

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет комп'ютерних наук та технологій
Кафедра комп'ютерних систем та мереж

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему БЕЗДРОТОВА СЕНСОРНА МЕРЕЖА З ЗАСТОСУВАННЯМ
ВЕЛИКИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Виконав: студент 2 курсу, групи КНТз-513м
спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма (спеціалізація)

Комп'ютерні системи та мережі

(код і назва спеціальності)

ПЕРЕРВЕНКО В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник ІЛ'ЯШЕНКО М.Б.

(прізвище та ініціали)

Рецензент СТЕПАНЕНКО О.О.

(прізвище та ініціали)

2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Комп'ютерних наук і технологій

Кафедра «Комп'ютерні системи та мережі»

Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) магістерський

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і назва)

Освітня програма (спеціалізація) Комп'ютерні системи та мережі
(назва)

Зав. кафедр Кудерметов Р.К.

“ ” _____ 2024 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

ПЕРЕРВЕНКО Володимир Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Бездротова сенсорна мережа з застосуванням великих даних на основі концепції Інтернету Речей

керівник проекту (роботи) ІЛЬЯШЕНКО Матвій Борисович, к. т. н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “18” жовтня 2024 року № 149

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 01 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) безпроводні сенсорні мережі, NB-IoT, WSN, BigData

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

1) Аналіз існуючих проблем при побудові сенсорних мереж.

2) Огляд технологій створення IoT-рішень для високопродуктивних сенсорних мереж.

3) Метод розробки IoT-рішень для високопродуктивних сенсорних мереж із використанням технологій Big Data.

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	ІЛЪЯШЕНКО М.Б., к. т. н., доцент		
Нормоконтроль	ПОЛЬСЬКА О.В. ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 17.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	30.09.2024 р.	
2	Огляд технологій створення IoT-рішень	13.10.2024 р.	
3	Аналіз технологій та методи порівняння	21.10.2024 р.	
4	Метод розробки IoT-рішень	07.11.2024 р.	
5	Математична модель задачі	19.11.2024 р.	
6	Аналіз результатів моделювання:	25.11.2024 р.	
7	Оформлення ПЗ	01.12.2024 р.	

Студент Володимир ПЕРЕРВЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник проекту (роботи) _____ Матвій ІЛЪЯШЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 89 с., 34 рис., 6 табл., 25 джерел.

БЕЗПРОВОДНІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, ВЕЛИКІ ДАНІ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ

Мета роботи: розробка методу створення IoT-рішення для високопродуктивних сенсорних мереж із використанням технологій Big Data та дослідження їх енергоефективності.

Об'єкт дослідження: процес створення високопродуктивної сенсорної мережі із застосуванням великих даних.

Предмет дослідження: безпроводові сенсорні мережі із використанням технологій великих даних на основі концепції Інтернету речей.

У цій роботі розглянуто концепцію Інтернету речей, висвітлено основні сфери її застосування та розвиток відповідних технологій. Показано актуальність використання великих даних у безпроводових сенсорних мережах та описано особливості їх застосування у високопродуктивних мережах. Розроблено структурну схему безпроводової сенсорної мережі із застосуванням великих даних на основі концепції Інтернету речей, а також досліджено аспекти енергетичної ефективності запропонованого рішення.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's work: 89 p.; 34 figures; 6 tables; 25 sources.

SENSOR NETWORKS, BIG DATA, INTERNET OF THINGS, ENERGY EFFICIENCY, ENERGY CONSUMPTION WIRELESS.

Purpose: to develop a method for creating an IoT solution for high-performance sensor networks using Big Data technologies and to study their energy efficiency.

Object of study: the process of creating a high-performance sensor network using big data.

Subject of research: wireless sensor networks using big data technologies based on the concept of the Internet of Things.

This paper considers the concept of the Internet of Things, highlights the main areas of its application and the development of relevant technologies. The relevance of using big data in wireless sensor networks is shown and the features of its application in high-performance networks are described. A structural scheme of a wireless sensor network using big data based on the concept of the Internet of Things is developed, and aspects of energy efficiency of the proposed solution are investigated.

ЗМІСТ

Скорочення на умовні позначки	8
Вступ	9
1 Аналіз існуючих проблем при побудові сенсорних мереж	11
1.1 Основні поняття концепції інтернету речей.....	11
1.2 Технічне забезпечення «Розумних міст»	18
1.2.1 Інтелектуальні дороги.....	18
1.2.2 Сонячні «розумні дороги».....	18
1.2.3 Інтелектуальні енергомережі	19
1.2.4 Інформаційні та Інтернет-технології.....	20
1.2.5 Візуалізація концепції.....	20
1.3 Термінологія IoT рішень. Методи розробки архітектури IoT	23
1.4 Висновки до розділу	29
2 Огляд технологій створення IoT-рішень для високопродуктивних сенсорних мереж	30
2.1 Мультиагентна технологія створення IoT-рішень та особливості її використання у високопродуктивних сенсорних мережах.....	30
2.2 Використання технологій Big Data в IoT для створення високопродуктивних сенсорних мереж	32
2.3 Аналіз технологій та методи порівняння.....	49
2.3.1 Технологія LoRa	49
2.3.2 Технологія SIGFOX.....	52
2.3.3 Технологія Weightless	53
2.3.4 Технологія NB-IoT (Narrow Band IoT)	54
2.4 Висновки до розділу	57
3 Метод розробки IoT-рішень для високопродуктивних сенсорних мереж із використанням технологій Big Data.....	58

3.1 Розробка схематичної моделі IoT рішення.....	58
3.2 IoT рішення із застосування великих даних.....	60
3.3 Модель розробки IoT рішення	62
3.4 Математична модель задачі енергоефективності IoT-рішення та методи її розв'язання.....	65
3.4.1 Робота в режимі PSM.....	71
3.4.2 Аналіз енергоспоживання	71
3.5 Математична комп'ютерна модель IoT-рішення	78
3.6 Аналіз результатів моделювання: порівняння методів	85
Висновки	86
Перелік джерел посилання	88

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

AI	- Artificial Intelligence, Штучний інтелект
BLE	- Bluetooth Low Energy, Технологія з низьким споживанням енергії
ESP	- Event Stream Processing, Обробка потоку подій
IoT	- Інтернет речей, Internet of Things
IIoT	- Промисловий IoT, Industrial IoT
LDR	- Light-dependent resistors, Світлозалежні резистори
ML	- Machine learning, Машинне навчання
PIR	- Infrared sensors, Інфрачервоні датчики
RFID	- Radio frequency identification technologies, Технології радіочастотної ідентифікації
PLC	- Power Line Communication, Зв'язок по лінії електропередач

ВСТУП

Інтернет речей є глобальною мережею взаємопов'язаних систем, яку активно використовують компанії в різних галузях. Ця зміна пов'язана з інтеграцією цифрових технологій, що є основою найважливіших суспільних та людських діяльностей, а також цифровою трансформацією бізнесу. Зі збільшенням кількості пристроїв, підключених до Інтернету, для автоматизації та збору даних, впровадження IoT сприяє ефективному розвитку бізнесу у всьому світі, завдяки інноваціям, які відкривають нові можливості. Важливою особливістю цих інновацій є їхнє використання для вирішення проблем, пов'язаних із глобальним потеплінням, економією води, підвищенням врожайності в розумному сільському господарстві, а також для створення основи для автономних транспортних засобів [1].

Завдяки зростанню обчислювальної потужності та зниженню вартості зберігання даних, можливості обробки даних стають більш доступними. Датчики стають меншими, дешевшими та точнішими, а пропускна здатність мережі швидко зростає. Усі ці технологічні тенденції суттєво підтримують розвиток IoT.

Проте, щоб повною мірою реалізувати потенціал IoT, необхідно вирішити кілька ключових проблем, таких як зменшення складності рішень, забезпечення безпеки та подолання недоліків зв'язку в різноманітних середовищах. Дослідження в області великих даних в системах IoT залишаються актуальними.

Завдяки розвитку інформаційних технологій та мікроелектроніки стало можливим створення мініатюрних сенсорних датчиків, які відрізняються високою надійністю та низькою вартістю. Це призвело до поширення сенсорних мереж, які використовують ці датчики. Такі мережі забезпечують постійний і точний моніторинг необхідних параметрів цільових об'єктів.

На початкових етапах розвитку сенсорних мереж передача даних здійснювалася через проводи, однак з розміщенням великої кількості датчиків у безпосередній близькості один від одного виникала потреба в значному

просторовому ресурсі. Таким чином, актуальність даної теми обумовлена розвитком інформаційних технологій, Інтернету Речей та сенсорних мереж.

Метою даної роботи є розробка методу для створення IoT-рішення для високопродуктивних сенсорних мереж із застосуванням технологій великих даних.

В процесі написання роботи були визначені такі завдання:

- провести огляд літератури за темою дослідження, визначити поняття Інтернету Речей та вивчити основні сфери його застосування;
- розглянути методи використання технологій великих даних у високопродуктивних сенсорних мережах;
- розробити структурну схему IoT-рішення та дослідити питання енергоефективності.

Об'єктом дослідження є процес створення високопродуктивної сенсорної мережі з використанням великих даних. Предметом дослідження виступають базові системи моніторингу із застосуванням великих даних в рамках концепції Інтернету Речей.

Для написання роботи були використані методи аналізу, статистики та порівняння. Наукова новизна роботи полягає у розробці алгоритму для розрахунку енергоефективності системи, а також у створенні структурної схеми IoT-рішення.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОБЛЕМ ПРИ ПОБУДОВІ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Основні поняття концепції інтернету речей

У цьому розділі ми розглянемо концепцію Інтернету Речей та проаналізуємо основні методи його побудови.

Інтернет речей, або IoT, представляє собою мережу взаємопов'язаних обчислювальних пристроїв, механічних і цифрових об'єктів, а також живих істот, яким присвоюються унікальні ідентифікатори. Ця мережа дозволяє передавати дані без потреби в прямій взаємодії між людьми.

Екосистема IoT складається з розумних пристроїв, які підключені до Інтернету та використовують вбудовані системи, такі як процесори, датчики та комунікаційні елементи, для збору, передачі та обробки даних, отриманих від інших пристроїв. Пристрої обмінюються даними, отриманими від датчиків, підключаючись до шлюзу або іншого пристрою, з якого дані надсилаються до хмари для подальшого аналізу [2].

Більшість операцій виконується без втручання людини, хоча користувачі можуть взаємодіяти з пристроями, наприклад, налаштовувати їх, давати інструкції або отримувати доступ до зібраних даних. Протоколи підключення, мережеві технології та засоби зв'язку, що застосовуються для цих пристроїв, значною мірою залежать від конкретних реалізованих застосувань.

Крім того, Інтернет речей може інтегрувати штучний інтелект та машинне навчання для спрощення процесів збору даних і підвищення їх динамічності.

Ця концепція сприяє тому, щоб люди мали можливість жити і працювати більш раціонально, а також повністю контролювати свої життя. Система пропонує не лише інтелектуальні пристрої для автоматизації домашніх умов, а й рішення, необхідні для бізнесу. Крім того, технологія дозволяє підприємствам у режимі реального часу стежити за фактичним функціонуванням своїх систем, що забезпечує глибоке розуміння всіх аспектів - від продуктивності машин до ланцюга постачання та логістичних процесів.

Інтернет речей надає можливість компаніям автоматизувати різні процеси та зменшувати витрати на трудові ресурси. Це також сприяє зменшенню кількості відходів і покращує якість обслуговування, роблячи виробництво та доставку товарів більш економічними. Водночас технологія забезпечує прозорість у транзакціях з клієнтами.

Таким чином, ця система є однією з ключових технологій у повсякденному житті, і її важливість лише зростатиме в міру того, як все більше компаній усвідомлюють потенціал підключених пристроїв для підтримки своєї конкурентоспроможності.

Інтернет речей надає організаціям безліч переваг, які варіюються в залежності від галузі, але також мають загальні риси, що можуть бути корисними в різних сферах [3]. Основні переваги системи включають можливість:

- контролювати бізнес-процеси;
- поліпшити обслуговування клієнтів;
- заощаджувати час та гроші;
- підвищити продуктивність праці співробітників;
- інтегрувати та адаптувати бізнес-моделі;
- приймати більш обґрунтовані бізнес-рішення;
- генерувати додатковий дохід.

Серед специфічних переваг можна виділити:

- доступ до інформації з будь-якого місця в будь-який час на будь-якому пристрої;
- поліпшений зв'язок між підключеними пристроями;
- економія часу і грошей завдяки передачі даних по мережі;
- автоматизацію завдань, що підвищує якість бізнес-послуг та знижує потребу в людському втручанні.

Проте, поряд з перевагами, існують і деякі недоліки IoT:

- зростання кількості підключених пристроїв і обміну інформацією підвищує ризик крадіжки конфіденційної інформації зловмисниками.

- управління величезною кількістю пристроїв і збором даних може стати складним завданням для підприємств.

- помилка в системі може призвести до збою всіх підключених пристроїв.

- відсутність міжнародних стандартів сумісності ускладнює взаємодію пристроїв від різних виробників.

Інтернет речей спонукає компанії переосмислити свої бізнес-підходи, надаючи їм інструменти для покращення стратегій.

Концепція IoT найбільше поширена у виробничих, транспортних і комунальних секторах, де активно використовуються датчики та інші пристрої. Проте її застосування також поширюється на сільське господарство, інфраструктуру та домашню автоматизацію, що веде до цифрової трансформації деяких організацій [4].

Наприклад, IoT може бути корисним для фермерів, полегшуючи їхню роботу. Датчики можуть збирати дані про опади, вологість, температуру та інші фактори, що допомагають автоматизувати агрономічні процеси.

Моніторинг інфраструктурних об'єктів — ще один аспект, у якому IoT демонструє свою користь. Датчики можуть використовуватися для відстеження подій і змін у конструкціях будівель, мостів та інших об'єктів. Це дозволяє досягти економії витрат, зменшити час, покращити якість робочих процесів і перейти до безпаперового документообігу.

Існує декілька сучасних стандартів IoT, серед яких виділяють наступні [5]:

- 6LoWPAN (IPv6 через бездротові персональні мережі з низьким енергоспоживанням) - відкритий стандарт, розроблений Інженерною групою Інтернету. 6LoWPAN дозволяє будь-якому малопотужному радіо пристрою обмінюватися даними з Інтернетом, зокрема, з використанням технологій 802.15.4, Bluetooth Low Energy (BLE) і Z-Wave, що широко застосовується в домашній автоматизації;

- ZigBee - бездротова мережа, яка характеризується низьким енергоспоживанням і невеликою швидкістю передачі даних, переважно використовується в промислових умовах, заснована на стандарті IEEE 802.15.4.

ZigBee Alliance також розробив Dotdot – універсальну мову для IoT, що забезпечує безпечну взаємодію інтелектуальних пристроїв у будь-якій мережі;

- Lite OS - операційна система, схожа на Unix, призначена для бездротових сенсорних мереж. LiteOS підтримує такі сфери застосування, як смартфони, розумні виробничі системи, домашня автоматизація та автомобільний Інтернет речей, також виступає платформою для створення інтелектуальних пристроїв;

- OneM2M - шар сервісів «машина-машина», який можна інтегрувати в апаратне та програмне забезпечення для з'єднання пристроїв, глобальна організація зі стандартизації, створена для розробки універсальних стандартів, що забезпечують взаємодію між додатками в різних вертикальних секторах;

- DDS (Служба розподілу даних) - стандарт IoT, розроблений Object Management Group (OMG), який забезпечує масштабовану та високопродуктивну комунікацію між пристроями в режимі реального часу;

- AMQP (Протокол асинхронного обміну повідомленнями) - відкритий стандарт для асинхронної передачі даних, гарантує безпечний та сумісний обмін зашифрованими повідомленнями між додатками і організаціями, використовується як для клієнт-серверної передачі повідомлень, так і для управління пристроями;

- CoAP (Протокол обмеженого застосування) - протокол, створений IETF, який дозволяє малопотужним пристроям з обмеженими обчислювальними ресурсами ефективно працювати в середовищі Інтернету речей;

- LoRaWAN (Широка мережа великого радіусу дії) - протокол, розроблений для підтримки масштабних мереж, таких як «розумні міста», що містять мільйони пристроїв із низьким енергоспоживанням.

Серед фреймворків IoT можна виділити [6]:

- Amazon Web Services (AWS) IoT - хмарна платформа, що дозволяє інтелектуальним пристроям безпечно з'єднуватися та взаємодіяти з хмарою AWS і між собою, що підтримує широкий спектр додатків для розробки і впровадження IoT;

- Arm Mbed IoT - платформа для створення IoT додатків на мікроконтролерах ARM, метою якої є забезпечити безпечне та підключене середовище для пристроїв шляхом інтеграції різноманітних інструментів і сервісів;

- Microsoft Azure IoT Suite - набір сервісів, що дозволяють взаємодіяти з IoT-пристроями, отримувати дані з них, виконувати аналіз і обробку цих даних, а також візуалізувати результати для бізнес-потреб;

- Brillo/Weave від Google - платформа для швидкої розробки IoT додатків, яка включає два основних компоненти Brillo – операційну систему на базі Android для вбудованих пристроїв з низьким енергоспоживанням, і Weave – протокол зв'язку, що дозволяє пристроям і хмарі обмінюватися даними;

- Calvin - це платформа з відкритим вихідним кодом, створена компанією Ericsson, яка призначена для розробки та управління розподіленими додатками, що забезпечують взаємодію між пристроями, яка складається з двох основних компонентів: середовища розробки для створення додатків та середовища виконання, яке керує виконанням цих додатків.

Інтернет речей має широкий спектр реальних застосувань, що охоплюють різні сфери - від споживчих та корпоративних рішень до промислових. Застосування IoT поширюється на галузі автомобілебудування, телекомунікацій, енергетики тощо.

Пристрої, оснащені датчиками і програмним забезпеченням, здатні збирати дані, аналізувати їх і передавати іншим технологіям, спрощуючи життя користувачів і роблячи його зручнішим. Наприклад, переносні гаджети можуть сприяти громадській безпеці, зменшуючи час реагування служб екстреної допомоги під час надзвичайних ситуацій завдяки оптимізації маршрутів до місця події або відстеженню стану здоров'я будівельників і пожежників, що працюють в небезпечних умовах .

В галузі охорони здоров'я IoT відкриває нові можливості, дозволяючи більш ретельно контролювати стан пацієнтів через аналіз даних. Лікарні застосовують системи Інтернету речей для автоматизованого управління

запасами, що включає як фармацевтичні препарати, так і медичні інструменти.

Розумні будинки можуть знижувати витрати на електроенергію завдяки датчикам, які відстежують кількість людей у приміщенні. Наприклад, системи можуть автоматично регулювати температуру: ввімкнути кондиціонер у разі переповненої кімнати або вимкнути обігрів, якщо в офісі більше нікого немає [7].

У сільському господарстві IoT відіграє ключову роль у системах інтелектуального землеробства. За допомогою підключених датчиків фермери можуть контролювати рівень освітлення, температуру, вологість ґрунту на полях та автоматизувати іригаційні системи, забезпечуючи оптимальні умови для зростання рослин.

Розумні будинки в споживчому сегменті, оснащені інтелектуальними термостатами, побутовими приладами та підключеними системами опалення, освітлення й електронними пристроями, можуть управлятися дистанційно через комп'ютери або смартфони.

У розумних містах технології IoT, такі як інтелектуальні вуличні ліхтарі та лічильники, допомагають зменшити затори, заощадити енергію, вирішувати екологічні проблеми та покращувати санітарію. Як приклад, розглянемо концепцію «Розумного міста». Це місто, де завдяки сучасним технологіям раціонально використовуються енергетичні ресурси, зводячи до мінімуму їх негативний вплив на довкілля. Це включає інноваційні рішення в галузях енергетики, водопостачання, транспорту та створення розумних будівель.

Перше у світі розумне місто - Боулдер у штаті Колорадо (США) з населенням близько 100 тисяч осіб. Мешканці міста відомі своєю турботою про природу та активно використовують передові технології, які ще донедавна здавалися фантастикою. Приблизно 50 тисяч будинків у Боулдері обладнані екологічними та енергозберігаючими системами: сонячними батареями, електромобілями, спеціалізованими системами опалення, охолодження та освітлення, які працюють у єдиній мережі моніторингу, надаючи власникам інформацію про вуглецевий слід їхніх будинків. Компанія Xcel у партнерстві з іншими технологічними компаніями інвестувала 100 мільйонів доларів у

створення в Боулдері «живої» лабораторії енергетичних технологій. Деякі будинки мають системи, що автоматично керують енергоспоживанням, завдяки чому комунальні платежі можуть становити лише 3 долари на місяць.

Сонячні панелі спілкуються з будинком, будинок - з автомобілем, і таке взаємозв'язане середовище сприяє значній економії енергії. Система дозволяє мешканцям керувати будинком віддалено з будь-якої точки світу, коригуючи налаштування термостатів або вимикаючи прилади через Інтернет.

Амстердам також активно впроваджує концепцію розумного міста. До 2025 року влада міста планує збільшити частку відновлюваних джерел енергії до 20% і зменшити викиди CO₂ на 40% у порівнянні з попередніми роками.

В Україні останніми роками державні органи, місцеве самоврядування та бізнес інвестують в оновлення міської інфраструктури, підтримуючи функціонування електромереж, водоканалів, доріг та об'єктів соціальної сфери. Проте якість життя не змінюється кардинально, адже традиційні інфраструктури не здатні відповідати сучасним потребам. Для покращення ситуації потрібен новий підхід до будівництва та реконструкції міських систем, орієнтований на потреби людей, а не підприємств.

Сучасні «розумні» технології, які активно розвиваються останні 10-15 років, дозволяють реалізовувати ефективні соціальні проекти, зокрема, впроваджувати сервіси, що спрощують отримання послуг без черг і зайвих паперів. У конкурентній боротьбі міст за людські та інвестиційні ресурси ключову роль відіграє якість міського середовища, яка залежить від відповідності інфраструктури потребам жителів і гостей міста.

Система «Розумне місто» здатна уповільнити зростання тарифів на комунальні послуги, зробити їх доступнішими, покращити якість послуг і підвищити ефективність роботи міських служб, що матиме позитивний вплив на всі аспекти життя.

1.2 Технічне забезпечення «Розумних міст»

Інфраструктура розумних міст включає передові технології, що автоматизують управління міським середовищем, підвищуючи ефективність та надійність її функціонування. Одним із важливих компонентів цієї інфраструктури є «розумні дороги», які сприяють оптимізації транспортного руху та підвищенню безпеки на вулицях.

1.2.1 Інтелектуальні дороги

Розумна дорога - це сукупність автоматизованих систем управління транспортом, що складається з мережі електронних детекторів [8]. Ці сенсори збирають дані про стан дорожнього руху і в режимі реального часу передають їх на центральний сервер. Система відслідковує такі показники:

- швидкість руху транспорту - середня швидкість потоку;
- щільність руху - рівень заповнення дороги транспортними засобами;
- інтенсивність руху - кількість автомобілів на дорозі.

Завдяки цій інформації система здатна автоматично оптимізувати рух. Наприклад, у разі утворення затору інтелектуальні дорожні знаки можуть змінити напрямок руху, щоб знизити навантаження на проблемні ділянки. Крім цього, великі екрани, розміщені по місту, можуть оперативно повідомляти водіїв про пробки. У майбутньому такі повідомлення можуть передаватися і через радіозв'язок.

1.2.2 Сонячні «розумні дороги»

Компанія «Solar Roadways» із США розробила інноваційні дороги, що працюють на сонячній енергії [9]. Такі дороги мають:

- вбудовані системи обігріву, які взимку здатні топити сніг та лід, що зменшує витрати міських служб на очищення доріг;
- світлодіодне освітлення, яке створює динамічні дорожні знаки та розмітку, що можна змінювати залежно від ситуації на дорозі;
- сенсори для виявлення тяжкості, які дозволяють заздалегідь попереджати

водіїв про пішоходів чи інші перешкоди на шляху.

Сонячні дороги можуть забезпечувати міста екологічною енергією, зменшуючи залежність від традиційних джерел. Скотт Брюсо, розробник цієї ідеї, планує створити глобальну мережу доріг, що працюватимуть автономно за допомогою сонячної енергії.

1.2.3 Інтелектуальні енергомережі

Ще одним важливим елементом розумного міста є «інтелектуальні енергомережі», які дозволяють інтегрувати різні джерела енергії, зокрема відновлювані, такі як сонячні та вітрові електростанції [10]. Головне завдання полягає в оновленні старої інфраструктури та її перетворенні на сучасну систему, яка зможе:

- ефективно співпрацювати зі споживачами;
- автоматично виявляти та усувати недоліки;
- інтегрувати місцеві джерела відновлюваної енергії.

Данія стала однією з перших країн, яка почала впроваджувати розподілені енергосистеми. У 1980-х роках країна відчувала гострий дефіцит електроенергії і змушена була імпортувати її з Німеччини та Швеції. Через це вартість електроенергії була дуже високою — 0,12-0,13 долара за кіловат-годину, і, згідно з прогнозами, могла піднятися ще вище.

Щоб уникнути енергетичної кризи, Данія почала розбудовувати вітрові електростанції і створювати розподілену енергосистему. Вітрові турбіни були об'єднані з комбінованими теплоелектроцентралями, які одночасно виробляють електроенергію та тепло для опалення. Завдяки цьому країна змогла забезпечити стабільне енергопостачання навіть у безвітряні періоди.

Сьогодні Данія повністю перейшла на децентралізовану енергосистему, покривши територію численними ТЕЦ потужністю 4, 10 та 25 мегават. Вартість електроенергії становить близько 0,20 долара за кіловат-годину. Незважаючи на залежність від імпорту природного газу, країна вже експортує електроенергію до сусідніх держав.

Впровадження технологій розумних міст сприяє ефективнішому

використанню ресурсів, покращенню життя мешканців та забезпечує сталість розвитку міської інфраструктури.

Ідея розподілених енергосистем полягає у взаємодії та інтеграції різноманітних джерел енергії, включаючи вітрові установки, сонячні батареї, малі гідроелектростанції та інші відновлювані джерела. У контексті сучасних енергетичних потреб все більшу популярність здобуває концепція V2G (Vehicle-to-Grid), особливо в країнах, що активно впроваджують електромобілі.

Vehicle-to-Grid - це технологія, яка дозволяє використовувати акумулятори електромобілів і гібридів як накопичувачі енергії. Ідея полягає в тому, щоб заряджати автомобілі у періоди, коли електроенергія коштує дешевше, а потім повертати її до мережі в години пікового навантаження, коли ціна зростає. Це створює можливість для оптимального розподілу енергії та ефективнішого використання ресурсів.

1.2.4 Інформаційні та Інтернет-технології

Для успішної реалізації таких проектів необхідно побудувати нову інформаційно-технологічну інфраструктуру. Переобладнання звичайних електромереж у сучасні комп'ютеризовані мережі реального часу потребує впровадження інноваційних інтернет-технологій. Ці системи повинні автоматично обробляти інформацію, що надходить з мільйонів сенсорів, і приймати оптимальні рішення для ефективного керування електроенергією. [11]

У результаті комплексної модернізації енергосистеми стають більш гнучкими та розумними. Наприклад, завдяки автоматизації відпадає необхідність у фізичному знятті показників з лічильників електроенергії - ці дані передаються в реальному часі до відповідних служб.

1.2.5 Візуалізація концепції

Концепцію «Розумного міста» можна візуально представити у вигляді схеми (рисунок 1.1), де всі ключові елементи — енергосистеми, транспорт, будинки, датчики, інформаційні мережі — інтегровані в єдину динамічну екосистему.

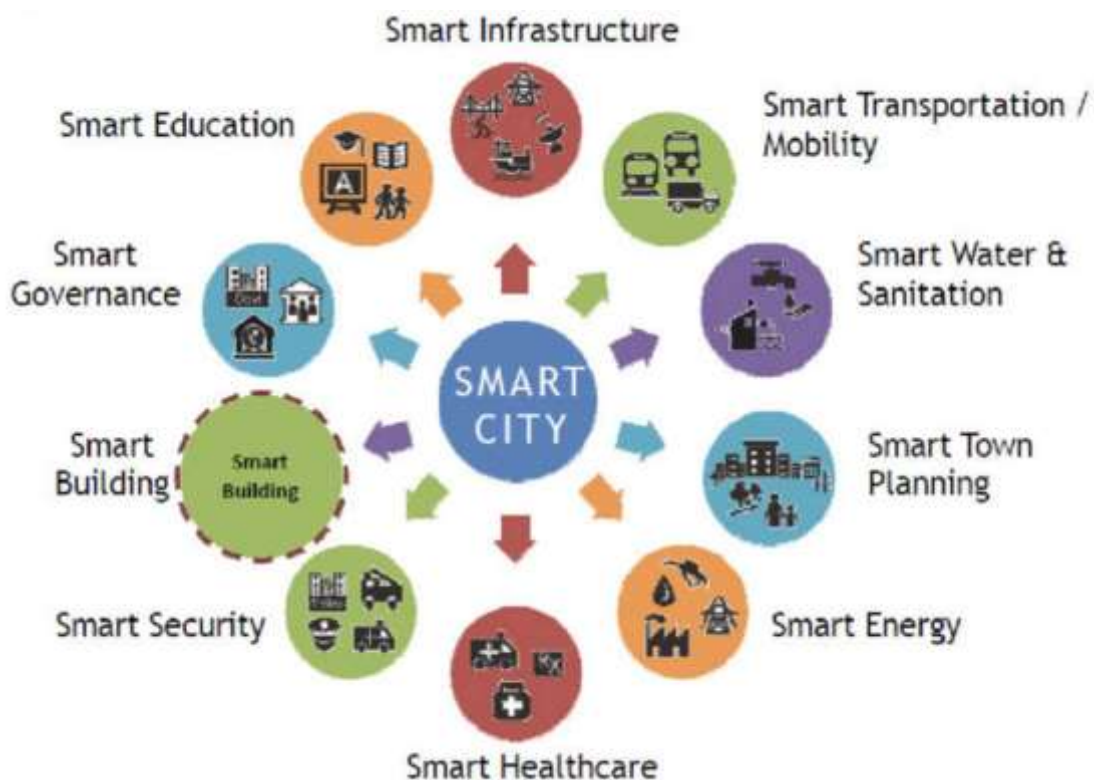


Рисунок 1.1 - Концепція «Розумного міста»

У більш широкому сенсі можливості розумних мереж простягаються набагато далі. Уже сьогодні стають реальністю системи, які на основі інформації від мільйонів індивідуальних лічильників можуть щогодини коригувати тарифні ставки в залежності від наявних енергоресурсів.

В окремих випадках лічильники навіть здатні реагувати на нестачу електроенергії, передаючи команди розумним побутовим приладам, таким як сушарки для одягу або посудомийні машини, тимчасово припинити роботу, поки енергопостачання не стабілізується.

Отже, інформаційні технології значно підвищують "інтелект" та ефективність мережі, водночас збільшуючи її вразливість до потенційних кібератак.

Наступним етапом еволюції високопродуктивних мереж стало застосування бездротових технологій для передачі даних у сенсорній мережі. На цьому етапі ці системи отримали назву «Бездротові Сенсорні Мережі»[12]. Бездротова сенсорна мережа передбачає розгортання великої кількості

компактних вузлів, які можуть самостійно налаштовуватися і співпрацювати для виконання спільних завдань. Вони мають здатність динамічно адаптуватися до змін у середовищі, де розгорнуті, і оперативно реагувати на зміни в топології мережі.

Основні компоненти бездротової сенсорної мережі включають:

- модуль датчика;
- модуль процесора;
- модуль джерела живлення;
- трансивер.

Залежно від призначення бездротової сенсорної мережі, можуть бути додані приводи, аналого-цифрові перетворювачі та монітори. Архітектура вузла мережі зображена на рисунку 1.2.

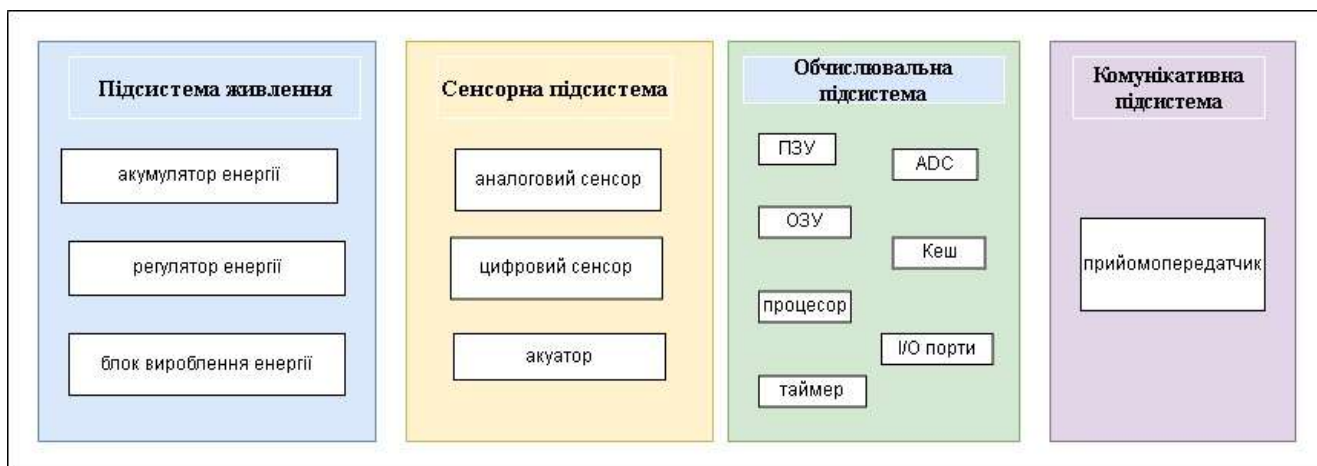


Рисунок 1.2 - Архітектура вузла мережі високопродуктивної сенсорної мережі

Бездротові сенсорні мережі створюються таким чином, що сенсорні вузли можуть самостійно організовуватися без потреби в центральній координації, що характерно для більшості додатків WSN.

Сенсорні вузли зазвичай живляться від батарей, які часто неможливо перезарядити або замінити, особливо якщо передбачається, що вони будуть функціонувати автономно протягом тривалого часу без втручання людини.

Тому ретельне управління ресурсами стає ключовою задачею при

проектуванні бездротових сенсорних мереж. Це завдання можна вирішити за допомогою різних енергозберігаючих технологій, таких як оптимізація радіозв'язку, скорочення обсягу даних, використання режимів сну чи пробудження, застосування енергоефективних протоколів маршрутизації, а також технологій збору енергії.

1.3 Термінологія IoT рішень. Методи розробки архітектури IoT

Хоча кожна система IoT має свої особливості, основні принципи архітектури Інтернету речей та загальний процес обробки даних залишаються подібними для всіх варіантів [13].

Архітектура IoT включає три основні компоненти (рис.1.3):

- основні елементи граничної області – ліва частина;
- обробка подій і аналітика – середина;
- кінцеві застосунки – права частина.

Основу кожної системи IoT складають підключені пристрої, які відповідають за надання даних — суті Інтернету речей. Для збору інформації про фізичні параметри навколишнього середовища або самого об'єкта ці пристрої оснащуються датчиками. Датчики можуть бути вбудовані в пристрої або працювати як окремі елементи для вимірювання та збору телеметричних даних.

Наприклад, сільськогосподарські датчики вимірюють параметри, такі як температура, вологість повітря і ґрунту, рівень рН ґрунту або інтенсивність сонячного світла.

Ще один ключовий компонент — виконавчі механізми. Взаємодіючи з датчиками, ці механізми здатні перетворювати зібрані дані в фізичні дії. Наприклад, у розумній системі поливу датчики фіксують рівень вологості ґрунту, а система, аналізуючи отриману інформацію в реальному часі, подає сигнал виконавчим механізмам для відкриття водяних клапанів у місцях з низьким

рівнем вологості. Клапани залишаються відкритими, поки датчики не зафіксують, що рівень вологості відновлено. Весь цей процес здійснюється без участі людини.

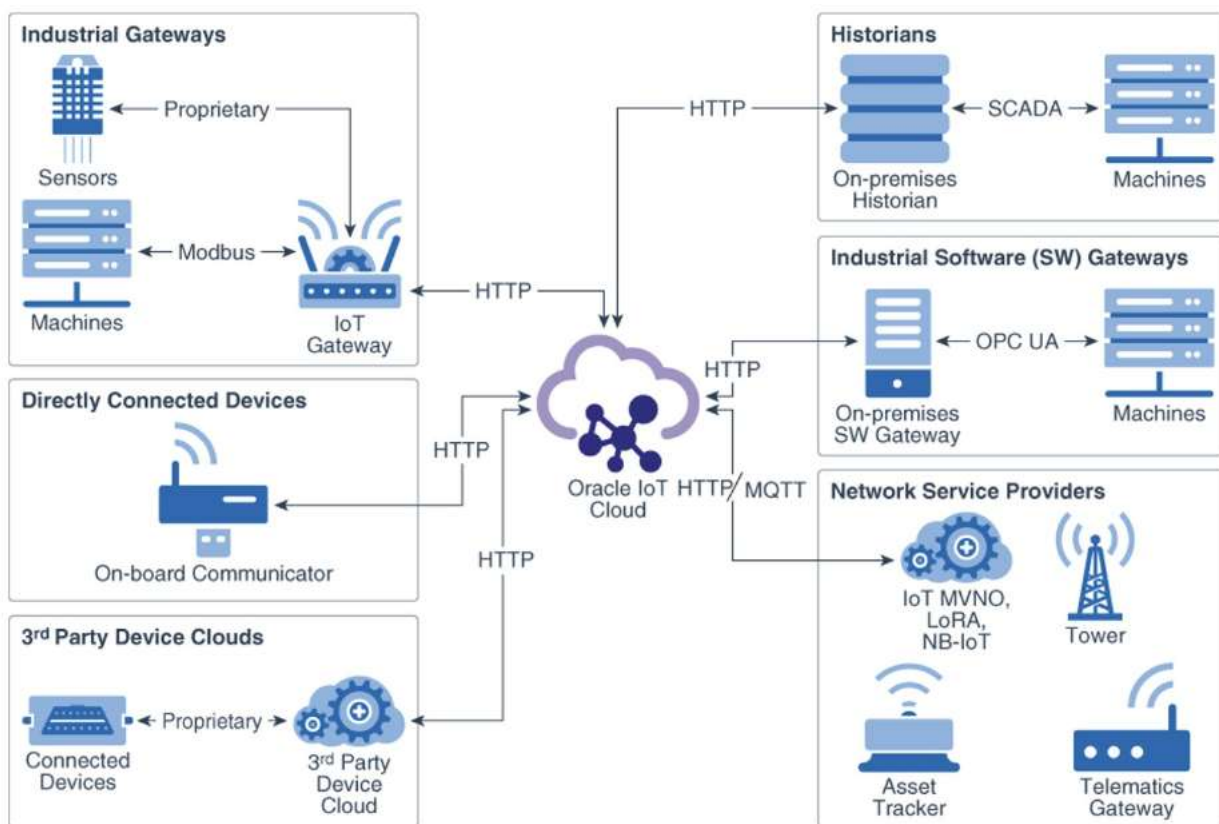


Рисунок 1.3 - Архітектура IoT системи

Ключовим моментом є те, що підключені об'єкти повинні мати можливість не лише здійснювати двонаправлений обмін даними з відповідними шлюзами або системами збору інформації, але й мати здатність взаємодіяти один з одним для обміну даними та спільної роботи в реальному часі. Це особливо важливо для пристроїв з обмеженими ресурсами та батарейним живленням, оскільки такий зв'язок потребує значних обчислювальних потужностей і споживає обмежену енергію та смугу пропускання. Тому ефективне управління пристроями вимагає надійної архітектури, що використовує відповідні, безпечні та енергоефективні протоколи зв'язку.

Таким чином, датчики (Sensors) здійснюють розпізнавання змін, приймаючи вхідні дані. Вони інтегровані в різні пристрої та використовуються в численних сферах. Сфери застосування датчиків ілюструються на рисунку 1.4.

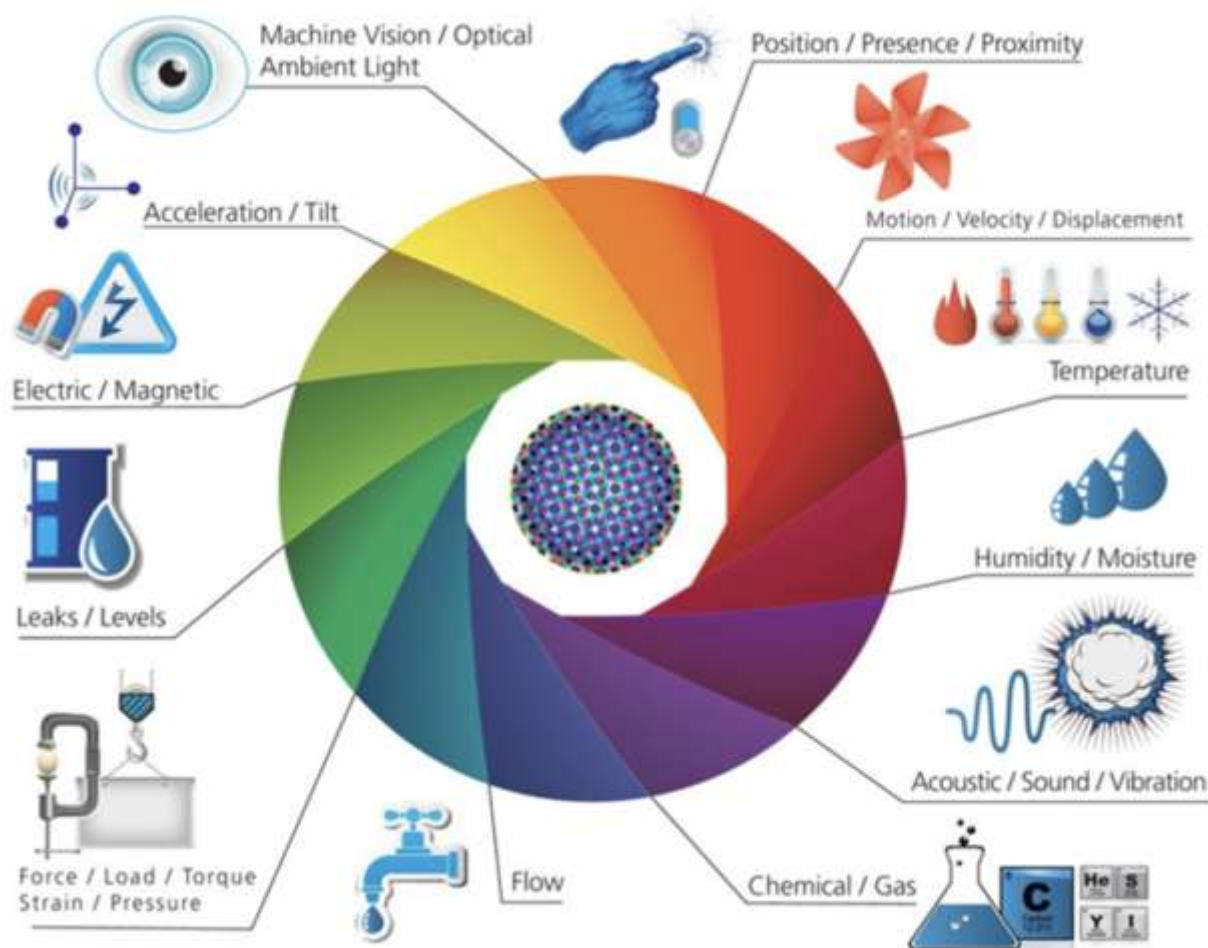


Рисунок 1.4 - Сфери застосування датчиків у IoT

Усі датчики збирають аналогові дані, які є безперервними і можуть бути представлені у вигляді лінії або потоку інформації. Однак передача таких даних через кабель або безпроводовий зв'язок неможлива, оскільки спочатку сигнал необхідно перетворити на цифрові дані. Принцип обробки цього сигналу зображено на рисунку 1.5.

Цифрові дані представлені як послідовність нулів та одиниць. Щоб перетворити аналогові дані на цифрові, безперервну аналогову лінію необхідно розділити на кілька окремих ділянок, кожній з яких буде присвоєне конкретне значення. Хвиляста лінія символізує безперервний аналоговий сигнал, а червона переривчаста лінія — цифровий сигнал. Кожному "стрижку" цифрового сигналу відповідає своє значення, яке виражається комбінацією нулів та одиниць і може бути передано через кабель або безпроводову мережу. Приклад зовнішнього вигляду IoT-датчика показано на рисунку 1.6.

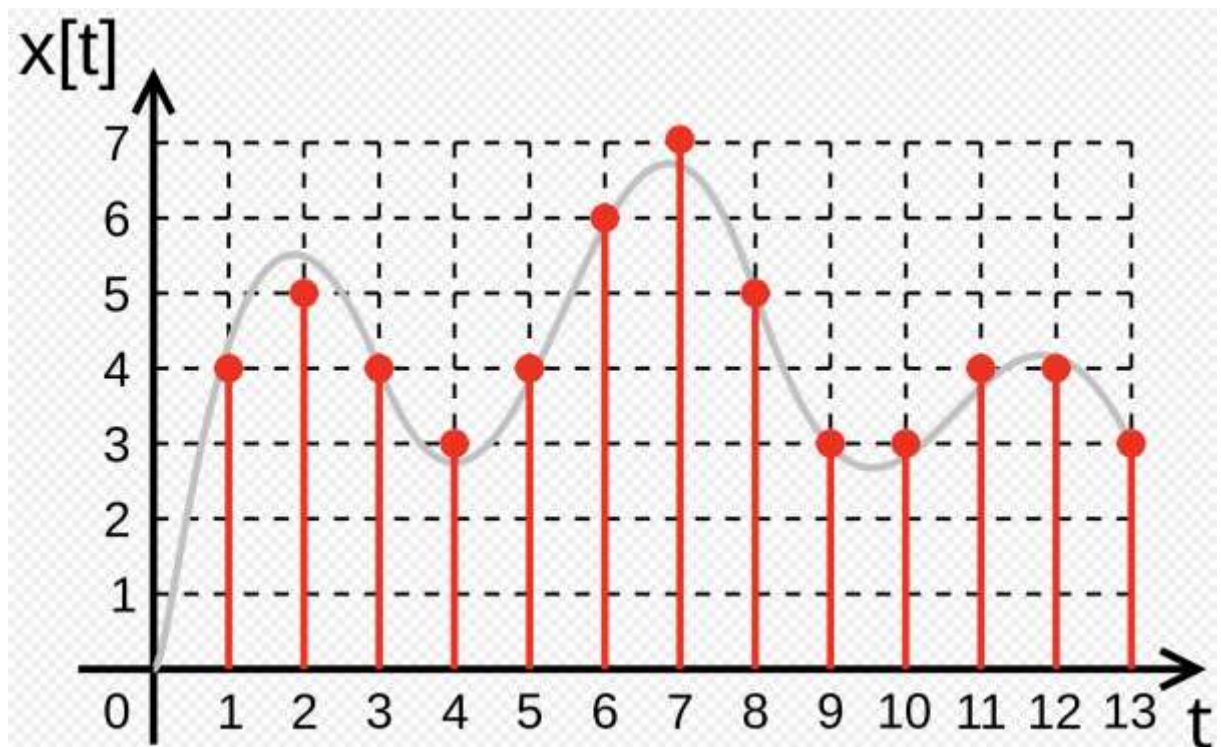


Рисунок 1.5 - Принцип обробки цифрових даних



Рисунок 1.6- Приклад зовнішнього вигляду датчику (датчик наявності людей)

Актуатори (Actuators) отримують вихідні дані. Людський організм є чудовим прикладом роботи датчиків і актуаторів. У цій системі мозок виступає як мікроконтролер, що обробляє інформацію, зібрану від численних датчиків, для того, щоб дати точний і правильний результат.

Шлюзи. Хоча цей етап архітектури IoT безпосередньо взаємодіє з датчиками та виконавчими механізмами, його важливо виділити окремо через його критичну роль у процесах збору, фільтрації та передачі даних в прикордонну інфраструктуру та хмарні платформи. З урахуванням великого обсягу введення та виведення, який генерується мільйонами пристроїв, необхідно звертати увагу на можливості агрегування, відбору і транспортування даних.

Шлюзи виконують роль посередників між підключеними пристроями, хмарними платформами та аналітичними системами, забезпечуючи необхідне підключення, яке з'єднує всі основні етапи архітектури. Вони полегшують обмін даними між датчиками та іншими компонентами системи, перетворюючи дані у формати, зручні для подальшого використання.

Крім того, шлюзи можуть здійснювати контроль, фільтрацію та вибірку даних, що дозволяє мінімізувати обсяг інформації, яку потрібно передавати в хмару, знижуючи витрати на передачу даних. Тому шлюзи сприяють локальній обробці даних, стискаючи їх до корисних пакетів, готових до подальшої обробки.

Іншим важливим аспектом роботи шлюзів є забезпечення безпеки. Оскільки вони контролюють потік даних в обох напрямках, застосування шифрування та інших інструментів безпеки допомагає запобігти витоку даних з хмари IoT і знижує ризик атак на IoT-пристрої.

Отже, шлюз IoT (IoT Gateway) виконує безліч функцій: обробку та фільтрацію даних, забезпечення безпеки, підключення пристроїв, оновлення програмного забезпечення та інші важливі завдання. Крім цього, шлюз служить платформою для прикладних ПК-програм, які обробляють дані та роблять систему пристрою інтелектуальною.

Хоча периферійні пристрої не є обов'язковим компонентом будь-якої архітектури IoT, вони можуть принести значні переваги, особливо у великих IoT-

проектах. У разі обмеженого доступу до хмарних платформ або низької швидкості їх передачі даних, периферійні системи забезпечують швидший час відгуку і більшу гнучкість у обробці та аналізі даних. Це критично важливо для деяких застосувань промислового IoT, де швидкість аналізу даних має вирішальне значення, і тому популярність периферійних обчислень у таких системах різко зростає.

Завдяки тому, що периферійна інфраструктура знаходиться ближче до джерела даних, вона здатна швидко реагувати на зміни в матеріалах IoT у реальному часі, забезпечуючи миттєву дієву інформацію. Великі обсяги даних, які вимагають потужностей хмарних платформ для обробки, надсилаються в хмару лише тоді, коли це дійсно необхідно.

Мінімізуючи вразливість мережі, периферійні системи сприяють підвищенню безпеки, а знижене енергоспоживання і менше навантаження на смугу пропускання дають можливість більш ефективно використовувати бізнес-ресурси.

Якщо датчики можна порівняти з нейронами, а шлюзи — з основою IoT, то хмара виступає як мозок цієї системи. На відміну від периферійних рішень, хмарні платформи призначені для зберігання, обробки та аналізу великих обсягів даних з використанням потужних інструментів аналізу та машинного навчання, яких не можуть забезпечити периферійні системи.

Хмарні обчислення, що набувають популярності, особливо в архітектурі промислового IoT, допомагають покращити продуктивність, зменшити незаплановані простой та енергоспоживання. Хмара також надає можливості для бізнес-аналітики, створюючи інформаційні панелі і звіти, що дозволяють користувачам ефективно взаємодіяти з системою, відслідковувати її стан і приймати обґрунтовані рішення на основі реальних даних.

1.4 Висновки до розділу

Все вищезазначене свідчить про те, що технології IoT наразі розвиваються стрімко, а разом з цим розширюється й сфера їх застосування. Однією з таких сфер є використання IoT у сенсорних мережах, які, у свою чергу, активно інтегруються з технологіями Big Data. Особливості такого застосування будуть детально розглянуті в наступному розділі роботи.

Платформа IoT служить містком між мережами передачі даних і пристроями-датчиками. Останнім часом платформи IoT з різноманітними корпоративними рішеннями значно розширюють можливості підключення пристроїв. Для ефективної роботи IoT важливо забезпечити безвідмовну сумісність між пристроями, а також надійність самої платформи та оболонок, побудованих на її основі.

Сьогодні спостерігається швидкий розвиток високопродуктивних сенсорних мереж, які включають в себе кілька основних компонентів:

- мережа датчиків – де датчик є основною одиницею високопродуктивної мережі і представляє собою пристрій, який реагує на різні зовнішні явища, такі як світло, тепло, звук, рух, дотик тощо; коли датчик поєднується з мікропроцесором, що обробляє дані, його називають інтелектуальним датчиком;

- мережа доступу - вузли-посередники або шлюзи, які агрегують дані від кількох датчиків і полегшують їх подальшу передачу до центрів управління або інших зовнішніх об'єктів;

- мережева інфраструктура - активне та пасивне обладнання, яке є частиною існуючих мереж;

- програмне забезпечення - інструменти для збору та обробки великих обсягів даних, такі як хмарні платформи, IoT-платформи та інші рішення.

Основними вимогами для організації високопродуктивних сенсорних мереж є низьке споживання енергії пристроями та можливість самоорганізації мережі.

2 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ СТВОРЕННЯ ІОТ-РІШЕНЬ ДЛЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

2.1 Мультиагентна технологія створення ІоТ-рішень та особливості її використання у високопродуктивних сенсорних мережах

Мультиагентні технології представляють собою новий підхід до вирішення складних завдань, що ґрунтується на принципах самоорганізації та еволюції, і вже активно впроваджуються в концепцію ІоТ. Основна ідея цих технологій полягає в інноваційних методах розв'язання складних задач, які не піддаються або важко піддаються традиційним математичним методам [14].

В ІоТ мультиагентні технології виконують такі функції:

- визначення цілей агента, зокрема зміни параметрів системи;
- формування основних і допоміжних функцій, включно з надсиланням та отриманням запитів;
- встановлення можливих дій агентів, таких як шифрування, дешифрування запитів, а також досягнення кінцевої мети;
- аналіз актуальних або прогнозованих змін у зовнішньому середовищі.

Завдяки датчикам вимірюються ключові параметри, які надсилаються на мікроконтролери, а потім передаються регулюючим пристроям, що взаємодіють з виконавчими механізмами. В контексті ІоТ ці дані також можуть бути передані на віддалений веб-сервіс, який взаємодіє з мікроконтролером та користувачем через мережу, підтримуючи голосові команди.

Таким чином, мультиагентні системи стають перспективною складовою ІоТ. Вони складаються з автономних інтелектуальних компонентів, відомих як агенти. Наприклад, в агент визначається як комп'ютерна система, побудована на апаратному чи програмному забезпеченні, яка має такі властивості:

- автономність - агенти можуть діяти без прямого втручання людини та мають певний контроль над власними діями та станом;
- соціальна здатність - агенти взаємодіють з іншими агентами та

користувачами через мову агентного спілкування;

- реактивність - агенти реагують на зміни середовища, яке може включати фізичний світ, користувачів, інших агентів, Інтернет;

- проактивність - агенти здатні демонструвати цілеспрямовану поведінку та проявляти ініціативу.

Агент може бути статичним (постійно працює на одному комп'ютері) або мобільним (переміщається мережею). У IoT системах агенти є автономними й адаптивними програмними продуктами, які сприймають навколишнє середовище за допомогою сенсорів і накопичують знання про нього, отримуючи зворотний зв'язок для прийняття рішень, які потім реалізуються через виконавчі механізми.

Процес допоміжного навчання дозволяє агентам покращувати прийняття рішень, спираючись на зворотний зв'язок, отриманий від користувачів або системи. Зібравши базу знань, агент може в подібних ситуаціях діяти самостійно, а його методи прийняття рішень будуть поступово вдосконалюватись.

На рисунку 2.1 представлено приклад IoT системи з інтегрованим агентом.



Рисунок 2.1 - Приклад IoT-системи з вбудованим агентом

Елемент навчання (Learning Element) — це компонент, який відповідає за вдосконалення методів навчання агента з метою забезпечення максимальної ефективності елемента продуктивності. «Критичний елемент» (Critic) також відіграє ключову роль, оскільки він дозволяє агенту зрозуміти, чи було прийняте рішення правильним. Цей компонент оцінює точність рішень, які приймає агент, та передає зворотний зв'язок у навчальний елемент.

Елемент продуктивності (Performance Element) безпосередньо пов'язаний із генератором проблем (Problem Generator), який вивчає нові можливості, що ще не були розглянуті в процесі навчання чи функціонування агента. Критик і генератор проблем є основними елементами процесу навчання агента.

Навчальний елемент, у свою чергу, передає зібрану інформацію в елемент продуктивності, який визначає, які дії є ефективними та які рішення повинні бути виконані ефекторами. Ефектори реалізують вибрані рішення. Після виконання дій, елемент продуктивності оцінює їх результативність і відправляє відгук у навчальний елемент для оновлення бази знань.

2.2 Використання технологій Big Data в IoT для створення високопродуктивних сенсорних мереж

У цьому розділі розглядається використання технологій Big Data у високопродуктивних сенсорних мережах та в ширшому контексті.

Big Data, або великі дані — це сукупність структурованих, напівструктурованих та неструктурованих даних, які організації збирають для отримання цінної інформації. Їх можна застосовувати в проєктах машинного навчання, прогнозного моделювання та для проведення розширеного аналізу [15].

Системи, що обробляють і зберігають великі дані, стали звичним елементом архітектури управління даними в організаціях. Основні характеристики великих даних включають:

- значний обсяг даних у різних середовищах;
- широкий спектр типів даних, що зберігаються в системах Big Data;
- високу швидкість генерації, збору та обробки інформації.

Нещодавно до цих характеристик були додані й інші параметри, такі як вірогідність, цінність та мінливість.

Обсяг великих даних не обмежується конкретними показниками, однак у випадку з ними часто йдеться про терабайти, петабайти і навіть ексабайти даних, що накопичуються з часом.

Значення великих даних: компанії використовують накопичені в їхніх системах великі дані для покращення операцій, підвищення якості обслуговування клієнтів, розробки персоналізованих маркетингових кампаній на основі індивідуальних переваг споживачів, а також для підвищення прибутковості. Організації, що ефективно застосовують великі дані, мають конкурентну перевагу, оскільки вони можуть швидше та обґрунтованіше ухвалювати бізнес-рішення.

Наприклад, великі дані надають компаніям цінну інформацію про клієнтів, яку можна використовувати для вдосконалення маркетингових стратегій, підвищення залученості клієнтів і збільшення коефіцієнта конверсії.

Крім того, великі дані допомагають компаніям ставати більш орієнтованими на клієнтів. Історичні та актуальні дані можуть слугувати основою для аналізу змін у вподобаннях споживачів, що дозволяє підприємствам оперативно оновлювати свої маркетингові стратегії відповідно до бажань і потреб клієнтів.

Великі дані також використовуються в медичній сфері: дослідники застосовують їх для визначення факторів ризику захворювань, а лікарі – для діагностики хвороб та станів пацієнтів. Крім того, інформація з електронних медичних карт, соціальних мереж, інтернету та інших джерел допомагає медичним організаціям і державним установам отримувати найсвіжішу інформацію про загрози та спалахи інфекційних захворювань.

В цьому розділі розглядається, як великі дані застосовуються виробниками

та транспортними компаніями для керування ланцюгами постачання й оптимізації логістики. Державні установи також використовують їх для надзвичайного реагування, запобігання злочинам та впровадження ініціатив розумних міст.

Джерела великих даних охоплюють бізнес-транзакції, клієнтські бази даних, медичні записи, журнали веб-відвідувань, мобільні додатки, соціальні мережі, репозиторії наукових досліджень, машинно-генеровані дані та дані в реальному часі від сенсорів у середовищах IoT. Дані можуть зберігатися в сирому вигляді або оброблятися за допомогою інструментів аналізу та підготовки, щоб бути готовими для конкретних аналітичних завдань.

На прикладі даних про клієнтів можна виділити основні типи аналітики, які застосовуються до великих даних:

- порівняльний аналіз - вивчає показники поведінки користувачів і реальну взаємодію з клієнтами, порівнюючи продукцію і послуги компанії з аналогічними продуктами конкурентів;

- аналіз соціальних мереж - дозволяє виявити настрої і думки користувачів у соціальних мережах щодо певного бренду чи продукту і це допомагає визначити цільову аудиторію для маркетингових кампаній;

- маркетинговий аналіз - включає інформацію, яка допомагає інформовано розробляти нові продукти та послуги;

- аналіз задоволеності та настроїв клієнтів - визначає рівень лояльності до бренду, потенційні проблеми та можливі шляхи покращення обслуговування клієнтів.

Найчастіше великі дані характеризуються обсягом, адже вони зазвичай збираються в значній кількості з таких джерел, як потоки кліків, системні журнали та поточні дані. Типи даних включають структуровані (SQL-бази), неструктуровані (текстові файли, документи), а також напівструктуровані дані, такі як журнали вебсерверів і потокові дані.

Феномен IoT і аналітика великих даних змінюють комп'ютерну індустрію, а технологічний розвиток відчутно впливає на повсякденне життя. Різні типи даних можна зберігати в єдиному сховищі на основі хмарних сервісів, що

дозволяє інтегрувати кілька джерел даних. Наприклад, (рис.2.2) проєкт аналізу великих даних може включати минулі дані про продажі, інформацію про повернення та онлайн-відгуки, щоб оцінити успіх продукту й передбачити майбутні продажі.

Достовірність даних визначає рівень точності та надійності наборів даних. Невизначені або ненадійні дані, зібрані з різноманітних джерел, як-от соціальні мережі та веб-сайти, можуть суттєво знизити якість інформації, що іноді складно виявити. Наприклад, компанії, що збирають великі масиви даних з різних джерел, можуть виявити певні неточності, однак для їх виправлення аналітикам часто потрібно відслідковувати походження даних, щоб зрозуміти, де саме вони зберігаються. Неякісні дані можуть призвести до неточних аналітичних висновків, що підриває довіру до аналітичних даних загалом. Тому важливо враховувати рівень невизначеності даних, наявних в організації, перед їх застосуванням у проєктах великих даних.

Цінність також є важливою характеристикою великих даних. Не всі зібрані дані матимуть значення для організації, а робота з неточними даними може викривити аналітичні висновки.



Рисунок 2.2 - Динаміка зростання Big Data

Це підкреслює важливість очищення та підготовки даних для забезпечення їх релевантності перед використанням у проєктах аналізу.

Варіативність - це ще одна характеристика великих даних, яка описує неоднорідність інформації. Такі дані можуть мати різні формати або значення, що ускладнює їх обробку та аналіз. Окрім цього, великі обсяги даних потребують потужної обчислювальної інфраструктури для ефективної обробки. Інтенсивність обробки даних може перевищувати можливості одного сервера або навіть кластера серверів. Для досягнення потрібної швидкості обробки організаціям може знадобитися сотні або тисячі серверів, які працюють разом у кластерній архітектурі.

Однак впровадження такої інфраструктури часто пов'язане зі значними витратами. Багато підприємств не готові інвестувати в масштабну серверну інфраструктуру, особливо для нерегулярних завдань. У зв'язку з цим загальнодоступні хмарні обчислення стали популярним рішенням для зберігання великих даних, забезпечуючи економічно ефективне масштабування потужностей для виконання проєктів.

Провайдери хмарних послуг, як-от Amazon, Microsoft і Google, пропонують керовані сервіси для роботи з великими даними, такі як:

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

У хмарі великі дані можуть зберігатися в таких місцях:

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

Для компаній, які планують розгорнути власні системи обробки великих даних, доступні рішення з відкритим кодом. Вони можуть скористатися як безкоштовними версіями таких рішень, так і комерційними платформами, як-от Cloudera (яка об'єдналася з Hortonworks у 2019 році) або MapR від Hewlett Packard

Enterprise, придбана також у 2019 році.

Розгортання та управління системами великих даних вимагає специфічних навичок, які відрізняються від стандартних умінь адміністраторів баз даних (DBA) та розробників, орієнтованих на роботу з реляційними базами даних. Це зумовлено складністю самих систем великих даних, де обробляються великі обсяги та різні типи інформації. Перехід до хмарних середовищ для розміщення таких систем може бути ефективним рішенням, однак потребує уваги до контролю витрат, оскільки надмірне використання хмарних ресурсів здатне швидко перевищити запланований бюджет.

Крім того, перенесення локальних наборів даних та робочих процесів в хмару є складним процесом, який часто потребує ретельного планування та координації. Особливістю сучасних хмарних систем є можливість розподіленого зберігання даних, що, у свою чергу, створює нові виклики для ІТ-відділів. Забезпечення доступу до цих даних для аналітиків може стати проблемою, особливо в розподілених середовищах, які містять різні платформи та сховища. Для оптимізації цього процесу ІТ-відділи активно працюють над створенням каталогів даних з функціями управління метаданими, що допомагає користувачам швидко знаходити потрібну інформацію.

Важливу роль у забезпеченні якості та узгодженості даних відіграє управління даними. Це дозволяє уникати неточностей і підвищувати надійність аналітичних результатів. Остаточна цінність великих даних багато в чому залежить від кваліфікації персоналу, відповідального за аналіз даних та постановку запитів для отримання корисних бізнес-результатів. Розвиток спеціалізованих інструментів для аналізу великих даних також сприяє доступу до аналітики для менш технічних користувачів, що дозволяє ширше використовувати прогнози у повсякденній діяльності компаній.

Деякі платформи, зокрема Nadoop, надають компаніям можливість налаштування інфраструктури для обробки великих даних. Вони дозволяють скоротити витрати на додаткове обладнання і спрощують роботу з великими даними через розподілену обчислювальну інфраструктуру. Такі підходи значно

відрізняються від концепції так званих "малих даних" - менш об'ємних і простих у використанні наборів інформації, які можна легко обробляти на стандартному обладнанні.

Головна мета аналітики великих даних полягає в підтримці прийняття обґрунтованих бізнес-рішень, забезпечуючи доступ до великих обсягів даних, включно з транзакційними та іншими нетрадиційними формами даних. Це відкриває нові можливості для прогнозного моделювання та поглибленого аналізу, що стає основою сучасних бізнес-процесів. Ключові області використання великих даних проілюстровані на рисунку 2.3, що надає загальний огляд сфер їх застосування в бізнесі та інших галузях.



Рисунок 2.3 - Ключові області використання великих даних

Існує безліч сфер застосування великих даних, проте в рамках цієї магістерської дисертації основну увагу буде зосереджено на використанні Big Data в контексті Інтернету речей. За прогнозами, до 2025 року через IoT буде згенеровано близько 5,5 трильйонів гігабайт даних.

Окрім того, ці пристрої будуть постійно збирати, аналізувати, обмінюватися та передавати дані в реальному часі. Без даних ці IoT-пристрої не

мали б тих функцій і можливостей, які сприяють їхній популярності по всьому світу. Коли організації збирають дані для подальшого аналізу, Інтернет речей стає основним джерелом цих даних, і в цей момент роль великих даних в IoT стає очевидною. Аналітика великих даних є ключовою для обробки інформації, що надходить від підключених пристроїв IoT, і допомагає поліпшити процес прийняття рішень.

Роль великих даних в IoT полягає в обробці великих обсягів даних в реальному часі та їх зберіганні за допомогою різних технологій зберігання. Обробка даних з Інтернету речей проходить через чотири основні етапи. Далі буде описано хід їх базового виконання.

I -й етап. Збір великих обсягів неструктурованих даних, що генеруються IoT-пристроями, які зберігаються в системі великих даних. Обсяг таких даних значною мірою визначається трьома чинниками: обсягом, швидкістю та різноманітністю.

II -й етап. Зберігання цих даних в системі великих даних, що представляє собою розподілену базу даних, де величезні обсяги інформації зберігаються в файлах великого обсягу.

III -й етап. Аналіз збережених даних за допомогою аналітичних інструментів для отримання цінної інформації та підтримки прийняття рішень.

IV -й етап. Формування звітів по аналізованих даних. Обробка Big Data в IoT представлена на рисунку 2.4.

Оскільки в IoT неструктуровані дані збираються через мережу, великі обсяги інформації вимагають аналізу за допомогою складних запитів, щоб оперативно отримувати інформацію та приймати швидкі рішення. Це створює нагальну потребу в великих даних для IoT. Отже, з точки зору великих даних, вони виступають як "паливо", що рухає Інтернетом речей. У зв'язку з цим, необхідні більш досконалі та інноваційні рішення для зберігання даних і обробки зростаючих робочих навантажень, що веде до модернізації інфраструктури сховищ великих даних організацій.

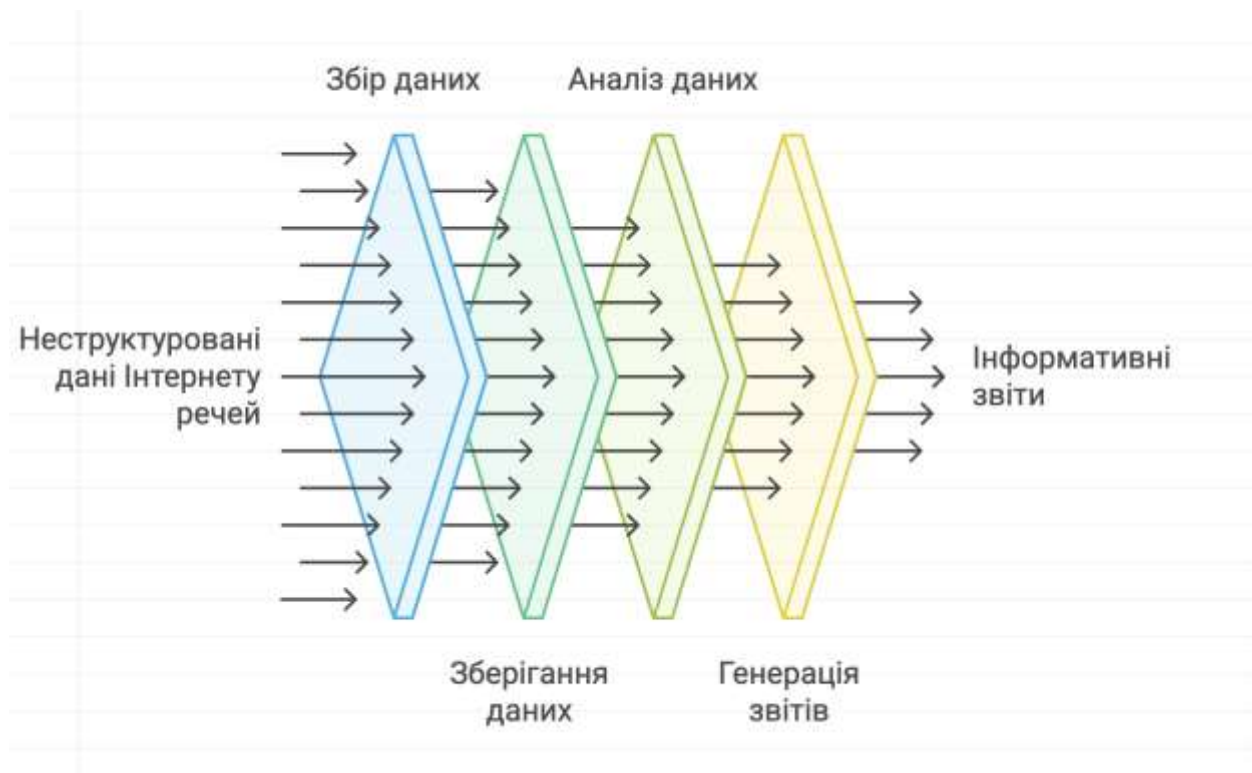


Рисунок 2.4 - Обробка великих даних (Big Data) в Інтернеті речей (IoT)

Подібно до цього, інтеграція додатків для великих даних і IoT сприяє прискоренню досліджень в обох цих областях. Технології IoT та великі дані є взаємозалежними і потребують подальшого розвитку.

Аналітика великих даних для IoT може бути корисною для аналізу різних даних Інтернету речей з метою:

- вивчення;
- виявлення тенденцій;
- пошуку закономірностей;
- виявлення прихованих кореляцій;
- отримання нової інформації.

Компанії можуть отримати значні переваги від аналізу великих обсягів даних IoT та їх ефективного управління, що дозволить оцінити вплив даних на бізнес. Це дозволяє організаціям краще розуміти дані і приймати більш обґрунтовані рішення, що позитивно впливає на різні сектори підприємств.

Переваги використання IoT та великих даних для компаній з різних галузей:

- підвищення рентабельності інвестицій для бізнесу - інтернет речей і аналітика великих даних змінюють спосіб, яким компанії отримують додану вартість, аналізуючи дані для кращого розуміння бізнесу. З підвищеним попитом на сховища даних, компанії обирають хмарні рішення, що дозволяє знизити витрати на впровадження;

- перетворення систем електронної охорони здоров'я - поєднання IoT і великих даних може трансформувати системи електронної охорони здоров'я, сприяючи дослідженням, що базуються на даних, а не на гіпотезах. IoT дозволить покращити дистанційну діагностику та розробку нових рішень для охорони здоров'я;

- переваги для виробничих компаній - встановлення датчиків IoT на обладнанні дозволяє збирати важливі дані про його роботу, що допомагає передбачити потребу в ремонті ще до виникнення серйозних проблем, тим самим знижуючи витрати на ремонти і простої;

- підвищення рівня аналітики самообслуговування - інтернет речей та великі дані дозволяють автоматизувати IT-функції та інтегрувати дані. Аналітика, як послуга, стає доступною для самостійного використання;

- переваги для транспортної галузі - використання IoT-датчиків для відстеження транспортних засобів надає дані про ефективність використання палива, маршрути та час водіїв, що дозволяє оптимізувати автопарки та підвищити продуктивність компаній.

Industrial Internet of Things пов'язаний з різними підключеними пристроями, які виконують наступні завдання для управління поведінкою промислових пристроїв:

- моніторинг;
- збір;
- обмін;
- аналіз;
- дії на основі отриманої інформації.

Тому конвергенція IoT і великих даних в IIoT є важливим елементом для

розвитку цієї технології.

Edge-Computing - у сучасному світі обробка даних в реальному часі є важливим пріоритетом. Інтернет речей і великі дані дають змогу здійснювати операції за запитом і в реальному часі, що підвищує важливість розгортання периферійних обчислень.

Завдяки тісному зв'язку між IoT і великими даними, організації можуть отримати значні переваги, ефективно використовуючи ці технології.

Зміна кількості підключених IoT-пристроїв в Україні та сусідніх країнах ілюструється на рисунку 2.5.

Отже, інструменти, розроблені для роботи з великими даними та аналітики, є важливими для ефективного контролювання потоку даних, що надходять від пристроїв Інтернету речей. Розробники, орієнтовані на IoT, створюють спеціалізовані платформи, програмне забезпечення та додатки, які дозволяють підприємствам і організаціям ефективно управляти своїми пристроями та зібраними даними.

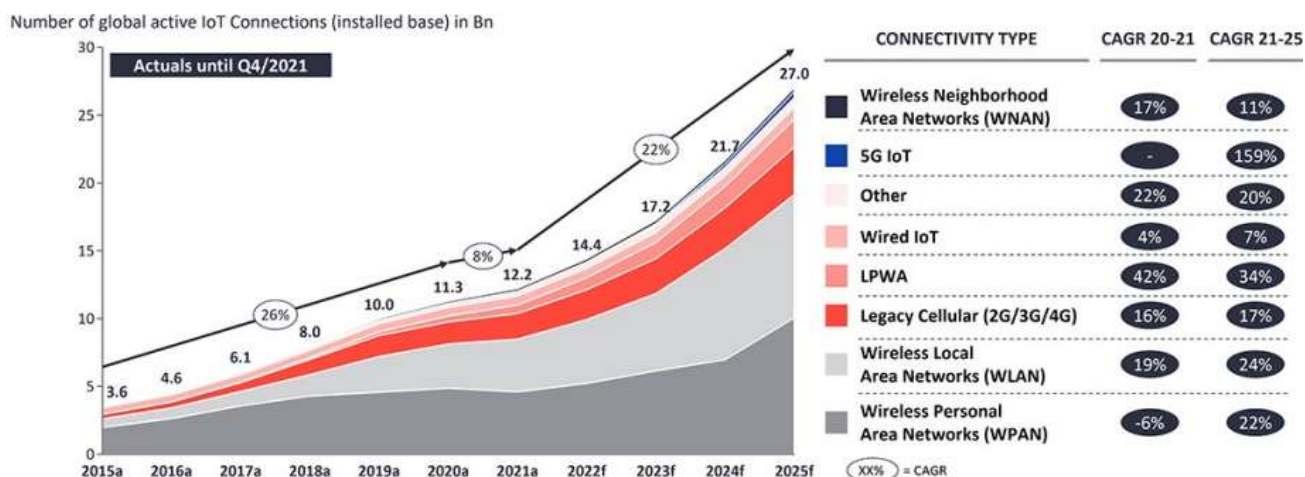


Рисунок 2.5 - Зміна кількості підключених пристроїв IoT

З розвитком інформаційних технологій і мікроелектроніки стало можливим створення мініатюрних сенсорних датчиків, які, в свою чергу, мають високу надійність і доступну вартість. Це стало основою для широкого впровадження сенсорних мереж, що використовують такі датчики. Такі мережі

дають змогу здійснювати постійний і точний моніторинг параметрів об'єктів, що потребують контролю.

На ранніх етапах розвитку сенсорних мереж передача даних здійснювалася через провідні канали зв'язку, але через велику кількість датчиків, що розміщуються поблизу один від одного, система займала значну площу. Сьогодні безпроводні сенсорні вузли, що є частиною таких мереж, відіграють ключову роль в зборі та обробці інформації. Вони виявляють дані з сенсорного поля, обробляють їх і передають через радіомодуль назад до центральної точки або кінцевого пункту призначення.

Сенсорні мережі можуть мати різні архітектури та умови роботи, залежно від фізичного рівня на лінії зв'язку, а також характеру мережевого трафіку. Наприклад, біологічні мережі відрізняються від традиційних тим, що мають природно розвивається кооперативний стимул, тоді як заплановані мережі часто потребують певних ініціатив для активізації вузлів і забезпечення їх співпраці.

Одним із важливих аспектів безпроводних сенсорних мереж є методи передачі даних і запитів від джерела до кінцевого вузла. Раніше дослідження зосереджувалися на вивченні можливостей для спільної роботи датчиків, їх збору, обробки даних, координації та управління інформаційним трафіком, що направляється до місця призначення.

Схема функціонування безпроводової сенсорної мережі зображено на рисунку 2.6.

Сенсорні мережі можна класифікувати за типом архітектури на такі категорії:

- шарувата архітектура;
- кластерна архітектура;
- сенсорні вузли з мобільним потоком.

Приклад моделі та структура безпроводової сенсорної мережі представлено на рисунках 2.7 та 2.8.



Рисунок 2.6 - Схема функціонування безпроводової сенсорної мережі

Вибір конкретної архітектури мережі залежить безпосередньо від її призначення та специфіки застосування.



Рисунок 2.7 - Модель безпроводової сенсорної мережі



Рисунок 2.8 - Структура безпроводової сенсорної мережі

Прикладом такої мережі може бути стаціонарна сенсорна мережа, така як система "Розумний будинок". У цій мережі передача даних здійснюється через окрему виділену мережу або через існуючу телекомунікаційну мережу, ТфОП, систему електроживлення або безпроводову мережу, яка зв'язує всі елементи системи з центром обробки даних.

Наразі сенсорні мережі лише починають активно впроваджуватися у цивільні сфери, проте вони вже демонструють свою здатність працювати в складних умовах, де відсутні провідні комунікації, а мінімальні розміри сенсорних пристроїв роблять їх гнучкими і універсальними. Ці характеристики визначають вибір методів побудови сенсорних мереж з використанням технологій Big Data, що дозволяють управляти великою кількістю з'єднаних інтелектуальних датчиків і інтерфейсів передачі даних. Згадана технологія є стійкою до налаштувань і володіє підвищеними експлуатаційними характеристиками, що робить її ефективним і перспективним рішенням для збору телеметричних даних, дистанційної діагностики та обміну інформацією.

Управління такою мережею здійснюється через шлюзи, що зв'язують основні компоненти мережі. Модулі системи управління обробляють, зберігають

дані в базах даних і, в разі потреби, реагують на події згідно з алгоритмами дій, визначеними в базах даних управлінської системи. Наприклад, якщо сенсори виявляють загоряння в контрольованих об'єктах, система спрацьовує, активуючи локальну систему оповіщення і відправляючи сигнал тривоги в пожежну частину.

Дані в сенсорних мережах зазвичай передаються невеликими пакетами, що є характерним для трафіку сигналів моніторингу і управління. Важливим є також підтвердження про успішну доставку повідомлень.

Існують два основних типи мереж зв'язку. Перший тип передбачає наявність фізичної інфраструктури, яка забезпечує послуги для спілкування клієнтів, таких як маршрутизація. До цього класу належать традиційні телефонні системи, мобільні мережі, інтернет, поштові та телевізійні системи (одностороння передача). Операції в таких мережах виконуються організаціями, що керують ними, а користувачі взаємодіють з термінальними пристроями для отримання послуг. У таких мережах використовується базова станція для обслуговування вузлів сенсорів, причому вузли можуть взаємодіяти лише з цією станцією, а не між собою.

Другий тип мережи є безінфраструктурним, де всі послуги надаються безпосередньо клієнтами на рівних засадах. У таких мережах "співпраця" між клієнтами необхідна для ефективного використання ресурсів. Прикладом є накладені однорангові мережі та безпроводові спеціалізовані мережі. Такі мережі простіші у налаштуванні, ніж мережі з підтримкою інфраструктури.

Залежно від вимог предметної області, топологія сенсорної мережі може бути організована в двох варіантах:

- топологія типу "зірка" (ієрархічна), в якій мережа складається з об'єктів двох типів: повнофункціональних і об'єктів зі зменшеною функціональністю. Об'єкти першого типу координують сегменти мережі і можуть взаємодіяти між собою та з об'єктами другого типу;

- топологія типу "точка-точка" (однорідна), де всі елементи мережі рівноправні і здійснюють безпосередній зв'язок між собою.

Приклад організації безпроводових сенсорних мереж з використанням

великих даних можна побачити на рисунку 2.9. Такий тип організації мережі може бути корисним для вирішення конкретних завдань, зокрема в промислових умовах.

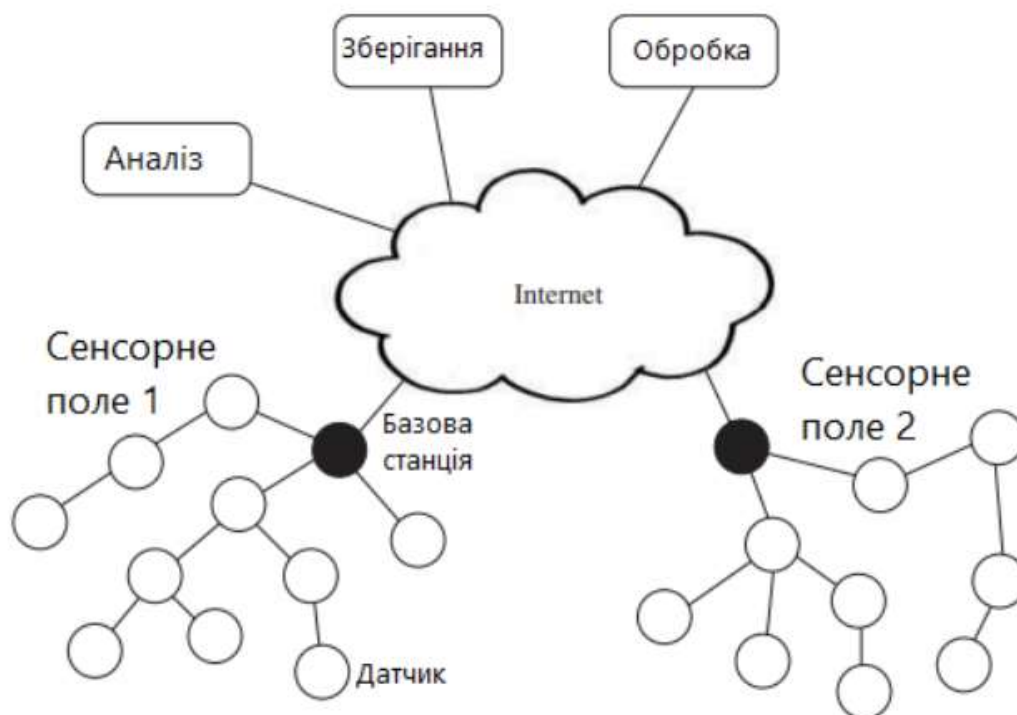


Рисунок 2.9 - Приклад побудови безпроводових сенсорних мереж

Інший підхід до побудови мережі – це "однорідна" топологія, яка не вимагає поділу мережі на сегменти (кластери), і всі елементи можуть взаємодіяти між собою в межах своєї зони покриття. Однак мережу також можна поділити на сегменти, які будуть управлятися координаторами, або залишити її без такої організації. Цей підхід дозволяє створювати більш складні мережеві конфігурації та адаптувати мережі до вирішення складних і нестандартних завдань.

Переваги безпроводових сенсорних мереж з використанням Big Data:

- здатність до самовідновлення та самоорганізації;
- можливість передачі даних на великі відстані – від кількох метрів до кількох кілометрів – з використанням малопотужних передавачів;
- низька вартість вузлів і їх компактні розміри;

- низьке енергоспоживання з можливістю живлення від автономних джерел;
- простота в установці, відсутність потреби в прокладанні кабелів;
- можливість установки на вже існуючі об'єкти без необхідності додаткових будівельних робіт;
- низька вартість технічного обслуговування.

В разі інтелектуальних мереж, сенсорні мережі інтегруються в системи великих даних для управління енергоспоживанням. Такі системи включають додатки для моніторингу енергоспоживання, управління попитом, координацію зберігання енергії і інтеграцію відновлювальних джерел енергії. Також для управління великими даними, які генерують датчики та вимірювачі, використовуються спеціальні методи.

Дискусії щодо практик та рекомендацій для інтелектуальних мереж спрямовані на ефективне управління даними та витягнення корисної інформації з системи великих даних. Оскільки надійність і низька затримка є основними вимогами для інтелектуальних мереж, обробка даних за допомогою туманних обчислень вивчається в контексті додатків реального часу на спеціально спроектованих платформах.

Як ще один приклад, можна згадати моніторинг людського тіла за допомогою безпроводових мереж тіла. Ці мережі використовують сенсори для збору медичних та здоров'я даних, що обробляються в рамках систем великих даних. Для роботи таких мереж потрібно програмне забезпечення, яке займається розпізнаванням активності, обробкою даних, вибором і витягом функцій, класифікацією, а також забезпеченням підтримки платформ та аутентифікацією датчиків і користувачів.

Крім того, більшість подій, що відслідковуються через регулярні проміжки часу, в значній мірі надлишкові або являють собою незначні варіації, що призводять до великої витрати ресурсів зберігання даних і енергії зв'язку в вузлах реле і датчиків. Це означає, що велика частина цих даних не представляє інтересу, безглузда і надлишкова. Таким чином, на відміну від типових WSN, дуже

важливо збирати і передавати великий обсяг даних, мінімізуючи при цьому затримку даних в системах великих даних на основі WSN.

2.3 Аналіз технологій та методи порівняння

Однією з ключових характеристик Інтернету речей є навантаження. З огляду на те, що для обробки великих обсягів даних, які виникають при високих навантаженнях, необхідні ефективні рішення, були розроблені нові типи мереж, орієнтовані на мінімізацію енергоспоживання. Технології, що забезпечують підключення автономних пристроїв до глобальної мережі, почали з'являтися у 2015-2016 роках і поступово здобувають популярність.

Серед найбільш поширених таких технологій можна виділити LoRa, SIGFOX, NB-IoT, Weightless P та інші. Їх розробка обумовлена потребою підключення великої кількості пристроїв для обліку та телеметрії, з метою централізованого збору даних на хмарних серверах.

2.3.1 Технологія LoRa

Технологія LoRa є еволюційним кроком у розвитку LPWAN-рішень, запатентованих корпорацією Semtech. Її основою є використання лінійної частотної модуляції (Chirp Spread Spectrum, CSS) [16]. Принцип роботи полягає у кодуванні даних широкосмуговими імпульсами, частота яких поступово змінюється (збільшується або зменшується) протягом певного інтервалу часу. Такий підхід робить приймач стійким до частотних відхилень, знижуючи вимоги до тактового генератора, що дозволяє застосовувати недорогі кварцові резонатори.

LoRa працює в субгігагерцовому діапазоні частот, який включає 169, 433 і 915 МГц для США, а також 868 МГц для Європи. Найчастіше використовуються частоти 868 і 915 МГц. Унаслідок високого рівня зовнішніх завад обмежено застосовується діапазон 2,4 ГГц. Для оптимального вибору між зоною покриття і

швидкістю передачі даних система передбачає компроміс. LoRa забезпечує швидкість передачі в межах від 0,3 до 50 Кбіт/с. Для збільшення автономності кінцевих пристроїв і підвищення пропускної здатності мережі інфраструктура LoRa адаптивно регулює швидкість передачі даних кожного пристрою.

Особливістю мереж LoRa є наявність трьох класів пристроїв, кожен з яких розрахований на виконання певних завдань і сценаріїв застосування. На рис. 2.10 представлені класи пристроїв: клас А (універсальний), клас В і клас С.

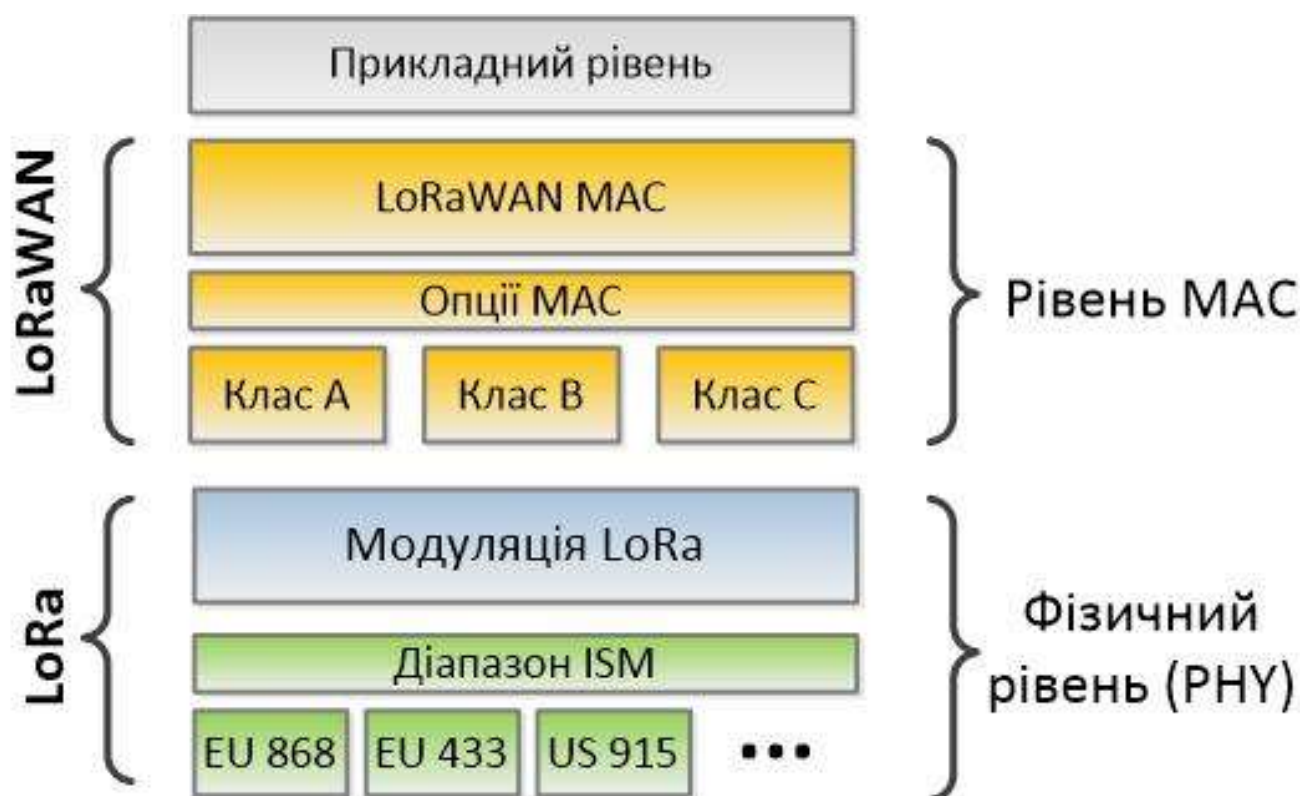


Рисунок 2.10 - Класи існуючих пристроїв в IoT мережах LoRa

Клас А. Визначає базовий функціональний режим для мереж LoRa. У цьому класі кінцевий пристрій ініціює сеанс зв'язку. Вузол надсилає короткі посилки даних на шлюз відповідно до заданого розкладу. Після кожної передачі пристрій відкриває приймальне вікно на певний час, очікуючи команду від сервера.

Клас В. Додає ще одне приймальне вікно, яке відкривається за заздалегідь встановленим розкладом. Синхронізація часу між кінцевим пристроєм і мережею

здійснюється за допомогою спеціального сигналу-маяка, який надсилає шлюз. Завдяки цьому сервер може передавати дані в чітко визначений момент.

Клас С. Забезпечує максимальну доступність прийому, відкриваючи практично безперервне приймальне вікно, яке закривається лише під час передачі даних. Цей режим підходить для задач, які потребують обробки великих обсягів даних.

Мережі LoRa зазвичай використовують топологію «зірка», у якій всі пристрої підключаються до шлюзів LoRa, а ті, своєю чергою, з'єднуються із загальним сервером мережі (NetServer) через стандартні IP-протоколи (рис. 2.11). У системі LoRaWAN мережеві вузли не закріплені за конкретним шлюзом, що забезпечує більшу гнучкість у роботі мережі [17].

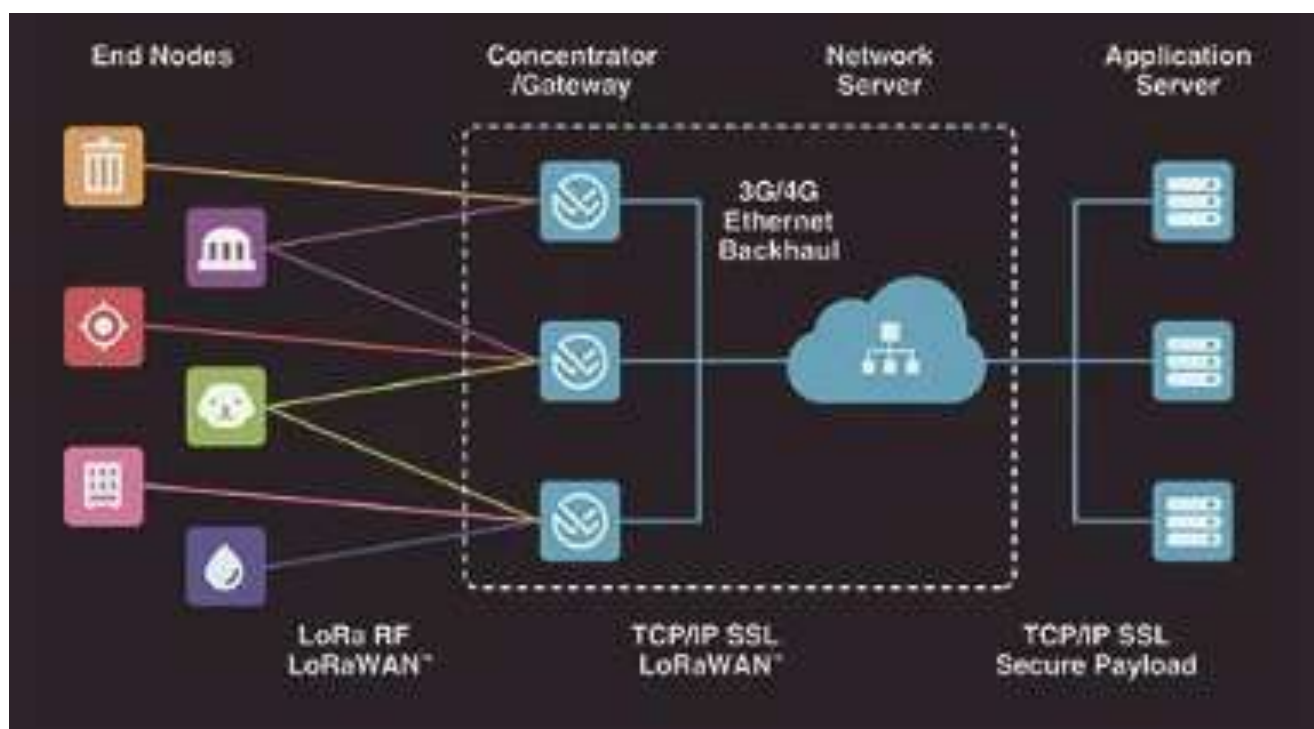


Рисунок 2.11 - Архітектура системи LoRa

Шлюзи виконують функцію передачі повідомлень між кінцевими пристроями та сервером, працюючи на основі архітектури протоколу, яка представлена на рисунку 2.12.

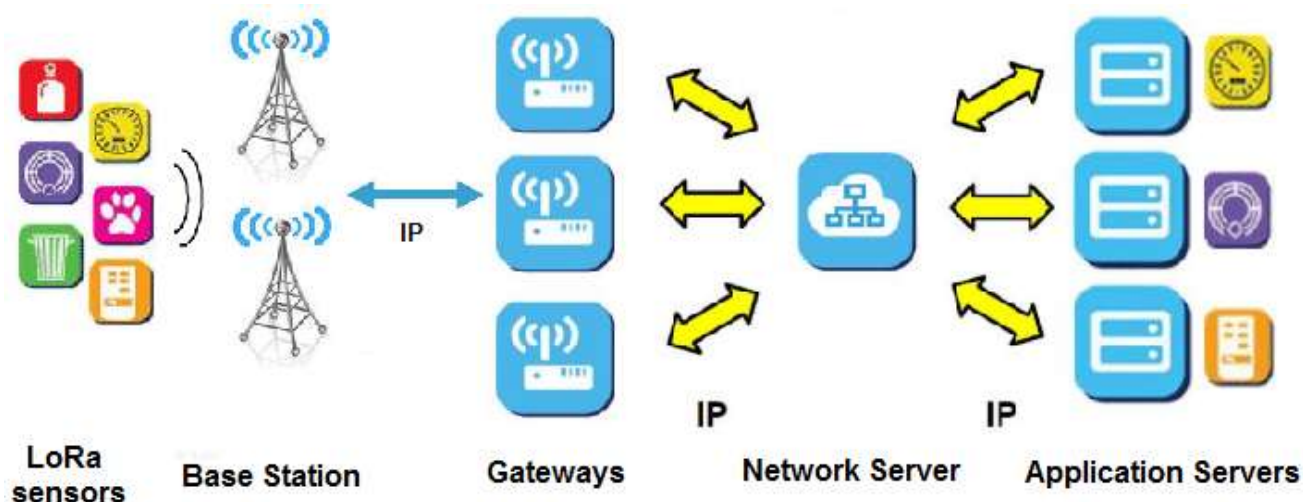


Рисунок 2.12 - Архітектура відкритого протоколу LoRaWAN

2.3.2 Технологія SIGFOX

SIGFOX — це приватна компанія, орієнтована на створення глобальної мережі, спеціально призначеної для пристроїв IoT [18].

Її технологія забезпечує передачу даних на великі відстані за умови низької потужності передавача та мінімального енергоспоживання, що дозволяє пристроям працювати автономно тривалий час. Мережа SIGFOX ідеально підходить для простих пристроїв, які періодично надсилають невеликі обсяги даних.

SIGFOX має певну схожість із традиційними стільниковими мережами (GSM, GPRS, 3G, 4G), проте вирізняється значно більшою енергоефективністю та меншими витратами. У її основі лежить використання ультравузької смуги частот (Ultra Narrow Band, UNB), яка забезпечує ефективне підключення пристроїв до глобальної мережі.

Технологія UNB є ключовим фактором, який забезпечує низький рівень енергоспоживання під час підтримання надійного з'єднання.

На рисунку 2.13 показана топологія мережі SIGFOX. Вона розроблена як масштабована і високопродуктивна мережа з низькими енерговитратами, зберігаючи при цьому простоту та легкість у реалізації. Основою архітектури є топологія «зірка», побудована на комірчастій інфраструктурі.



Рисунок 2.13 - Топологія мережі SIGFOX

SIGFOX пропонує два режими використання вузлів.

Режим P2P (Point-to-Point), який забезпечує прямий зв'язок між вузлами безпосередньо через інтерфейс локальної мережі (LAN).

У цьому режимі вузли можуть відправляти повідомлення напряму, що робить передачу даних безкоштовною, оскільки вона не проходить через транзитний канал, який потребує оплати.

Режим P2P дозволяє легко створювати вторинні мережі без потреби змінювати прошивку пристроїв — достатньо використовувати спеціальні команди з поточної бібліотеки.

Гібридний режим (SIGFOX/P2P) - поєднує можливості SIGFOX та P2P.

У цьому випадку частина повідомлень відправляється через мережу SIGFOX, а частина — у режимі P2P. Один вузол функціонує як шлюз (GW) для передачі даних у мережу SIGFOX, тоді як інші вузли працюють у режимі P2P.

2.3.3 Технологія Weightless

Weightless — це відкритий стандарт для LPWAN, що орієнтований на високу продуктивність мережі [19]. Спеціальна група інтересів Weightless SIG пропонує три різні протоколи.

Протокол Weightless-W:

- працює в телевізійних частотах (TV White Space, TVWS);
- ідеальний для використання в нафтовій і газовій промисловості;

Протокол Weightless-N:

- робить акцент на широкій зоні покриття, обмежуючи швидкість передачі даних і забезпечуючи односторонній зв'язок;

- підходить для сенсорних мереж, таких як вимірювання температури чи контроль рівня рідини;

Протокол Weightless-P:

- вузькосмугова технологія LPWAN для додатків IoT, які вимагають високої щільності пристроїв, двостороннього зв'язку та тривалого терміну служби батареї;

- вирізняється масштабованістю, оптимізованим зв'язком, широким покриттям, низькими витратами на розгортання і високою пропускну здатністю;

- на відміну від Weightless-W та Weightless-N, не потребує температурної компенсації кварцового генератора (TCXO).

Weightless-P є найбільш масштабованою технологією LPWAN у субгігагерцовому діапазоні, підтримуючи більшу кількість пристроїв на одну базову станцію, ніж інші подібні рішення.

2.3.4 Технологія NB-IoT (Narrow Band IoT)

NB-IoT, також відомий як LTE-Cat.M2, є вузькосмуговим стандартом для IoT, який забезпечує:

- широку зону покриття;
- низьке енергоспоживання (до 10 років служби батареї);
- низьку вартість терміналів;
- високу надійність та безпеку операторського класу.

NB-IoT орієнтований на традиційні IoT-застосунки, такі як інтелектуальні лічильники та системи моніторингу, але також пропонує можливості для складних рішень, як-от "розумні міста" [19].

Стандарт NB-IoT був вперше специфікований організацією 3GPP у Release 13 (LTE Advanced Pro) та тестується з 2016 року. Він охоплює такі сфери використання:

- інтелектуальні системи обліку (електрика, газ, вода);
- пожежно-охоронні сигналізації для будинків і комерційних об'єктів;

- пристрої для моніторингу здоров'я;
- відстеження людей, тварин чи предметів;
- інфраструктура розумного міста (вуличне освітлення, контроль транспортних засобів);
- промислові прилади (зварювальні апарати, компресори).

NB-IoT є вузькосмуговою технологією глобальної мережі з низьким енергоспоживанням, орієнтованою на додатки M2M. На рис. 2.14 зображено ключові характеристики NB-IoT, які забезпечують її популярність у 80% випадків використання LPWAN.

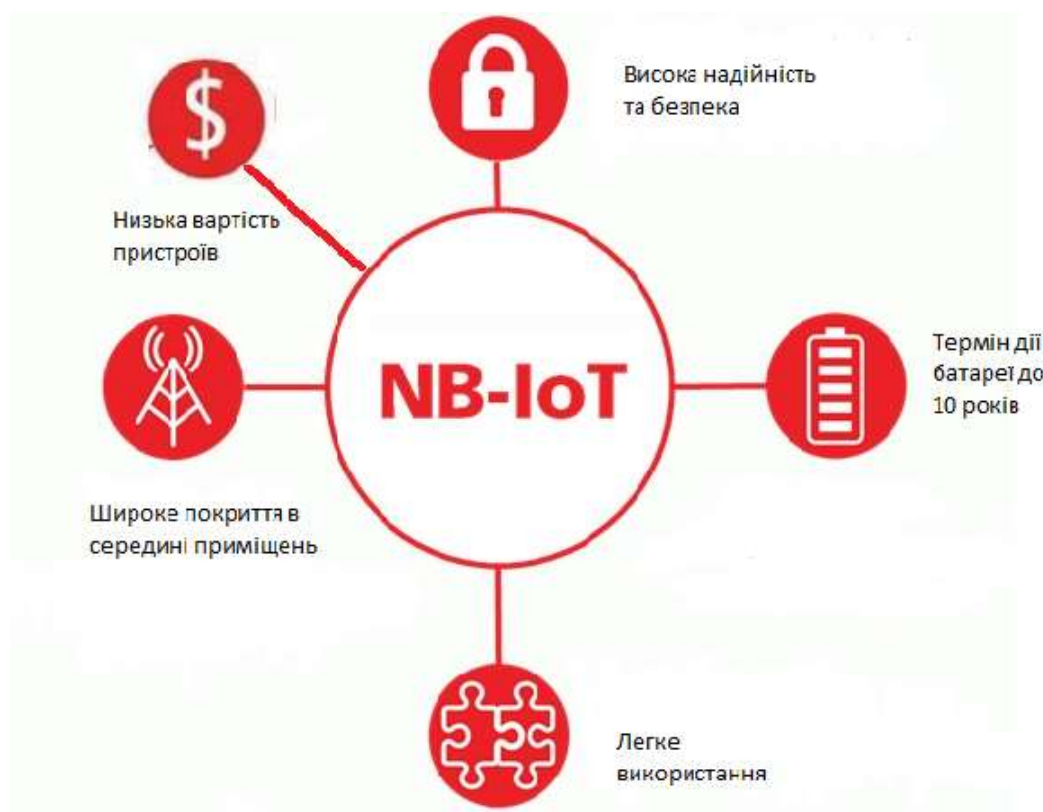


Рисунок 2.14 - Характеристики NB-IoT

Порівняння технологій високопродуктивних мереж дальнього радіусу дії подано в таблиці 2.1.

Таблиця містить основні параметри, такі як енергоспоживання, зону покриття, швидкість передачі даних, тип зв'язку, масштабованість, вартість розгортання та придатність для різних сценаріїв використання.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика технологій сенсорних мереж IoT для роботи з великими даними

Технічні характеристики	LoRa	SIGFOX	NB-IoT	Weightless P
Метод модуляції	CSS	–	OFDMA/DS SS	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	Широко муговий до 500 кГц	Вузькосму говий 100 кГц	Вузькосму говий 200 кГц	Вузькосму говий 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
Безпека	AES-64 та 128 бит	AES с HMACs	–	AES-128 / 256
Дальність	До 2,5 км в місті, до 45 км поза містом	До 10 км в місті, до 50 км поза містом	–	До 2 км в місті
Підтримка	LoRa Alliance, IBM, Cisco, Actility, Semtech	SigFox, Samsung	3GPP, Ericson, Nokia, Huawei, Intel...	Ubiik Weightless SIG

Багато операторів у світі використовують смугу частот 900 МГц для GSM завдяки її широким можливостям покриття. Це обумовлено тим, що низькочастотні діапазони мають чудові характеристики поширення сигналу, що, своєю чергою, значно покращує проникнення сигналу всередину приміщень.

2.4 Висновки до розділу

Порівнюючи можливості NB-IoT із іншими технологіями LPWAN, такими як e-MTC, SIGFOX і LoRa, можна відзначити, що NB-IoT демонструє вищу продуктивність. Аналізуючи ці технології за критеріями мережевих інвестицій, покриття, вхідного та вихідного трафіку, а також надійності, можна стверджувати, що NB-IoT є найбільш оптимальним вибором.

Розгортання NB-IoT у смугах частот 700, 800 і 900 МГц є доцільним рішенням, оскільки ці частоти мають добре розвинену екосистему, зумовлену підтримкою з боку провідних операторів у світі. Велика кількість комерційних мереж UMTS і LTE, що вже працюють у діапазоні 900 МГц, додатково сприяє ефективному впровадженню цієї технології.

Пристрої IoT, розташовані на кінцевих вузлах (на периферії або межах мережі), підключаються для виконання інтелектуальної обробки даних і подальшого проведення аналітики. Деякі пристрої підключаються безпосередньо, а інші - через шлюзи.

Шлюзи виконують функцію об'єднання трафіку з енергоефективних мереж дальнього радіусу дії у локальні та глобальні мережі з вищою пропускну здатністю. Вони зазвичай оснащені більш потужними джерелами живлення та значними обчислювальними ресурсами, порівняно з кінцевими вузлами.

Крайові або "туманні" додатки, що працюють через шлюзи, обробляють дані, отримані від датчиків і виконавчих пристроїв. Кінцеві вузли часто створені для тривалої автономної роботи, що вимагає максимально ефективного використання вбудованих обчислювальних пристроїв та радіопередавачів. Інтелектуальні порогові тригери, що вбудовані в шлюзи, підвищують ефективність трафіку, передаючи лише корисну інформацію на центральні хмарні сервери.

Шлюзи взаємодіють за допомогою різних безпроводових технологій, як стільникових, так і нестільникових. Залежно від потреб додатків (зона покриття,

час затримки, пропускна здатність, енергоефективність та вартість), розробникам пропонується широкий спектр радіоінтерфейсів із різними характеристиками.

Однак масштабування гетерогенного поєднання технологій зв'язку створює ряд викликів, таких як функціональна несумісність і можливі радіоперешкоди, які потрібно враховувати під час проєктування та розробки IoT-пристроїв. Крім того, при створенні системи необхідно брати до уваги не лише відповідність мережевим стандартам і вимогам безпроводового зв'язку, але й такі фактори, як енергоспоживання та термін служби батарей.

Пристрої IoT мають забезпечувати стабільну роботу протягом багатьох років без втручання людини, що робить оптимізацію енергоспоживання ключовим завданням у їхньому проєктуванні.

3 МЕТОД РОЗРОБКИ ІОТ-РІШЕНЬ ДЛЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ BIG DATA

3.1 Розробка схематичної моделі IoT рішення

У цьому розділі буде представлена структурна схема IoT-рішення для сенсорної мережі з використанням технологій великих даних. На рисунку 3.1 зображена основна архітектура системи великих даних [20].

Більшість архітектур, призначених для обробки великих даних, включають один або кілька з наступних елементів.

Джерела даних. Будь-яка система обробки великих даних починається з різних джерел інформації. До них належать:

- сховища даних застосунків, такі як реляційні бази даних;
- статичні файли, створені програмами (наприклад, логи веб-серверів);
- джерела потокової передачі даних у реальному часі, як-от пристрої Інтернету речей.

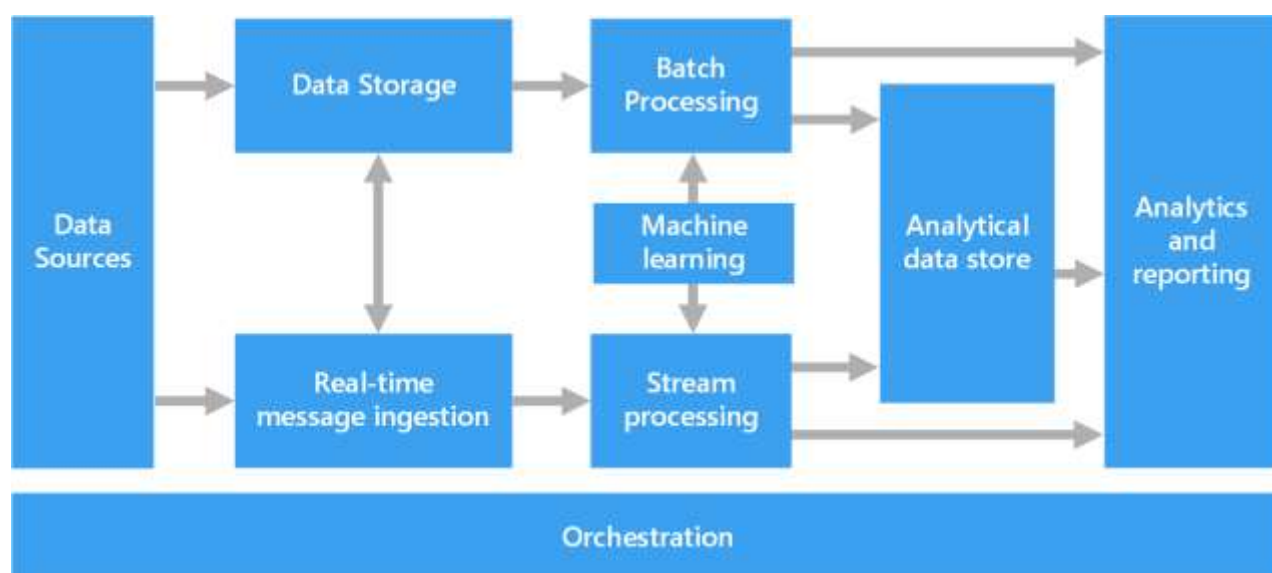


Рисунок 3.1 - Системна архітектура IoT рішення

Сховище даних. Дані для пакетної обробки зазвичай зберігаються в розподіленому файловому сховищі, здатному утримувати великі обсяги файлів різних форматів. Таке сховище часто називають озером даних. Реалізувати його можна за допомогою Azure Data Lake Store або контейнерів для зберігання великих двійкових об'єктів у службі Azure Storage.

Пакетна обробка. Через значний обсяг даних у рішенні часто використовуються пакетні завдання. Ці завдання передбачають фільтрацію, статистичну обробку та інші процеси для підготовки даних до аналізу. Як правило, процес включає читання вихідних файлів, їх обробку та збереження результатів у нові файли.

Прийом повідомлень у реальному часі. Якщо система отримує дані в реальному часі, архітектура повинна мати механізм для збору та зберігання цих повідомлень для потокової обробки. Багатьом рішенням потрібне сховище для буферизації повідомлень з можливістю горизонтального масштабування, надійної доставки та іншими функціями черг повідомлень. Цей компонент часто називають потоковою буферизацією.

Потокова обробка. Після збереження повідомлень у режимі реального часу система виконує їх фільтрацію, статистичну обробку та інші процеси підготовки до аналізу. Оброблені поточкові дані записуються у вихідне сховище. Для цього

можна використовувати Azure Stream Analytics, яка забезпечує керовану службу потокової обробки на основі SQL-запитів до поточкових даних.

Машинне навчання. Підготовлені дані, отримані з пакетної або потокової обробки, можуть бути використані для створення моделей машинного навчання. Ці моделі дозволяють прогнозувати результати або класифікувати дані.

Сховище аналітичних даних. У багатьох рішеннях обробки великих даних інформація структурується для подальшого аналізу. Оброблені дані зберігаються у форматі, що підтримує аналітичні запити. Для цього можуть використовуватися реляційні бази даних.

Аналіз та створення звітів. Основна мета обробки великих даних - це аналітика та створення звітів, що забезпечують отримання важливих інсайтів. Для покращення аналітичних можливостей до архітектури можна додати шар моделювання.

Оркестрація. Більшість рішень обробки великих даних включають повторювані робочі процеси. Вони передбачають трансформацію вихідних даних, передачу між різними джерелами та сховищами, завантаження оброблених даних у аналітичні сховища або їх передачу безпосередньо до звітів чи на панелі моніторингу.

3.2 IoT рішення із застосування великих даних

Необхідність у високопродуктивних та ефективних системах NB-IoT виникає через швидке зростання обсягу даних, що потребує постійного моніторингу та інтелектуальної обробки інформації, отриманої від вимірювань і досліджень (завдань, які виконуються за допомогою IoT-рішень) [21].

Наприклад, останнім часом новітні технології, зокрема в точному землеробстві, використовуються для підвищення продуктивності та ефективного управління ресурсами. Важливим аспектом є необхідність наявності точних та

своєчасних даних про стан об'єкта в системах, які використовують ці технології.

Зібрані параметри, отримані шляхом вимірювань, стають вхідними даними для спеціалізованих систем управління процесами. До таких прикладів можна віднести контроль зрошення, дозування пестицидів, боротьбу зі шкідниками та інші завдання. Для збору та комплексної обробки отриманих даних інтеграція IoT з безпроводовими високопродуктивними сенсорними мережами у нових структурах значно підвищує ефективність, зокрема сприяючи збільшенню врожайності сільськогосподарських культур.

WSN (безпроводові сенсорні мережі) виконують кілька важливих функцій: збір даних про різні параметри (наприклад, температура, вологість, рівень сонячного світла, поживні речовини), розподілену обробку даних через досягнення консенсусу, встановлення і зберігання відповідних даних, а також злиття даних низького рівня і їх передачу.

Між IoT та технологіями великих даних існує взаємозалежний зв'язок. Обидві технології активно взаємодіють і сильно впливають одна на одну. Зі зростанням Інтернету речей виникає зростаюча потреба в більш потужних рішеннях для обробки великих даних. Наприклад, оскільки обсяг даних, що генеруються пристроями IoT, зростає дуже швидко, традиційні технології зберігання даних досягли своїх меж. Це вимагає впровадження новітніх рішень для зберігання даних і оновлення інфраструктури для обробки великих обсягів даних, що генеруються.

Також важливо зазначити, що звичайні дані не є достатніми для сучасних застосувань, таких як моніторинг, енергетика тощо. У таких випадках, особливо при моніторингу великих територій, датчики об'єднуються в високопродуктивні сенсорні мережі. Мережа WSN складається з сенсорних вузлів для вимірювання і вузлів для збору, обробки і передачі даних (приймачів або головок кластерів).

Однією з ключових проблем є оптимізація енергоефективності системи. При виконанні задач, таких як моніторинг великих територій або управління енергетикою, кінцеві пристрої IoT повинні мати великий термін служби на батареях. Це підвищує актуальність досліджень у галузі енергоефективності

пристроїв IoT.

Усе вищезазначене підтверджує необхідність інтеграції технологій великих даних у рішення IoT для досягнення високої енергоефективності.

3.3 Модель розробки IoT рішення

Розглянемо математичну модель IoT рішення. Загальна схема зв'язку математичних виразів і рівнянь моделі з функціональними елементами наведена на рисунку 3.2.

Представимо структурну схему IoT як систему, яка має N входів і M виходів. Тоді загальна кількість функціональних виводів (вхідних і вихідних) буде [22]

$$N+M=P.$$

При цьому N та M є змінними параметрами, які можна виразити через математичні формули або рівняння в залежності від конкретної системи. Таким чином, ми можемо записати:

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

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

де N_t – число входів;

M_t – число виходів;

P – загальна кількість виводів;

SR_t – поточні значення масиву даних.

Ці рівняння визначають кількість вхідних і вихідних параметрів у відповідних підсистемах IoT рішення, що дозволяє будувати математичну модель для подальшого аналізу та оптимізації системи.

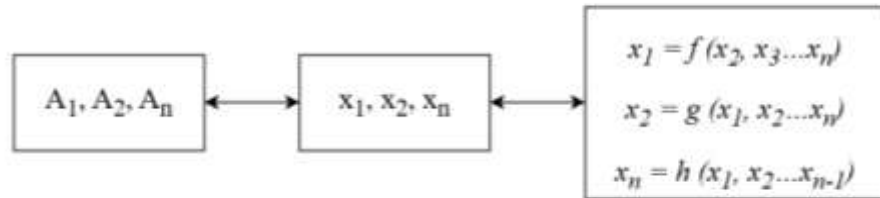


Рисунок 3.2 - Взаємодія виразів моделі з функціональними елементами

Функції (3.1) і (3.2) можна описати для кожного окремого IoT рішення, визначаючи, які стани воно може приймати. В цих функціях враховуються різні типи взаємодії системи з навколишнім середовищем:

$$P_{ri} = \{\text{тільки вхід, тільки вихід, двонаправлений}\} \quad (3.3)$$

Це означає, що кожен елемент системи може мати один з трьох можливих станів:

- тільки вхід: коли елемент системи приймає дані, але не відправляє їх;
- тільки вихід: коли елемент системи лише відправляє дані, не отримуючи їх;
- двонаправлений: коли елемент системи може і приймати, і відправляти дані, здійснюючи двосторонню взаємодію.

Ці стани визначають, як функціонує кожен окремий вузол або компонент IoT системи, а також забезпечують основну основу для моделювання його роботи в рамках більш загальної схеми.

Графічно математичну модель IoT рішення можна представити у вигляді рисунка 3.3, де кожен з компонентів і їх стани (вхід, вихід, двонаправлений) позначені як взаємозв'язки між елементами системи, що дозволяє наочно

відображати всі можливі сценарії функціонування системи та її взаємодію з навколишнім середовищем.

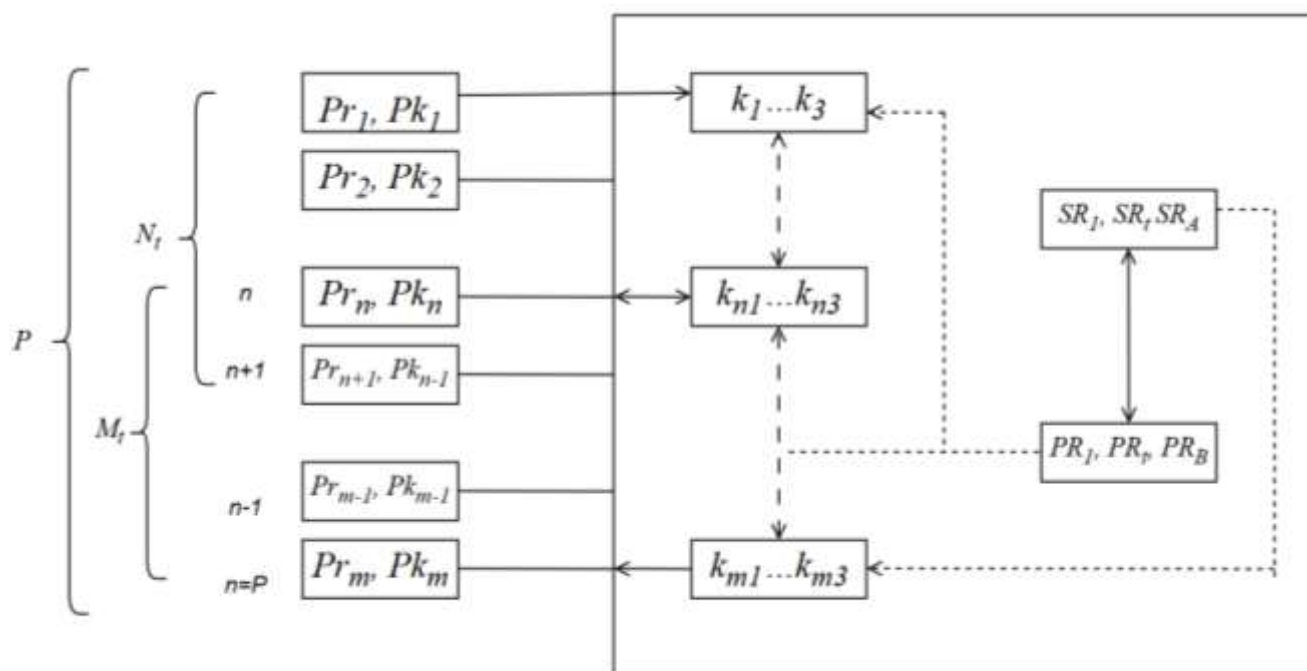


Рисунок 3.3 – Математична модель IoT рішення

Блоки PR1-PRB в даній моделі позначають кінцеві пристрої IoT, які є основними елементами системи та виконують різні функції збору, обробки та передачі даних. Для цих пристроїв критично важливою характеристикою є енергоспоживання та час автономної роботи, оскільки ці параметри визначають ефективність їх функціонування в довгостроковій перспективі, особливо в умовах обмежених ресурсів, таких як батареї.

У наступному розділі магістерської дисертації буде детально розглянуто, як енергоспоживання кінцевих пристроїв IoT впливає на їх експлуатаційні характеристики, а також як оптимізувати ці параметри для забезпечення тривалого терміну служби пристроїв без необхідності частого обслуговування або заміни батарей. Це дозволить створити більш ефективні та надійні рішення для використання в різноманітних сферах, таких як сільське господарство, енергетика та розумні міста, де важливо зберігати енергію та продовжувати роботу пристроїв на великих територіях.

3.4 Математична модель задачі енергоефективності IoT-рішення та методи її розв'язання

Кожен пристрій, підключений до мережі, повинен пройти процедуру встановлення з'єднання між базовою станцією оператора та кінцевим пристроєм, незалежно від того, чи це смартфон, чи датчик. Ця процедура стандартизована та отримала назву процедури випадкового доступу (рис. 3.4). Для кращого розуміння цього процесу необхідно заздалегідь узагальнити принцип його роботи [23].

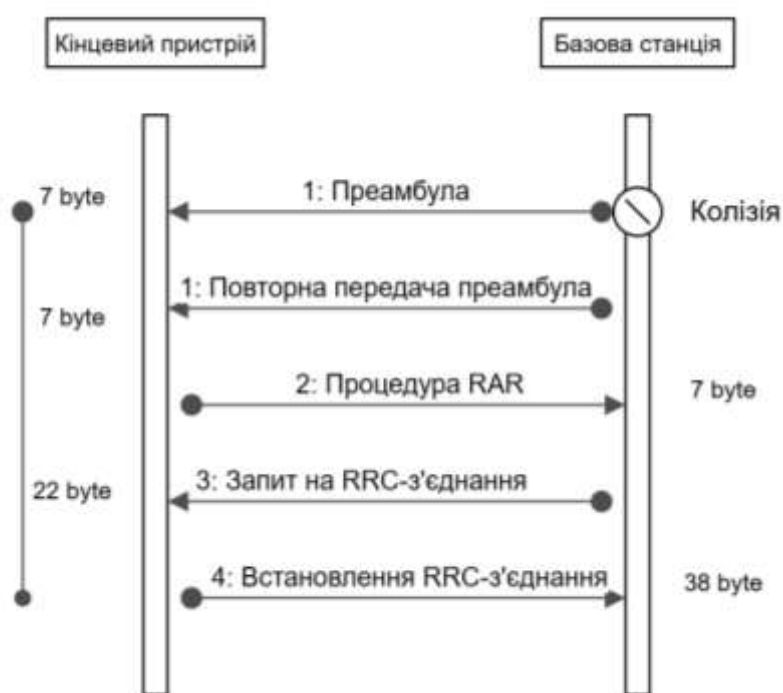


Рисунок 3.4 - Встановлення з'єднання між базовою станцією оператора та кінцевим пристроєм випадковим доступом

По-перше, кінцевий пристрій ініціює процес підключення, передаючи преамбули Msg1 до базової станції через фізичний канал випадкового доступу (Physical Random-Access Channel, PRACH). Преамбула обирається випадковим чином з 64 доступних послідовностей. Ця особливість і стає основним об'єктом дослідження, оскільки зі збільшенням кількості кінцевих пристроїв, які одночасно

намагаються підключитися до мережі, виникають колізії під час встановлення з'єднання. Це, у свою чергу, спричиняє затримки в каналі зв'язку.

Якщо преамбула успішно прийнята базовою станцією, вона надсилає підтвердження у вигляді повідомлення відповіді випадкового доступу (Random Access Response, RAR), позначеного на рисунку як Msg2. Це повідомлення має надійти до кінцевого пристрою протягом заданого інтервалу очікування (response window).

Однією з характерних особливостей передачі даних кінцевими пристроями Інтернету речей є їх періодичний характер. Пристрої підключаються до мережі не постійно, а лише в моменти, коли потрібно передати накопичену інформацію до сервера для обробки. Частота виходу пристрою в онлайн-режим визначається різними таймерами, які будуть розглянуті далі.

Аналізуючи особливості процедури підключення та характер передачі інформації IoT-пристроями, можна дійти висновку, що «вузьким місцем» цієї системи є обмежена кількість доступних преамбул під час встановлення з'єднання. Якщо два кінцевих пристрої одночасно використовують одну й ту саму послідовність преамбули для підключення до мережі, один із них буде відключений. У цьому разі пристрій повторить спробу встановити з'єднання до моменту закінчення таймера або успішного завершення процедури підключення. Хоча така проблема могла б бути несуттєвою за умов невеликої кількості пристроїв на одну базову станцію, із розвитком концепції Інтернету речей кількість кінцевих пристроїв постійно зростає.

Критична ситуація може виникнути у випадках, коли одночасно активується група датчиків. Це може спричинити зіткнення у процесі підключення, що своєю чергою призведе до значних затримок або навіть перевантаження мережі.

Ще одним важливим аспектом функціонування IoT-пристроїв є їх автономність, тобто здатність працювати тривалий час без втручання людини. У рамках цього дослідження буде запропонована модель розрахунку енергоспоживання пристрою. Вона дозволить прогнозувати термін служби

акумулятора з урахуванням зазначених затримок у процесі підключення. Основні вихідні дані для моделі сформовані відповідно до специфікацій і представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для розрахунку

Позначення	Параметр	Значення
-	Ширина смуги	200 кГц
s	Повне число преамбул	64
L_1	Максимальне число передач преамбул	10
-	Розмір вікна очікування преамбул	5 мс
-	Таймер ContentionResolution	у 48 мс
$W_{\max}$	Індикатор Backoff	у 200 м
π_3	Імовірність успішної доставки Msg3	0,9
π_4	Імовірність успішної доставки Msg4	0,9
L_3	Максимальна кількість повідомлень HARQ T_x , для повідомлень Msg3 та Msg4	5
M	Кількість кінцевих пристроїв у мережі	100 150 200
b	Частота PRACH	5 мс
K	Вікно очікування RAR	5мс
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

Під час реалізації розрахунків важливим параметром є так званий індекс конфігурації PRACH. Він безпосередньо впливає на кілька системних характеристик, пов'язаних із повідомленням Msg1. Серед цих параметрів – кількість субкадрів, доступних для передачі преамбули (де кінцевий пристрій може спробувати передати преамбулу), та довжина самої преамбули. Іншим важливим параметром є таймер ContentionResolution, який визначає максимальну кількість субкадрів, доступних пристрою для очікування Msg3, перш ніж процедура підключення буде вважатися невдалою.

Кожного разу, коли кінцевий пристрій має дані для передачі, він починає змагатися з іншими пристроями за доступ до каналу PRACH. Ймовірність

успішної передачі преамбули дорівнює $1-e^{-1}$, де i -й індекс спроб передачі та L_i позначає максимальне число цих спроб.

Після закінчення K_0 субкадрів виконується пауза, необхідна для уникнення конфлікту із прийомом Msg2. Ця пауза визначається як вікно відповіді (*response window*). Після паузи нове вікно відповіді розміром K запускає таймер, який відлічує час до повторної передачі преамбули. У межах цього вікна відповідей базова станція *eNB* надсилає повідомлення Msg2, рівномірно розподілені по субкадрах.

Якщо пристрій IoT не отримав Msg2, через колізії або недостатню потужність сигналу, процедура випадкового доступу (RA) повторюється після затримки, визначеної випадковим таймером W . Цей таймер відстрочки W вибирається у межах рівномірно розподіленого вікна затримки $W_{\max}$.

Після успішного отримання повідомлення RAR пристрій NB-IoT переходить до обробки Msg3, яку необхідно виконати у межах часу t_{pr} . Далі Msg3 передається, і пристрій чекає $t_{tx}-1$, щоб здійснити передачу Msg4. Ймовірність успішної доставки повідомлень Msg3 і Msg4 позначаються відповідно як π_3 і π_4 . Максимальна кількість спроб передачі Msg3 становить L_3 .

Згідно з результатами дослідження [24], загальна затримка встановлення підключення визначається як сума затримок у повідомленнях Msg1, Msg2 та RRC Msg3:

$$E[\tau] = E[\tau^{(1)}] + E[\tau^{(2)}], \quad (3.4)$$

де $E[\tau^{(1)}]$ – час очікування від активації кінцевого пристрою до кінця процедури преамбули Msg1 та відповідь на неї Msg2;

$E[\tau^{(2)}]$ – час очікування, доки не буде встановлено з'єднання RRC.

Ці компоненти можна розрахувати за наступними етапами:

- очікуваний час затримки передачі повідомлень Msg3/Msg4:

$$E[\tau^{(2)}] = t_{pr} + t_{tx} \cdot \bar{n}_3 \quad (3.5)$$

де $\bar{n}_3$ – середня кількість передач між Msg3 та Msg4.

$$\bar{n}_3 = \pi_{tx} \sum_{n=1}^{L_3} n(1 - \pi_{tx})^{n-1} = \frac{1}{\pi_{tx}} [1 - (1 - \pi_{tx})^{L_3}] \quad (3.6)$$

- очікуваний час затримки передачі повідомлень Msg1/Msg2:

$$E[\tau^{(1)}] = c_1(K_1 + K_0 + K + \bar{w}), \quad (3.7)$$

де $\bar{w}$ – середній час очікування перед повторною преамбулою і він дорівнює:

$$\bar{w} = c_1(c_2 + 1) + (c_2 + b + bc_3)(W - bc_3 - c_2) + bc_3c_2.$$

Такий розрахунок враховує вплив колізій на затримку наступним чином:

$$E[\tau^{(1)}] = \sum_{j=1}^M \theta_j \frac{1}{\pi + \mu_j}, \quad (3.8)$$

де θ_j – ймовірність знаходження пристрою в стані зіткнення:

$$\theta_j = \frac{(M-1)!}{(j-1)!(M-j)!} \rho^{j-1} (1 - \rho)^{M-j}. \quad (3.9)$$

Ця формула дозволяє врахувати усі можливі спроби підключення, а також час затримки між різними етапами процедури підключення.

Такий підхід до розрахунків дозволяє оцінити середній час, протягом якого пристрій перебуває у різних станах, що необхідно для точного розрахунку його енергоспоживання.

При цьому, для аналізу енергоспоживання кінцевих пристроїв

враховується лише сценарій із виникненням колізій у зв'язку, адже саме вони мають найбільший вплив на час затримки та, відповідно, на витрати енергії пристрою.

Числовий аналіз затримок підключення представлений у таблиці 3.2.

Результати цього аналізу підтверджують, що зі зростанням кількості пристроїв у мережі ймовірність колізій також збільшується, що призводить до зростання затримок підключення. Це, у свою чергу, створює додаткове навантаження на кінцеві пристрої, підвищуючи їх енергоспоживання.

Таблиця 3.2 - Затримка при реалізації Msg3/Msg4

Параметр	Позначення	Значення		
Затримка Msg3/Msg4				
Середня кількість спроб передачі преамбули	n	1,233		
Середня затримка	$E[\tau^{(2)}]$	12,395		
Очікувана затримка Msg1/Msg2 без колізій				
Середня затрмка при передачі преамбули з першої спроби	$E[\tau^{(1)}, \text{спроба}]$	8,5		
Очікувана затримка Msg1/Msg2 з колізіями				
		Число пристроїв M2M		
		100	150	200
Ймовірність колізій	π_{kol}	0,025%	0,006%	0,008%
Середнє число спроб передачі преамбули	n	1,026	1,035	1,038
Середня затримка	$E[\tau^{(2)}], \text{мс}$	15,87	16,71	17,42

Кінцеві пристрої, такі як датчики, смартфони або інші пристрої, можуть функціонувати у двох основних станах:

- RRC_IDLE – стан, у якому пристрій не має виділених мережевих ресурсів. У цьому стані пристрій споживає мінімальну потужність, оскільки його приймач переважно вимкнений;
- RRC_CONNECTED – стан, у якому пристрою надано ресурси для передачі даних.

Проте пристрої Інтернету речей (зокрема IoT-пристрої) для збільшення

тривалості автономної роботи використовують спеціальний режим енергозбереження, відомий як Power Save Mode (PSM). Нижче наведено детальніший опис цієї процедури.

3.4.1 Робота в режимі PSM

Кінцевий пристрій активує режим PSM шляхом запуску двох заздалегідь встановлених таймерів, пов'язаних із процедурою оновлення сервісної зони (Tracking Area Update, TAU) [25]:

- перший таймер визначає проміжок часу, протягом якого пристрій знаходиться в режимі очікування (RRC_IDLE) або в режимі дисконтинуальної прийомної роботи (DRX);
- другий таймер задає загальну тривалість часу, протягом якого пристрій перебуває у режимах DRX та PSM.

Коли мережа звільняє з'єднання RRC після виконання процедури TAU, таймери починають відлік заново. Пристрій поводить себе як будь-який зареєстрований у мережі пристрій, але залишається в режимі очікування.

Час роботи першого таймера називається активним часом (active time), оскільки в цей період пристрій доступний для зв'язку з мережею NB-IoT. Коли активний час завершується, пристрій переходить у режим PSM до закінчення дії другого таймера. У цей період пристрій працює на мінімальній потужності.

3.4.2 Аналіз енергоспоживання

Аналіз енергоспоживання кінцевих пристроїв буде виконуватися в двох сценаріях:

- без використання режиму PSM (рис. 3.5);
- з використанням режиму PSM (рис. 3.6).

Для розрахунку енергоспоживання кінцевих пристроїв IoT спершу необхідно визначити вихідні енергетичні параметри, які подано в таблиці 3.3. Розрахунки виконано відповідно до сценаріїв, представлених на рис. 3.4 і 3.5, з урахуванням попередньо визначених затримок підключення. На основі цих параметрів можна буде виконати оцінку загального енергоспоживання пристрою

в кожному режимі роботи та спрогнозувати тривалість автономної роботи залежно від профілю використання.

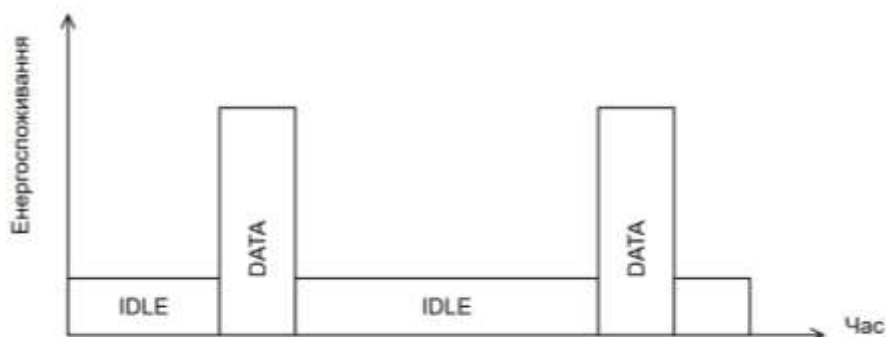


Рисунок 3.5 - Енергоспоживання кінцевих приладів без використання режиму PSM

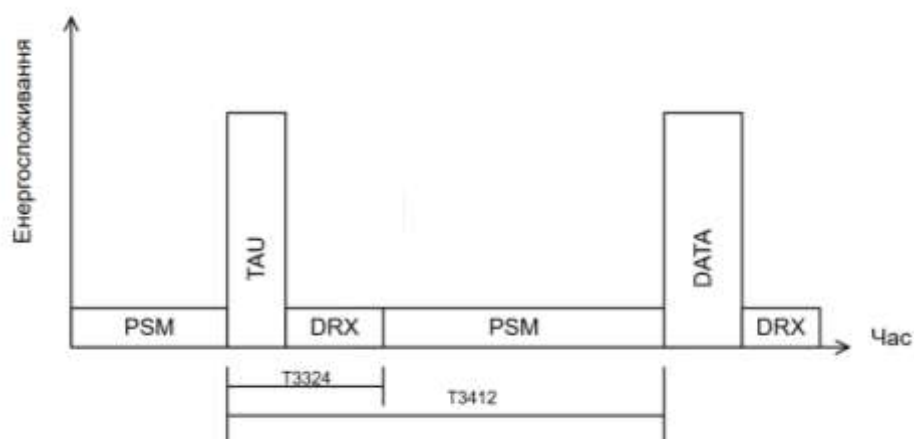


Рисунок 3.6 - Енергоспоживання кінцевих приладів з використанням режиму PSM

Таблиця 3.3 - Енергетичні вихідні дані про енергоспоживання

Символ	Варіант	Значення
P_0	Витрати потужності в режимі PSM	0 мВт
P_1	Витрати потужності в режимі	0,05 мВт
P_2	Витрати потужності на обробку та прийом	50 мВт
P_3	Витрати потужності на передачу	50 мВт

Розглянемо порядок розрахунку:

- визначення відсотка часу, протягом якого пристрій перебуває в кожному зі станів;
- розрахунок загальної потужності споживання та струму розряду акумулятора;
- оцінка необхідного терміну автономної роботи пристрою.

На основі наведеного алгоритму слід обчислити час, який пристрій проводить у різних режимах.

Розглянемо послідовність розрахунку часу, який витрачено на передачу Msg1/Msg3:

- визначення частки часу, яку пристрій проводить у кожному стані;
- обчислення сумарної потужності споживання та струму розряду акумулятора;
- розрахунок необхідної тривалості автономної роботи пристрою.

$$q_3 = \frac{1}{T} \left(K_1 \bar{n} + \frac{1}{\pi_{tx}} \left(1 - (1 - \pi_{tx})^{L_3} (1 + \pi_{tx} L_3) \right) \right) \quad (3.10)$$

Відповідно до зазначеного алгоритму, потрібно розрахувати час перебування пристрою в різних станах, час, витрачений на передачу Msg1/Msg3.

Час витрачений на прийом Msg2/Msg4: ф. 3.10

$$q_3 = \frac{1}{T} \left(K_1 (\bar{n} - 1) + \frac{K + 1}{2} + t_{pr} + \frac{t_{tx} - 1}{\pi_{tx}} \right) \cdot \left(1 - (1 - \pi_{tx})^{L_3} (1 + \pi_{tx} L_3) \right) \quad (3.11)$$

Час, витрачений на стан DRX:

$$q_1 = \frac{1}{T} \left(\frac{b}{2} + K_0 \bar{n} + (\bar{n} - 1)\bar{w} \right) \quad (3.12)$$

Загальний обсяг енергії витрачений Іот пристроєм:

$$\epsilon = P_0 (1 - q_3 - q_2 - q_1) + P_1 q_1 + P_2 q_2 + P_3 q_3 \quad (3.13)$$

Алгоритм розрахунку терміну служби акумулятора кінцевого пристрою з урахуванням ймовірності зіткнення зв'язку складається наступним чином:

$$Q = q_3 + q_2 + q_1$$

Для розрахунку енергоспоживання за передачу одного блоку інформації необхідно розрахувати час передачі одного пакета даних:

$$T_{\text{пер}} = \frac{\theta_1}{R_{M2M}},$$

де θ - блок даних від пристрою M2M до Enb, $\theta = 100$ байт;

R_{M2M} – швидкість передачі даних, $R_{M2M} = 200$ кбіт/с.

Розрахунок передачі/прийому сигнальних повідомлень використано:

$$T_{\text{сиг}} = \frac{Q_{\text{сиг}}}{R_{M2M}}.$$

Загальний час, витрачений на сигналізацію та блок даних дорівнює:

$$T_{\text{пакету}} = T_{\text{пер}} + 2 \cdot T_{\text{сиг}}.$$

На основі цих дано сожна розрахувати енергоспоживання для передачі блоку даних і сигнальних повідомлень наступним чином:

$$\epsilon_{\text{пакету}} = T_{\text{пакету}} \cdot P_2 + t_{\text{обр}} \cdot P_1,$$

де: $t_{\text{обр}}$ – час обробки запиту в плануальнику eNB, $t_{\text{обр}} \sim 10$ мс.

Знаючи енергоспоживання для процесу підключення і передачі блоку даних в 100 байтах, можна розрахувати енергоспоживання за всю операцію:

$$\epsilon_{full} [1 \text{ передача}] = \epsilon_{\text{пакету}} + \epsilon .$$

Для розрахунку енергоспоживання протягом року, скористаємось наступним виразом:

$$\epsilon_{full} [\text{рік}] = 365 \text{ днів} \cdot 24 \text{ години} \cdot k \cdot \epsilon_{full} [1 \text{ передача}],$$

де: k – кількість передач на добу

У стані IDLE пристрій буде знаходитися після кожної передачі пакету інформації, і енергоспоживання при цьому буде дорівнювати:

$$\epsilon_{IDLE} [\text{рік}] = 365 \text{ днів} \cdot 24 \text{ години} \cdot 60 \text{ хвилин} \cdot 60 \text{ сек} \cdot P_1.$$

Загальне енергоспоживання можна розрахувати наступним чином:

$$\epsilon_{full} [IDLE] = \epsilon_{full} [\text{рік}] + \epsilon_{IDLE} [\text{рік}].$$

Таким чином, термін служби акумулятора пристрою в режимі очікування буде дорівнювати:

$$T_{work}[IDLE] = \frac{P_{bat}}{\epsilon_{full} [IDLE]},$$

де: P_{bat} – ємність акумулятора.

При знаходженні пристрою в режиму PSM, він практично не витрачає енергію і час автономної роботи можна записати наступним чином:

$$T_{work}[PSM] = \frac{P_{bat}}{\epsilon_{full}[PSM]},$$

Здійснимо чисельний аналіз автономного часу роботи кінцевого пристрою за таких умов: сигнальні повідомлення мають розмір 59 байт для передачі по лінії вгору та 136 байт для прийому по лінії вниз, без урахування переданих 100 байт по лінії вгору. Розрахунки будуть виконуватись за умови використання трьох батарей AAA 1,25 В ємністю 1000 мА. Пристрій передає інформацію тричі на день, по 100 байт кожного разу. Отримані результати будуть представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Чисельний аналіз автономного часу роботи кінцевого пристрою

Параметр	Число NB IoT пристроїв	Розмір блоку даних		
		100 байт	500 байт	1 кбайт
Енергоспожиання на процедуру RA, Вт·с	100	$0.827 \cdot 10^{-3}$		
	150	$0.828 \cdot 10^{-3}$		
	200	$0.829 \cdot 10^{-3}$		
Енергоспожиання на передачу блоку даних, Вт·с	100	$0.20 \cdot 10^{-3}$		
	150	$0.99 \cdot 10^{-3}$		
	200	$2.0 \cdot 10^{-3}$		
Енергоспоживання за рік, Вт·с	100	2719,28	4772,39	7461,99
	150	2721,24	4774,46	7464,05
	200	2711,88	4775,94	7465,53
Час роботи пристроїв режимі IDLE, років	100	2,095	1,418	0,996
	150	2,094	1,417	0,995
	200	2,093	1,417	0,995
Час роботи пристроїв режимі PSM, років	100	3,310	1,886	1,206
	150	3,307	1,885	1,206
	200	3,305	1,884	1,205

З таблиці можна зробити висновок, що з ростом кількості пристроїв у мережі та збільшенням обсягу пакета даних енергоспоживання пристрою зростатиме лінійно, особливо якщо обсяг пакета даних збільшиться до 1 кілобайта, і якщо кількість пристроїв у мережі досягне 150. На основі цих

результатів можна прогнозувати орієнтовні часові рамки автономної роботи кінцевого пристрою за умови більшої кількості підключених пристроїв до мережі.

Також важливо провести порівняння часу роботи кінцевих пристроїв, які використовують режим PSM, із традиційним алгоритмом роботи пристрою. Для цього ми побудуємо графік, представлений на рис. 3.7. Графік показує, як змінюється ємність акумулятора пристрою з часом в днях, з урахуванням різних режимів роботи.

Згідно з представленим графіком, можна зробити висновок, що застосування режиму PSM у кінцевих пристроях забезпечує підвищення часу автономної роботи на 49% порівняно з традиційними режимами роботи пристроїв IoT в умовах WSN.

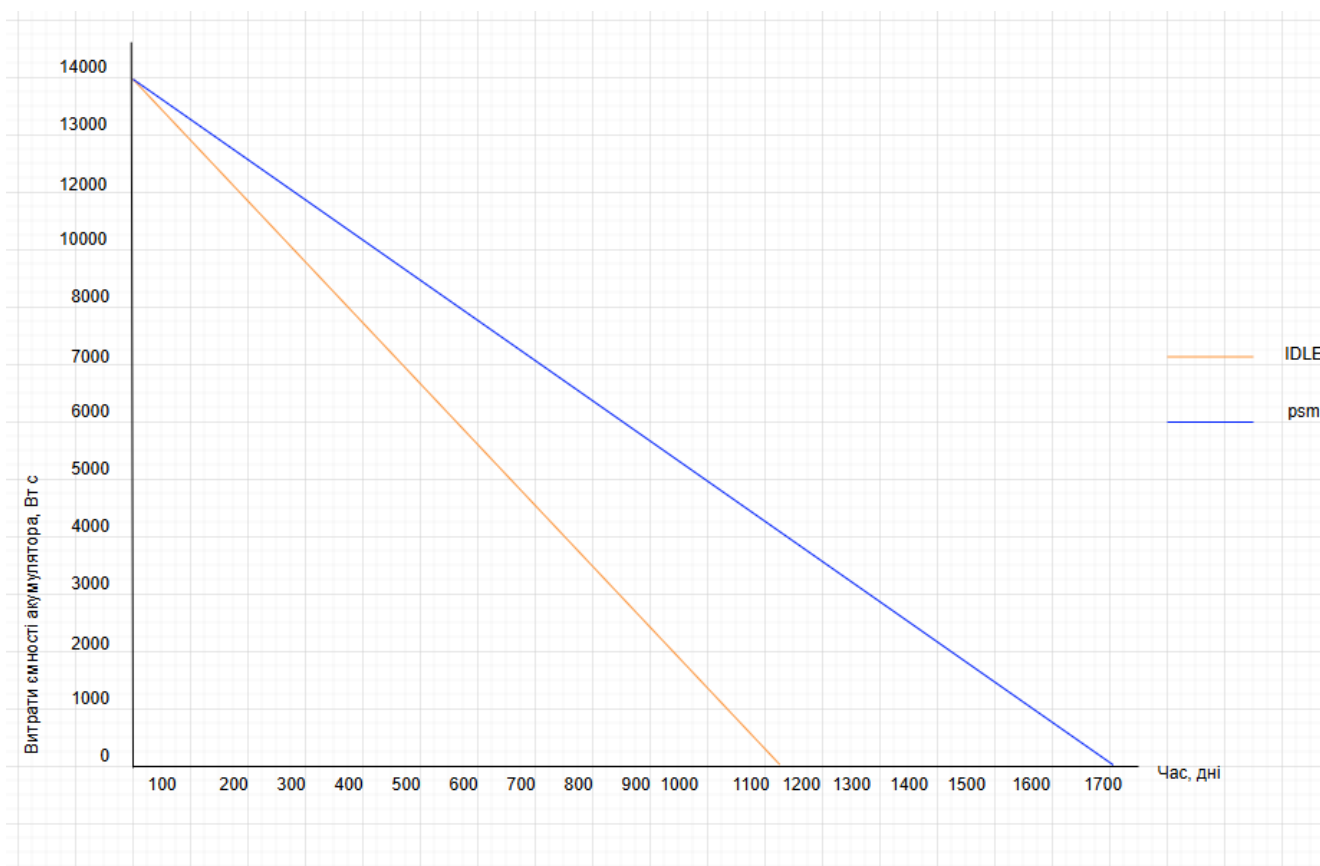


Рисунок 3.7 - Витрата ємності акумулятору пристрою

3.5 Математична комп'ютерна модель IoT-рішення

При розробці комп'ютерної математичної моделі планується застосування нейронних мереж та середовища моделювання Matlab/Simulink.

Нейронна мережа є методом прогнозувальної аналітики, який застосовується для класифікації або прогнозування змінних. Вона є частиною машинного навчання і працює, намагаючись передбачити значення так, як це робить людський мозок [25].

Нейронна мережа складається з кількох елементів: вхідних вузлів (які є початком мережі), вихідних вузлів (які представляють результати або прогнози після проходження даних через мережу), та прихованого шару між цими вузлами. Прихований шар, що розташований між входом і виходом, робить нейронну мережу унікальною та ефективною. Кожного разу, коли дані потрапляють у мережу, алгоритм обробляє їх, надаючи «ваги» вузлам у прихованому шарі, що змінює результат у вихідних вузлах.

Приклад структури нейронної мережі наведено на рисунку 3.8.

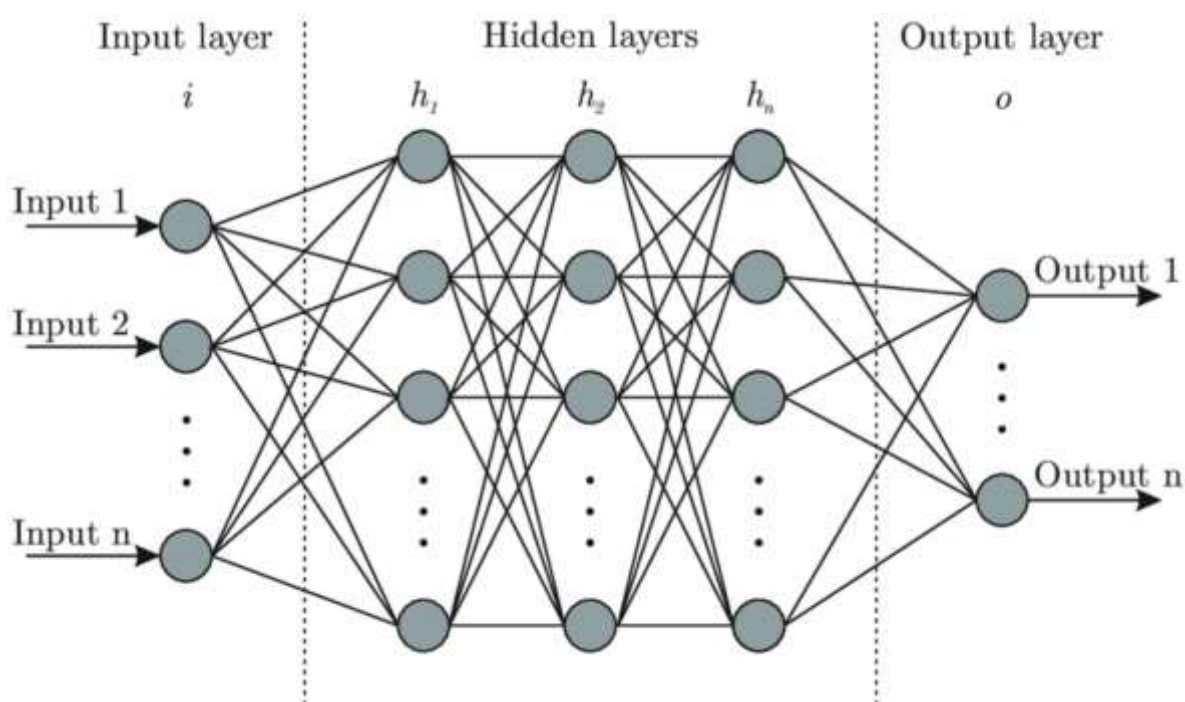


Рисунок 3.8 - Приклад нейронної мережі

Прогнозування за допомогою нейронних мереж відрізняється від, наприклад, лінійної регресії (яка також є популярним інструментом прогнозування і широко використовується в аналізі даних) тим, що моделі лінійної регресії значно простіші. Розглянемо нейронну мережу з одним вихідним вузлом, вхідними вузлами та прихованими шарами.

Якщо видалити приховані шари нейронної мережі, залишаться тільки вхідні та вихідні вузли. У цьому випадку мережа намагається передбачити значення вихідних вузлів, використовуючи лише вхідні вузли. Це аналогічно тому, як працюють моделі лінійної та логістичної регресії для прогнозування значень.

Однак наявність прихованих шарів в нейронній мережі робить її більш інтелектуальною та точною в порівнянні з традиційними інструментами прогнозування, оскільки вона «вчиться» з досвіду, запам'ятовує попередні залежності в даних і включає ці зв'язки в алгоритм.

Попри високу точність нейронних мереж, виникає питання, чому вони не використовуються більш широко. Як і очікувалося, нейронні мережі мають кілька недоліків. Вони потребують значної обчислювальної потужності, що робить їх більш витратними. Крім того, для навчання нейронних мереж необхідно мати великий обсяг даних, що не завжди доступно.

Ще один важливий аспект – нейронні мережі мають так званий ефект «чорного ящика». Це означає, що можна спостерігати за вхідними даними і вихідними результатами, але не можна зрозуміти, що саме відбувається всередині процесу. Це ускладнює налаштування алгоритму і робить складним передбачення того, як мережа поведеться в нових ситуаціях. Однак для прогнозування енергоефективності в системах Інтернету речей ці недоліки не є критичними.

На етапі навчання нейронна мережа регулює ваги, щоб передбачити правильну мітку класу для вхідних даних. Переваги нейронних мереж включають високу стійкість до зашумлених даних, а також здатність класифікувати шаблони, на яких мережа не була спеціально навчена. Після того, як мережу було спроектовано для конкретного завдання, вона готова до навчання.

Для початку процесу навчання початкові ваги вибираються випадковим чином, після чого мережа починає навчання. Мережа обробляє записи в навчальних даних по черзі, використовуючи ваги та функції у прихованих шарах, після чого порівнює отримані результати з бажаними. Помилки, що виникають, поширюються назад по мережі, коригуючи ваги для наступного запису. Цей процес повторюється багато разів, оскільки ваги постійно уточнюються в ході навчання.

Навчання мережі включає багаторазову обробку одного й того самого набору даних, адже ваги з'єднань постійно оновлюються. Кількість шарів і обробних елементів у кожному шарі є важливими параметрами, які визначають топологію мережі. Однак ці параметри є не тільки технічними, але й частково інтуїтивними рішеннями для проектувальників мереж.

Згодом сформувалося кілька основних правил для проектування нейронних мереж, які застосовують дослідники та інженери при розв'язанні своїх задач.

Перше правило. Зі збільшенням складності зв'язку між вхідними даними та бажаним результатом має збільшуватися кількість обробних елементів у прихованому шарі.

Друге правило. Якщо завдання можна поділити на кілька етапів, може бути доцільним додавати додатковий прихований шар. Якщо ж завдання не можна поділити, додаткові шари можуть призвести лише до запам'ятовування навчального набору, а не до генералізації.

Третє правило. Кількість доступних навчальних даних встановлює максимальну кількість обробних елементів у прихованому шарі. Для обчислення цієї межі потрібно кількість спостережень у навчальному наборі поділити на суму кількості вузлів у вхідному та вихідному шарах, а потім розділити отримане значення на коефіцієнт масштабування (від 5 до 10). Для даних з меншим рівнем шуму застосовуються більші коефіцієнти масштабування. Якщо занадто багато нейронів, навчальна мережа буде запам'ятовувати набір даних замість того, щоб узагальнювати, і це знизить її ефективність на нових наборах даних.

Нейронні мережі, завдяки своїй складності, здатні знаходити найкращу модель для прогнозування, яка дає точні результати для нових даних. Ми можемо оцінити якість моделі, переглянувши статистику і матриці помилок, однак ми не можемо однозначно визначити, чи є кращий предиктор. Для поліпшення прогнозування можна використовувати методи ансамблю, які об'єднують кілька слабких нейронних мереж, утворюючи більш точні і сильні моделі. Ці методи працюють шляхом створення декількох різних мереж, використовуючи різні зразки вихідних даних, і об'єднання їх результатів через голосування (для класифікації) або усереднення (для прогнозування).

При виконанні прогнозування була побудована архітектура мережі, яка враховує основні фактори, що впливають на прогнозування у високопродуктивних мережах з використанням Big Data. Архітектура цієї мережі зображена на рисунку 3.9.

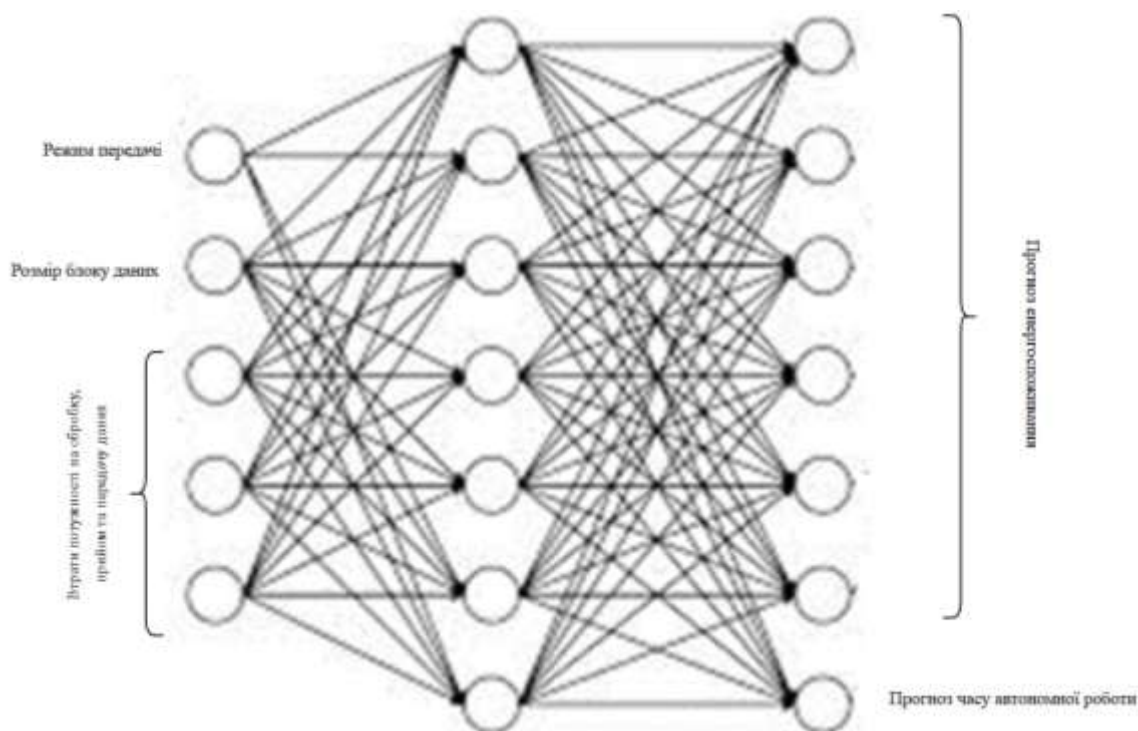


Рисунок 3.9 - Нейронна мережа для прогнозування енергоефективності

Навчання нейронної мережі для прогнозування енергоефективності здійснюється за допомогою наявних даних і експериментів, виконаних у

середовищі Matlab/Simulink. Для цього використовуються спеціальні функції, які опрацьовують вхідні дані та зчитують результати, включаючи вихідні й проміжні стани мережі.

Основні функції, що будуть задіяні в процесі навчання, описуються наступним чином:

$$[y_1, x_{f1}, x_{f2}] = \text{myNeuralNetworkFunction}(x_1, x_2, x_{i1}, x_{i2})$$

де: x_1 - матриця розміру $8 \times TS$, вхідні дані №1;
 x_2 - матриця розміру $1 \times TS$, вхідні дані №2;
 x_{i1} - матриця розміру 8×2 , початкові стани затримки для вхідних даних №1;
 x_{i2} - матриця розміру 1×2 , початкові стани затримки для вхідних даних №2.
 y_1 - матриця розміру $1 \times TS$, вихідне значення мережі;
 x_{f1} - матриця розміру 8×2 , кінцеві стани затримки для вхідних даних №1;
 x_{f2} - матриця розміру 1×2 , кінцеві стани затримки для вхідних даних №2;
 TS - це кількість timesteps (кроків часу), на яких проводиться обчислення.

Архітектура програмного забезпечення для цієї нейронної мережі представлена на рисунку 3.10.

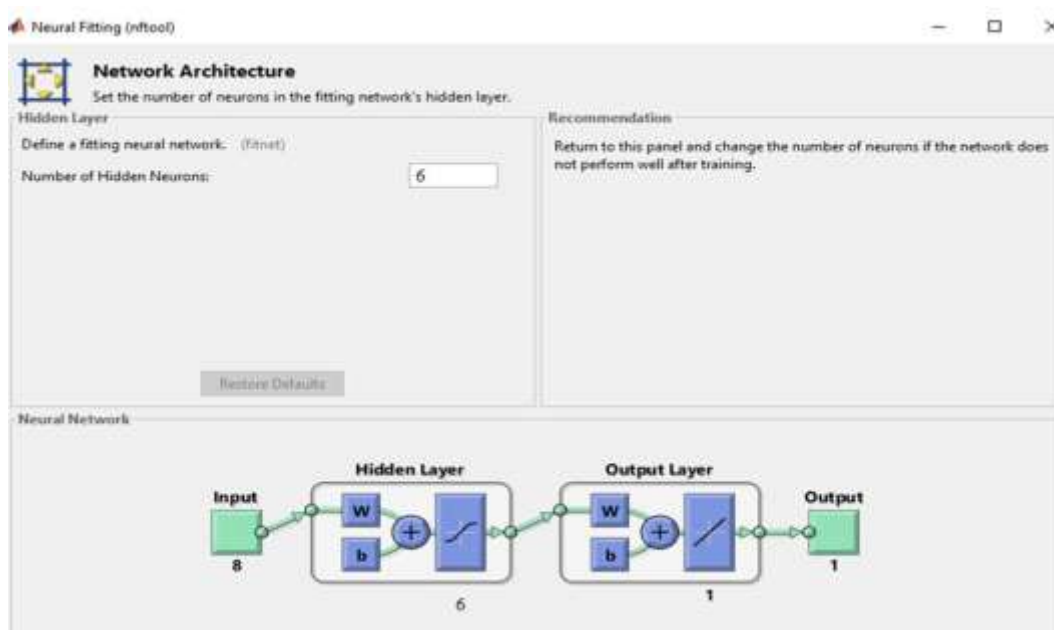


Рисунок 3.10 - Архітектура ПЗ

Діаграма класів представлена на рисунку 3.11.

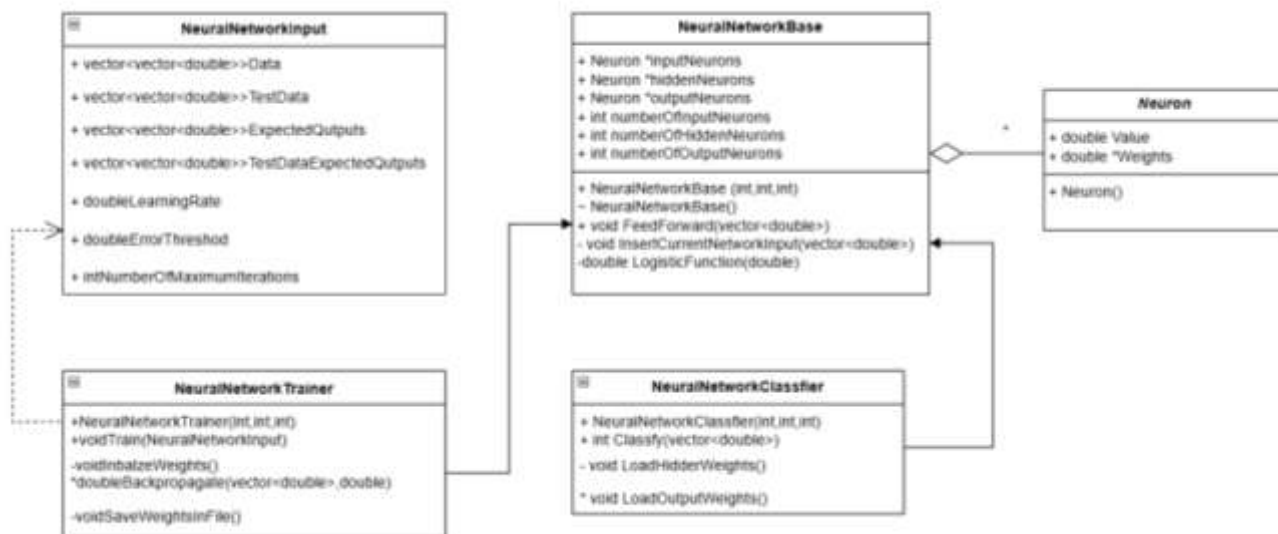


Рисунок 3.11 - Діаграма класів

Прогнозна модель представлена на рисунку 3.12.

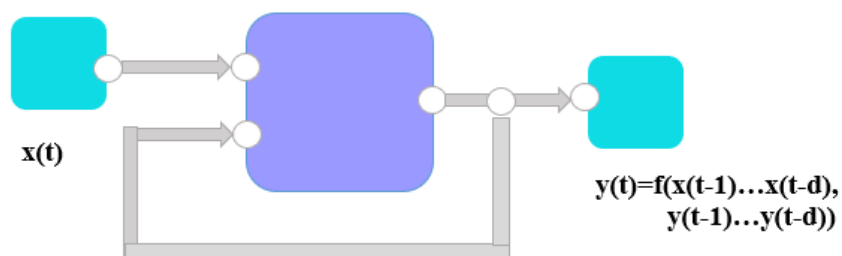


Рисунок 3.12 - Прогнозна модель енергоефективності

Симуляція програмного забезпечення зображена на рисунку 3.13.

Навчання НМ представлено на рисунку 3.14.

Надалі зробимо порівняння результатів, отриманих за допомогою аналітичного (розрахункового) методу та нейронної мережі для прогнозування часу роботи кінцевих пристроїв IoT в рамках високопродуктивної сенсорної мережі з використанням BigData

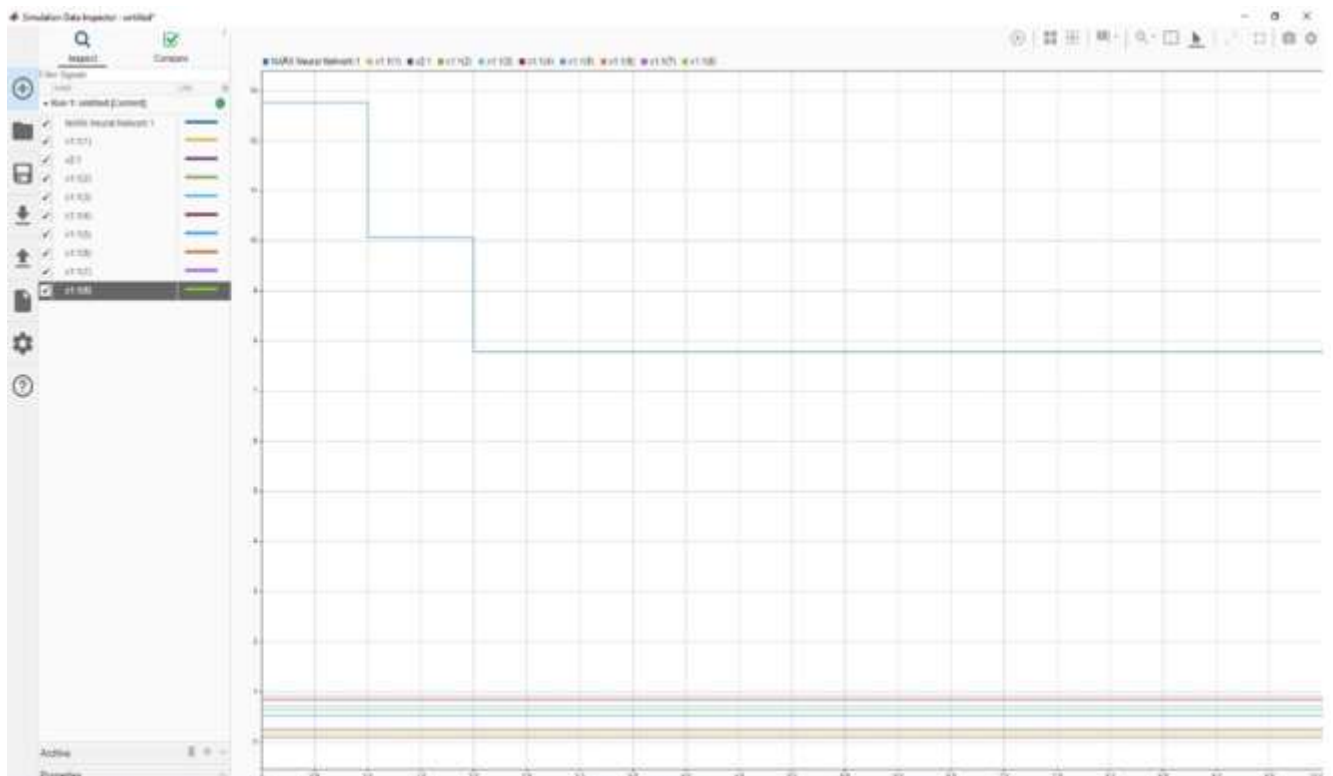


Рисунок 3.13 - Симуляція програмного забезпечення

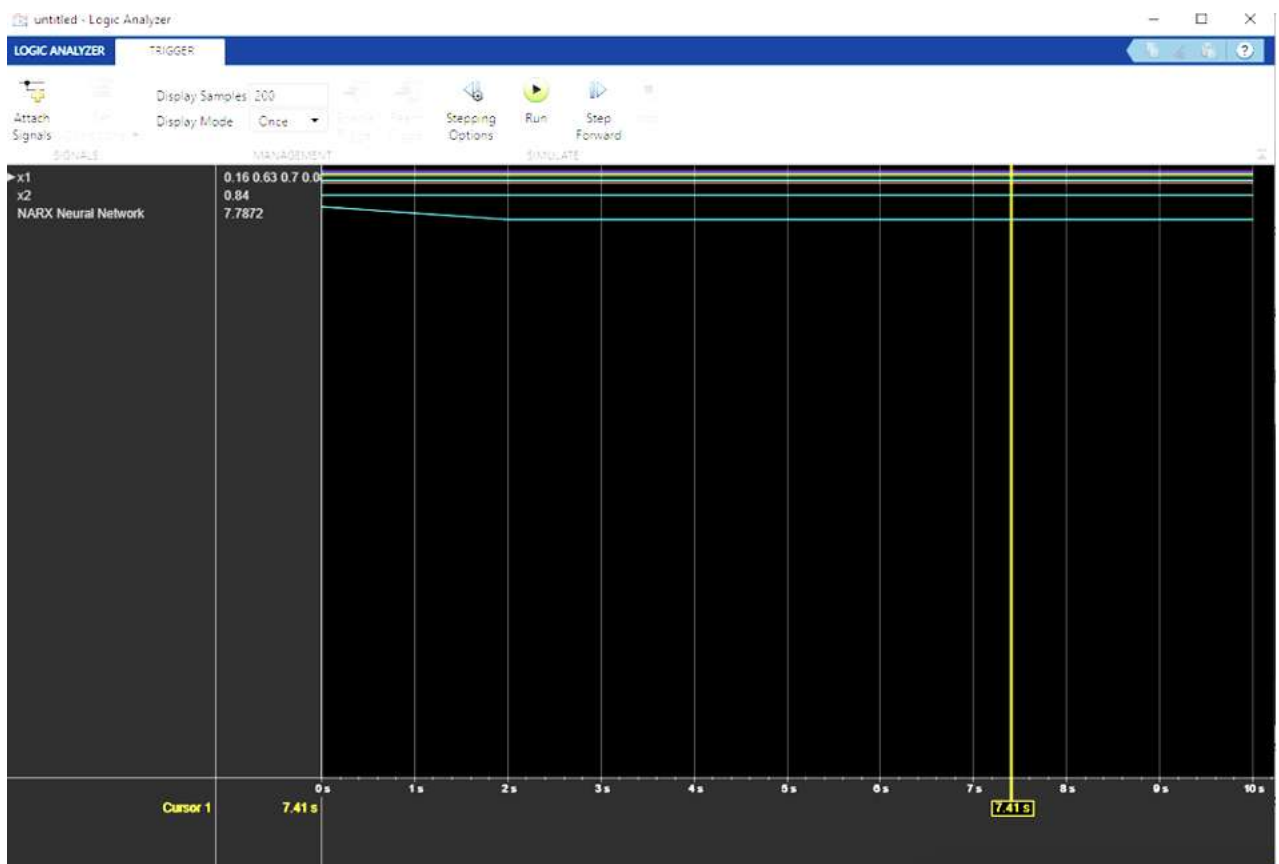


Рисунок 3.14 - Завершення навчання нейронної мережі

3.6 Аналіз результатів моделювання: порівняння методів

Порівняльна таблиця демонструє, що похибка не перевищує 5%, що свідчить про ефективність використання нейронних мереж для прогнозування часу роботи кінцевих пристроїв IoT. Крім того, запропоновану методику можна застосовувати для оцінки енергоефективності високопродуктивних сенсорних мереж із використанням Big Data (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 - Порівняльна характеристика результатів

Параметр	Число NB IoT 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	7458,3686
	150	7464,05	7460,4859
	200	7465,53	7451,3689
Час роботи пристроїв режимі IDLE, років	100	0,996	0,98891
	150	0,995	0,98997

Для досягнення оптимальної енергоефективності доцільно використовувати технологію NB-IoT у високопродуктивних сенсорних мережах на основі Big Data. Алгоритм, наведений у роботі, є ефективним для розрахунку параметрів кінцевих пристроїв

ВИСНОВКИ

Мета роботи, яка полягала в розробці методу побудови IoT-рішення для високопродуктивних сенсорних мереж з використанням технологій Big Data та дослідженні енергетичної ефективності, була досягнута. Розроблено структурну схему ефективного IoT-рішення, а також методику розрахунку енергоефективності за допомогою нейронних мереж, яку можна застосувати при створенні високопродуктивних сенсорних мереж. Верхня та нижня межі ціни на товар чи послугу складають 3,0 млн – 3,8 млн грн.

У першому розділі роботи встановлено, що сфера використання IoT швидко зростає. Інтернет речей являє собою систему взаємопов'язаних обчислювальних пристроїв, механічних та цифрових машин, об'єктів, тварин чи людей, яким присвоєно унікальні ідентифікатори та які мають можливість передавати дані через мережу без потреби взаємодії людини з людиною. Екосистема складається з інтелектуальних пристроїв, підключених до Інтернету, що використовують вбудовані системи, такі як процесори, датчики і комунікаційне обладнання для збору, передачі та обробки даних. Пристрої обмінюються даними датчиків через підключення до шлюзів або інших пристроїв, що передають ці дані в хмару для подальшого аналізу.

У другому розділі зазначено, що компанії можуть отримати вигоду з аналізу великих обсягів даних Інтернету речей і управління ними, що дозволяє краще розуміти вплив цих даних на бізнес. Це сприяє прийняттю більш ефективних і обґрунтованих рішень. Кожен сегмент бізнесу та галузі може отримати певні переваги від цього аналізу.

У третьому розділі розроблено структурну схему рішення та алгоритм розрахунку енергоефективності системи. Визначено основні причини затримок при встановленні з'єднання, зокрема обмеженість послідовностей преамбул. Проведено чисельний аналіз затримок і ймовірностей виникнення колізій, на основі чого запропоновано модель для розрахунку енергоспоживання кінцевих

пристроїв стандарту IoT. Запропонована модель дозволяє прогнозувати орієнтовний час роботи кінцевого пристрою в заданому режимі, а також порівнювати автономний режим роботи пристрою з використанням режиму PSM і без нього. Результати порівняння показали суттєве збільшення часу автономної роботи кінцевого пристрою при використанні режиму PSM. Алгоритм, наведений у роботі, є ефективним для розрахунку параметрів кінцевих пристроїв.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Tripathy B., Anuradha J. Internet of Things (IoT): TeChnologies, AppliCations, Challenges and Solutions. Florida : CRC Press, 2017. 334 p.
2. Agus Kurniawan. Smart Internet of Things Projects. 2016 .258 p.
3. Göransson P. Software Defined Networks. A comprehensive approach. 2015. 326 p.
4. Rebecca Lee Hammons, Ronald J. Kovac. Fundamentals of Internet of Things for Non-Engineers. Taylor & Francis. 2019. 430 p.
5. Бутко М.П. Системний підхід і моделювання в наукових дослідженнях. Центр навчальної літератури (ЦНЛ). 2019. 360 с.
6. Мирошниченко В. О. Використання сучасних інформаційних технологій: формування мультимедійної компетентності. Центр навчальної літератури (ЦНЛ). 2022. 296 с.
7. Джермен Галегуа. Розумні міста. ArtHuss. 2021. 192 с.
8. D. Rawat, J. Rodrigues, I. Stojmenovic. Analysis and Design of Cyber-Physical Systems. A Hybrid Control Systems Approach. CRC Press. 2016.
9. Сонячне майбутнє — як дороги Solar Roadways змінюють світову енергетику. URL: <https://www.imena.ua/blog/solar-roads-to-the-future/> (дата звернення 18.10.2024)..
10. Smart communication services. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/enerhetyka/avtomatizatsiya-intelektualni-merezhi/intelektualni-enerhomerezhi.html> (Last accessed: 01.10.2024).
11. James D. McCalley Khaitan. Design Techniques and Application of CyberPhysical Systems: A Survey. IEEE Systems Journal. 2014. P. 350-365.
12. Галелюка І.Б. Моделювання бездротових сенсорних мереж /І.Б. Галелюка. Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2015. № 14. С. 141 – 150.
13. Корабейникова Т.І. Організація архітектури системи іот в протокольному стекові /Корабейникова Т.І., Іськович Т.В. Міжнародний науковий

журнал «Грааль науки». 2023. № 27. С. 341-346.

14. Hu F. Security and Privacy in Internet of Things (IoTs) Models, Algorithms, and Implementations. CRC Press. 2016. 137 p.

15. Fantana G. I., Oae S. A. Evolution of Smart Building, Proceeding of the 2018 International Conference on Environment, Energy, Ecosystems and Development, 2018. P. 146-152.

16. LoRa технологія URL: <https://itmaster.biz.ua/directory/standarts/lora.html> (дата звернення 11.11.2024).

17. Архітектура мережі LoRaWAN URL: <https://ua.reallin.net/related-products/lora-system/lorawan-network-architecture.html> (дата звернення 29.10.2024).

18. Технологія SIGFOX URL: <https://sigfox.ua/technology/> (дата звернення 17.11.2024).

19. Kirichek R., Kulik V. Long-Range Data Transmission on Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN) by Using LPWAN Protocols. Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 678. P. 442–453.

20. Oussous, A.; Benjelloun, F. Big Data Technologies: Saud Univ. Comput. Inf. Sci. 2018. P. 431–448.

21. Жураковський Б. Ю., Федорова Н. В., Гаврилко Є. В. Технології створення інтернету речей. 2021. 127 с.

22. Дрозд О.В., Маєвський Д.А., Маєвська О.Ю., Мартинюк О.М., Табунщик Г.В. Моделювання систем інтернету речей. 2019. 130 с.

23. Gao Y., McCluskey P. Security and Privacy in Internet of Things (IoTs). Wiley. 2019.

24. Faruqui A, Sergici S, Sharif A. The impact of informational feedback on energy consumption - a survey of the experimental evidence. 2021. 1598 –1608 pp.

25. Жураковський Б. Ю., Зенів І.О.. Технології інтернету речей: навчальний посібник. Київ: 2021, 271 с.