичним збором простих вимірювань, а передбачають безперервний моніторинг, інтелектуальну обробку та аналіз великих потоків даних у режимі, близькому до реального часу. Саме ці вимоги формують потребу в тісній інтеграції IoT-інфраструктури з технологіями Big Data.

Показовим прикладом є застосування IoT у сільському господарстві, зокрема в системах точного землеробства. Використання сенсорів для вимірювання параметрів ґрунту, мікроклімату, рівня вологості, освітленості та інших факторів дозволяє підвищити врожайність і оптимізувати використання ресурсів. Ключовою вимогою таких систем є отримання достовірних, точних і своєчасних даних про стан об'єктів моніторингу, що неможливо реалізувати без масштабованої платформи збору та аналізу даних.

Інформація, отримана від сенсорних вузлів, використовується як вхідні дані для спеціалізованих систем керування технологічними процесами. До таких задач належать автоматизоване керування зрошенням, оптимізація дозування добрив і пестицидів, моніторинг поширення шкідників, а також прогнозування стану посівів. Для забезпечення комплексної обробки даних інтеграція IoT з безпроводовими сенсорними мережами (WSN) та платформами Big Data є критично важливою, оскільки саме вона дозволяє перейти від локальних вимірювань до системного аналізу та прийняття обґрунтованих рішень.

У подібних сценаріях застосування традиційних підходів до зберігання та аналізу даних виявляється недостатнім. Дані, що генеруються IoT-пристроями, характеризуються великим обсягом, високою швидкістю надходження та різноманітністю форматів. Це обумовлює необхідність

використання технологій Big Data, які забезпечують розподілене зберігання, паралельну обробку та аналітику великих масивів інформації. Сучасні IoT-системи в такому разі моделюються як агентно-орієнтовані середовища, де сенсорні вузли, шлюзи, крайові платформи та хмарні сервіси взаємодіють як єдина інтелектуальна система.

Хоча внесок технологій IoT, Big Data та WSN, розглянутих окремо, добре відомий і доведений практикою, їх інтеграція в межах єдиної IoT-інфраструктури відкриває нові можливості. Поєднання цих компонентів дозволяє значно підвищити ефективність систем моніторингу, точність моделювання виробничих процесів, якість прогнозування та обґрунтованість управлінських рішень. Особливо це актуально для задач довготривалого спостереження, аналізу тенденцій і виявлення прихованих закономірностей у великих обсягах даних.

Безпроводові сенсорні мережі в такій інфраструктурі виконують низку ключових функцій. До них належать збір даних про різні фізичні параметри (температура, вологість, освітленість, концентрація речовин тощо), попередня розподілена обробка інформації, агрегація та злиття даних низького рівня, а також передача релевантної інформації до шлюзів і центрів обробки. Використання кластерної організації WSN із головними вузлами дозволяє зменшити обсяг переданих даних і знизити навантаження на канали зв'язку.

Між технологіями Big Data та IoT існує тісний взаємозалежний зв'язок. З одного боку, зростання масштабів IoT призводить до різкого збільшення обсягів даних і підвищує вимоги до продуктивності систем Big Data. З іншого боку, розвиток інструментів аналізу великих даних стимулює впровадження більш складних і функціонально насичених IoT-рішень. Унаслідок цього традиційні системи зберігання даних поступово вичерпують свої можливості, що зумовлює перехід до розподілених, масштабованих і відмовостійких сховищ та обчислювальних платформ.

У багатьох практичних застосуваннях, таких як моніторинг великих територій, управління енергетичними системами або екологічний контроль,

сенсорні вузли об'єднуються у високопродуктивні WSN з ієрархічною структурою. Такі мережі включають вузли вимірювання та вузли збору й обробки даних, які виконують роль кластерних головок або шлюзів. Подібна організація дозволяє оптимізувати використання ресурсів і підвищити загальну ефективність системи.

Окремої уваги потребує питання енергоефективності IoT-інфраструктури. У задачах тривалого моніторингу кінцеві пристрої часто працюють в автономному режимі протягом багатьох років, що накладає жорсткі обмеження на енергоспоживання. Тому дослідження та оптимізація енергетичних параметрів сенсорних вузлів, протоколів зв'язку та механізмів обробки даних є невід'ємною складовою проектування IoT-систем із підтримкою Big Data.

Узагальнюючи викладене, можна зробити висновок, що ефективна реалізація сучасних IoT-рішень неможлива без використання технологій Big Data та без урахування вимог енергоефективності. Інтеграція IoT, WSN і Big Data формує основу для побудови масштабованих, інтелектуальних і надійних систем моніторингу та управління, що відповідають вимогам сучасних прикладних задач.

Таким чином, інтеграція IoT, безпроводових сенсорних мереж та технологій Big Data формує цілісну інфраструктуру, здатну забезпечити збір, передачу, зберігання та інтелектуальну обробку великих обсягів даних у масштабних розподілених системах. Використання NB-IoT як базової технології зв'язку дозволяє поєднати широку зону покриття, високу надійність і низьке енергоспоживання, що є критичним для довготривалої автономної роботи кінцевих IoT-пристроїв.

Разом з тим, зростання кількості сенсорних вузлів і складності алгоритмів обробки даних підвищує вимоги до оптимізації параметрів функціонування системи. Насамперед це стосується енергоспоживання кінцевих пристроїв, характеристик передавання даних, частоти вимірювань, а також балансу між локальною, крайовою та хмарною обробкою інформації. Без

формалізованого підходу до аналізу цих параметрів неможливо забезпечити стабільну роботу IoT-інфраструктури впродовж усього життєвого циклу.

У зв'язку з цим актуальним є застосування математичних моделей, які дозволяють кількісно описати процеси збору, передавання та обробки даних у NB-IoT і WSN, а також оцінити вплив різних факторів на енергоефективність і продуктивність системи. Побудова таких моделей створює основу для подальшої оптимізації архітектури IoT-рішення та обґрунтованого вибору параметрів його роботи.

З огляду на викладене, у підрозділі 3.4 доцільно перейти до розроблення та аналізу математичної моделі функціонування IoT-системи, яка дозволить формалізувати взаємодію сенсорних вузлів, мережевої інфраструктури та компонентів обробки даних, а також оцінити енергоефективність і пропускну здатність системи в різних режимах експлуатації.

### 3.4 Математична модель IoT інфраструктури

Для формального опису процесів функціонування IoT-інфраструктури з інтеграцією Big Data доцільно застосувати математичну модель, яка дозволяє кількісно описати взаємодію між сенсорними вузлами, каналами зв'язку, обчислювальними компонентами та підсистемами зберігання й аналізу даних. Така модель є необхідною для подальшої оптимізації параметрів системи, зокрема з точки зору енергоефективності, пропускну здатності та масштабованості.

У загальному вигляді IoT-рішення розглядається як багатокomпонентна динамічна система, що працює у дискретному або квазібезперервному часі та генерує великі обсяги різномірних даних. Для спрощення аналізу представимо структурну схему IoT-інфраструктури у вигляді сукупності функціональних елементів, взаємодія яких формалізується за допомогою математичних виразів і рівнянь. Узагальнена схема відповідності математичних залежностей і функціональних блоків системи наведена на рисунку 3.2.

IoT-інфраструктуру можна подати як систему з  $N$  входами та  $M$  виходами, де входи відповідають потокам даних від сенсорних вузлів, а виходи — результатам обробки, керуючим сигналам або агрегованим даним, що передаються у вищі рівні системи.

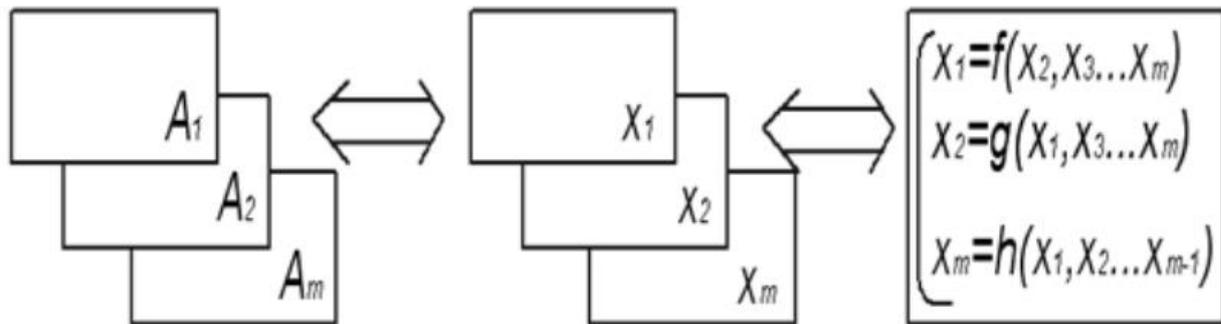


Рисунок 3.7 — Схема відповідності математичних залежностей і функціональних блоків

Загальна кількість функціональних виводів визначається співвідношенням:

$$N+M=P,$$

де:  $P$  — загальна кількість функціональних виводів системи, яка залежить від архітектури IoT-рішення та рівня його складності.

Параметри  $N$  і  $M$  є змінними величинами, що залежать від режиму роботи системи, інтенсивності надходження даних та стану обчислювальних ресурсів. У математичному вигляді ці залежності можна подати так:

$$N_t = f(SR_t) \leq P, \quad (3.1)$$

$$M_t = f(SR_t, PR_t, N_t) \leq P, \quad (3.2)$$

де:  $N_t$  — кількість активних вхідних потоків у момент часу  $t$ ;  
 $M_t$  — кількість активних вихідних потоків у момент часу  $t$ ;  
 $SR_t$  — масив вхідних даних, сенсорних вузлів в момент часу  $t$ ;  
 $PR_t$  — сукупність параметрів обробки даних, що включає фільтрацію,

агрегацію, компресію, маршрутизацію та зберігання;  $P$  — максимально допустима кількість функціональних виводів системи.

Таким чином, кількість входів визначається кількістю активних сенсорних вузлів і частотою вимірювань, тоді як кількість виходів формується на основі алгоритмів обробки даних і логіки прийняття рішень. Зі зростанням обсягів даних, характерних для Big Data, функція  $f(\cdot)$  стає нелінійною та залежить від багатьох факторів, включаючи затримки передачі, обчислювальні ресурси та обмеження енергоспоживання.

Кожен функціональний елемент IoT-інфраструктури може перебувати в одному з можливих станів, які визначають напрямок і характер інформаційної взаємодії. Це формалізується у вигляді множини допустимих режимів:

$$PR_i \in \{\text{вхідний, вихідний, двонаправлений}\}. \quad (3.3)$$

Вхідні елементи зазвичай відповідають сенсорним вузлам, що лише генерують дані. Вихідні елементи реалізують функції керування або візуалізації результатів. Двонаправлені елементи, зокрема шлюзи та крайові обчислювальні вузли, виконують як прийом, так і передачу інформації, що є характерним для сучасних IoT-рішень із підтримкою адаптивного керування.

Графічне подання математичної моделі IoT-рішення, наведене на рисунку 3.8, дозволяє інтерпретувати систему як орієнтований граф, де вершини відповідають функціональним блокам, а дуги — потокам даних і керуючим впливам. Такий підхід спрощує аналіз масштабованості, відмовостійкості та балансування навантаження між елементами системи.

Блоки PR1—PRB у представленій моделі відповідають кінцевим IoT-пристроєм, які є найбільш ресурсно обмеженими компонентами інфраструктури. Для них критичними параметрами є енергоспоживання, тривалість роботи від автономного джерела живлення, режим передачі даних і частота активації радіомодуля. Саме ці пристрої формують основний обсяг первинних даних і, водночас, визначають загальну надійність і довговічність IoT-системи.

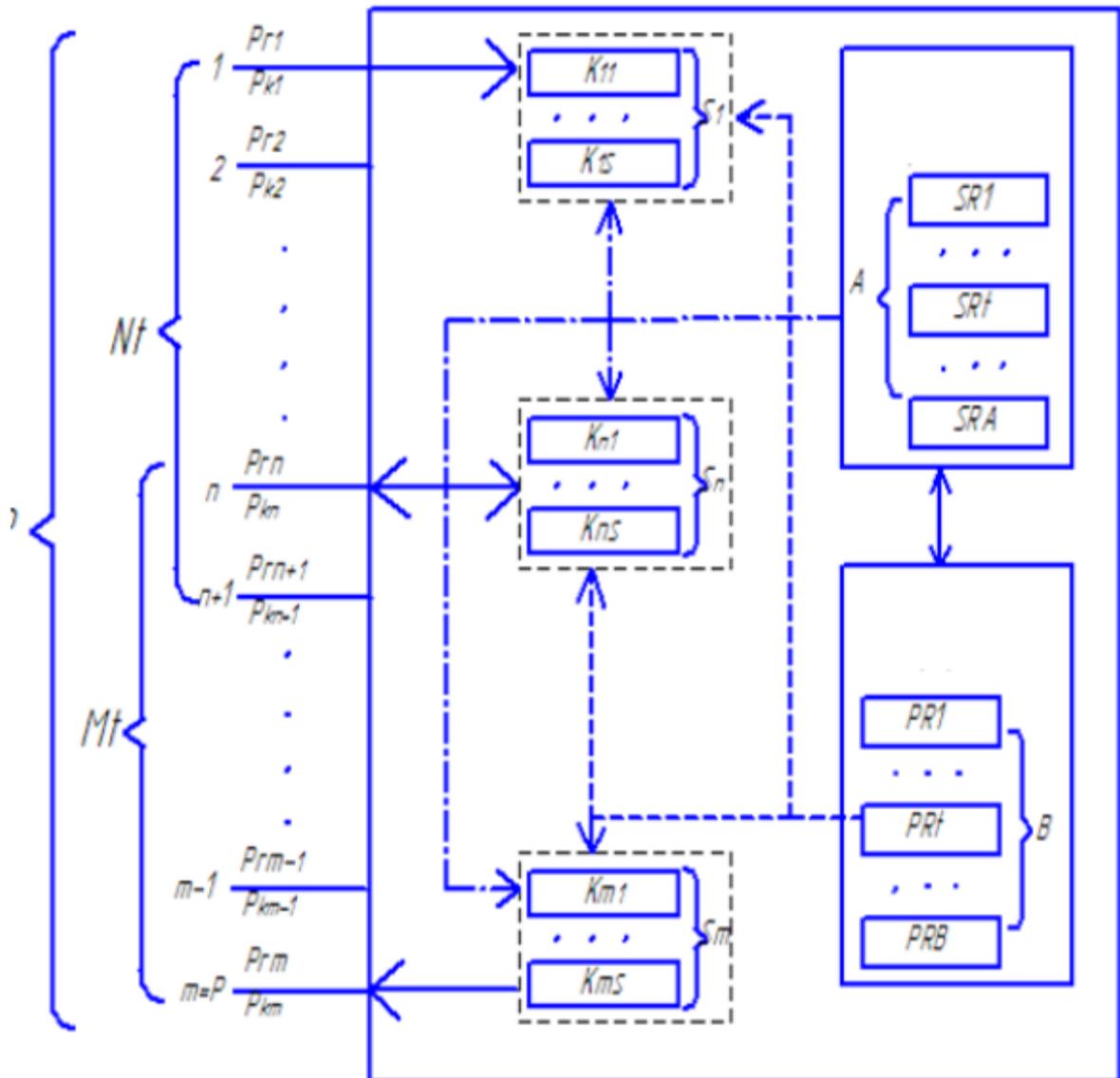


Рисунок 3.8 — Графічне подання математичної моделі IoT-інфраструктури

З огляду на це, подальший розвиток математичної моделі потребує врахування енергетичних характеристик кінцевих вузлів, включаючи моделі споживання енергії при передачі, прийомі та локальній обробці даних. Це обґрунтовує необхідність окремого дослідження задачі енергоефективності IoT-інфраструктури.

На основі розробленої математичної моделі IoT-рішення можливе формування функціональної схеми системи (див. рис. 3.9), яка відображає практичну реалізацію описаних математичних залежностей. Математична модель задає кількість і типи входів та виходів, режими роботи функціональних

елементів, а також характер інформаційних і керуючих потоків між ними, що безпосередньо трансформується у структуру функціональних блоків та зв'язків між ними.

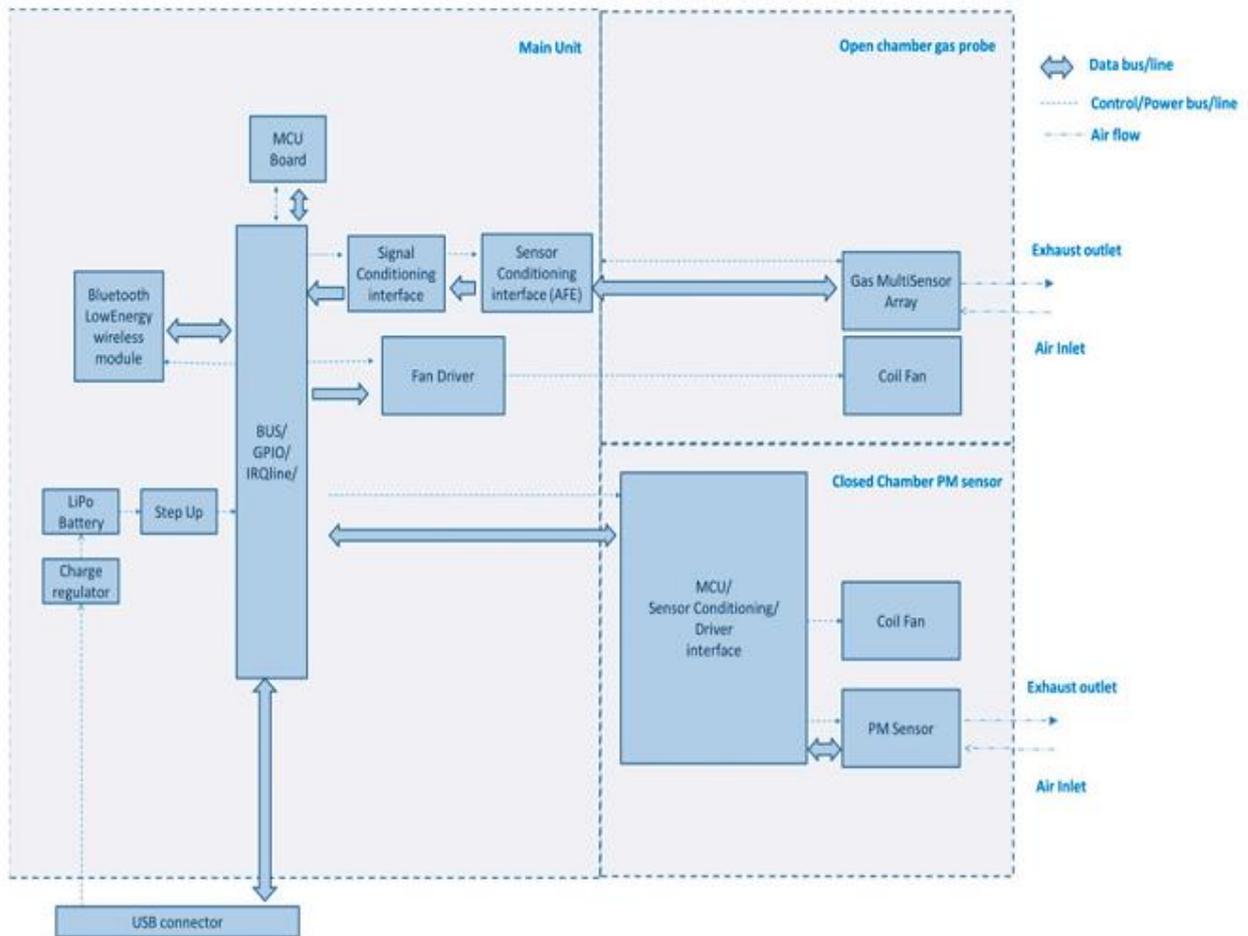


Рисунок 3.9 — Функціональна схема IoT-інфраструктури

Функціональна схема, побудована на основі математичної моделі, дозволяє відобразити відповідність між сенсорними вузлами, шлюзами, крайовими обчислювальними модулями та хмарними сервісами Big Data, а також визначити їх ролі в процесах збору, обробки, зберігання та аналізу даних. Таким чином, математична модель виступає формалізованою основою для переходу від абстрактного опису системи до її прикладної архітектурної та функціональної реалізації.

Крім того, побудова функціональної схеми на базі математичної моделі спрощує подальший аналіз енергоефективності, масштабованості та надійності

IoT-інфраструктури, оскільки кожному функціональному блоку можуть бути однозначно поставлені у відповідність кількісні параметри, визначені в моделі.

У наступному підрозділі сформульовано задачу енергоефективності IoT-рішення, визначено критерії оптимізації та розглянуто підходи до зменшення енергоспоживання кінцевих пристроїв без зниження ефективності збору та обробки даних у системах з інтеграцією Big Data.

### 3.5 Задача енергоефективності та її вирішення

У мережах IoT кожен підключений пристрій, незалежно від того, чи є це смартфоном, сенсорним вузлом або іншим кінцевим пристроєм, повинен пройти процедуру встановлення з'єднання з базовою станцією оператора. Цей процес стандартизований і відомий як процедура випадкового доступу (Random Access Procedure) (див. рис. 3.10).

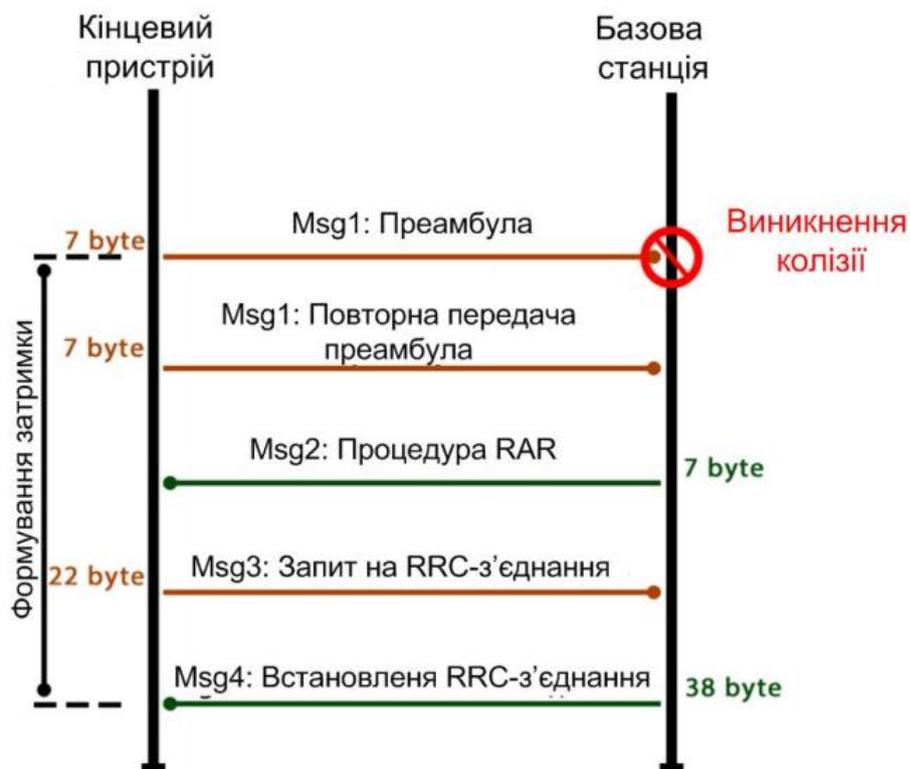


Рисунок 3.10 — Структурна схема процедури випадкового доступу

Для розуміння проблематики енергоспоживання та затримок у мережі важливо узагальнити цей механізм.

Процедура починається з того, що кінцевий пристрій передає преамбулу (Msg1) через фізичний канал випадкового доступу (PRACH — Physical Random Access Channel). Преамбула вибирається випадковим чином із 64 доступних послідовностей, що створює ймовірність колізій при одночасному підключенні кількох пристроїв. У разі успішного прийняття преамбули базова станція надсилає відповідь RAR (Msg2) у межах встановленого часу очікування (Response Window).

Далі кінцевий пристрій передає повідомлення RRC (Msg3) через спільний фізичний канал висхідної лінії (PUSCH — Physical Uplink Shared Channel), використовуючи ресурси, надані у Msg2. Процедура вважається завершеною успішно після отримання повідомлення Msg4 про встановлення RRC-підключення від базової станції.

Характерною особливістю IoT-пристроїв є періодичний характер передачі даних: пристрій підключається до мережі тільки у моменти необхідності відправки накопиченої інформації на сервер для обробки. Частота таких підключень визначається внутрішніми таймерами та алгоритмами енергозбереження кінцевого пристрою.

Внаслідок цього ключовим вузьким місцем (bottleneck) процедури підключення стає обмежена кількість доступних преамбул. Якщо кілька пристроїв одночасно ініціюють підключення, використовуючи одну й ту ж послідовність, один із них буде тимчасово відключений і спробує повторно встановити з'єднання після закінчення таймера. При невеликій кількості пристроїв на базову станцію ця проблема не критична, але зі збільшенням кількості кінцевих вузлів, характерним для IoT-екосистем, ймовірність колізій та затримок значно зростає. Наприклад, у разі масового спрацьовування групи сенсорів можливі перевантаження каналу та затримки у передачі даних.

Другим критичним фактором є автономність пристроїв, тобто здатність працювати без людського втручання тривалий час. Для оцінки цього параметра

необхідна розробка моделі енергоспоживання кінцевих пристроїв, яка дозволяє прогнозувати термін служби акумулятора з урахуванням періодичних затримок у процедурі підключення та витрат енергії на передавання даних.

Розрахунок параметрів затримок підключення та ймовірності колізій спирається на стандартизовані параметри IoT-мереж. На їх основі формується модель прогнозування енергоспоживання і оптимізації роботи мережі. Це дозволяє проводити чисельний аналіз і для стандарту NB-IoT, і для інших протоколів LPWAN, враховуючи специфікації базових станцій і кінцевих пристроїв, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Специфікації базових станцій і кінцевих пристроїв

Позначення	Параметр	Значення
-	Ширина смуги	200 кГц
s	Повне число преамбул	64
$L_1$	Максимальне число передач преамбули	10
-	Розмір вікна очікування преамбули	5 мс
-	Таймер ContentionResolution	(у 48мс)
$W_{max}$	Індикатор Backoff	(у 200 м)
$\pi_3$	Імовірність успішної доставки Msg3	0.9
$\pi_4$	Імовірність успішної доставки Msg4	0.9
$L_3$	Максимальна кількість повідомлень HARQ Tx для повідомлень Msg3 та Msg4	5
M	Кількість кінцевих пристроїв у мережі	100, 150, 200
b	Частота PRACH	5 мс
K	Вікно очікування RAR	5 мс
$K_1$	Час передачі преамбули	1 мс
$K_0$	Час обробки преамбули на eNB	2 мс
$t_{pr}$	Час обробки перед передачею Msg3	5 мс
$t_x$	Час обробки Msg3 і прийом Msg4	6 мс

Таким чином, для забезпечення ефективної роботи IoT-мереж і тривалого часу автономної роботи кінцевих пристроїв необхідно одночасно вирішувати дві ключові задачі:

1. Зменшення колізій під час встановлення з'єднання, що дозволяє скоротити затримки та підвищити пропускну здатність мережі.

2. Оптимізація енергоспоживання кінцевих пристроїв, що продовжує термін служби батареї та підвищує надійність IoT-інфраструктури.

Ці аспекти формують основу подальшого розгляду методів енергоефективності та управління трафіком у IoT-системах, що плавно переходить до аналізу енергетичних моделей і алгоритмів оптимізації роботи кінцевих вузлів.

Під час розрахунків особливу увагу слід приділяти індексу конфігурації PRACH, який прямо впливає на низку системних параметрів першого повідомлення Msg1. До таких параметрів належать, зокрема, кількість субкадрів, виділених для передачі преамбули, та довжина самої преамбули. Аналогічно, таймер Contention Resolution визначає максимальну кількість субкадрів, відведених для очікування передачі Msg3, після чого пристрій може зафіксувати невдачу процедури встановлення з'єднання.

Кожен раз, коли кінцевий пристрій має дані для передачі, він конкурує з іншими пристроями за доступні ресурси каналу PRACH. Ймовірність успішної передачі преамбули на  $i$ -му кроці можна записати як  $1-e^{-i}$ , де  $i$  — максимальна кількість спроб передачі для даного пристрою. Після  $K_0$  субкадрів відбувається пауза для уникнення накладення на попереднє повідомлення Msg2 (так зване response window). У наступному вікні відповіді базова станція (eNB) надсилає Msg2 рівномірно по субкадрах. Якщо пристрій не отримав Msg2 через колізії або недостатню потужність сигналу, процедура випадкового доступу повторюється після випадково обраного таймера відстрочки  $W$ , рівномірно розподіленого у межах  $W_{max}$ .

Після успішного прийому повідомлення RAR пристрій NB-IoT розпочинає передачу Msg3 протягом часу  $t_{pr}$ , після чого очікує передачу Msg4

протягом  $t_{tx}-1$ . Імовірність успішної передачі Msg3 і Msg4 позначається як  $\pi_3$  та  $\pi_4$ , а максимальна кількість спроб передачі —  $L_3$ .

Згідно зі стандартами, загальна затримка встановлення підключення обчислюється як сума затримок передачі Msg1,Msg2 та Msg3, RCC Msg4:

$$E[\tau] = E[\tau^{(1)}] + E[\tau^{(2)}], \quad (3.3)$$

Очікувана затримка Msg3/Msg4 розраховується за формулою:

$$E[\tau^{(2)}] = t_{pr} + t_{tx} \cdot \bar{n}_3, \quad (3.4)$$

де  $\bar{n}_3$  — середня кількість повторних передач між Msg3 і Msg4, що визначається ймовірністю успішної доставки:

$$\bar{n}_3 = \pi_{tx} \sum_{n=1}^{L_3} n(1 - \pi_{tx})^{n-1} = \frac{1}{\pi_{tx}} [1 - (1 - \pi_{tx})^{L_3}] \quad (3.5)$$

Для Msg1/Msg2 очікувана затримка враховує можливі колізії та час повторних спроб:

$$E[\tau^{(1)}] = c_1(K_1 + K_0 + K + \bar{w}), \quad (3.6)$$

де  $w$  — випадково обраний таймер відстрочки для повторної передачі, а  $K_i$  — число субкадрів для передачі преамбули та Msg2. У випадку зіткнень середня затримка збільшується пропорційно ймовірності колізій  $\theta_1$  (\theta\_1):

$$E[\tau^{(1)}] = \sum_{j=1}^M \theta_j \frac{1}{\pi + \mu_j}, \quad (3.7)$$

де, стан можливого зіткнення визначається за формулою:

$$\theta_j = \frac{(M-1)!}{(j-1)!(M-j)!} \rho^{j-1} (1 - \rho)^{M-j}. \quad (3.8)$$

Ця методика дозволяє точно оцінити середній час перебування пристрою в різних станах, що є критично важливим для розрахунку енергоспоживання кінцевих пристроїв.

Режими роботи кінцевих пристроїв NB-IoT визначають споживання енергії. Вони можуть знаходитися у двох основних станах:

1. RRC\_IDLE — пристрій не має виділених мережевих ресурсів, споживання мінімальне, приймач переважно вимкнений.
2. RRC\_CONNECTED — пристрою виділено ресурс для передачі даних, активне споживання енергії.

Щоб підвищити автономність, пристрої використовують режим енергозбереження PSM (Power Save Mode). Кінцевий пристрій активує PSM через два таймери Tracking Area Update (TAU): перший визначає час очікування в стані RRC\_IDLE або DRX, другий — загальний час перебування в режимах DRX і PSM. Після закінчення активного часу пристрій переходить у мінімальне енергоспоживання до завершення таймера 2, залишаючись доступним для мережі лише після активації нового циклу.

Таким чином, детальний розрахунок затримок, ймовірності колізій та оптимізація таймерів дозволяють побудувати точну модель енергоспоживання кінцевих пристроїв, яка стане основою для подальшого аналізу та оптимізації NB-IoT мереж.

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ІОТ-ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖІ ЗАСОБАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

### 4.1 Аналіз енергоспоживання кінцевих пристроїв

Для проведення експериментальних досліджень IoT-інфраструктури особливу увагу приділено аналізу енергоспоживання кінцевих пристроїв NB-IoT. Кожен пристрій, підключений до мережі, проходить процедури встановлення з'єднання та передачі даних. Через збільшену кількість пристроїв у мережі виникає проблема колізій при одночасному підключенні, що може призводити до затримок та підвищеного споживання енергії. Аналіз енергоспоживання NB-IoT кінцевих пристроїв проводився у двох основних режимах роботи:

1) Без використання режиму енергозбереження PSM — пристрій постійно перебуває у стані очікування або активної передачі даних.

2) З використанням режиму PSM (Power Save Mode) — пристрій переходить у режим мінімального споживання енергії після завершення передачі даних, що дозволяє значно збільшити автономність.

На рис. 4.1 та 4.2 представлені графічні ілюстрації зміни споживаної потужності кінцевого пристрою залежно від режиму роботи та активності передачі даних. Для оцінки автономності пристрою необхідні вихідні дані про енергоспоживання в різних станах роботи, типові дані наведені в таблиці 4.1. При розрахунку автономності передбачалася добова робота пристрою протягом 24 годин та враховувалися сценарії підключення до мережі й затримки, визначені у підрозділі 3.4.

Алгоритм розрахунку енергоспоживання передбачає:

— визначення часу перебування пристрою у кожному стані (передача Msg1/Msg3, прийом Msg2/Msg4, DRX, PSM);

— обчислення загального споживання потужності та струму розряду;

— розрахунок очікуваного терміну автономної роботи пристрою на основі середнього енергоспоживання.

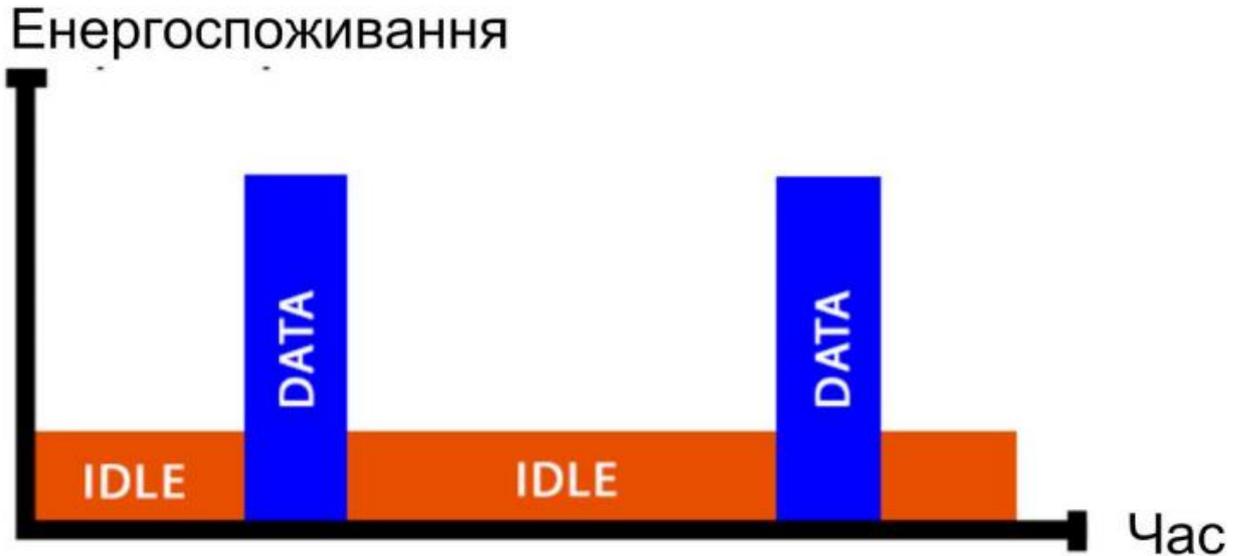


Рисунок 4.1 — Енергоспоживання без використання режиму енергозбереження PSM

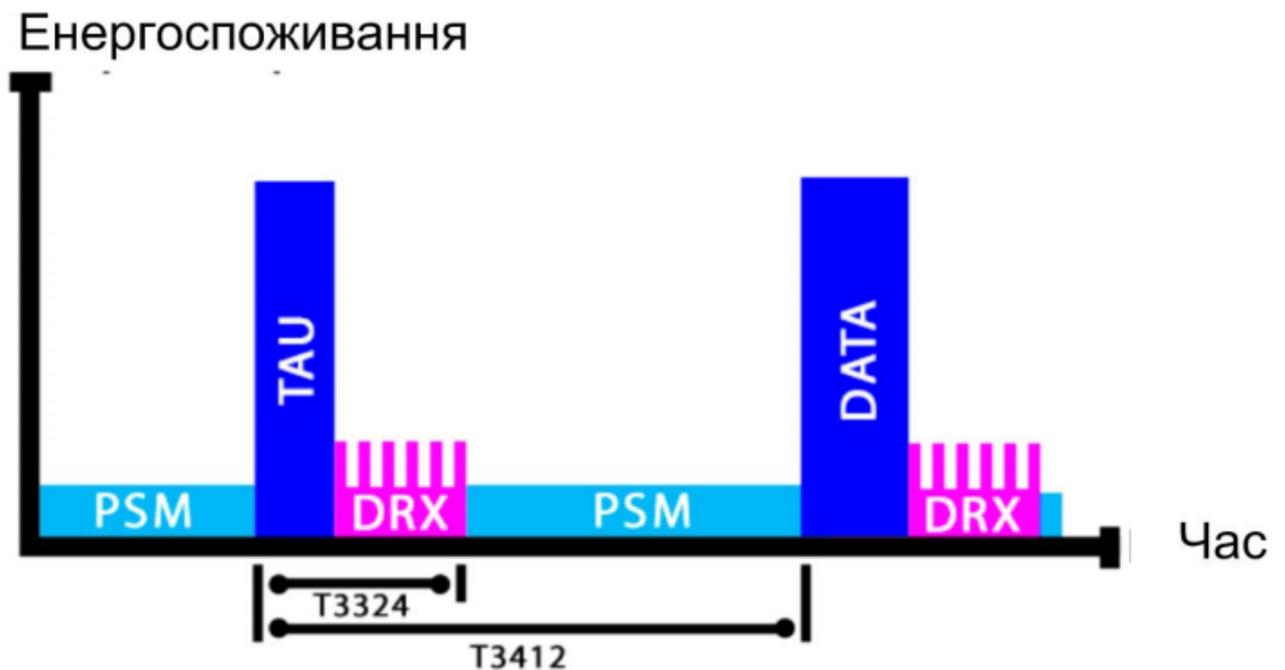


Рисунок 4.2 — Енергоспоживання з використання режиму енергозбереження PSM

Для передачі одного блоку даних враховувалися не тільки самі дані, а й сигналізаційні повідомлення, які передаються вгору і вниз по каналу. Загальний час, витрачений на пакет даних, включає час передачі самого блоку та сигналізаційних повідомлень, а енергоспоживання обчислювалося з урахуванням витрат на передачу та обробку.

Таблиця 4.1 — Параметри енергоспоживання для різних режимів роботи кінцевих пристроїв

Символ	Варіант	Значення
P0	Витрати потужності в режимі PSM	0 мВт
P1	Витрати потужності у стані очікування	0,05 мВт
P2	Витрати потужності на обробку та прийом	50 мВт
P3	Витрати потужності на передачу	50 мВт

Енергоспоживання за рік визначалося на основі кількості передач на добу, а для стану Idle враховувалося постійне споживання енергії у стані очікування. Використання режиму PSM практично зводить до нуля витрати енергії під час очікування, що суттєво збільшує автономність.

Чисельний аналіз автономності показав, що при використанні трьох батарей AAA 1,5 В ємністю 1000 мА та трьох передачах на добу блоку даних розміром 100 байт, автономність NB-IoT пристрою складає:

- 1) Без PSM: до 2 років у режимі IDLE.
- 2) З PSM: понад 3 роки автономної роботи, що забезпечує значне продовження терміну служби батареї та зменшення витрат на обслуговування пристроїв.

Результати чисельного аналізу підтверджують, що застосування режиму PSM є критично важливим для підвищення ефективності енергоспоживання, особливо при великій кількості пристроїв у мережі або при зростанні обсягу переданих даних. Табличні дані дозволяють прогнозувати автономність пристроїв у різних сценаріях роботи мережі.

Результати аналізу показали, що споживана потужність без PSM значно вища через постійну активність пристрою та необхідність повторних спроб підключення в умовах колізій. Використання PSM дозволяє знизити енергоспоживання майже на половину, що суттєво підвищує автономність пристроїв.

Нижче наведено результати чисельного аналізу автономності кінцевих пристроїв залежно від кількості підключених пристроїв та розміру пакета даних:

Таблиця 4.2 — Автономність часу роботи NB-ІоТ кінцевих пристроїв

Число NB-ІоТ пристроїв	Розмір блоку даних	Енерго-споживання на RA, Вт*с	Енерго-споживання на передачу, Вт*с	Енерго-споживання за рік, Вт*с	Час роботи, роки	
					Режим IDLE	Режим PSM
100	100 байт	$0,827 \cdot 10^{-3}$	$0,20 \cdot 10^{-3}$	2719,28	2,095	3,310
150	100 байт	$0,828 \cdot 10^{-3}$	$0,99 \cdot 10^{-3}$	2721,34	2,094	3,307
200	100 байт	$0,829 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	2722,88	2,093	3,305

Візуалізація витрати ємності акумулятора (див. рис. 4.3) за часом підтверджує значне зростання автономності при використанні PSM.

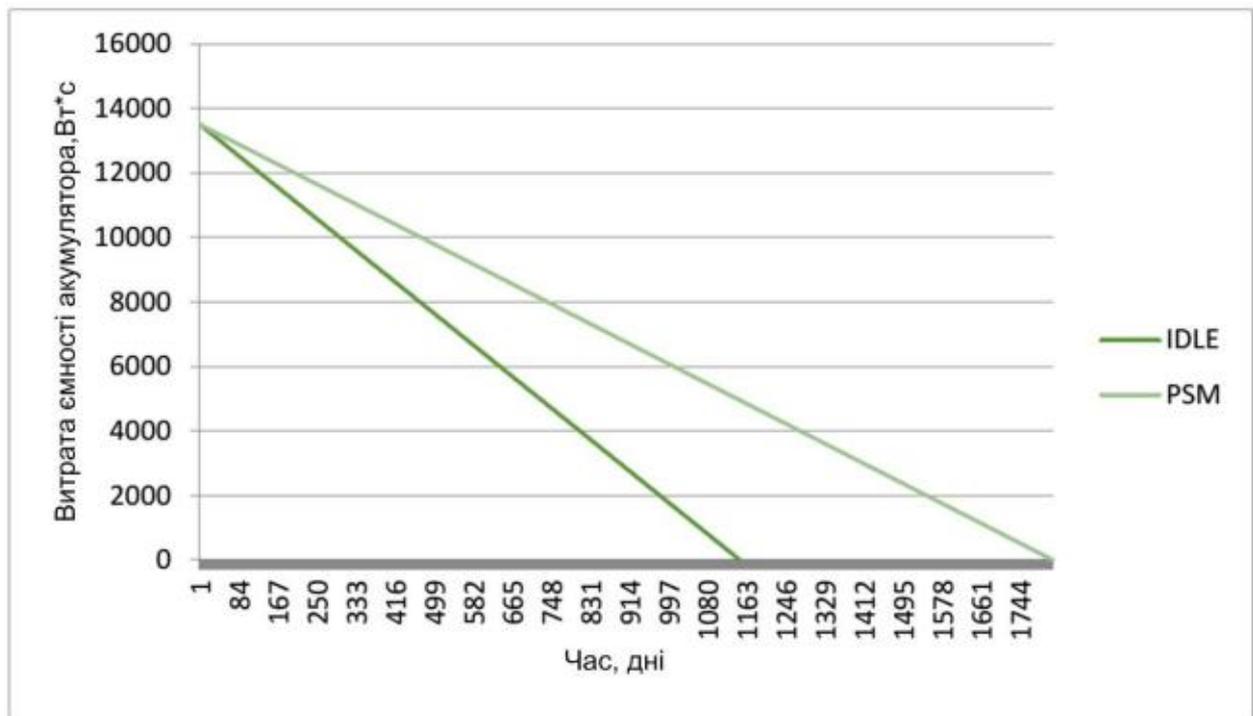


Рисунок 4.3 — Графік витрати ємності акумулятора

За експериментальними даними, застосування режиму енергозбереження дозволяє збільшити час роботи пристрою на приблизно 49% порівняно з традиційним режимом.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що для ефективного функціонування IoT-інфраструктури, особливо при великій кількості підключених пристроїв, необхідно впроваджувати режими енергозбереження та оптимізувати процедури підключення з урахуванням колізій та затримок.

#### 4.2 Комп'ютерна реалізація математичної моделі

Для реалізації комп'ютерної математичної моделі IoT-інфраструктури було запропоновано використання нейронних мереж у поєднанні зі середовищем моделювання Matlab/Simulink. Таке поєднання дозволяє моделювати поведінку кінцевих пристроїв та прогнозувати їх енергоспоживання в різних режимах роботи з високою точністю.

Нейронна мережа — це метод машинного навчання, який дозволяє здійснювати прогнозування та класифікацію даних подібно до процесів у людському мозку. Вона складається з трьох основних компонентів:

Вхідні вузли — приймають дані з зовнішніх джерел, наприклад, інформацію про стан пристроїв, активність передачі даних, кількість підключених пристроїв.

Приховані шари — обробляють дані, визначають внутрішні закономірності та залежності між параметрами. Це саме ті елементи, які забезпечують гнучкість і точність прогнозів, адже вони дозволяють мережі «запам'ятовувати» минулі зв'язки в даних.

Вихідні вузли — формують результати прогнозування, наприклад, очікуване енергоспоживання, час автономної роботи або ймовірність колізій у мережі.

Приклад типової структури нейронної мережі наведено на рисунку 4.4.

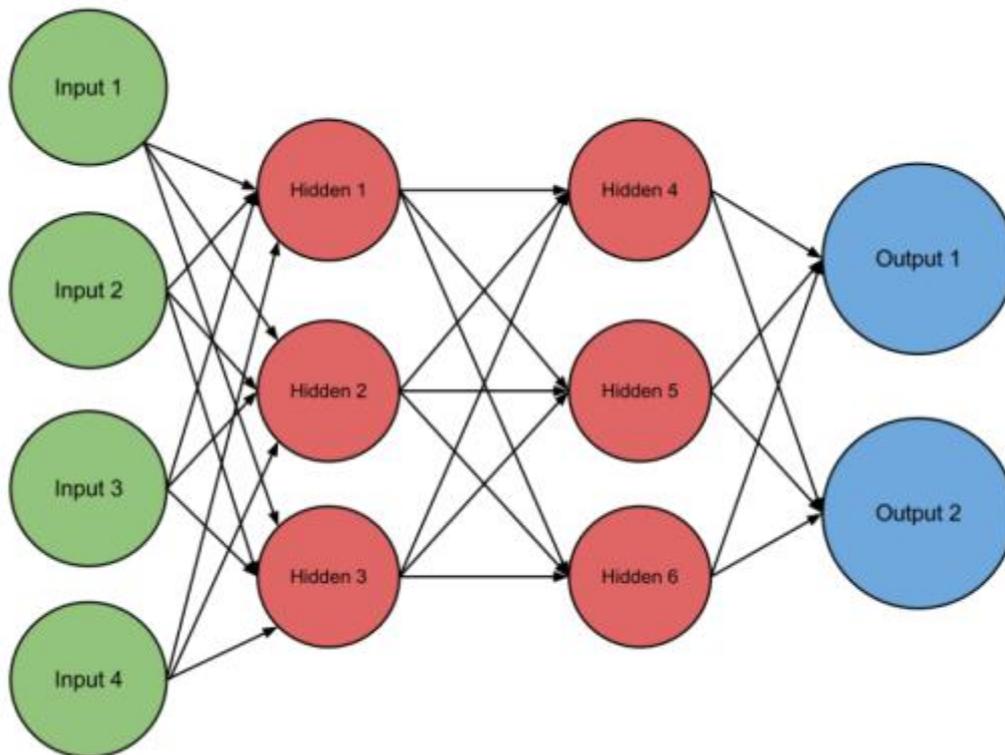


Рисунок 4.4 — Структура нейронної мережі

Основна перевага нейронної мережі над традиційними методами прогнозування, такими як лінійна або логістична регресія, полягає у здатності враховувати складні нелінійні залежності між параметрами. Якщо прибрати приховані шари, мережа буде працювати аналогічно регресійним моделям, прогножуючи вихідні значення лише на основі вхідних параметрів. Саме приховані шари роблять нейронні мережі «розумними» — вони здатні адаптуватися до складних взаємозв'язків у даних та враховувати історичну інформацію, що підвищує точність прогнозів.

Незважаючи на високі показники точності, нейронні мережі мають ряд обмежень:

Вони потребують значних обчислювальних ресурсів, що може збільшувати витрати на обробку даних.

Для навчання мереж необхідний великий обсяг даних, що не завжди доступно.

Мережі працюють за принципом «чорного ящика», тобто важко зрозуміти внутрішні процеси обробки даних, що ускладнює налаштування алгоритму та прогнозування результатів для нових сценаріїв.

У контексті прогнозування енергоспоживання кінцевих пристроїв IoT ці недоліки не є критичними, оскільки основна задача полягає у точному передбаченні витрат енергії, а внутрішня прозорість алгоритму не є критичною. Реалізація моделі в Matlab/Simulink дозволяє автоматизувати обчислення та проводити експериментальні дослідження, варіюючи параметри роботи мережі та сценарії передачі даних.

Таким чином, поєднання нейронних мереж із комп'ютерним моделюванням дає можливість ефективно аналізувати роботу кінцевих пристроїв у різних умовах і створює основу для подальшого порівняльного аналізу результатів моделювання.

Ключовою особливістю нейронних мереж є ітеративний процес навчання, в якому записи (рядки) представляються мережі по одній, а ваги, пов'язані з вхідними значеннями, коригуються щоразу. Після того, як представлені всі кейси, процес часто починається заново. На цьому етапі навчання мережа навчається, регулюючи ваги, щоб передбачити правильну мітку класу вхідних вибірок. Переваги нейронних мереж включають їх високу стійкість до зашумлених даних, а також їх здатність класифікувати шаблони, на яких вони не були навчені. Після того, як мережа була структурована для конкретного додатка, ця мережа готова до навчання.

Для запуску цього процесу початкові ваги вибираються випадковим чином. Далі починається навчання.

Мережа обробляє записи в навчальних даних по одній, використовуючи ваги і функції в прихованих шарах, потім порівнює отримані вихідні дані з бажаними.

Потім помилки поширюються назад по системі, в результаті чого система коректує ваги для наступного запису. Цей процес повторюється знову, оскільки ваги постійно змінюються.

Під час навчання мережі один і той же набір даних обробляється багато разів, оскільки ваги з'єднань постійно уточнюються.

Кількість шарів і кількість обробних елементів на шар є важливими рішеннями. Для прямого зв'язку ці параметри топології зворотного поширення також є найбільш неземними - вони є «мистецтвом» проектувальника мережі.

Згодом виробилися тільки три загальних правила, яким слід було більшість дослідників і інженерів, які застосовують цю архітектуру до своїх проблем.

Правило перше: у міру збільшення складності взаємозв'язку між вхідними даними і бажаним виходом кількість обробних елементів в прихованому шарі також має збільшуватися.

Правило друге: якщо моделювання можна розділити на кілька етапів, то може знадобитися додатковий прихований шар. Якщо процес не можна розділити на етапи, то додаткові рівні можуть просто дозволити запам'ятовувати навчальний набір, а не справжнє спільне рішення.

Правило третє: кількість доступних навчальних даних встановлює верхню межу кількості обробних елементів в прихованому шарі. Щоб обчислити цю верхню межу, необхідно використовувати кількість спостережень в навчальному наборі і розділити це число на суму кількості вузлів у вхідному і вихідному шарах в мережі.

Потім розділити результат ще раз на коефіцієнт масштабування від п'яти до десяти.

Для відносно менш зашумлених даних використовуються великі коефіцієнти масштабування. Якщо використовується занадто багато штучних нейронів, навчальний набір буде запам'ятовуватися, а не узагальнюватися, і мережа буде марна для нових наборів даних.

Алгоритм нейронних мереж сам по собі може використовуватися для пошуку однієї моделі, яка дає хороші прогнози для нових даних. Ми можемо переглянути статистику і матриці помилок поточного предиктора, щоб



Навчання нейронної мережі проводиться на основі наявних даних та результатів експериментів, виконаних у середовищі Matlab/Simulink. Для цього використовується спеціальна функціональна структура, яка дозволяє подавати на вхід мережі різні набори даних та враховувати початкові умови для затриманих станів (див. рис. 4.6).

`[y1,xf1,xf2] = myNeuralNetworkFunction(x1,x2,xi1,xi2)` takes these arguments:

`x1 = 8xTS matrix, input #1`

`x2 = 1xTS matrix, input #2`

`xi1 = 8x2 matrix, initial 2 delay states for input #1.`

`xi2 = 1x2 matrix, initial 2 delay states for input #2.`

and returns:

`y1 = 1xTS matrix, output #1`

`xf1 = 8x2 matrix, final 2 delay states for input #1.`

`xf2 = 1x2 matrix, final 2 delay states for input #2.`

where TS is the number of timesteps.

Рисунок 4.6 — Вікно спеціальної функціональної структури у середовищі Matlab/Simulink

Це забезпечує можливість моделювання тимчасових залежностей та оцінки енергоспоживання пристроїв у динаміці. Архітектура програмного забезпечення реалізована у вигляді модульної системи, що дозволяє організувати процес навчання та тестування нейронної мережі у структурованому вигляді (рис. 4.7).

Класи, що входять до складу системи, представлені на діаграмі класів (рис. 4.8), що ілюструє взаємодію компонентів між собою та їхню функціональну спрямованість.

Прогнозна модель енергоефективності, яка використовується для аналізу роботи кінцевих NB-IoT пристроїв, представлена на рисунку 4.9. Вона дозволяє оцінювати вплив різних параметрів мережі та сценаріїв передачі даних на

енергоспоживання, забезпечуючи основу для побудови прогнозів та оптимізації роботи пристроїв.

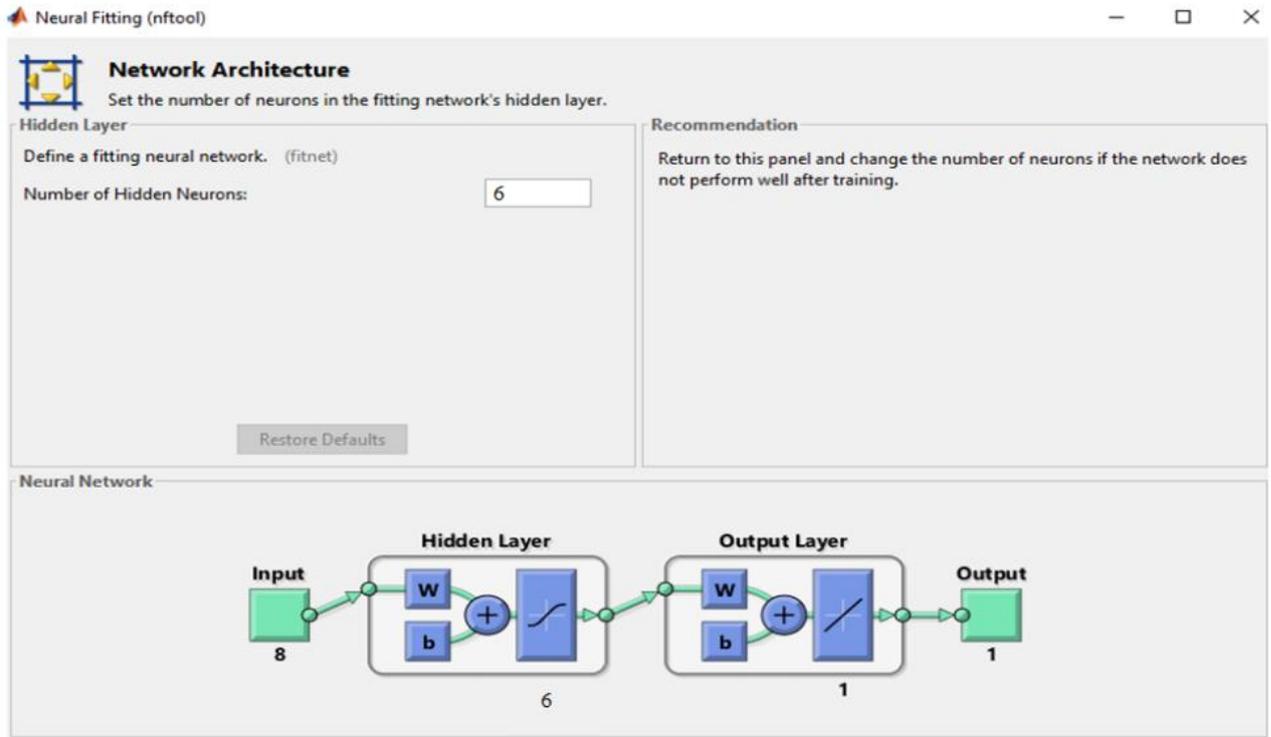


Рисунок 4.7 — Архітектура програмного забезпечення

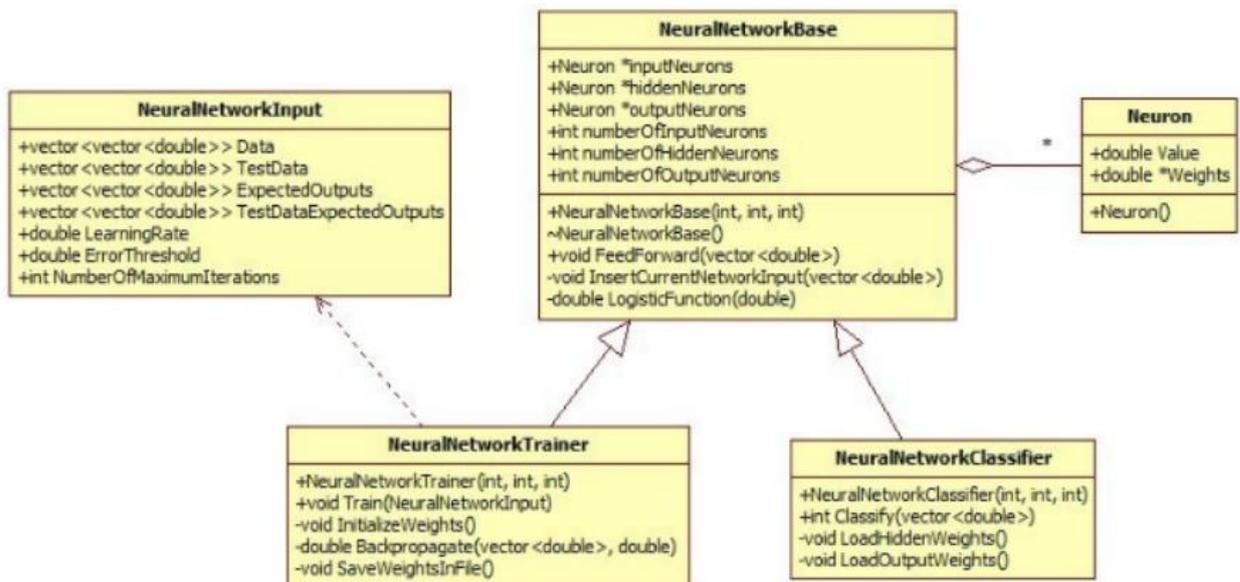


Рисунок 4.8 — Класи, що входять до складу системи

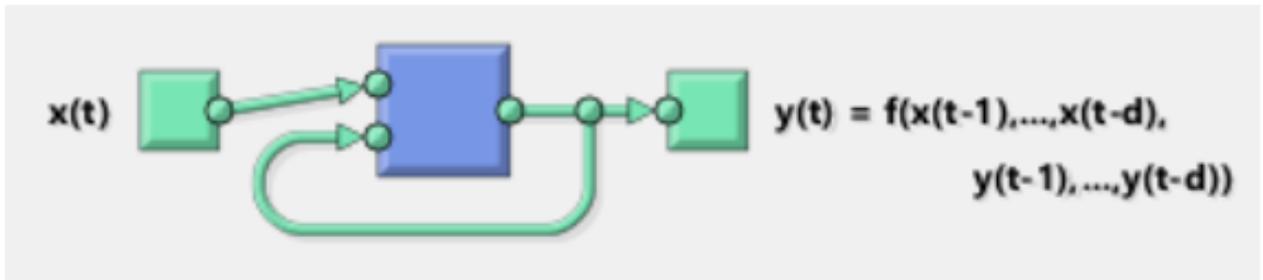


Рисунок 4.9 — Модель прогнозування енергоефективності

Симуляція навчання мережі у програмному забезпеченні показана на рисунку 4.10.



Рисунок 4.10 — Процес симуляції в середовищі Matlab/Simulink

Процес навчання нейронної мережі завершується після досягнення стабільної точності прогнозів, що підтверджується тестуванням на контрольних наборах даних (див. рис. 4.11). Після завершення навчання мережа готова до використання для прогнозування енергоспоживання та оцінки автономності кінцевих пристроїв.

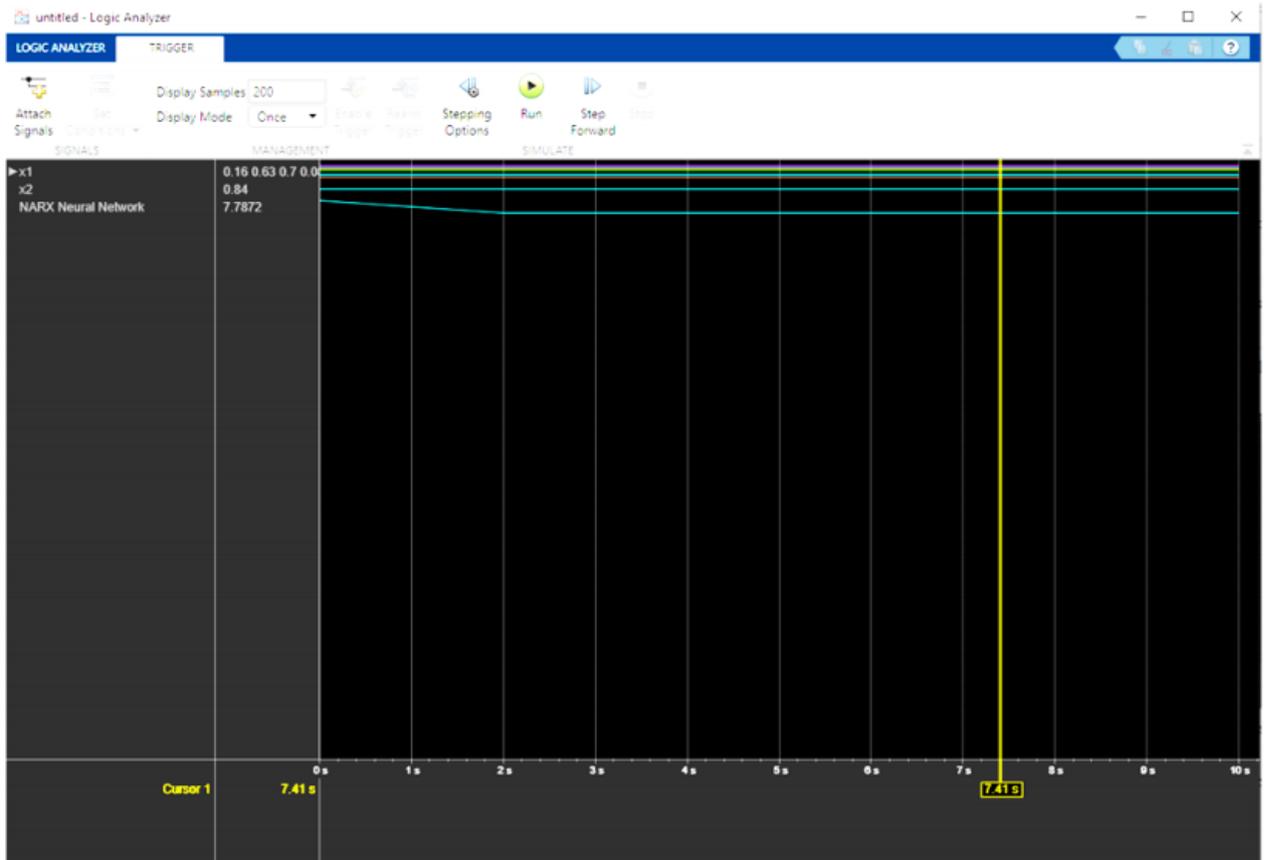


Рисунок 4.11 — Результат навчання нейронної мережі

У наступному підрозділі будуть представлені результати прогнозування та порівняльний аналіз ефективності мережі у різних сценаріях роботи.

#### 4.3 Порівняльний аналіз результатів моделювання

Для оцінки ефективності запропонованої методики прогнозування енергоспоживання та часу автономної роботи кінцевих пристроїв IoT було проведено порівняння результатів, отриманих аналітичним розрахунком, та прогнозів, сформованих нейронною мережею. Аналіз здійснювався для високопродуктивної сенсорної мережі з використанням технологій BigData, що дозволяє моделювати реальні сценарії роботи великої кількості пристроїв. Результати представлені у таблиці 4.3.

Аналіз порівняльних даних показав, що відхилення між аналітичними розрахунками та прогнозами нейронної мережі не перевищує 5%. Це свідчить про високий рівень точності нейромережного моделювання та його доцільність

для прогнозування енергоспоживання та автономності кінцевих NB-ІоТ пристроїв у реальних умовах роботи сенсорних мереж.

Таблиця 4.3 — Порівняльна характеристика результатів аналітичного розрахунку та прогнозування нейронною мережею

Параметр	Число NB-ІоТ пристроїв	Аналітичні результати	Прогнозування за допомогою НМ
Енергоспоживання на передачу блоку даних, Вт·с	100	$0,20 \cdot 10^{-3}$	$0,1876 \cdot 10^{-3}$
	150	$0,99 \cdot 10^{-3}$	$0,9789 \cdot 10^{-3}$
	200	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0364 \cdot 10^{-3}$
Енергоспоживання за рік, Вт·с	100	7461,99	7458,37
	150	7464,05	7460,49
	200	7465,53	7451,37
Час роботи пристрою в режимі IDLE, років	100	0,996	0,9889
	150	0,995	0,98997
	200	0,995	0,9885

Крім того, використання нейронних мереж дозволяє враховувати складні взаємозв'язки між параметрами мережі, які важко врахувати традиційними аналітичними методами. Це включає залежності між кількістю пристроїв, обсягом переданих даних, затримками при доступі до каналу та режимами енергозбереження, такими як PSM і DRX.

Результати моделювання також підтверджують ефективність застосування технології NB-ІоТ у високопродуктивних сенсорних мережах, особливо в умовах обробки великих обсягів даних (BigData). Використання NB-ІоТ дозволяє значно підвищити енергоефективність мережі та продовжити термін служби автономних пристроїв, що є критично важливим для

масштабних IoT-систем, де заміна батарей у кожного пристрою є складною і дорогою процедурою.

Таким чином, запропонований підхід до прогнозування енергоспоживання та автономності кінцевих пристроїв поєднує класичні аналітичні методи та можливості штучного інтелекту, забезпечуючи точність, надійність і практичну придатність для високопродуктивних сенсорних мереж з BigData.

## 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ

### 5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Мета проведення комерційного та технологічного аудиту є розробка методу побудови IoT-інфраструктури сенсорної мережі із застосуванням технологій BigData та засобів штучного інтелекту для аналізу даних і оцінки енергоефективності. Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів кафедри обчислювальна техніка: : к.т.н., доцент Богомолів С.В., к.т.н., доцент Тарновський М. Г, к.т.н., доцент Кадук О.В.

Для проведення технологічного аудиту було використано таблицю 5.1 [23] в якій за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв здійснено оцінку комерційного потенціалу.

Таблиця 5.1 — Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів

Продовження табл. 5.1

Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Таблиця 5.2 — Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0-10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

В таблиці 5.3 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 5.3 — Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Богомолів С. В.	Тарновський М.Г.	Кадук О. В.
	Бали, виставлені експертами:		
1	2	2	3
2	2	2	2
3	4	4	4
4	2	3	3
5	4	4	4
6	2	2	2
7	2	2	2
8	3	3	3
9	1	3	3
10	4	3	4
11	4	4	4
12	4	4	4
Сума балів	СБ <sub>1</sub> =34	СБ <sub>2</sub> =36	СБ <sub>3</sub> =38
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{34+36+38}{3} = 36$		

Середньоарифметична оцінка, отримана на основі експертних висновків, становить 36 балів, і згідно з таблицею 5.2, це вказує на рівень вище середнього комерційного потенціалу результатів проведених досліджень.

Результати магістерської кваліфікаційної роботи можуть використовуватися:

- 1) Інженерами та розробниками IoT-систем для проектування та оптимізації сенсорних мереж.
- 2) Фахівцями з енергетики та промислової автоматизації для підвищення енергоефективності мереж.
- 3) Дослідниками та науковцями в галузі Інтернету речей, BigData та штучного інтелекту для подальших наукових досліджень.
- 4) Організаціями та компаніями, що впроваджують інтелектуальні системи моніторингу та контролю за об'єктами інфраструктури.

Проведемо оцінку якості і конкурентоспроможності нової розробки порівняно з аналогом.

В якості аналога для розробки було обрано AWS IoTCore з AWS IoTGreengrass та AWS Analytics.

Основними недоліками аналога є:

- висока вартість впровадження та експлуатації, зумовлена використанням комерційної хмарної інфраструктури та платної моделі доступу до сервісів;
- залежність від постійного з'єднання з хмарними сервісами, що ускладнює використання в ізольованих або обмежених мережах;
- складність налаштування та адміністрування, яка потребує залучення висококваліфікованих фахівців;
- обмежені можливості глибокої адаптації алгоритмів обробки даних та штучного інтелекту під специфіку конкретної сенсорної мережі;
- відсутність прозорої математичної моделі оцінки енергетичної ефективності сенсорних вузлів.

Також до недоліків можна віднести залежність від постачальника (vendorlock-in), складність міграції даних та сервісів на альтернативні платформи, а також підвищені вимоги до захисту та конфіденційності даних у хмарному середовищі.

У розробці дана проблема вирішується шляхом застосування модульної IoT-інфраструктури, яка може функціонувати як у локальному, так і в гібридному режимі, з можливістю виконання аналітичної обробки та алгоритмів штучного інтелекту безпосередньо на граничних вузлах. Запропонований метод передбачає використання математичної моделі енергоспоживання та інтелектуальних алгоритмів оцінки стану сенсорних пристроїв, що дозволяє зменшити обсяг передаваних даних і підвищити автономність системи.

Аналіз сучасних підходів до побудови IoT-інфраструктур показав, що більшість існуючих рішень базуються на централізованій хмарній обробці даних, де сенсорні вузли виконують лише функції збору та передачі інформації. Такий підхід забезпечує масштабованість, проте призводить до значних затримок, зростання енергоспоживання та залежності від каналу зв'язку.

Альтернативним напрямом є використання edge- та fog-обчислень, які дозволяють частково обробляти дані на рівні шлюзів або кінцевих пристроїв. Однак у більшості рішень інтелектуальні алгоритми застосовуються фрагментарно та не враховують комплексно енергетичний стан сенсорних вузлів.

Окремі наукові підходи пропонують використання методів машинного навчання для прогнозування навантаження або виявлення аномалій, проте вони, як правило, не інтегровані в єдину IoT-інфраструктуру та не поєднані з BigData технологіями.

Також система випереджає аналог за такими параметрами, як:

- менша вартість реалізації та експлуатації;
- можливість локального розгортання без обов'язкового використання хмарних сервісів;
- наявність формалізованої математичної моделі оцінки енергетичної ефективності;
- гнучкість адаптації алгоритмів штучного інтелекту під конкретну сенсорну мережу;

- підвищена автономність сенсорних вузлів та зниження енергоспоживання;
- прозорість архітектури та можливість подальшого наукового розвитку.

В таблиці 5.4 наведені основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки.

Проведемо оцінку якості продукції, яка є найефективнішим засобом забезпечення вимог споживачів та порівняємо її з аналогом.

Таблиця 5.4 — Основні параметри нової розробки та товару-конкурента

Показник	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)		
1	2	3	4	5
Відповідність стандартам IoT та мережевих протоколів, %	80	100	1,25	20%
Масштабованість IoT-інфраструктури, %	75	100	1,33	20%
Рівень енергоефективності сенсорних вузлів, %	70	100	1,43	25%
Надійність і відмовостійкість, %	85	100	1,18	20%
Рівень інтеграції III та BigData, %	65	100	1,54	15%

Визначимо відносні одиничні показники якості по кожному параметру за формулами (5.1) та (5.2) і занесемо їх у відповідну колонку табл. 5.5.

$$q_i = \frac{P_{Hi}}{P_{Bi}} \quad (5.1)$$

або

$$q_i = \frac{P_{Bi}}{P_{Hi}} \quad (5.2)$$

де  $P_{hi}$ ,  $P_{Bi}$  — числові значення  $i$ -го параметру відповідно нового і базового виробів.

$$q_1 = \frac{100}{80} = 1,25;$$

$$q_2 = \frac{100}{75} = 1,33;$$

$$q_3 = \frac{100}{70} = 1,43;$$

$$q_4 = \frac{100}{85} = 1,18;$$

$$q_5 = \frac{100}{65} = 1,54.$$

Відносний рівень якості нової розробки визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i, \quad (5.3)$$

$$K_{\text{я.в.}} = 1,25 \cdot 0,2 + 1,33 \cdot 0,2 + 1,43 \cdot 0,25 + 1,18 \cdot 0,2 + 1,54 \cdot 0,15 = 1,34$$

Відносний коефіцієнт показника якості нової розробки більший одиниці, отже нова розробка якісніший базового товару-конкурента.

Наступним кроком є визначення конкурентоспроможності товару. Конкурентоспроможність товару є головною умовою конкурентоспроможності підприємства на ринку і важливою основою прибутковості його діяльності.

Однією із умов вибору товару споживачем є збіг основних ринкових характеристик виробу з умовними характеристиками конкретної потреби покупця. Такими характеристиками найчастіше вважають нормативні та технічні параметри, а також ціну придбання та вартість споживання товару.

В таблиці 5.5 наведено технічні та економічні показники для розрахунку конкурентоспроможності нової розробки відносно товару-аналога, технічні дані взяті з попередніх розрахунків.

Таблиця 5.5 — Нормативні, технічні та економічні параметри нової розробки і товару-виробника

Показники	Варіанти	
	Базовий (товар- конкурент)	Новий (інноваційне рішення)
1	2	3
1. Нормативно-технічні показники		
Відповідність стандартам IoT та мережевих протоколів, %	80	100
Масштабованість IoT-інфраструктури, %	75	100
Рівень енергоефективності сенсорних вузлів, %	70	100
Надійність і відмово стійкість, %	85	100
Рівень інтеграції III та BigData, %	65	100
2. Економічні показники		
Ціна придбання, грн	12000	2000

Загальний показник конкурентоспроможності інноваційного рішення ( $K$ ) з урахуванням вищезазначених груп показників можна визначити за формулою:

$$K = \frac{I_{m.n.}}{I_{e.n.}}, \quad (5.4)$$

де  $I_{m.n.}$  — індекс технічних параметрів;  $I_{e.n.}$  — індекс економічних параметрів.

Індекс технічних параметрів є відносним рівнем якості інноваційного рішення. Індекс економічних параметрів визначається за формулою (5.5)

$$I_{e.n.} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Hei}}{\sum_{i=1}^n P_{Bei}}, \quad (5.5)$$

де  $P_{Hei}$ ,  $P_{Bei}$  — економічні параметри (ціна придбання та споживання товару) відповідно нового та базового товарів.

$$I_{e.n.} = \frac{2000}{12000} = 0,16;$$

$$K = \frac{1,34}{0,16} = 8,4.$$

Зважаючи на розрахунки, можна зробити висновок, що нова розробка буде конкурентоспроможніше, ніж конкурентний товар.

## 5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи групуються за такими статтями: витрати на оплату праці, витрати на соціальні заходи, матеріали, паливо та енергія для науково-виробничих цілей, витрати на службові відрядження, програмне забезпечення для наукових робіт, інші витрати, накладні витрати.

1. Основна заробітна плата кожного із дослідників  $Z_o$ , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери визначається за формулою:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн)} \quad (5.6)$$

де  $M$  — місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.;

$T_p$  — число робочих днів в місяці; приблизно  $T_p \approx 21...23$  дні;

$t$  — число робочих днів роботи дослідника.

Зведемо сумарні розрахунки до таблиця 5.6.

2. Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.7)$$

де  $C_i$  — погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  — час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Таблиця 5.6 — Заробітна плата дослідника в науковій установі бюджетної сфери

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату грн.
Керівник	16000	761,9	5	3810
Інженер	15000	714,3	42	30000
Всього				33810

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.8)$$

де  $M_M$  — розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн;

$K_i$  — коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду;

$K_c$  — мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  — середня кількість робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 21 \dots 23$  дні;

$t_{зм}$  — тривалість зміни, год.

Таблиця 5.7 — Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
1. Підготовчі	2	1	47,6	95,2
2. Монтажні	3	3	64,3	192,9
3. Інтеграційні	2	5	81,0	161,9
4. Налаштувальні	6	2	52,4	314,3
5. Випробувальні	3	4	71,4	214,3
Всього				978,6

### 3. Розрахунок додаткової заробітної плати робітників

Додаткова заробітна плата  $Z_d$  всіх розробників та робітників, які приймали участь в розробці нового технічного рішення розраховується як 10 - 12 % від основної заробітної плати робітників.

На даному підприємстві додаткова заробітна плата начисляється в розмірі 11% від основної заробітної плати.

$$Z_d = (Z_o + Z_p) * \frac{H_{\text{дод}}}{100\%} \quad (5.9)$$

$$Z_d = 0,11 * (33810 + 978,6) = 3826,69 \text{ (грн)}$$

4. Нарахування на заробітну плату  $H_{зп}$  дослідників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою (5.10):

$$H_{зп} = (Z_o + Z_p + Z_d) * \frac{\beta}{100} \text{ (грн)} \quad (5.10)$$

де  $Z_o$  — основна заробітна плата розробників, грн.;

$Z_d$  — додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

$Z_p$  — основну заробітну плату робітників, грн.;

$\beta$  — ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, % .

Дана діяльність відноситься до бюджетної сфери, тому ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування буде складати 22%, тоді:

$$H_{зп} = (33810 + 978,6 + 3826,69) * \frac{22}{100} = 8495,25 \text{ (грн)}$$

#### 5. Сировина та матеріали.

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби й предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за прямим призначенням згідно з нормами їх витрачання, а також витрачені придбані напівфабрикати, що підлягають монтажу або виготовленню й додатковій обробці в цій організації, чи дослідні зразки, що виготовляються виробниками за документацією наукової організації.

Витрати на матеріали (М) у вартісному вираженні розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{i=1}^n V_j \cdot C_{вj}, \quad (5.11)$$

де  $H_j$  — норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  — кількість видів матеріалів;

$C_j$  — вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  — коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$V_j$  — маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{вj}$  — вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

Проведені розрахунки зведені в таблицю 5.8.

Таблиця 5.8 — Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, шт	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір	180	1	180
Ручка	25	1	25
Блокнот	40	1	40
Флешка	280	1	280
З врахуванням коефіцієнта транспортування			577,5

6. Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість програмного забезпечення розраховують за формулою:

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inprz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i \quad (5.12)$$

де  $C_{inprz}$  — ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$  — кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  — коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  — кількість найменувань програмних засобів.

Отримані результати необхідно звести до таблиці:

Таблиця 5.9 — Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Операційна система Windows 11	1	8 599	8 599
Середовище Matlab/Simulink	1	37000	37000
Всього з врахуванням налагодження			40700

## 7. Витрати на «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт»

Балансову вартість спецустаткування розраховують за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (5.13)$$

де  $C_i$  — ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.}i}$  — кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  — коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  — кількість найменувань устаткування.

Отримані результати необхідно звести до таблиці:

Таблиця 5.10 — Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
ІоТ обладнання	20	500	10000
Мережевий маршрутизатор	5	2000	10000
Всього			20000
Всього з врахування транспортних витрат			22000

## 8. Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{C_{\text{обл}}}{T_{\text{в}} \cdot 12} \cdot t_{\text{вик}}, \quad (5.14)$$

де  $C_0$  — балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$  — термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_г$  — строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 — Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Комп'ютер	20000	2	2	1666,67
Всього				1666,67

9. До статті «Паливо та енергія для науково-виробничих цілей» відносяться витрати на всі види палива й енергії, що безпосередньо використовуються з технологічною метою на проведення досліджень.

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yt} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{впi}}{\eta_i}, \quad (5.15)$$

де  $W_{yt}$  — встановлена потужність обладнання на певному етапі розробки, кВт;

$t_i$  — тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  — вартість 1 кВт-години електроенергії, грн;

$K_{впi}$  — коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{впi} < 1$ ;

$\eta_i$  — коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

Для написання магістерської роботи використовується персональний комп'ютер для якого розрахуємо витрати на електроенергію.

$$B_e = \frac{0,5 \cdot 230 \cdot 12,69 \cdot 0,5}{0,8} = 912,09$$

## 10. Службові відрядження.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуються як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$V_{\text{св}} = (Z_o + Z_p) * \frac{H_{\text{св}}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де  $H_{\text{св}}$  — норма нарахування за статтею «Службові відрядження».

$$V_{\text{св}} = 0,2 * (33810 + 978,6) = 6957,62$$

11. Накладні (загальновиробничі) витрати  $V_{\text{нзв}}$  охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо. Накладні (загальновиробничі) витрати  $V_{\text{нзв}}$  можна прийняти як (100...150)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$V_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (5.17)$$

де  $H_{\text{нзв}}$  — норма нарахування за статтею «Інші витрати».

$$V_{\text{нзв}} = (33810 + 978,6) \cdot \frac{100}{100\%} = 34788,09 \text{ грн}$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР

$$V = 33810 + 978,6 + 3826,69 + 8495,25 + 577,5 + 40700 + 22000 + 1666,67 + 912,09 + 6957,62 + 34788,09 = 154712,01 \text{ грн}$$

Прогнозування загальних втрат  $ZB$  на виконання та впровадження результатів виконаної МКНР здійснюється за формулою:

$$ZB = \frac{B}{\eta}, \quad (5.18)$$

де  $\eta$  — коефіцієнт, який характеризує стадію виконання даної НДР.

Оскільки, робота знаходиться на стадії науково-дослідних робіт, то коефіцієнт  $\beta = 0,7$ .

Звідси:

$$ЗВ = \frac{154712,01}{0,7} = 221017,16 \text{ грн.}$$

### 5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки

У даному підрозділі кількісно спрогнозуємо, яку вигоду, зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Розрахуємо збільшення чистого прибутку підприємства  $\Delta\Pi_i$ , для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, за формулою

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (5.19)$$

де  $\Delta\Pi_o$  — покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

$N$  — основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

$\Delta N$  — покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

$\Pi_o$  — основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

$n$  — кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

$\lambda$  — коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт  $\lambda = 0,8333$ .

$\rho$  — коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту.  $\rho = 0,25$ ;

$x$  — ставка податку на прибуток. У 2025 році — 18%.

Припустимо, що ціна зросте на 500 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 400 шт., протягом другого року — на 480 шт., протягом третього року на 550 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 1 шт., а її ціна до 2000 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\begin{aligned}\Delta\Pi_1 &= [500 \cdot 1 + (2000 + 500) \cdot 400] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 170911,91 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\Pi_2 &= [500 \cdot 1 + (2000 + 500) \cdot (400 + 480)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 376318,3 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\Pi_3 &= [500 \cdot 1 + (2000 + 500) \cdot (400 + 480 + 550)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 611204,74 \text{ грн.}\end{aligned}$$

#### 5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо основні показники, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності.

Розрахуємо величину початкових інвестицій  $PV$ , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки.

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B, \quad (5.20)$$

$k_{\text{інв}}$  — коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо ( $k_{\text{інв}} = 2 \dots 5$ ).

$$PV = 2 \cdot 221017,16 = 442034,32$$

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій  $E_{abc}$  згідно наступної формули:

$$E_{abc} = (ППП - PV) \quad (5.21)$$

де ПП — приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

$$ППП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.22)$$

де ПП — збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.;

T — період часу, протягом якою виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

$\tau$  — ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,2;  
t — період часу (в роках).

$$ППП = \frac{170911,91}{(1 + 0,2)^1} + \frac{376318,3}{(1 + 0,2)^2} + \frac{611204,74}{(1 + 0,2)^3} = 759110,33 \text{ грн.}$$

$$E_{abc} = (759110,33 - 442034,32) = 317076,01 \text{ грн.}$$

Оскільки  $E_{abc} > 0$  то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій  $E_e$ . Для цього користуються формулою:

$$E_e = \sqrt[T]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (5.23)$$

$T_{ж}$  — життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_B = \sqrt[3]{1 + \frac{317076,01}{442034,32}} - 1 = 0,35 = 35\%$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (5.24)$$

де  $d$  — середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні  $d = (0,14 \dots 0,2)$ ;

$f$  — показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина  $f = (0,05 \dots 0,1)$ .

$$\tau_{\min} = 0,18 + 0,05 = 0,23$$

Так як  $E_g > \tau_{\min}$  то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g} \quad (5.25)$$

$$T_{ок} = \frac{1}{0,35} = 2,9 \text{ роки}$$

Так як  $T_{ок} \leq 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на рівень вище середнього комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 2,9 роки. Загальні витрати складають 221017 грн. Прибуток за три роки склав 759110,33 грн.

## ВИСНОВКИ

Мету роботи — розробку методу побудови IoT-інфраструктури сенсорної мережі із застосуванням технологій Big Data та засобів штучного інтелекту для аналізу даних і оцінки енергоефективності — досягнуто в повному обсязі. У процесі виконання дослідження були послідовно розв’язані всі поставлені у вступі задачі, а отримані результати підтвердили доцільність і ефективність запропонованого підходу.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану розвитку Інтернету речей та сенсорних мереж. Показано, що стрімке зростання кількості IoT-пристроїв і обсягів даних зумовлює ускладнення IoT-інфраструктур та підвищує вимоги до їх масштабованості, надійності й енергоефективності. Встановлено, що традиційні підходи до обробки даних та управління сенсорними мережами є недостатньо ефективними в умовах великих потоків інформації та обмежених ресурсів кінцевих пристроїв.

У другому розділі досліджено архітектурні підходи до побудови IoT-інфраструктур та принципи інтеграції технологій Big Data в IoT-системи. Обґрунтовано доцільність використання розподілених архітектур і інтелектуальних методів аналізу даних для підвищення продуктивності та адаптивності сенсорних мереж. Показано, що поєднання IoT і Big Data створює умови для ефективного аналізу стану мережі та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

У третьому розділі розроблено структурну схему IoT-інфраструктури сенсорної мережі та побудовано математичну модель її функціонування. Проведено аналіз процедури доступу до мережі, визначено основні чинники виникнення затримок і колізій під час встановлення з’єднання. На основі цього сформульовано модель оцінки енергоспоживання кінцевих IoT-пристроїв з урахуванням режимів роботи мережі та механізмів енергозбереження. Отримані результати дозволяють прогнозувати автономний час роботи пристроїв і оцінювати вплив параметрів мережі на енергоефективність.

У четвертому розділі виконано експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання із застосуванням методів штучного інтелекту. Проведено аналіз енергоспоживання кінцевих пристроїв у режимах з використанням та без використання режиму PSM, що підтвердило суттєве зростання автономності при його застосуванні. Реалізовано комп'ютерну модель у середовищі Matlab/Simulink із використанням нейронних мереж для прогнозування енергоспоживання та часу роботи пристроїв. Порівняльний аналіз аналітичних розрахунків і результатів нейромережного прогнозування показав, що похибка не перевищує 5%, що свідчить про високу точність і практичну придатність запропонованого підходу.

Отримані в роботі результати підтверджують наукову новизну, яка полягає в розробці методу побудови IoT-інфраструктури сенсорної мережі з інтеграцією технологій Big Data та використанням алгоритмів штучного інтелекту для оцінки енергоефективності й прогнозування стану мережевих вузлів.

Практичне значення роботи полягає в можливості застосування запропонованої методики під час проєктування та експлуатації IoT-інфраструктур сенсорних мереж. Розроблений підхід може бути використаний для підвищення автономності кінцевих пристроїв, оптимізації використання енергетичних ресурсів і забезпечення стабільної роботи високопродуктивних IoT-систем у середовищі великих даних.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Богомолов С. В., Півнюк М.П. МЕТОД ТА ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ ІоТ-ПРИСТРОЇВ У ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ВИЯВЛЕННЯМ ВІДМОВ. Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи — 2025: VI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція (2025). Режим доступу: <https://itconf.nuos.edu.ua/2025/publications/%D0%B0-method-and-toolset-for-monitoring-iot-devices-in-local-networks-with-failure-detection/>
2. Fantana G. I., Oae S. A. Evolution of Smart Building // Proceedings of the International Conference on Environment, Energy, Ecosystems and Development. – 2013. – P. 112–118.
3. Ayala L. Cybersecurity Lexicon. – New York : Apress, 2016. – 316 p.
4. Sinopoli J. Smart Buildings. – Spicewood : Spicewood Publishing, 2006. – P. 2–12.
5. Hu F. Security and Privacy in Internet of Things (IoTs): Models, Algorithms, and Implementations. – Boca Raton : CRC Press, 2016. – 440 p.
6. Vermesan O., Friess P. Internet of Things – From Research and Innovation to Market Deployment. – Aalborg : River Publishers, 2014. – 352 p.
7. Riley M. Programming Your Home: Automate with Arduino, Android, and Your Computer. – Dallas ; Raleigh : The Pragmatic Bookshelf, 2012. – 425 p.
8. Березюк О. В., Лисенко В. П. Інтернет речей: архітектура, протоколи та застосування : навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 148 с.
9. Климчук М. М., Кучерук В. Ю. Енергоефективні інформаційно-комунікаційні системи : монографія. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 212 с.
10. Railsback S. F., Grimm V. Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction. – Princeton : Princeton University Press, 2011. – 331 p.
11. Schmarzo B. Big Data: Understanding How Data Powers Big Business. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. – 240 p.

12.Жук О. М., Ткаченко В. А. Великі дані та їх застосування в кіберфізичних системах // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Інформатика. – 2021. – № 3. – С. 67–74.

13.Мельник А. О. Технології Big Data в інформаційно-аналітичних системах : навч. посіб. – Львів : Львівська політехніка, 2019. – 180 с.

14.Wirth N. Algorithms and Data Structures. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2012. – 528 p.

15.Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions // Future Generation Computer Systems. – 2013. – Vol. 29, No. 7. – P. 1645–1660.

16.Oussous A., Benjelloun F.-Z., Lahcen A. A., Belfkih S. Big Data Technologies: A Survey // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2018. – Vol. 30. – P. 431–448.

17.Коваленко І. В., Романюк В. А. Бездротові сенсорні мережі: принципи побудови та застосування // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2017. – № 2. – С. 34–41.

18.Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless Sensor Networks: A Survey // Computer Networks. – 2002. – Vol. 38, No. 4. – P. 393–422.

19.Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, No. 4. – P. 2347–2376.

20.Федоренко О. Г., Бондаренко М. О. Аналіз енергоспоживання IoT-пристроїв у сенсорних мережах // Вісник ХНУРЕ. – 2020. – № 2. – С. 89–95.

21.Murtagh N., Gatersleben B., Uzzell D. Differences in Energy Behaviour and Conservation between and within Households with Electricity Monitors // Energy Policy. – 2014. – Vol. 66. – P. 543–556.

22.Kirichek R., Kulik V. Long-Range Data Transmission on Flying Ubiquitous Sensor Networks by Using LPWAN Protocols // Communications in

Computer and Information Science. – 2016. – Vol. 678. – P. 442–453. – DOI: 10.1007/978-3-319-51917-3\_39.

23.Козловський В. О. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. — 2021. — 42 с.

24.Методичні вказівки до виконання магістерських кваліфікаційних робіт студентами спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія». / Укладачі О. Д. Азаров, О. В. Дудник, С. І. Швець – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 57 с.

**ДОДАТОК А**

Технічне завдання

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії  
Кафедра обчислювальної техніки

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ОТ  
проф., д.т.н. Азаров О.Д.

---

" 3 " жовтня 2025 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи  
«ІоТ-інфраструктура мережі із застосуванням штучного інтелекту»

Науковий керівник: доцент к.т.н.

Богомолів С. В.

Студент групи 1КІ-24м

Півнюк М. П.

## 1 Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

1.1 Актуальність роботи обумовлена стрімким розвитком технологій Інтернету речей (IoT) та впровадженням високопродуктивних сенсорних мереж у різних сферах: промисловість, енергетика, транспорт, житлово-комунальні системи та моніторинг навколишнього середовища. Збільшення кількості IoT-пристроїв та обсягів генерованих ними даних формує складні IoT-інфраструктури, які висувають високі вимоги до масштабованості, надійності, продуктивності та енергоефективності.

Традиційні методи побудови сенсорних мереж та обробки даних не завжди ефективні в умовах великих потоків інформації, обмежених обчислювальних ресурсів кінцевих пристроїв та необхідності тривалої автономної роботи. Застосування технологій Big Data та штучного інтелекту дозволяє здійснювати інтелектуальний аналіз даних, прогнозування стану мережі та оптимізацію енергоспоживання IoT-інфраструктур.

1.2 Наказ про затвердження теми МКР № 313 від 24.09.2025 року.

## 2 Мета МКР і призначення розробки

2.1 Мета роботи — розробка методу побудови IoT-інфраструктури сенсорної мережі з використанням технологій Big Data та алгоритмів штучного інтелекту для оцінки енергоефективності та прогнозування автономності кінцевих пристроїв.

2.2 Призначення розробки — програмний комплекс для аналізу IoT-мереж, який дозволяє:

- оцінювати енергоспоживання кінцевих пристроїв;
- прогнозувати час автономної роботи;
- визначати оптимальні режими енергозбереження;
- підвищувати ефективність використання ресурсів сенсорних мереж.

### 3 Вихідні дані для виконання МКР

3.1 Аналіз сучасних концепцій та архітектур IoT-інфраструктур, включно з NB-IoT та високопродуктивними сенсорними мережами.

3.2 Розробка структурної схеми IoT-інфраструктури з інтеграцією модулів Big Data та нейронних мереж для прогнозування енергоспоживання.

3.3 Реалізація комп'ютерної математичної моделі IoT-інфраструктури у середовищі Matlab/Simulink.

3.4 Виконання розрахунків енергоспоживання та прогнозування часу автономної роботи кінцевих пристроїв для доведення ефективності розробки.

3.5 Тестування методики та програмного комплексу на різних сценаріях роботи IoT-мереж з урахуванням режимів енергозбереження (PSM) та без нього.

### 4 Вимоги до виконання МКР

Головна вимога — розробка методу оцінки енергоефективності IoT-інфраструктури та прогнозування автономності кінцевих пристроїв на основі:

- математичного моделювання режимів роботи пристроїв;
- порівняння аналітичних та прогнозних результатів нейронних мереж;
- інтеграції Big Data для аналізу великих обсягів даних мережі.

### 5 Етапи МКР та очікувані результати

Етапи роботи та очікувані результати приведено в Таблиці А.1.

Таблиця А.1 — Етапи роботи та очікувані результати

№ з/п	Назва етапу	Термін (початок)	Термін (кінець)	Очікувані результати
1	Огляд та аналіз підходів до створення IoT-інфраструктури	11.09.2025	17.09.2025	Аналітичний огляд джерел, Розділ 1
2	Підходи й технології для побудови IoT-інфраструктури мережі	18.09.2025	20.09.2025	Розділ 2

## Продовження таблиці А.1.

3	Метод побудови IoT-інфраструктури для мереж із інтеграцією big data	20.09.2025	03.10.2025	Розділ 3
4	Експериментальні дослідження та тестування IoT-інфраструктури мережі засобами штучного інтелекту	04.10.2025	12.10.2025	Розділ 4
5	Підготовка економічного обґрунтування розробки	13.10.2025	15.10.2025	Розділ 5
6	Публікація проміжних результатів дослідження	16.10.2025	16.10.2025	Тези доповіді
7	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу та презентації	17.10.2025	25.10.2025	ПЗ, графічний матеріал, презентація
8	Підготовка та підпис супроводжуючих документів, нормоконтроль та тест на текстові запозичення	26.10.2025	03.11.2025	Оформлені документи

## 6 Матеріали, що подаються до захисту МКР

До захисту подаються: пояснювальна записка МКР, протокол попереднього захисту МКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук опонента, протоколи складання державних екзаменів, анотації до МКР українською та іноземною мовами.

## 7 Порядок контролю виконання та захисту МКР

Виконання етапів графічної та розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні Екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора.

## 8 Вимоги до оформлювання та порядок виконання МКР

## 8.1 При оформлюванні МКР використовуються:

— ДСТУ 3008: 2015 «Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання»;

— ДСТУ 8302: 2015 «Бібліографічні посилання. Загальні положення та правила складання»;

—ГОСТ 2.104-2006 «Єдина система конструкторської документації. Основні написи»;

— методичні вказівки до виконання магістерських кваліфікаційних робіт зі спеціальності 123 — «Комп'ютерна інженерія»;

— документи на які посилаються у вище вказаних.

8.2 Порядок виконання МКР викладено в «Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21».

## ДОДАТОК Б

### Протокол перевірки кваліфікаційної роботи

Назва роботи: IoT-інфраструктура мережі із застосуванням штучного інтелекту.

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ : кафедра обчислювальної техніки, ФІТКІ, 1КІ – 24м

(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КП1) 11 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту.
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Азаров О. Д., д.т.н., зав. каф. ОТ

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Мартинюк Т. Б., д.т.н., проф. каф. ОТ

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Захарченко С. М.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Богомолів С. В., к.т.н. доц. каф. ОТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Півнюк М. П.

(прізвище, ініціали)

## ДОДАТОК В

## Графічний матеріал

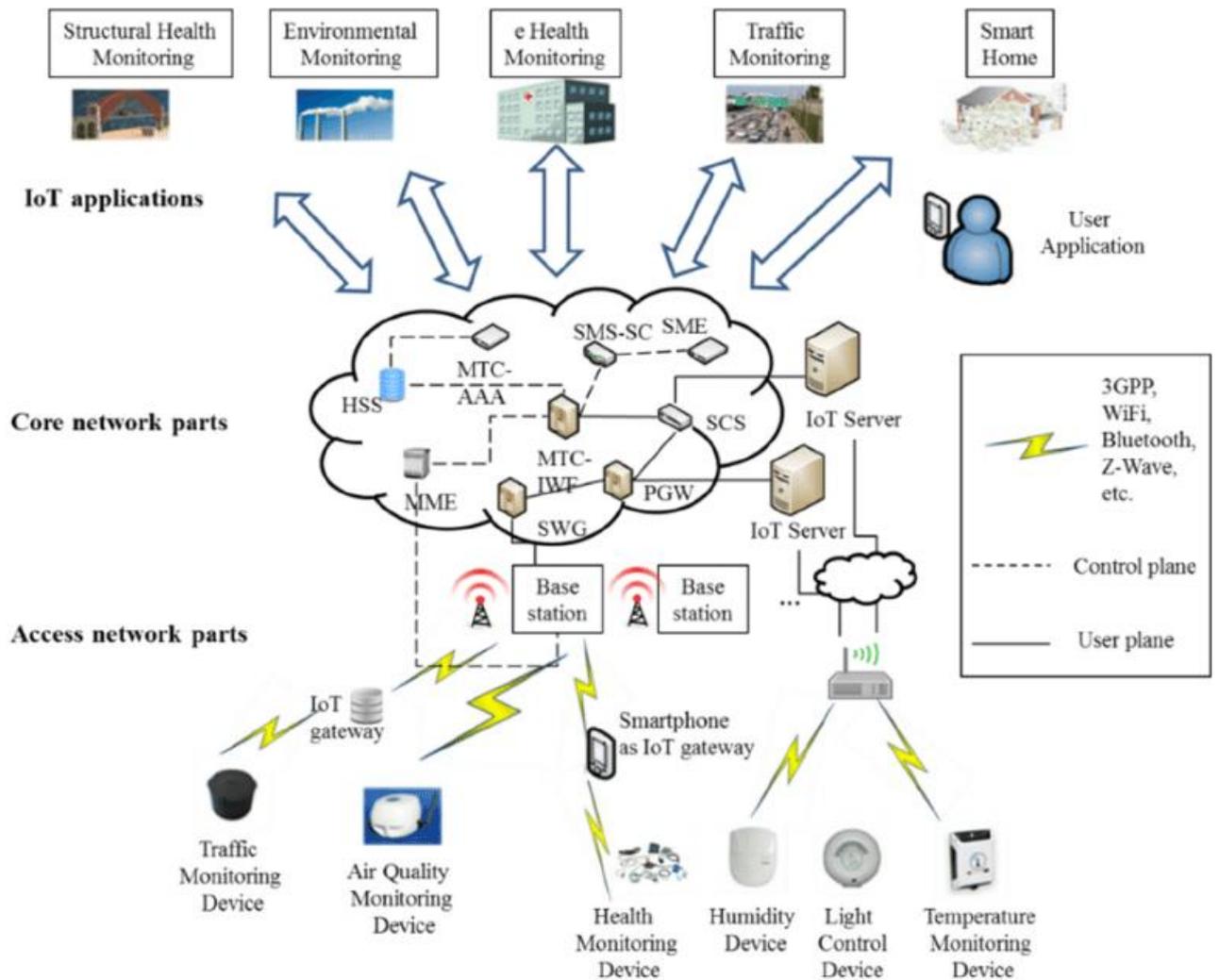


Рисунок В.1 — Загальна архітектура IoT

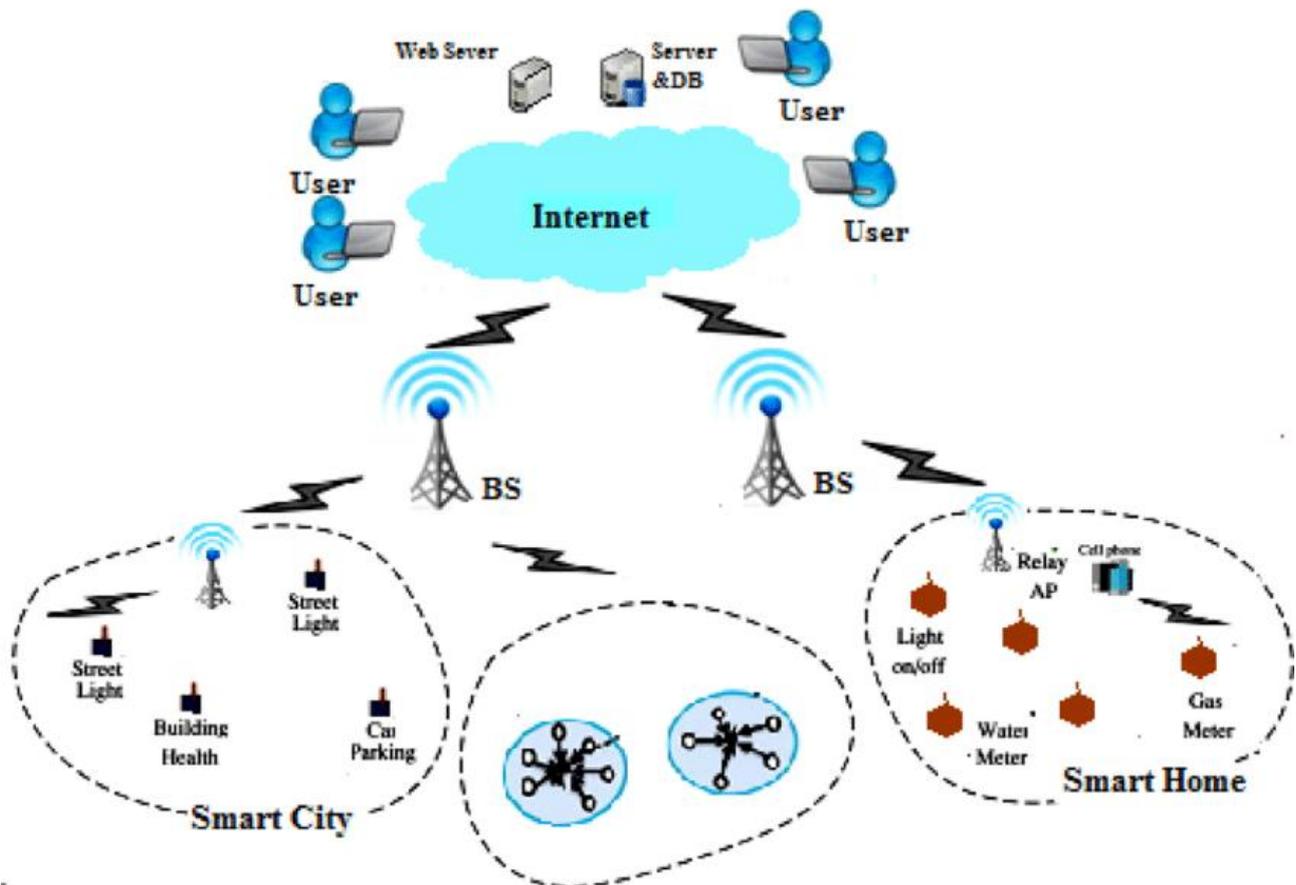


Рисунок В.2 — Архітектура сенсорної мережі IoT

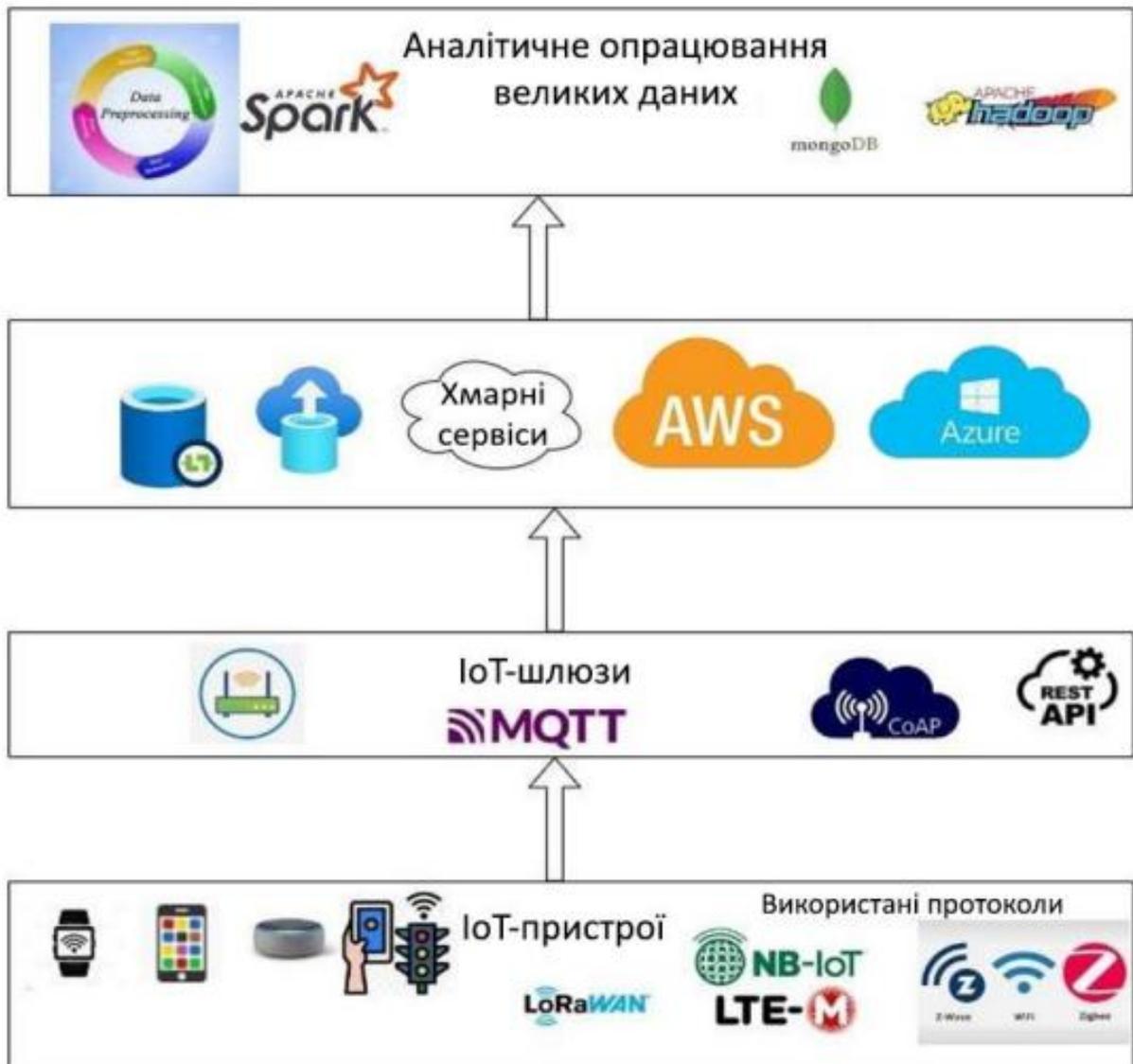


Рисунок В.3 — IoT та архітектура великих даних