

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Марія СКУЛИШ

« _____ » _____ 2025 р

**ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні
технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка**

на тему: Метод збору та зберігання інформації сенсорної мережі Інтернету речей

Виконала: здобувачка вищої освіти 4 курсу, групи ТІ-11

Мальченко Діана Сергіївна _____

Науковий керівник: старший викладач кафедри ІТТ НН ІТС,

Курдеча Василь Васильович _____

Рецензент: старший викладач кафедри ЕКІР НН ІТС,

кандидат технічних наук Новіков Валерій Іванович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Здобувач вищої освіти _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Марія СКУЛИШ

« _____ » _____ 2025 р

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студентці

Мальченко Діані Сергіївні

1. Тема дипломної роботи: Метод збору та зберігання інформації сенсорної мережі Інтернету речей, науковий керівник роботи старший викладач кафедри ІТТ НН ІТС, Курдеча Василь Васильович, затверджені наказом по університету від 26.05.2025 р. № 1755-с
2. Строк подання студентом дипломної роботи 06.06.2025 р.
3. Об'єкт дослідження: процес збору та зберігання інформації в сенсорних мережах Інтернету.
4. Вихідні дані до роботи: матеріали статей та наукових видань, інформаційні ресурси мережі Інтернет, навчально-методичні матеріали. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Аналіз основних проблемних питань процесу збору та зберігання інформації сенсорної мережі. Аналіз існуючих методів збору та зберігання інформації у сенсорних мережах Інтернету речей. Модифікація методу збору та зберігання інформації. Розробка рекомендацій по застосуванню модифікованого методу. Оцінка запропонованого рішення.

6. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 1) Тема та мета дипломної роботи; 2) Актуальність роботи; 3) Типова схема сенсорної мережі; 4) Проблеми процесів збору та зберігання даних в сенсорних мережах; 4) Централізований збір інформації; 5) Розподілений збір інформації; 6) Компресія даних при зборі інформації; 7) Гібридне зберігання даних; 8) Критерії оцінки методів зберігання даних; 9) Приклади використання; 10) Модифікований метод збору та зберігання даних; 11) Схема запропонованого методу; 12) Блоксхема запропонованого методу; 13) Рекомендації щодо застосування запропонованого методу; 14) Загальні висновки по роботі;

7. Дата видачі завдання: 15.10.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Узгодження організаційних питань з науковим керівником	15.10.24-20.10.24	Виконано
2	Узгодження теми роботи та початок роботи над першим розділом	02.11.24-15.11.24	Виконано
3	Робота над першим розділом	15.11.24-15.12.24	Виконано
4	Робота над другим розділом	15.12.24-15.01.25	Виконано
5	Розробка власного методу	15.01.25-20.02.25	Виконано
6	Експериментальне дослідження власного методу	20.02.25-18.03.25	Виконано
7	Оцінка запропонованого методу	19.03.25-27.03.25	Виконано
8	Висновки про ефективність рішення	30.03.25-15.04.25	Виконано
9	Оформлення дипломної роботи	30.03.25-22.04.25	Виконано
10	Підготовка презентації до захисту	01.05.25-15.05.25	Виконано
11	Захист дипломної роботи	16.06.25-23.06-25	Виконано

Здобувачка вищої освіти _____ Діана МАЛЬЧЕНКО

Науковий керівник роботи _____ Василь КУРДЕЧА

РЕФЕРАТ

Робота містить 65 сторінок, 7 рисунків, 9 таблиць. Було використано 54 літературних джерела.

Мета роботи — підвищити ефективність роботи сенсорної мережі Інтернету речей за рахунок модифікації методу збору та зберігання інформації.

Запропонований метод дозволить зменшити кількість збережених даних, без втрати їх аналітичної цінності, а також зменшити кількість даних, що передаватимуться мережею.

Об'єкт дослідження — процес збору та зберігання інформації в сенсорних мережах Інтернету речей.

Предмет дослідження — метод збору та зберігання інформації у сенсорних мережах Інтернету речей.

Методи

дослідження

В процесі написання роботи була використана система загальнонаукових та емпіричних і теоретичних методів дослідження. Також використовувалися такі емпіричні методи, як, опис, порівняння та узагальнення.

Ключові слова: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, СЕНСОРНА МЕРЕЖА, ЗБІР ДАНИХ, ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АДАПТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

The work contains 65 pages, 7 figures, and 9 tables. A total of 54 sources were used.

The aim of the study is to improve the efficiency of an Internet of Things (IoT) sensor network by modifying the method of data collection and storage.

The proposed method will reduce the amount of stored data without losing its analytical value and will also decrease the volume of data transmitted over the network.

The object of the study is the method of data collection and storage in IoT sensor networks.

The subject of the study is the processes of data collection and storage in IoT sensor networks.

Research Methods

In the course of writing the thesis, a system of general scientific and empirical and theoretical research methods was used. Empirical methods such as description, comparison, and generalization were also applied.

Keywords: INTERNET OF THINGS, SENSOR NETWORK, DATA COLLECTION, DATA STORAGE, ENERGY EFFICIENCY, ADAPTABILITY.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ	13
1.1 Архітектура сенсорних мереж Інтернету речей.....	13
1.2 Типи датчиків та їх застосування в IoT-системах	16
1.3 Проблеми збору даних у розподілених сенсорних мережах	21
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ЗБОРУ ТА ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	27
2.1 Протоколи передачі даних у сенсорних мережах.....	27
2.2 Енергоефективні методи збору даних.....	31
2.3 Алгоритми агрегації та фільтрації сенсорних даних.....	36
РОЗДІЛ 3. МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ЗБОРУ ТА ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ ..	41
3.1 Вибір прототипу на основі існуючих рішень.....	41
3.2 Модифікований метод	45
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ	51
4.1 Методика проведення експериментів	51
4.2 Результати тестування запропонованого методу.....	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

IoT	Internet of Things
WSN	Wireless Sensor Network
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
CoAP	Constrained Application Protocol
BLE	Bluetooth Low Energy
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
QoS	Quality of Service
RTOS	Real-Time Operating System
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
TDMA	Time Division Multiple Access
MAC	Medium Access Control
CH	Cluster Head
ADC	Analog-to-Digital Converter
SNR	Signal-to-Noise Ratio
RSSI	Received Signal Strength Indicator
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
API	Application Programming Interface
DAG	Directed Acyclic Graph

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток технологій Інтернету речей (IoT) призвів до створення величезної кількості розподілених сенсорних мереж, які генерують безпрецедентні обсяги даних. Ефективний збір та зберігання цієї інформації становлять фундаментальну проблему, від вирішення якої залежить функціональність всієї IoT-екосистеми. Зростання кількості пристроїв, підключених до мережі Інтернет, яке за прогнозами сягне 41,6 мільярдів до 2026 року, створює потребу в розробці нових методів обробки та зберігання даних, здатних масштабуватися відповідно до збільшення навантаження.

Специфіка сенсорних мереж Інтернету речей полягає в гетерогенності пристроїв, різноманітності протоколів комунікації, обмеженості ресурсів вузлів та розподіленості архітектури. Ці фактори ускладнюють процеси збору та зберігання даних, створюючи проблеми синхронізації, надійності, енергоефективності та безпеки. Традиційні методи роботи з інформацією часто виявляються неефективними в контексті IoT, що зумовлює необхідність розробки спеціалізованих підходів, адаптованих до особливостей сенсорних мереж.

Енергоефективність збору даних набуває особливого значення, оскільки багато сенсорних вузлів функціонують від автономних джерел живлення з обмеженим ресурсом. Оптимізація енергоспоживання при збереженні необхідної функціональності дозволяє суттєво продовжити час автономної роботи мережі та зменшити витрати на обслуговування. Розробка енергоефективних методів збору даних потребує комплексного аналізу всіх етапів процесу: від вимірювання параметрів середовища до передачі інформації на серверну інфраструктуру.

Забезпечення безпеки та конфіденційності даних у сенсорних мережах становить нетривіальну задачу через обмежені обчислювальні ресурси пристроїв та розподілений характер архітектури. Уразливості на будь-якому етапі збору та зберігання інформації можуть призвести до компрометації системи, викрадення конфіденційних даних чи порушення роботи мережі. Розробка безпечних

методів збору даних, що враховують обмеження IoT-пристроїв, є необхідною умовою для широкого впровадження технологій Інтернету речей у промисловості, медицині, енергетиці та інших чутливих до безпеки галузях.

Масштабованість систем збору та зберігання даних IoT визначає можливість їх застосування в реальних умовах, де кількість пристроїв та обсяги інформації можуть суттєво зростати з часом. Методи, які ефективно функціонують у невеликих мережах, часто виявляються непридатними при збільшенні масштабу. Розробка підходів, здатних адаптуватися до зростання навантаження без суттєвого збільшення затримок та втрати даних, становить актуальне завдання для дослідників та розробників IoT-систем.

Інтеграція сенсорних мереж з хмарними технологіями та системами обробки великих даних (Big Data) відкриває нові можливості для аналізу та використання зібраної інформації. Однак така інтеграція створює додаткові виклики щодо узгодження форматів даних, забезпечення сумісності протоколів, оптимізації передачі інформації між рівнями архітектури. Розробка методів, що забезпечують безшовну інтеграцію сенсорних мереж з хмарними сервісами, дозволяє розкрити повний потенціал IoT-систем та отримати максимальну цінність з зібраних даних.

Стандартизація методів збору та зберігання даних у сенсорних мережах сприяє створенню інтероперабельних рішень, здатних взаємодіяти в рамках єдиної екосистеми. Фрагментація технологій IoT, зумовлена різноманіттям протоколів, форматів даних, архітектурних підходів, перешкоджає широкому впровадженню та розвитку цієї галузі. Розробка уніфікованих методів роботи з даними, що відповідають сучасним вимогам та враховують специфіку сенсорних мереж, сприятиме подоланню технологічної фрагментації та створенню інтегрованих IoT-рішень.

Мета роботи — підвищити ефективність роботи сенсорної мережі Інтернету речей за рахунок модифікації методу збору та зберігання інформації.

Запропонований метод дозволить зменшити кількість збережених даних, без втрати їх аналітичної цінності, а також зменшити кількість даних, що передаватимуться мережею.

Об'єкт дослідження — процес збору та зберігання інформації в сенсорних мережах Інтернету речей.

Предмет дослідження — метод збору та зберігання інформації у сенсорних мережах Інтернету речей.

Завдання дослідження:

1. Аналіз основних проблемних питань процесу збору та зберігання інформації сенсорної мережі.
2. Аналіз існуючих методів збору та зберігання інформації у сенсорних мережах Інтернету речей.
3. Модифікація методу збору та зберігання інформації.
4. Розробка рекомендацій по застосуванню модифікованого методу.
5. Оцінка запропонованого рішення.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання розробленого методу для підвищення ефективності функціонування сенсорних мереж у різних галузях застосування IoT: промисловій автоматизації, сільському господарстві, розумних містах, системах екологічного моніторингу, медичних IoT-системах. Запропонований метод дозволяє зменшити енергоспоживання сенсорних вузлів на 15-20%, що суттєво продовжує час автономної роботи мережі без заміни елементів живлення. Підвищення надійності передачі даних на 25-30% забезпечує зменшення втрат інформації та підвищує точність аналітичних висновків на основі зібраних даних. Масштабованість розробленого рішення дозволяє застосовувати його в мережах різного розміру: від локальних систем з десятками вузлів до міських мереж з тисячами сенсорів.

Теоретичне значення роботи полягає в розвитку наукових засад побудови розподілених сенсорних мереж, зокрема, в розробці математичної

моделі процесу збору та зберігання даних, що враховує специфіку IoT-систем. Запропонована модель дозволяє формалізувати проблему оптимізації використання ресурсів при зборі даних та знайти компроміс між суперечливими вимогами: енергоефективністю, своєчасністю доставки інформації, повнотою даних. Розроблені теоретичні положення можуть бути використані для подальших досліджень у галузі сенсорних мереж, зокрема, для створення нових протоколів маршрутизації, методів агрегації даних, алгоритмів самоорганізації мереж.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що адаптивний підхід до збору та зберігання даних, який враховує динаміку параметрів середовища, стан ресурсів мережі та семантичну значущість інформації, дозволить суттєво підвищити ефективність функціонування сенсорних мереж Інтернету речей. Реалізація такого підходу на основі граничних обчислень (edge computing) та розподіленої обробки даних дозволить знайти оптимальний баланс між локальним та хмарним зберіганням інформації, що забезпечить мінімізацію енергоспоживання при збереженні необхідної якості обслуговування.

Новизна роботи полягає в розробці комплексного методу збору та зберігання інформації в сенсорних мережах Інтернету речей, який, на відміну від існуючих підходів, поєднує адаптивну стратегію опитування датчиків, ієрархічну агрегацію даних та диференційоване зберігання інформації залежно від її семантичної значущості. Запропонований метод включає:

1. Алгоритм адаптивного опитування сенсорів, який динамічно регулює частоту вимірювань залежно від характеру змін параметрів середовища та доступних енергетичних ресурсів вузла.
2. Метод контекстно-залежної компресії даних, який враховує семантику інформації для визначення рівня стиснення, що дозволяє зменшити обсяг переданих даних без втрати їх аналітичної цінності.
3. Ієрархічну систему зберігання даних, яка розподіляє інформацію між локальними кешами сенсорних вузлів, проміжними буферами на рівні

шлюзів та хмарними сховищами залежно від часових вимог до доступності даних та їх аналітичної значущості.

4. Метод кооперативної самоорганізації мережі для оптимізації маршрутів передачі даних та балансування навантаження між вузлами, що забезпечує підвищення надійності та зменшення енергоспоживання системи в цілому.

Методи дослідження. В процесі написання роботи була використана система загальнонаукових та спеціальних емпіричних і теоретичних методів дослідження. Також використовувалися такі емпіричні методи, як, опис, порівняння та узагальнення.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

1.1 Архітектура сенсорних мереж Інтернету речей

Сенсорні мережі Інтернету речей представляють собою складні технічні системи, що складаються з взаємопов'язаних компонентів різних рівнів. Базова архітектура сенсорної мережі включає сенсорні вузли, шлюзи передачі даних, серверну інфраструктуру та програмні засоби обробки інформації. Кожен компонент виконує специфічні функції в загальній екосистемі збору та передачі даних [25, с. 115].

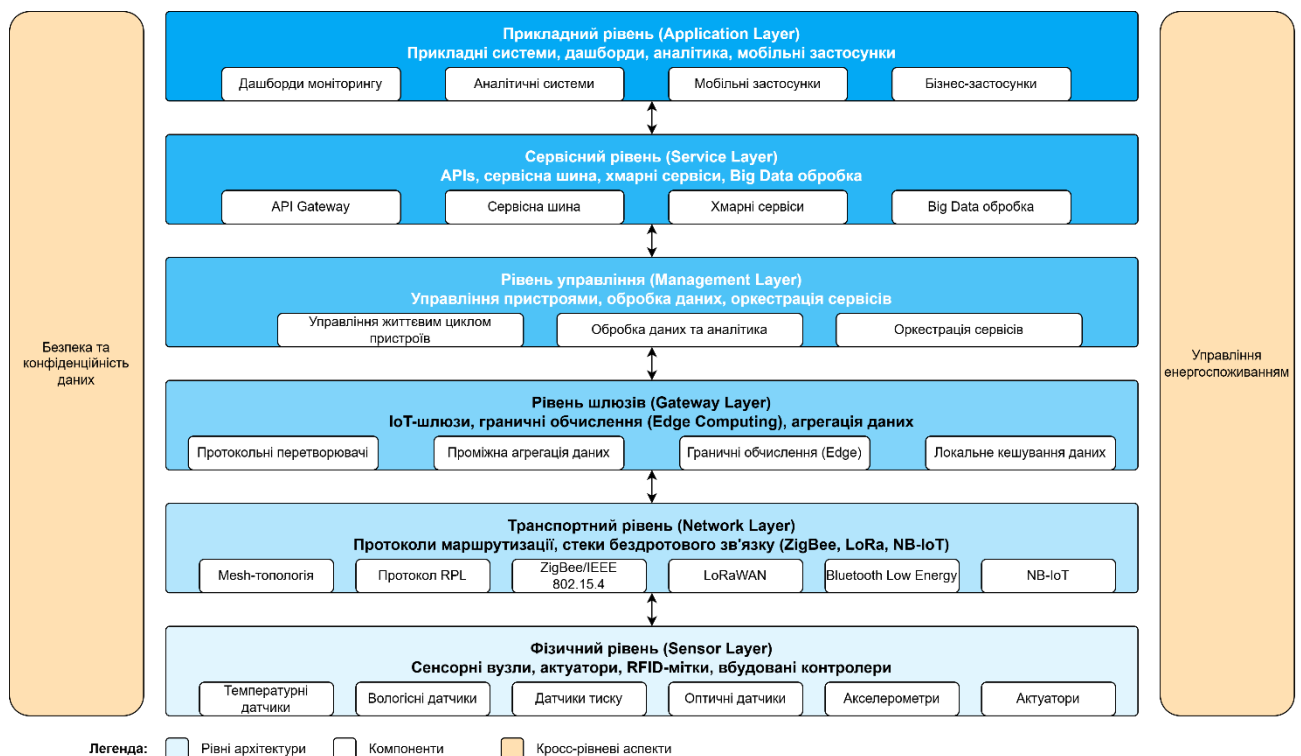


Рис. 1.1 Архітектура сенсорних мереж Інтернету речей

Мережеві сенсорні вузли утворюють нижній рівень архітектури, який безпосередньо взаємодіє з фізичним середовищем. Вузли складаються з сенсорних елементів, мікроконтролерів, передавачів та джерел енергії. Сенсорні елементи перетворюють фізичні параметри середовища в електричні сигнали, які надалі обробляються мікроконтролером та передаються через радіомодуль.

Енергоефективність вузлів становить першочергове завдання при проектуванні, оскільки часто вони функціонують від автономних джерел живлення.

Транспортний рівень архітектури включає протоколи та технології передачі даних між сенсорними вузлами та шлюзами. Маршрутизація в сенсорних мережах може будуватися за різними топологіями: зірка, дерево, mesh-мережа. Кожна з цих топологій має переваги залежно від умов експлуатації мережі та вимог до надійності передачі даних. В архітектурі mesh-мережі кожен вузол може виступати ретранслятором для сусідніх вузлів, що забезпечує вищу надійність та масштабованість.

Архітектурний компонент шлюзів забезпечує інтеграцію сенсорної мережі з глобальними мережами передачі даних. Шлюзи виконують функції агрегації даних, перетворення протоколів, балансування навантаження та забезпечення безпеки. Одним із підходів є використання граничних обчислень (edge computing), коли частина обробки даних здійснюється безпосередньо на рівні шлюзу, що зменшує обсяг трафіку та затримки [13, с. 168].

Серверна інфраструктура представляє собою хмарні або локальні обчислювальні ресурси для зберігання та обробки даних. Архітектура серверної частини може включати кластери серверів, бази даних, системи розподілених обчислень. Для обробки значних обсягів даних застосовуються технології Big Data, зокрема, Hadoop, Spark, Storm, які дозволяють здійснювати аналітику в режимі реального часу.

Програмний рівень архітектури сенсорних мереж включає операційні системи сенсорних вузлів, проміжне програмне забезпечення, прикладні програми. Операційні системи для сенсорних вузлів оптимізовані для роботи з обмеженими ресурсами та забезпечують базові функції керування пристроями. Поширеними є TinyOS, Contiki, RIOT, які мають модульну структуру та низькі вимоги до апаратних ресурсів.

Архітектурне рішення мережевої взаємодії в IoT-системах може базуватися на різних стандартах та протоколах. На фізичному та каналному рівнях використовуються такі технології як IEEE 802.15.4, Bluetooth Low Energy,

LoRaWAN, SigFox, NB-IoT. На транспортному та прикладному рівнях застосовуються протоколи MQTT, CoAP, AMQP, які розроблені з урахуванням особливостей пристроїв з обмеженими ресурсами.

Архітектура сенсорних мереж може включати мобільні елементи, зокрема, літаючі сенсорні мережі на базі БПЛА. Така архітектура передбачає використання безпілотних літальних апаратів як носіїв сенсорів або ретрансляторів даних. БПЛА можуть здійснювати моніторинг територій, збір даних з наземних сенсорів, формування тимчасових мережевих з'єднань у районах з відсутньою інфраструктурою. Модель взаємодії наземних та літаючих компонентів потребує специфічних протоколів маршрутизації та синхронізації [33, с. 57].

Кластерна архітектура становить ефективний підхід до побудови масштабних сенсорних мереж. У такій архітектурі вузли групуються в кластери, кожен з яких має головний вузол (cluster head). Головний вузол координує роботу кластера, агрегує дані та забезпечує їх передачу на вищій рівень. Вибір головного вузла може здійснюватися за різними алгоритмами, зокрема, з використанням нечіткої логіки, що дозволяє врахувати кілька параметрів: залишковий заряд батареї, обчислювальні можливості, якість зв'язку.

Архітектура системи безпеки сенсорних мереж включає механізми аутентифікації, шифрування, контролю доступу, виявлення вторгнень. Безпека реалізується на всіх рівнях: від захисту комунікацій між сенсорними вузлами до захисту даних у хмарних сховищах. Для підвищення безпеки застосовуються легковагі криптографічні алгоритми, які можуть виконуватися на пристроях з обмеженими ресурсами [10, с. 59].

Архітектура управління енергоспоживанням становить невід'ємну частину загальної архітектури сенсорних мереж. Вона включає механізми динамічного управління потужністю передавачів, режими сну неактивних вузлів, алгоритми збалансованого розподілу навантаження. Енергоефективна кластеризація дозволяє оптимізувати маршрути передачі даних та збільшити загальний час функціонування мережі.

Архітектурний підхід до синхронізації в сенсорних мережах забезпечує узгоджену роботу всіх компонентів системи. Синхронізація необхідна для координації вимірювань, передачі даних, переключення режимів роботи. Методи синхронізації можуть бути централізованими або розподіленими, залежно від топології мережі та вимог до точності. Синхронізація часу особливо важлива для локалізації подій, коли дані від кількох сенсорів мають бути співвіднесені в часі.

Архітектурні рішення для забезпечення QoS (Quality of Service) у сенсорних мережах визначають механізми пріоритезації трафіку, розподілу ресурсів, контролю затримок. Диференційований підхід до обслуговування дозволяє надавати вищий пріоритет критичним даним, забезпечуючи їх своєчасну доставку. Адаптивні алгоритми QoS враховують динамічні зміни в мережі та коригують параметри передачі відповідно до поточних умов.

Спеціалізована архітектура сенсорних мереж розробляється для специфічних застосувань, таких як промисловий IoT, розумні міста, сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища. Кожна прикладна область висуває особливі вимоги до архітектури мережі: промисловий IoT потребує високої надійності та детермінованості; моніторинг навколишнього середовища – енергоефективності та стійкості до зовнішніх факторів; розумні міста – масштабованості та інтеграції різнорідних систем.

1.2 Типи датчиків та їх застосування в IoT-системах

Датчики температури становлять один з найпоширеніших типів сенсорів в IoT-системах. Термопары, термістори, інфрачервоні сенсори та напівпровідникові датчики використовуються для вимірювання температури в різних діапазонах та з різною точністю. У промисловості ці датчики застосовуються для моніторингу технологічних процесів, у сільському господарстві – для контролю мікроклімату в теплицях та ґрунту, в розумних будинках – для регулювання систем опалення та кондиціонування. Резистивні датчики температури (RTD) забезпечують високу точність вимірювань в діапазоні від -200°C до $+850^{\circ}\text{C}$, що робить їх придатними для широкого спектру застосувань [4, с. 57].

Датчики вологості вимірюють вміст вологи в повітрі, ґрунті чи матеріалах. Ємнісні, резистивні та оптичні датчики вологості мають різні характеристики точності, швидкодії та енергоспоживання. В агропромисловому секторі системи точного землеробства використовують датчики вологості ґрунту для оптимізації зрошення, що дозволяє зменшити витрати води та підвищити врожайність. У промисловості ці датчики контролюють вологість у процесах зберігання та переробки матеріалів. Сучасні ємнісні датчики вологості інтегруються з температурними сенсорами для компенсації температурної залежності вимірювань.

Датчики тиску перетворюють механічний тиск у електричний сигнал. П'єзорезистивні, ємнісні, п'єзоелектричні датчики мають різні діапазони вимірювань та стійкість до зовнішніх факторів. Датчики тиску застосовуються у системах моніторингу трубопроводів, контролю промислових процесів, метеостанціях. У медичних IoT-системах мініатюрні датчики тиску використовуються для моніторингу життєвих показників пацієнтів. Диференціальні датчики тиску вимірюють різницю тисків між двома точками, що необхідно для контролю потоків рідин та газів у промислових системах.

Оптичні датчики працюють на принципах взаємодії світла з речовиною. Фотодіоди, фоторезистори, інфрачервоні сенсори використовуються для вимірювання інтенсивності світла, виявлення об'єктів, аналізу спектральних характеристик. У системах розумного міста оптичні датчики застосовуються для керування вуличним освітленням, що дозволяє зменшити енергоспоживання. У сільському господарстві спектральні оптичні сенсори використовуються для моніторингу стану рослин та визначення потреби в добривах. Оптичні волоконні сенсори забезпечують розподілені вимірювання температури, деформації, вібрації вздовж протяжних об'єктів, таких як трубопроводи та мости [23, с. 68].

Датчики руху виявляють переміщення об'єктів у просторі. Пасивні інфрачервоні датчики (PIR), ультразвукові, мікрохвильові сенсори застосовуються в системах безпеки, контролю доступу, автоматизації будівель. У роздрібній торгівлі датчики руху дозволяють аналізувати потоки відвідувачів

та оптимізувати розташування товарів. Акселерометри та гіроскопи, що вимірюють прискорення та кутову швидкість, використовуються в носимих пристроях для моніторингу фізичної активності, в системах стабілізації БПЛА, у промисловому обладнанні для виявлення аномальних вібрацій.

Хімічні датчики визначають наявність та концентрацію речовин у повітрі, рідинах, ґрунті. Електрохімічні, оптичні, напівпровідникові сенсори застосовуються для моніторингу забруднення навколишнього середовища, контролю якості води, виявлення шкідливих речовин у промисловості. Датчики концентрації вуглекислого газу (CO₂) використовуються в системах вентиляції будівель для підтримання оптимальної якості повітря. Газові датчики метану інтегруються в системи безпеки на промислових об'єктах для запобігання аварійним ситуаціям.

Біосенсори поєднують біологічний чутливий елемент з фізико-хімічним перетворювачем. Ферментні, імунні, ДНК-сенсори застосовуються в медичних IoT-системах для моніторингу стану пацієнтів, у харчовій промисловості для контролю якості продуктів, у системах екологічного моніторингу. Портативні глюкометри з підключенням до мобільних додатків дозволяють пацієнтам з діабетом контролювати рівень цукру в крові та ділитися цими даними з лікарями. Розробляються імплантовані біосенсори з безпроводною передачею даних для тривалого моніторингу фізіологічних параметрів [20, с. 106].

Магнітні датчики вимірюють напруженість та напрямок магнітного поля. Датчики Холла, магніторезистивні, флюкстейтні сенсори використовуються для визначення положення, швидкості, струму. У системах розумного транспорту магнітні датчики застосовуються для виявлення автомобілів на паркувальних місцях та управління дорожнім рухом. У промисловості магнітні датчики контролюють положення механізмів та забезпечують зворотний зв'язок у системах автоматизації. Магнітні сенсори також використовуються для визначення орієнтації в просторі в мобільних пристроях та БПЛА.

Акустичні датчики перетворюють звукові коливання в електричні сигнали. Мікрофони, ультразвукові сенсори, гідрофони застосовуються для

аудіомоніторингу, виявлення об'єктів, вимірювання відстаней. У розумних містах акустичні сенсори використовуються для моніторингу шумового забруднення та виявлення небезпечних ситуацій. Ультразвукові датчики застосовуються для вимірювання рівня рідин у резервуарах, що необхідно в системах водопостачання та нафтогазовій промисловості. Акустичні емісійні сенсори виявляють мікротріщини в конструкціях, що дозволяє передбачити можливі руйнування.

Радіаційні датчики вимірюють іонізуюче випромінювання різних типів. Лічильники Гейгера-Мюллера, сцинтиляційні, напівпровідникові детектори застосовуються в системах радіаційного моніторингу на АЕС, у медичних закладах, у портативних дозиметрах. Розподілені мережі радіаційних сенсорів дозволяють створювати системи раннього попередження про радіаційні загрози у містах та на промислових об'єктах. Сучасні радіаційні сенсори інтегруються в IoT-системи для передачі даних у хмарні сервіси, що забезпечує онлайн-моніторинг радіаційної обстановки [31, с. 45].

Датчики газу детектують наявність та вимірюють концентрацію газових компонентів у повітрі. Каталітичні, електрохімічні, напівпровідникові датчики застосовуються для виявлення горючих газів, токсичних речовин, вимірювання якості повітря. У системах розумного дому датчики чадного газу (CO) та природного газу забезпечують безпеку мешканців. На промислових об'єктах мережі газових сенсорів контролюють дотримання норм безпеки та виявляють витіки небезпечних речовин. Компактні напівпровідникові датчики летких органічних сполук (VOC) вимірюють загальну якість повітря в приміщеннях.

Датчики якості води вимірюють різні параметри: рН, електропровідність, каламутність, розчинений кисень, наявність забруднювачів. Потенціометричні, оптичні, електрохімічні сенсори застосовуються в системах моніторингу водних ресурсів, водоочисних спорудах, рибних господарствах. Мережі датчиків якості води дозволяють проводити онлайн-моніторинг стану водойм та раннє виявлення забруднень. Мініатюрні датчики інтегруються в побутові системи

фільтрації води для контролю ефективності очищення та своєчасної заміни фільтрів.

Датчики електричних параметрів вимірюють напругу, струм, потужність, частоту. Датчики Холла, шунти, трансформатори струму, подільники напруги застосовуються в системах енергетичного моніторингу, розумних електромережах, побутових пристроях. Інтелектуальні лічильники електроенергії з підключенням до IoT-мереж дозволяють оптимізувати споживання енергії та виявляти несанкціоновані підключення. Датчики електричних параметрів також використовуються для моніторингу стану акумуляторів у системах з автономним живленням, що особливо актуально для відда-лених сенсорних вузлів [13, с. 170].

Інерційні датчики вимірюють прискорення, кутову швидкість, орієнтацію в просторі. Акселерометри, гіроскопи, магнітометри об'єднуються в інерційні вимірювальні модулі (IMU), які застосовуються в БПЛА, системах стабілізації, носимих пристроях. У медичних IoT-системах інерційні сенсори використовуються для моніторингу рухової активності пацієнтів та виявлення падінь. У промисловості ці датчики вимірюють вібрацію обладнання, що дозволяє прогнозувати несправності та планувати технічне обслуговування. Мініатюрні MEMS-акселерометри та гіроскопи мають низьке енергоспоживання, що робить їх придатними для використання в автономних сенсорних вузлах.

Мультисенсорні системи поєднують кілька типів датчиків в єдиному пристрої. Інтеграція температурних, вологісних, оптичних, хімічних сенсорів дозволяє проводити комплексний моніторинг параметрів середовища. Алгоритми злиття даних від різних типів датчиків підвищують точність вимірювань та дозволяють виявляти складні події. Мультисенсорні платформи широко застосовуються в системах екологічного моніторингу, розумних будівлях, промислового IoT. Модульна архітектура таких систем забезпечує гнучкість та можливість адаптації до конкретних застосувань.

1.3 Проблеми збору даних у розподілених сенсорних мережах

Енергоєфективність збору даних становить центральну проблему функціонування розподілених сенсорних мереж. Обмежені енергетичні ресурси вузлів, які часто живляться від батарей або акумуляторів, створюють необхідність мінімізації енергоспоживання при збереженні функціональності. Передача даних по радіоканалу споживає значно більше енергії, ніж обробка даних на вузлі, тому зменшення обсягу переданої інформації шляхом агрегації, стиснення, фільтрації даних безпосередньо на сенсорних вузлах може суттєво продовжити час автономної роботи. Адаптивні алгоритми збору даних, які змінюють частоту вимірювань та передачі залежно від динаміки параметрів середовища та стану енергетичних ресурсів, дозволяють оптимізувати енергоспоживання [11, с. 38].

Масштабованість систем збору даних виступає значним викликом при розгортанні великих сенсорних мереж. Зі збільшенням кількості вузлів зростають обсяги даних, навантаження на комунікаційні канали та серверну інфраструктуру. Ієрархічна архітектура збору даних з проміжною агрегацією на шлюзах та граничних вузлах дозволяє зменшити навантаження на центральні сервери. Розподілені алгоритми управління потоками даних необхідні для запобігання перевантаженням мережі та втраті інформації. Методи балансування навантаження між шлюзами та серверами забезпечують ефективне використання наявних ресурсів та підтримують стабільність системи при зростанні масштабу.

Надійність збору даних визначає здатність системи функціонувати в умовах відмов окремих компонентів, втрат пакетів, завад у каналах зв'язку. Розподілений характер сенсорних мереж та часто неконтрольовані умови експлуатації підвищують ризики збоїв. Механізми підтвердження доставки, повторної передачі, альтернативної маршрутизації забезпечують стійкість до відмов окремих вузлів та каналів зв'язку. Надлишковість даних, коли однакові параметри вимірюються кількома сенсорами, дозволяє компенсувати втрати інформації. Методи виявлення та ізоляції несправних вузлів запобігають поширенню помилкових даних у системі.

Синхронізація в процесах збору даних необхідна для коректної інтерпретації вимірювань та ефективної координації роботи мережі. Розподілений характер системи та обмежені обчислювальні ресурси вузлів ускладнюють підтримання точного часу. Протоколи синхронізації, такі як NTP, RTP, адаптовані для сенсорних мереж, дозволяють узгодити часові шкали вузлів з прийнятною точністю. Методи відносної синхронізації, коли вузли узгоджують свої годинники між собою без звернення до глобального еталону, зменшують навантаження на мережу. Синхронізація особливо важлива для додатків, що вимагають точної часової прив'язки даних, таких як локалізація подій за часом прибуття сигналів на різні вузли [24, с. 86].

Безпека даних при їх зборі та передачі становить комплексну проблему, що включає забезпечення конфіденційності, цілісності, автентичності інформації. Обмежені обчислювальні ресурси сенсорних вузлів ускладнюють застосування стандартних криптографічних алгоритмів. Легковагі протоколи шифрування та автентифікації розробляються спеціально для пристроїв з обмеженими ресурсами. Управління ключами в розподіленому середовищі потребує ефективних механізмів генерації, розподілу, оновлення ключів. Методи виявлення аномалій та вторгнень дозволяють ідентифікувати атаки на систему збору даних та вживати контрзаходи.

Гетерогенність джерел даних створює проблеми сумісності, інтеграції, уніфікації форматів. У розподілених сенсорних мережах можуть використовуватися датчики різних виробників, з різними характеристиками, протоколами, форматами даних. Семантична інтероперабельність, коли різні компоненти системи однаково інтерпретують значення даних, забезпечується через стандартизацію форматів та метаданих. Проміжне програмне забезпечення (middleware) виконує функції адаптації та трансляції між різними форматами та протоколами. Онтологічні моделі даних дозволяють створити єдиний понятійний апарат для інтерпретації інформації з різних джерел.

Затримки та пропускну здатність при передачі даних обмежують можливості систем реального часу. Бездротові технології, що застосовуються в

сенсорних мережах, мають обмежену пропускну здатність та підвищену вразливість до завад. Буферизація даних на проміжних вузлах може призводити до затримок, що неприпустимо для систем з жорсткими вимогами реального часу. Методи пріоритезації трафіку забезпечують першочергову передачу критичних даних. Адаптивне управління частотою опитування сенсорів та передачі даних дозволяє оптимізувати використання доступної пропускну здатності. Протоколи з детермінованим доступом до середовища (TDMA, FDMA) забезпечують передбачувані затримки, що необхідно для систем реального часу.

Локалізація джерел даних необхідна для просторової прив'язки вимірювань та координації роботи мережі. У розподілених сенсорних мережах географічне положення вузлів може бути невідоме або змінюватися з часом. Методи локалізації включають використання систем глобального позиціонування (GPS), триангуляцію за рівнем сигналу від опорних вузлів, аналіз часу поширення сигналів. Для зменшення енергоспоживання GPS-приймачі можуть використовуватися лише на частині вузлів, а положення інших визначатися відносно них. Алгоритми спільної локалізації, коли вузли обмінюються інформацією про своє положення та відстані до сусідів, дозволяють підвищити точність визначення координат [29, с. 170].

Маршрутизація даних у сенсорних мережах ускладнюється динамічною топологією, обмеженими ресурсами вузлів, неоднорідністю трафіку. Протоколи маршрутизації мають забезпечувати ефективне використання енергетичних ресурсів, балансування навантаження, стійкість до відмов. Проактивні протоколи підтримують таблиці маршрутизації, що забезпечує швидку передачу даних, але потребує додаткових витрат на обмін службовою інформацією. Реактивні протоколи визначають маршрути за потреби, що зменшує накладні витрати, але збільшує затримки встановлення з'єднання. Географічні протоколи маршрутизації використовують інформацію про просторове розташування вузлів для оптимізації шляхів передачі даних.

Якість даних та її забезпечення в процесі збору становить фундаментальну проблему сенсорних мереж. Дані можуть бути спотворені через похибки вимірювань, шуми, збої обладнання, атаки на систему. Методи валідації даних на рівні сенсорних вузлів, шлюзів, серверної інфраструктури дозволяють виявляти та фільтрувати недостовірні вимірювання. Статистичні підходи до виявлення аномалій базуються на порівнянні поточних вимірювань з історичними патернами та даними від сусідніх вузлів. Механізми калібрування сенсорів необхідні для підтримання точності вимірювань протягом тривалого часу експлуатації.

Обробка та агрегація даних на проміжних вузлах дозволяє зменшити обсяг передаваної інформації та підвищити енергоефективність. Однак розподілена обробка створює проблеми узгодженості інтерпретації даних, балансування обчислювального навантаження, забезпечення достовірності результатів. Методи розподіленої агрегації, такі як кластеризація, усереднення, пошук екстремумів, мають враховувати специфіку даних та вимоги конкретних додатків. Адаптивні алгоритми агрегації змінюють рівень стиснення інформації залежно від її значущості, доступних ресурсів, вимог до затримок [7, с. 45].

Мобільність вузлів створює додаткові виклики для систем збору даних. У мобільних сенсорних мережах топологія постійно змінюється, що потребує динамічної адаптації маршрутів передачі даних. Хендовер між точками доступу має відбуватися без втрати даних та суттєвих затримок. Методи передбачення переміщень на основі аналізу траєкторій дозволяють заздалегідь підготувати мережу до змін топології. Проблема доплерівського зсуву частоти при передачі даних між рухомими об'єктами потребує специфічних методів модуляції та синхронізації. Мобільні збирачі даних, такі як БПЛА, можуть періодично облітати стаціонарні сенсорні вузли та збирати накопичені дані, що дозволяє зменшити енергоспоживання на передачу через багато ретрансляцій.

Стандартизація та інтероперабельність протоколів збору даних забезпечують сумісність компонентів різних виробників та можливість інтеграції в більші системи. Множинність стандартів та протоколів у сфері IoT

створює проблеми фрагментації технологічного ландшафту. Міжнародні організації, такі як IEEE, IETF, ISO, розробляють стандарти для різних аспектів сенсорних мереж: фізичного рівня, протоколів маршрутизації, форматів даних, безпеки. Відкриті стандарти стимулюють інновації та конкуренцію, але потребують механізмів сертифікації та перевірки сумісності. Шлюзи та проміжне програмне забезпечення забезпечують трансляцію між різними протоколами та стандартами.

Управління потоками даних у мережі включає механізми контролю перевантажень, балансування навантаження, пріоритезації трафіку. Асиметричний характер трафіку в сенсорних мережах, коли більшість даних передається від сенсорних вузлів до центральних серверів, створює ризики перевантаження вузлів, розташованих ближче до шлюзів. Механізми контролю перевантажень, такі як адаптивне регулювання швидкості передачі, буферизація, явні сповіщення про перевантаження, запобігають втраті даних у періоди пікового навантаження. Методи балансування навантаження між альтернативними маршрутами та шлюзами підвищують загальну пропускну здатність мережі та зменшують ризики відмов через перевантаження.

Сумісність з хмарними платформами для зберігання та обробки даних становить важливий аспект сучасних систем IoT. Протоколи та формати даних мають забезпечувати ефективну інтеграцію з хмарними сервісами. Проблеми включають забезпечення безпеки передачі даних через публічні мережі, управління потоками даних для оптимізації використання мережевих ресурсів, синхронізацію локальних та хмарних сховищ. Граничні обчислення (edge computing) дозволяють розподілити навантаження між локальними та хмарними ресурсами, зменшити затримки та обсяги переданих даних. Механізми управління життєвим циклом даних включають визначення політик зберігання, архівування, видалення інформації [4, с. 60].

Автономність та самоорганізація систем збору даних необхідні для функціонування в умовах мінімального людського втручання. Розподілені сенсорні мережі мають здатність автоматично адаптуватися до змін у

навколишньому середовищі, відмов окремих компонентів, появи нових вузлів. Механізми самовідновлення дозволяють виявляти та компенсувати відмови шляхом перебудови маршрутів, перерозподілу завдань, активації резервних компонентів. Алгоритми самоорганізації забезпечують формування оптимальної топології мережі, вибір координаторів та головних вузлів кластерів без централізованого управління. Еволюційні підходи дозволяють системі вдосконалюватися з часом на основі аналізу накопиченого досвіду функціонування.

Висновки до розділу 1

У межах першого розділу було проведено глибокий аналіз ключових технологій, що формують основу сенсорних мереж Інтернету речей (IoT). Розглянуто архітектуру таких мереж, яка включає сенсорні вузли, мережеві шлюзи, серверну інфраструктуру та програмне забезпечення для обробки й зберігання інформації. Визначено, що ефективність роботи IoT-систем значною мірою залежить від правильного вибору апаратних і програмних компонентів, топології мережі, а також протоколів комунікації.

Окрему увагу приділено аналізу типів сенсорів, які застосовуються для моніторингу різноманітних параметрів — температури, вологості, тиску, руху, освітленості тощо. Встановлено, що вибір типу сенсора безпосередньо впливає на точність, частоту вимірювань та енергоспоживання вузлів.

Також було проаналізовано основні проблеми, що виникають при зборі даних у розподілених сенсорних мережах, серед яких: надмірний обсяг даних, високе енергоспоживання, затримки при передачі, втрата даних через нестабільні канали зв'язку. Підкреслено необхідність застосування ефективних методів попередньої обробки та агрегації даних на рівні сенсорних вузлів, що дозволяє зменшити навантаження на мережу й підвищити загальну енергоефективність системи.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ЗБОРУ ТА ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Протоколи передачі даних у сенсорних мережах

Протоколи передачі даних у сенсорних мережах забезпечують надійну комунікацію між вузлами з обмеженими ресурсами та специфічними вимогами до енергоспоживання. Організація обміну інформацією в таких мережах базується на багаторівневій архітектурі, де кожен рівень оптимізований для виконання конкретних функцій. Адаптація класичної моделі OSI до особливостей сенсорних мереж привела до створення спеціалізованих протоколів, що враховують обмеженість обчислювальних ресурсів та енергетичні обмеження вузлів [3, с. 9].

Протокол IEEE 802.15.4 становить основу для багатьох сенсорних мереж та визначає фізичний і канальний рівні передачі даних. Стандарт оптимізований для низької швидкості передачі (до 250 кбіт/с) при мінімальному енергоспоживанні. Механізми доступу до середовища включають CSMA/CA для уникнення колізій та режими маяків для синхронізації вузлів. Адресація в мережі може використовувати короткі 16-бітні адреси для економії енергії або повні 64-бітні адреси для глобальної унікальності.

ZigBee представляє собою надбудову над IEEE 802.15.4, що визначає мережевий та прикладний рівні протоколу. Топології мережі включають зірку, дерево та mesh-конфігурації з автоматичною маршрутизацією. Механізми безпеки ZigBee забезпечують шифрування AES-128 та автентифікацію вузлів. Профілі додатків стандартизують функціональність для різних сфер застосування: домашня автоматизація, промисловий контроль, медичні системи.

6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) адаптує протокол IPv6 для використання в сенсорних мережах з обмеженими ресурсами.

Стиснення заголовків IPv6 з 40 до 3-7 байт дозволяє ефективно передавати IP-пакети через канали з малою пропускнуою здатністю. Фрагментація та збірка пакетів на каналному рівні забезпечує передачу даних розміром до 1280 байт через фрейми IEEE 802.15.4 розміром 127 байт.

Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) реалізує модель публікації/підписки для обміну повідомленнями між сенсорними вузлами та серверами. Легковаговість протоколу досягається мінімальним розміром заголовків (2 байти) та простотою операцій. Три рівні якості обслуговування (QoS) дозволяють балансувати між надійністю доставки та енергоспоживанням. Механізм Last Will and Testament забезпечує оповіщення про відключення вузлів [20, с. 21].

Таблиця 2.1 Порівняльна характеристика протоколів сенсорних мереж [42]

Протокол	Швидкість передачі	Дальність дії	Енергоспоживання	Топологія	Розмір мережі
ZigBee	250 кбіт/с	10-100 м	Дуже низьке	Зірка, дерево, mesh	До 65536 вузлів
Bluetooth LE	1 Мбіт/с	10-30 м	Низьке	Зірка, mesh	До 32767 вузлів
LoRaWAN	0,3-50 кбіт/с	2-15 км	Наднизьке	Зірка	Необмежено
NB-IoT	200 кбіт/с	10-40 км	Середнє	Зірка	Необмежено
Wi-Fi HaLow	150 кбіт/с-347 Мбіт/с	100м-1км	Середнє	Зірка, mesh	До 8191 вузлів

CoAP (Constrained Application Protocol) адаптує концепції REST для пристроїв з обмеженими ресурсами. Протокол працює поверх UDP для зменшення накладних витрат порівняно з TCP. Бінарний формат повідомлень та

компактні заголовки мінімізують обсяг переданих даних. Підтримка multicast дозволяє ефективно передавати команди групам сенсорів. Механізми observe дозволяють вузлам підписуватися на зміни ресурсів без постійного опитування [15, с. 48].

Bluetooth Low Energy оптимізований для короткочасних з'єднань з мінімальним енергоспоживанням. Адаптивна частотна модуляція з розширеним спектром забезпечує стійкість до завад. Режими роботи включають broadcasting для односторонньої передачі даних та connection-oriented для двостороннього обміну. Mesh-розширення дозволяє створювати масштабні мережі з ретрансляцією повідомлень.

LoRaWAN забезпечує передачу даних на великі відстані при наднизькому енергоспоживанні. Модуляція LoRa використовує технологію розширення спектру для досягнення високої чутливості приймача. Адаптивна швидкість передачі даних (ADR) автоматично налаштовує параметри модуляції для оптимізації енергоспоживання та пропускну здатності. Три класи пристроїв визначають режими роботи: від найбільш енергоефективного Class A до постійно активного Class C [2, с. 73].

NB-IoT (Narrowband IoT) працює в ліцензованому спектрі мобільних операторів та забезпечує глибоке проникнення сигналу в приміщення. Протокол оптимізований для передачі невеликих обсягів даних з великими інтервалами. Розширений режим бездіяльності (eDRX) дозволяє пристроям спати до 3 годин між сеансами зв'язку. Механізми повторної передачі підвищують надійність в умовах поганого покриття.

Thread поєднує переваги IP-адресації з енергоефективністю mesh-мереж. Протокол використовує IPv6 для глобальної адресації та 6LoWPAN для адаптації до IEEE 802.15.4. Самовідновлювальна mesh-топологія забезпечує стійкість до відмов окремих вузлів. Безпека забезпечується шифруванням на мережевому рівні та автентифікацією пристроїв через цифрові сертифікати.

RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) розроблений спеціально для маршрутизації в сенсорних мережах. Протокол буде направлений

ациклічні графи (DAG) для оптимальної передачі даних до точок збору. Метрики маршрутизації включають енергетичні параметри, якість каналу, затримки. Механізми самовідновлення забезпечують адаптацію до змін топології мережі.

Таблиця 2.2 Енергетичні характеристики протоколів передачі даних [43]

Протокол	Споживання в активному режимі	Споживання в сплячому режимі	Час переходу між режимами	Ефективність передачі
ZigBee	35-40 мА	3-5 мкА	15-30 мс	85-90%
BLE	15-20 мА	1-2 мкА	1-2 мс	92-95%
LoRaWAN	120-150 мА	0,1-1 мкА	5-10 мс	70-80%
Thread	30-35 мА	2-4 мкА	10-20 мс	88-93%
Wi-Fi HaLow	150-200 мА	10-15 мкА	100-200 мс	80-85%

DSME (Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension) розширює IEEE 802.15.4 для забезпечення детермінованої передачі даних. Часові слоти та каналне планування гарантують передачу критичних даних з мінімальними затримками. Багатоканальність підвищує пропускну здатність мережі та стійкість до завад. Механізми адаптації дозволяють динамічно перерозподіляти ресурси залежно від навантаження.

Протоколи безпеки в сенсорних мережах адаптовані до обмежень обчислювальних ресурсів вузлів. Легковагі криптографічні алгоритми, такі як AES-CCM та ChaCha20, забезпечують конфіденційність при мінімальних витратах енергії. Механізми розподілу ключів враховують динамічну топологію мережі та можливість компрометації окремих вузлів. Протоколи автентифікації використовують еліптичні криві для зменшення розміру ключів та обчислювальної складності [10, с. 54].

Гібридні протокольні рішення поєднують переваги різних технологій для оптимізації продуктивності системи. Комбінація ближньої та дальньої передачі дозволяє використовувати енергоефективні локальні з'єднання для збору даних та потужні канали для магістральної передачі. Адаптивне перемикання між протоколами залежно від типу даних та вимог додатку підвищує гнучкість системи. Уніфіковані інтерфейси спрощують інтеграцію різномірних технологій в єдину мережу.

Еволюція протоколів сенсорних мереж демонструє тенденцію до конвергенції різних технологій для створення універсальних рішень. Стандартизація інтерфейсів та форматів даних спрощує інтеграцію різномірних компонентів у єдину екосистему. Міграція від пропрієтарних протоколів до відкритих стандартів стимулює інновації та знижує вартість розгортання мереж. Модульна архітектура протокольних стеків дозволяє комбінувати оптимальні рішення для кожного рівня комунікації.

Адаптація протоколів до специфічних вимог різних галузей застосування призводить до створення вертикально-орієнтованих рішень. Промислові мережі потребують детермінованості та надійності передачі даних, медичні системи - високого рівня безпеки та конфіденційності, екологічний моніторинг - максимальної енергоефективності. Профілювання протоколів дозволяє оптимізувати їх характеристики під конкретні завдання без втрати сумісності з базовими стандартами.

Перспективи розвитку протоколів сенсорних мереж пов'язані з інтеграцією технологій штучного інтелекту та машинного навчання безпосередньо в комунікаційні процеси. Самоналаштовувані протоколи зможуть динамічно адаптувати параметри передачі даних на основі аналізу поточних умов та прогнозування майбутніх потреб. Когнітивні мережі автоматично оптимізуватимуть використання спектру, маршрутизацію та розподіл ресурсів для досягнення максимальної ефективності системи в цілому.

2.2 Енергоефективні методи збору даних

Енергоефективність збору даних визначається оптимізацією всіх етапів процесу: від активації датчиків до передачі інформації на сервери. Циклічне планування активності вузлів дозволяє мінімізувати час перебування в активному стані. Розклад роботи синхронізується між вузлами для координації періодів активності та сну. Адаптивні алгоритми коригують тривалість циклів залежно від динаміки вимірюваних параметрів та рівня заряду батарей.

Ієрархічна кластеризація мережі знижує енергоспоживання через локалізацію комунікацій всередині кластерів. Головні вузли кластерів виконують функції агрегації даних та дальньої передачі, розвантажуючи рядові сенсори. Ротація ролей головних вузлів забезпечує рівномірний розподіл енергетичного навантаження. Алгоритми формування кластерів враховують залишкову енергію вузлів, якість радіозв'язку та географічне розташування [30, с. 113].

Компресія даних на сенсорних вузлах зменшує обсяг інформації для передачі та відповідно знижує енергоспоживання радіомодулів. Алгоритми стиснення адаптовані до обмежених обчислювальних ресурсів мікроконтролерів. Диференційне кодування ефективне для даних з невеликими змінами між вимірюваннями. Словникові методи застосовуються для повторюваних патернів у даних. Втратна компресія допустима для некритичних параметрів при заданому рівні точності.

Таблиця 2.3 Енергетична ефективність методів збору даних [44]

Метод	Зниження енергоспоживання	Складність реалізації	Вплив на затримку	Область застосування
Циклічне планування	60-80%	Низька	Помірний	Всі типи мереж
Кластеризація	40-60%	Середня	Мінімальний	Великі мережі

Компресія даних	30-50%	Середня	Низький	Мережі з великим обсягом даних
Агрегація in-network	50-70%	Висока	Помірний	Щільні мережі
Адаптивне опитування	35-55%	Середня	Змінний	Динамічні середовища

Механізми wake-on-radio дозволяють вузлам залишатися в глибокому сні до отримання сигналу пробудження. Додатковий наднизькоенергетичний приймач постійно моніторить канал на наявність спеціальних сигналів. Основний трансивер активується лише при необхідності передачі або прийому даних. Затримка пробудження становить одиниці мілісекунд, що прийнятно для більшості застосувань.

Адаптивне опитування датчиків змінює частоту вимірювань залежно від швидкості зміни параметрів. При стабільних умовах інтервали між вимірюваннями збільшуються для економії енергії. Різкі зміни параметрів викликають перехід до частішого опитування для детального відстеження динаміки. Порогові значення для зміни режимів налаштовуються індивідуально для кожного типу датчиків [1, с. 168].

Кооперативна передача даних використовує просторове різноманіття для підвищення енергоефективності. Сусідні вузли об'єднують зусилля для передачі даних на далекі відстані, знижуючи необхідну потужність кожного передавача. Віртуальні антенні решітки формуються динамічно залежно від розташування вузлів та якості каналів. Розподіл енергетичних витрат між кооперуючими вузлами забезпечує збалансоване споживання.

Гібридні схеми доступу до середовища поєднують переваги різних методів для оптимізації енергоспоживання. TDMA забезпечує детерміновані слоти передачі без колізій, але вимагає точної синхронізації. CSMA дозволяє гнучкий доступ, але призводить до колізій при високому навантаженні. Адаптивне перемикання між схемами залежно від трафіку оптимізує загальну ефективність.

Таблиця 2.4 Порівняння схем енергозбереження в сенсорних мережах [45]

Схема	Економія енергії	Втрата даних	Складність синхронізації	Масштабованість
S-MAC	75-85%	< 2%	Середня	Обмежена
T-MAC	80-90%	< 1%	Висока	Середня
B-MAC	70-80%	< 3%	Низька	Висока
X-MAC	85-92%	< 1%	Низька	Висока
ContikiMAC	90-95%	< 0.5%	Середня	Висока

Прогнозування даних на основі історичних вимірювань дозволяє пропускати передачу передсказуваних значень. Моделі авторегресії та машинного навчання будуються на шлюзах або серверах. Сенсорні вузли передають лише відхилення від прогнозованих значень, що значно зменшує обсяг трафіку. Точність прогнозування адаптується до допустимих похибок конкретного застосування.

Енергетично-збалансована маршрутизація враховує залишкову енергію вузлів при виборі шляхів передачі даних. Метрики маршрутизації включають не лише відстань та якість каналу, але й енергетичний стан проміжних вузлів. Динамічна зміна маршрутів запобігає виснаженню окремих вузлів та подовжує час життя всієї мережі. Резервні маршрути активуються при критичному зниженні енергії на основному шляху [31, с. 47].

Селективна активація компонентів вузла дозволяє вимикати непотрібні модулі для економії енергії. Мікроконтролери підтримують кілька режимів енергозбереження з різним споживанням та часом виходу. Периферійні пристрої активуються лише на час виконання конкретних операцій. Управління тактовою частотою процесора адаптує продуктивність до поточних потреб.

Розподілена обробка даних переносить частину обчислень з центральних серверів на периферійні вузли. Локальна фільтрація та агрегація зменшують обсяг даних для передачі. Граничні обчислення виконують попередній аналіз

безпосередньо біля джерел даних. Федеративне навчання дозволяє будувати моделі без централізованого збору сирих даних.

Адаптивне управління потужністю передавача налаштовує рівень сигналу залежно від відстані до приймача та умов поширення. Зворотний зв'язок про якість прийому дозволяє мінімізувати потужність при збереженні надійності зв'язку. Когнітивне радіо адаптується до завад у каналі через зміну частоти або модуляції. Beamforming концентрує енергію в напрямку приймача [28, с. 88].

Гібридне збереження енергії поєднує кілька джерел живлення для підвищення автономності вузлів. Сонячні панелі, вібраційні генератори, термоелектричні перетворювачі доповнюють основні батареї. Суперконденсатори забезпечують пікові струми при передачі даних. Інтелектуальне управління розподіляє навантаження між джерелами залежно від їх поточного стану.

Інтеграція методів енергозбереження з механізмами забезпечення якості обслуговування створює складну оптимізаційну задачу пошуку балансу між конфліктними вимогами. Динамічне управління компромісами між енергоспоживанням, затримками передачі даних та надійністю доставки потребує розробки адаптивних алгоритмів. Контекстно-залежні стратегії дозволяють пріоритизувати різні аспекти продуктивності залежно від поточних потреб системи та доступних ресурсів.

Комплексний підхід до енергоефективності охоплює не лише технічні аспекти, але й організаційні та експлуатаційні фактори. Оптимізація процедур технічного обслуговування мінімізує енергетичні витрати на діагностику та налаштування мережі. Інтелектуальне планування заміни елементів живлення базується на прогнозах моделей деградації батарей. Централізоване управління енергетичними профілями забезпечує узгоджену роботу всіх компонентів системи.

Майбутнє енергоефективних методів збору даних полягає в досягненні повної енергетичної автономності сенсорних мереж через комбінацію надфективних алгоритмів та альтернативних джерел енергії. Прогрес у розробці

мікроелектромеханічних систем відкриває можливості створення сенсорів з споживанням на рівні нановат. Квантові технології обіцяють революційне підвищення ефективності обробки та передачі інформації при мінімальних енергетичних витратах.

2.3 Алгоритми агрегації та фільтрації сенсорних даних

Агрегація даних у сенсорних мережах зменшує обсяг інформації через об'єднання та узагальнення вимірювань з кількох джерел. Статистичні функції агрегації включають обчислення середнього, медіани, мінімуму, максимуму для груп однотипних датчиків. Просторова агрегація враховує географічне розташування сенсорів для виявлення локальних та глобальних трендів. Часова агрегація об'єднує послідовні вимірювання для згладжування випадкових флуктуацій [9, с. 42].

Ієрархічна агрегація організує обробку даних на кількох рівнях мережевої архітектури. Первинна агрегація виконується на рівні сенсорних вузлів для локальних вимірювань. Кластерна агрегація об'єднує дані від вузлів одного кластера на головному вузлі. Глобальна агрегація на шлюзах та серверах формує загальну картину стану системи. Розподіл функцій агрегації оптимізує використання обчислювальних ресурсів.

Фільтрація аномальних значень запобігає спотворенню агрегованих результатів через помилкові вимірювання. Статистичні методи виявляють викиди на основі порівняння з історичними даними та сусідніми вузлами. Порогові фільтри відкидають значення за межами фізично можливих діапазонів. Адаптивні фільтри налаштовують параметри залежно від поточних умов середовища.

Таблиця 2.5 Характеристики алгоритмів агрегації даних [46]

Алгоритм	Ступінь стиснення	Точність	Обчислювальна складність	Затримка
Середнє арифметичне	N:1	Висока	O(n)	Низька

Медіана	N:1	Дуже висока	$O(n \log n)$	Середня
Кластеризація k-means	N	Середня	$O(nkt)$	Висока
Вейвлет-агрегація	N (N)	Висока	$O(n \log n)$	Середня
Нейромережева компресія	N	Регульована	$O(n^2)$	Висока

Просторово-часова кореляція використовується для ефективної компресії даних з географічно близьких сенсорів. Алгоритми виявляють залежності між вимірюваннями сусідніх вузлів та передають лише незалежну інформацію. Предиктивна модель будується на основі кореляційної матриці та оновлюється при зміні умов. Декореляція даних виконується через ортогональні перетворення.

Семантична агрегація враховує змістовне значення даних при їх об'єднанні. Контекстна інформація про тип датчика, умови вимірювання, призначення даних впливає на вибір методу агрегації. Пріоритетність різних типів інформації визначає ступінь деталізації при агрегації. Метадані зберігають додаткову інформацію про процес агрегації для можливості відновлення деталей [4, с. 77].

Розподілена агрегація на основі консенсусу забезпечує узгоджені результати без централізованої координації. Вузли обмінюються локальними оцінками та ітеративно наближаються до спільного значення. Алгоритми консенсусу стійкі до відмов окремих вузлів та змін топології мережі. Швидкість збіжності залежить від зв'язності мережі та вибраних параметрів алгоритму.

Адаптивна фільтрація Калмана оцінює стан системи на основі зашумлених вимірювань. Рекурсивний алгоритм поєднує прогноз на основі моделі системи з корекцією за новими вимірюваннями. Розширений фільтр Калмана працює з нелінійними моделями через локальну лінеаризацію. Розподілена реалізація дозволяє виконувати фільтрацію на мережі сенсорних вузлів.

Таблиця 2.6 Ефективність фільтрації даних у сенсорних мережах [47]

Метод фільтрації	Відсоток виявлених аномалій	Помилкові спрацювання	Обчислювальна вартість	Затримка обробки
Пороговий фільтр	85-90%	5-10%	Низька	< 1 мс
Статистичний фільтр	92-95%	3-5%	Середня	5-10 мс
Фільтр Калмана	95-98%	1-3%	Висока	10-20 мс
Машинне навчання	97-99%	< 1%	Дуже висока	20-50 мс

Вейвлет-перетворення дозволяє аналізувати сигнали на різних масштабах часу та частоти. Багаторівневий аналіз виявляє як короткочасні сплески, так і довготривалі тренди. Стиснення досягається через відкидання малозначущих вейвлет-коефіцієнтів. Адаптивний вибір материнського вейвлету оптимізує представлення конкретного типу сигналів.

Нечітка логіка в агрегації даних дозволяє працювати з неточними та неповними вимірюваннями. Лінгвістичні змінні описують якісні оцінки параметрів. Правила нечіткого виведення комбінують експертні знання з емпіричними даними. Дефазифікація перетворює нечіткі результати в конкретні числові значення для подальшого використання [30, с. 113].

Потокова обробка даних виконує агрегацію та фільтрацію в режимі реального часу без накопичення великих обсягів. Ковзні вікна дозволяють аналізувати останні дані з обмеженим використанням пам'яті. Інкрементальні алгоритми оновлюють результати при надходженні нових вимірювань. Розподілена потокова обробка масштабується на великі обсяги даних.

Машинне навчання для агрегації даних автоматично виявляє оптимальні методи об'єднання інформації. Навчання з учителем використовує розмічені дані

для побудови моделей агрегації. Навчання без учителя виявляє приховані структури та залежності в даних. Онлайн-навчання адаптує моделі до змін у характеристиках даних.

Контекстно-залежна фільтрація враховує умови вимірювання при визначенні достовірності даних. Час доби, погодні умови, стан обладнання впливають на інтерпретацію вимірювань. База правил фільтрації формується на основі експертних знань та історичного досвіду. Динамічне оновлення правил забезпечує адаптацію до нових ситуацій.

Гібридні методи агрегації поєднують переваги різних підходів для оптимізації якості результатів. Комбінація статистичних та модельних методів підвищує точність оцінок. Ансамблеві методи об'єднують результати кількох алгоритмів через зважене голосування. Мета-навчання вибирає оптимальний метод агрегації для конкретного контексту [12, с. 171].

Синергія між алгоритмами агрегації та методами штучного інтелекту створює нові можливості для інтелектуальної обробки сенсорних даних. Глибоке навчання дозволяє автоматично виявляти оптимальні стратегії агрегації для складних багатовимірних даних. Генеративні моделі можуть відновлювати втрачену інформацію та прогнозувати пропущені вимірювання. Трансферне навчання адаптує попередньо навчені моделі до специфічних умов конкретної сенсорної мережі.

Розвиток квантових обчислень відкриває перспективи для експоненціального прискорення складних алгоритмів агрегації та фільтрації. Квантова суперпозиція дозволяє одночасно обробляти множину варіантів агрегації даних. Квантова запутаність може використовуватися для миттєвої синхронізації розподілених процесів обробки. Гібридні класично-квантові алгоритми поєднують переваги обох парадигм для вирішення задач оптимізації в сенсорних мережах.

Стандартизація методів агрегації та фільтрації стає необхідною умовою для забезпечення інтероперабельності між різними системами збору даних. Формування бібліотек перевірених алгоритмів прискорює розробку нових

рішень та гарантує їх якість. Сертифікаційні процедури забезпечують відповідність алгоритмів вимогам конкретних галузей застосування. Відкриті платформи для тестування та порівняння алгоритмів стимулюють конкуренцію та інновації в цій сфері.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було здійснено комплексний аналіз сучасних методів збору та зберігання інформації в сенсорних мережах Інтернету речей. Досліджено ключові протоколи передачі даних, такі як ZigBee, 6LoWPAN, LoRaWAN, NB-IoT, MQTT, CoAP та інші, кожен із яких адаптований до специфіки обмежених ресурсів вузлів IoT-систем. Проведено їх порівняльну характеристику за параметрами швидкості, енергоспоживання, масштабованості, типів топологій та ефективності передачі.

Розглянуто енергоефективні підходи до збору даних, включно з циклічним плануванням активності вузлів, ієрархічною кластеризацією, компресією та агрегацією інформації. Показано, що застосування адаптивного опитування сенсорів та wake-on-radio технологій дозволяє суттєво знизити витрати енергії та продовжити автономну роботу мережі.

Також було досліджено алгоритми агрегації та фільтрації сенсорних даних, серед яких виділено просторово-часову агрегацію, фільтрацію аномалій, нейромережеві підходи, вейвлет-аналіз та адаптивну фільтрацію Калмана. Встановлено, що комбінація агрегації з локальною обробкою даних дозволяє суттєво зменшити обсяг трафіку без втрати аналітичної точності.

РОЗДІЛ 3

МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ЗБОРУ ТА ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ

3.1 Вибір прототипу на основі існуючих рішень.

На основі порівняльного аналізу методів збору сенсорних даних, поданого в таблиці 3.1, найбільш доцільним для реалізації в обраній системі є підхід, заснований на адаптивному опитуванні. Цей метод демонструє високі показники за ключовими критеріями: він забезпечує надзвичайно високу енергоефективність, характеризується помірним обсягом переданих даних, є простим у реалізації та водночас здатен ефективно реагувати на стрибкоподібні зміни вимірюваного параметра. Завдяки цим властивостям, адаптивне опитування є особливо придатним для автономних або енергозалежних сенсорних вузлів, які працюють у режимах обмеженого живлення або безперервного моніторингу.

Таблиця 3.1 Порівняльна таблиця методів збору сенсорних даних [41]

Метод	Енергоефективність	Об'єм даних	Реалізація	Ефективність детекції стрибків
Адаптивне опитування	Дуже висока	Помірний	Проста	Висока
Вікно статистики	Висока	Малий	Проста	Часткова (втрата деталей)
Периодический	Низька	Дуже великий	Дуже проста	Дуже висока
ML	Дуже низька	Дуже малий	Дуже складна	Середнє

Похідна (dT/dt)	Середня	Малий	складна	Висока
-----------------	---------	-------	---------	--------

Разом з тим, цей підхід має один суттєвий недолік — навіть за умов динамічної зміни частоти опитування, загальний обсяг даних, що накопичується в базі даних, залишається значним. Це може створювати додаткове навантаження на інфраструктуру зберігання та ускладнювати подальшу обробку великих обсягів історичних даних.

Отже, для досягнення балансу між енергоефективністю та ефективністю зберігання інформації, доцільно доповнити адаптивне опитування механізмами агрегації даних, а також застосуванням алгоритмів їх стиснення. Зокрема, агрегація дозволить зменшити кількість збережених точок за рахунок узагальнення інформації у часових або подієвих інтервалах, тоді як стиснення — зменшити фізичний обсяг збережених записів без суттєвої втрати інформативності.

Метод адаптивного опитування зводиться до наступних кроків, які можна подати у вигляді блоксхеми на рисунку 1:

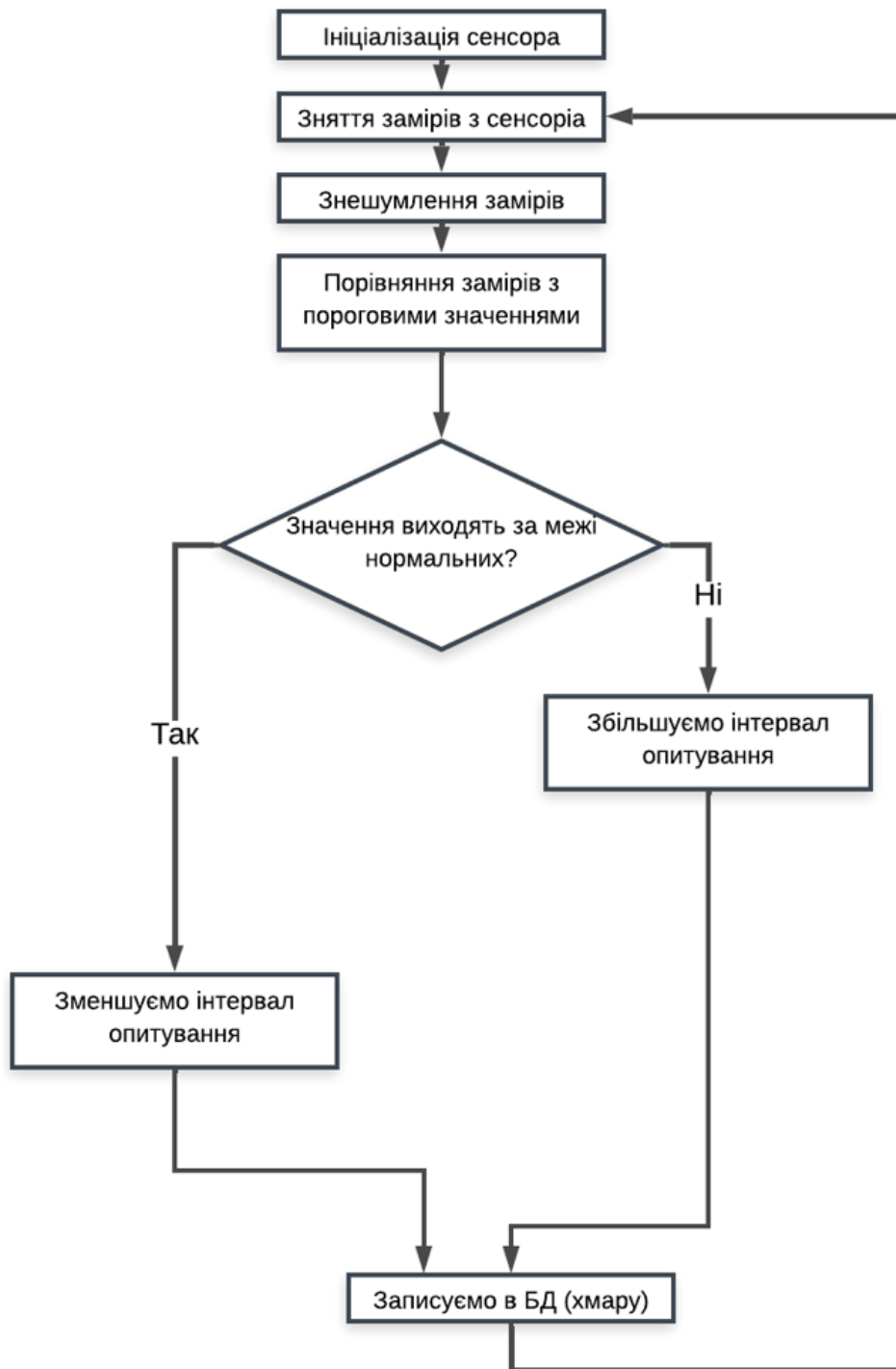


Рис. 3.1 Блоксхема методу адаптивного опитування

Крок 1. Ініціалізація системи.

На початковому етапі виконується ініціалізація сенсорної системи: налаштовуються параметри зчитування, встановлюються початкові порогові значення для визначення відхилень, а також задаються граничні значення

інтервалів опитування (мінімальний та максимальний). Система переходить у стан готовності до роботи.

Крок 2: Зчитування даних із сенсора

Сенсор здійснює черговий вимір фізичної величини (наприклад, температури). Отримане значення фіксується для подальшої обробки.

Крок 3: Попередня обробка (знешумлення)

З метою зменшення впливу випадкових флуктуацій та шумів, дані проходять етап фільтрації (наприклад, за допомогою ковзного середнього або цифрового фільтра), що дозволяє підвищити достовірність подальшого аналізу.

Крок 4: Перевірка на наявність аномалій або відхилень від норми

Очищене значення порівнюється з допустимими межами або очікуваними статистичними характеристиками. У разі перевищення встановлених порогів фіксується потенційне відхилення.

Крок 5: Аналіз відхилення

Якщо зафіксовано відхилення, система переходить до наступного кроку (Крок 6). В іншому випадку відбувається перехід до Кроку 7.

Крок 6: Реакція на виявлене відхилення (адаптація інтервалу опитування)

У разі виявлення змін у сигналі система динамічно зменшує інтервал між вимірами, наближаючи його до мінімально допустимого значення. Це дозволяє більш точно та оперативно фіксувати характер змін. Далі переходимо до кроку 8.

Крок 7: Відсутність змін – збільшення інтервалу опитування

Якщо сигнал стабільний і не виходить за межі норми, інтервал між вимірами поступово збільшується в напрямку до заздалегідь заданого максимального значення. Це дозволяє знизити частоту вимірювань і, відповідно, обсяг збережених даних при незмінному стані середовища. Далі переходимо на наступний крок.

Крок 8: Збереження даних та повтор циклу

Після адаптації інтервалу опитування поточні дані зберігаються у вибраній системі зберігання (базі даних або хмарному сховищі). Після завершення цього кроку алгоритм повертається до Кроку 2, починаючи новий цикл вимірювання та аналізу.

3.2 Модифікований метод

Вирішити проблему надлишкового об'єму переданих і зберезуваних даних пропонується завдяки впровадженню додаткових кроків Edge Computing агрегації даних.

Традиційно, метод адаптивного порогу зберігає в бд періодичні дані, щільність яких в часі збільшується або зменшується в залежності від частоти змін у замірах.

Запропонована модифікація передбачає агрегацію даних що не виходять за рамки нормальних, для виділення тільки ключових показників замірів та їхню подальшу передачу в БД.

Розподілена агрегація даних виконується на різних рівнях мережевої ієрархії для зменшення обсягу переданої інформації. Сенсорні вузли виконують попередню фільтрацію та усереднення даних, шлюзи здійснюють кластерну агрегацію з урахуванням просторової кореляції вимірювань. Методи агрегації включають статистичні функції (середнє, медіана, мода), виявлення патернів та видалення дублікатів.

Граничні обчислення на рівні сенсорних вузлів та шлюзів дозволяють виконувати попередню обробку даних без передачі на центральні сервери. Розподіл обчислювальних завдань між рівнями архітектури оптимізується з урахуванням доступних ресурсів та вимог до затримок. Локальна обробка включає фільтрацію шумів, виявлення аномалій, розрахунок статистичних показників.

Далі дані аналізуються на рахунок відхилення від норми. У випадку якщо відсутнє, доцільно буде агрегувати дані, так як в них немає істотно цікавих даних для аналітики чи збереження, тому такі дані можна звести до загальних відомостей, за допомогою агрегування.

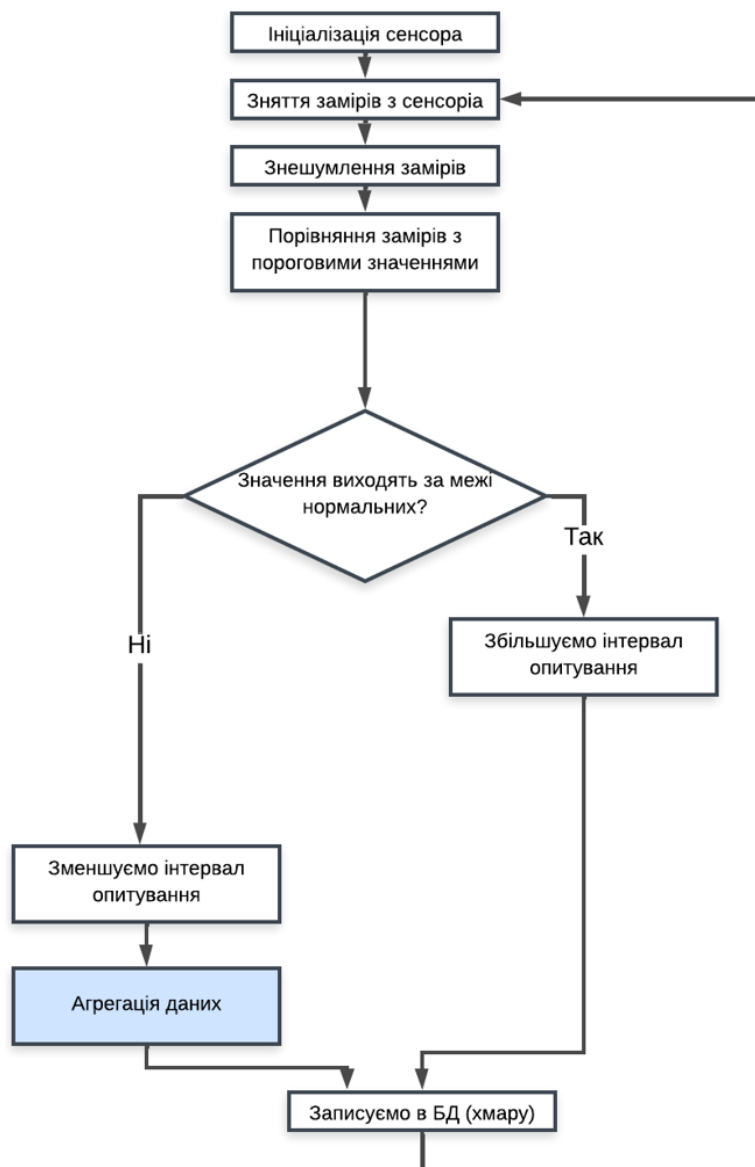


Рис. 3.2 Модифікований метод адаптивного опитування

Агрегація передбачає об'єднання окремих вимірювань у компактні статистичні представлення з метою зменшення кількості переданих та збережених даних, зниження енергоспоживання пристроїв, зменшення навантаження на комунікаційні канали та підвищення продуктивності всієї системи.

Одним з найпоширеніших підходів є агрегація за часовими інтервалами, коли протягом певного періоду (наприклад, однієї хвилини або години) обчислюються узагальнені статистичні характеристики, такі як середнє значення, мінімум, максимум, дисперсія тощо. Це дозволяє значно зменшити кількість переданих повідомлень, зберігаючи при цьому загальну картину зміни контрольованого параметра.

Наприклад у випадку замірів температури раз в 5 секунд (таблиця 3.2), можна перейти до замірів середнього значення температури за період (таблиця 3.3).

Таблиця 3.2 Приклад замірів температур з періодичністю 5 секунд

DataTime	Temperature
2025-03-07 00:01:00	20.71
2025-03-07 00:01:55	23.21
2025-03-07 00:02:55	23.85
2025-03-07 00:03:50	23.91

Таблиця 3.3 Приклад агрегованих замірів температури за 3 хвилини

StartTime	EndTime	Min	Average	Max
2025-03-07 00:01:00	2025-03-07 00:03:50	20.43	21.81	23.46

У випадку систем з географічно розподіленими сенсорами, доцільною є просторова агрегація, яка полягає в об'єднанні даних із кількох джерел, розташованих у певному регіоні. Такий підхід дозволяє отримати регіональні оцінки параметрів середовища, що важливо для макрорівневого моніторингу.

Ще одним важливим методом є подієва агрегація, яка здійснюється у відповідь на визначені події або порушення порогових умов. У таких випадках передаються лише ті дані, які свідчать про відхилення або аномалії, що суттєво знижує загальне навантаження на мережу, але при цьому не втрачає важливої інформації.

Найбільш універсальним підходом вважається гібридна агрегація, що поєднує в собі переваги часової, просторової та подієвої агрегації, забезпечуючи гнучку адаптацію до змін у поведінці системи та характеристиках даних. В результаті, агрегація даних у IoT дозволяє не лише ефективно управляти інформаційними потоками, але й підвищує стабільність, масштабованість та енергоефективність розподілених сенсорних систем.

Якщо в даних сенсорної мережі помічено відхилення від норми, значить доцільно буде детальніше їх проаналізувати, проте детальний аналіз таких даних не є задачею Edge Computing, тому їх потрібно зберігати в бд.

Таким чином запропонований модифікований метод зводиться до наступних кроків:

Крок 1. Ініціалізація системи.

На початковому етапі виконується ініціалізація сенсорної системи: налаштовуються параметри зчитування, встановлюються початкові порогові значення для визначення відхилень, а також задаються граничні значення інтервалів опитування (мінімальний та максимальний). Система переходить у стан готовності до роботи.

Крок 2: Зчитування даних із сенсора

Сенсор здійснює черговий вимір фізичної величини (наприклад, температури). Отримане значення фіксується для подальшої обробки.

Крок 3: Попередня обробка (знешумлення)

З метою зменшення впливу випадкових флуктуацій та шумів, дані проходять етап фільтрації (наприклад, за допомогою ковзного середнього або цифрового фільтра), що дозволяє підвищити достовірність подальшого аналізу.

Крок 4: Перевірка на наявність аномалій або відхилень від норми

Очищене значення порівнюється з допустимими межами або очікуваними статистичними характеристиками. У разі перевищення встановлених порогів фіксується потенційне відхилення.

Крок 5: Аналіз відхилення

Якщо зафіксовано відхилення, система переходить до наступного кроку (Крок 6). В іншому випадку відбувається перехід до Кроку 7.

Крок 6: Реакція на виявлене відхилення (адаптація інтервалу опитування)

У разі виявлення змін у сигналі система динамічно зменшує інтервал між вимірами, наближаючи його до мінімально допустимого значення. Це дозволяє більш точно та оперативно фіксувати характер змін. Далі переходимо до кроку 8.

Крок 7. Агрегація даних.

У разі стабільного сигналу (відсутності відхилень), поточне значення не записується окремо. Замість цього воно включається до агрегованого представлення даних — наприклад, як частина середнього значення за певний часовий інтервал або як статистичний опис (середнє, мінімум, максимум, дисперсія). Такий підхід дозволяє зменшити обсяг збережених даних без втрати загальної інформативності. Далі перехід до кроку 9.

Крок 8: Відсутність змін – збільшення інтервалу опитування

Якщо сигнал стабільний і не виходить за межі норми, інтервал між вимірами поступово збільшується в напрямку до задалегідь заданого максимального значення. Це дозволяє знизити частоту вимірювань і, відповідно,

обсяг збережених даних при незмінному стані середовища. Далі переходимо на наступний крок.

Крок 9: Збереження даних та повтор циклу

Отримані дані зберігаються в базу даних, при цьому, якщо вони були агреговані, то в базу агрегованих даних. Якщо ні, то як і у методі прототипі у базу числових рядів не агрегованих даних. Після завершення цього кроку алгоритм повертається до Кроку 2, починаючи новий цикл вимірювання та аналізу.

Висновок до розділу 3

У цьому розділі розроблено та описано модифікований метод збору та зберігання інформації в сенсорних мережах Інтернету речей, що ґрунтується на концепції адаптивного опитування з розширенням на основі принципів Edge Computing. Проведений аналіз існуючих рішень дозволив визначити найбільш перспективні підходи, зокрема — механізми агрегації даних, фільтрації вимірювань, та локальної обробки інформації.

Запропонований метод включає багаторівневу структуру обробки даних, у межах якої первинна агрегація виконується безпосередньо на сенсорних вузлах, кластерна — на рівні шлюзів, а глобальна — на сервері. Це дозволяє суттєво зменшити обсяг переданої та збереженої інформації без втрати її аналітичної цінності. Зокрема, обробці підлягають лише ті значення, що виходять за межі адаптивно встановленого порогу, а решта — агрегується у статистично значущі показники.

Метод також враховує просторову кореляцію та часову динаміку даних, що дозволяє підвищити точність і надійність результатів при зменшенні енергоспоживання. Адаптивність запропонованого рішення робить його придатним для широкого спектра застосувань — від екологічного моніторингу до промислових IoT-систем.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ

4.1 Методика проведення експериментів

Для дослідження модифікованого методу, було проведено імітаційне моделювання процесу збору даних в сенсорній мережі IoT.

Розроблений макет представляє собою написану програму Python, з використанням бібліотек Pandas та SCV, розгорнута в хмарному середовищі Google Collaboratory.

Для проведення експерименту було обрано датасет IoTSDDD_2025 [48], який представляє собою набір посекундних замірів температури, вологості, освітленості, кислотності та електронапруги.

Розроблена модель являє собою програмне забезпечення, призначене для імітації поведінки сенсорної системи в умовах змінного середовища. Вона дозволяє відтворити процес збору та обробки даних сенсорами, моделюючи ключові параметри, такі як частота опитування, значення вимірюваних величин, а також можливі відхилення чи шуми у вимірюваннях.

Модель забезпечує можливість задавати початкові умови, варіювати параметри симуляції та аналізувати результати у вигляді числових рядів або таблиць. Таким чином, вона виступає як інструмент для тестування алгоритмів обробки даних без необхідності використання реального обладнання.

Імітаційна модель складається з наступних основних компонентів:

- **Сенсорні вузли** — віртуальні пристрої, що опитуються з визначеною періодичністю. Кожен вузол відповідає одному типу датчика (наприклад, температура, вологість тощо).
- **Контролер опитування** — логіка, що визначає момент опитування кожного сенсора відповідно до встановленої динамічної періодичності.

- **Джерело даних** — основою для імітації сенсорних вимірів є реальний датасет, що містить результати вимірювань із секундною дискретністю за одну добу. Під час опитування сенсора система звертається до цього датасету та вибирає значення, відповідне поточному часу експерименту.
- **База даних** — імітована система зберігання, до якої надсилаються згенеровані запити та вимірні значення.

Імітаційна модель відтворює процес збору даних у сенсорній мережі, де функціонування кожного сенсорного вузла контролюється централізованим контролером опитування. Контролер здійснює періодичне опитування сенсорів відповідно до визначеного алгоритму, який задає правила та інтервали звернення до кожного вузла.

The screenshot shows a Google Colab interface with a Python script on the left and a data table on the right. The script defines a `Sensor` class with methods for initialization, simulation, and data reading. The table displays sensor data for various sensors over time, including start and end times, and statistical values like Min, Mean, and Max.

```
[143] import pandas as pd
import csv
import os
import math

class Sensor:
    def __init__(self, sensor_id: int, data_type_name:
self.data_file = data_file
self.id = sensor_id
self.sample_type_name = data_type_name
self.history = []
self.smoothed_value = None
self.alpha = 0.3
self.allowed_deviation = 1.75
self.is_spike_simulated = False

def simulate_value_spike(self, spike_second_start:
self.is_spike_simulated = True
self.spike_second_start = spike_second_start
self.spike_duration = spike_duration
self.spike_amplitude = spike_amplitude

def read_value(self, sim_second: int) -> float:
value = self.data_file.at[sim_second//5, self.

if self.is_spike_simulated and sim_second >= se
value = value + math.sin((sim_second - self

self.history.append(value)
```

SensorId	StartTime	EndTime	Min	Mean	Max
1	2025-03-07 19:59:40	2025-03-07 20:01:00	20.43	21.81	23.46
1	2025-03-07 19:59:05	2025-03-07 19:59:25	20.26	21.5	22.36
1	2025-03-07 19:58:25	2025-03-07 19:58:50	20.74	21.317999999999998	22.87
1	2025-03-07 19:58:55	2025-03-07 19:58:10	20.12	22.156	24.25
1	2025-03-07 19:56:00	2025-03-07 19:56:40	20.96	23.3825	24.68
1	2025-03-07 19:54:25	2025-03-07 19:55:45	20.12	22.25	24.96
1	2025-03-07 19:52:45	2025-03-07 19:54:10	20.16	22.082941176470587	24.02
1	2025-03-07 19:52:05	2025-03-07 19:52:30	21.27	23.008	24.65
1	2025-03-07 19:51:35	2025-03-07 19:51:50	22.92	24.11	24.67
1	2025-03-07 19:51:15	2025-03-07 19:51:20	23.4	23.4	23.4

Рис. 4.1 Скрипт симуляції моделі, реалізований мовою Python в онлайн середовищі Google Collaboratory

У момент опитування контролер ініціює зчитування значення з відповідного сенсора. Замість реального вимірювання, у рамках імітації, значення параметра визначається шляхом вибірки з попередньо сформованого датасету, який містить посекундні виміри реального фізичного процесу за

певний період часу. Для кожного запиту система отримує значення, що відповідає поточному моменту експериментального часу.

Отримані дані зберігаються в імітований базі даних, яка фіксує час опитування, ідентифікатор сенсора та відповідне значення параметра. Такий підхід дозволяє проводити аналіз якості збору даних, оцінювати ефективність алгоритмів опитування та досліджувати вплив зміни частоти опитування на обсяг зібраної інформації та точність відображення процесу.

4.2 Результати тестування запропонованого методу

Дослідження здатності зменшувати кількість збережених даних.

У межах дослідження проведено оцінку зменшення обсягу збережених даних на прикладі повного добового циклу роботи системи. У моделі передбачено, що дані надходять щосекунди від одного сенсора (приблизно **86 000 записів за добу**), що формує значний обсяг інформації, яка підлягає збереженню.

Критерієм ефективності обрано **загальний обсяг щоденно збережених даних у байтах**. Тоді коефіцієнт збереження даних можна виразити як:

$$K = \frac{S_{\text{прототип}}}{S_{\text{модифікований}}} \quad (4.1)$$

Де K – коефіцієнт збереження даних.

$S_{\text{прототип}}$ – Фактичний розмір бази даних, створеної реалізацією методу прототипу

$S_{\text{модифікований}}$ – Фактичний розмір баз даних, створеної реалізацією запропонованого модифікованого методу.

У рамках експерименту послідовно запускалися два окремі скрипти: перший реалізовував базовий метод збору даних, другий — модифікований метод із вбудованими механізмами агрегації.

Кожен зі скриптів симулював роботу сенсорної системи в ідентичних умовах протягом фіксованого періоду часу. Результати моделювання зберігалися у вигляді NoSQL CVS-баз даних, сформованих безпосередньо під час виконання скриптів. Це дозволило здійснити кількісне порівняння між двома підходами за критерієм кількості записів у базі даних.

У ході експерименту реалізація базового методу сформувала **12904 записів**. Натомість реалізація запропонованого методу за той самий період створила **2525 записів** в базу даних не агрегованих, і **1085 записів** в агрегованих даних.

Відповідно до формули кількісної оцінки ефективності використання пам'яті було розраховано **коефіцієнт збереження даних**:

$$K = \frac{S_{\text{прототип}}}{S_{\text{модифікований}}} = \frac{365.2 \text{ Кб}}{143.5 \text{ Кб}} \approx 2.54 \quad (4.2)$$

Таким чином, використання запропонованого підходу дозволяє зменшити обсяг збережених даних приблизно у **2,54 рази**, що є підтвердженням підвищеної ефективності методу в контексті економії пам'яті та зменшення навантаження на систему зберігання.

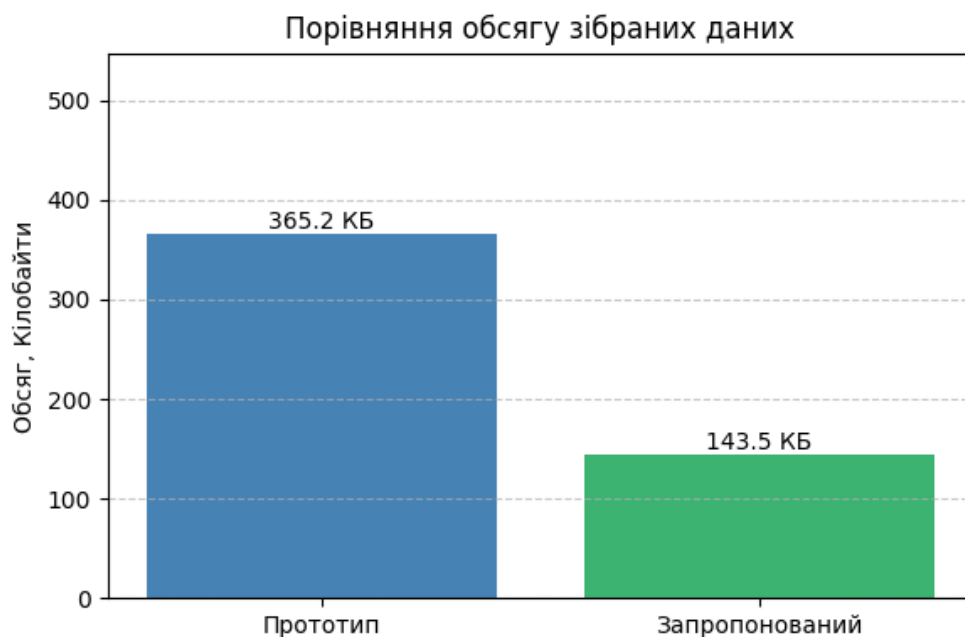


Рис. 4.2 Порівняння кількості збережених даних реалізацією методу прототипу та запропонованого модифікованого методу

Дослідження здатності зберігати пікові значення в замірах.

В цьому експерименті досліджується здатність запропонованого методу фіксувати короткотривалі динамічні зміни вимірюваних параметрів. Зокрема, важливо перевірити, чи не призводить квантування та агрегація до втрати критично важливої інформації в періоди різких змін, таких як, наприклад, стрімке зростання температури протягом кількох хвилин.

Це особливо актуально в контексті реалізованої стратегії агрегації даних: у випадках, коли значення сенсора залишаються стабільними в межах визначеного діапазону, система не здійснює фактичного опитування, а лише оновлює агрегований показник.

Такий аналіз дозволить встановити, наскільки запропонований метод зберігає чутливість до аномальних або раптових змін у середовищі, що є важливим критерієм при застосуванні в умовах, де необхідна висока оперативність реагування.

Для експерименту, запустимо в симуляції в симуляційну модель було введено штучний скачкообразний синусоїдальний стрибок температури. Збурення було реалізовано на 6000-й секунді симуляції та мало тривалість 10 хвилин (600 секунд). Амплітуда синусоїдального стрибка становила 15 °C. Такий тест дозволяє оцінити ефективність методу в умовах раптових та нетривалих змін температури, що є важливим для задач виявлення аномалій або адаптивного керування.

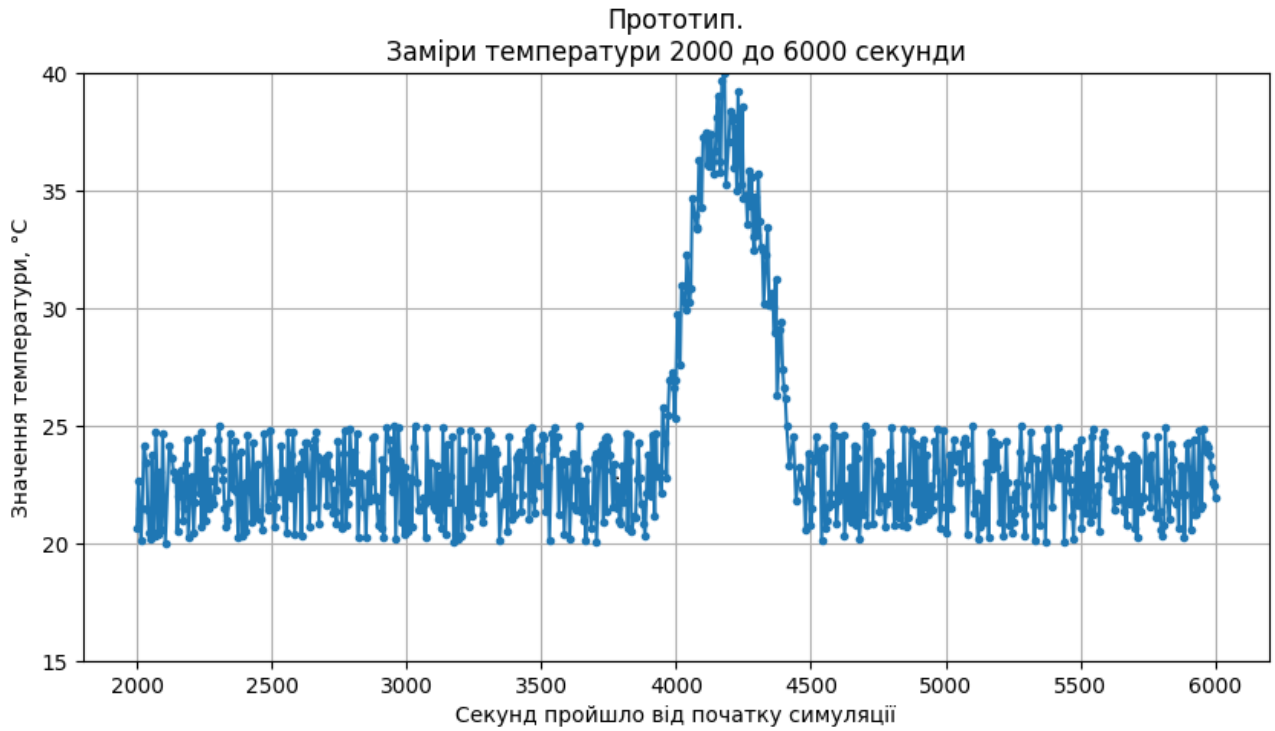


Рис. 4.3 Графік значення температури за часом, створений на основі записів у базі даних, створеній реалізацією методу прототипу

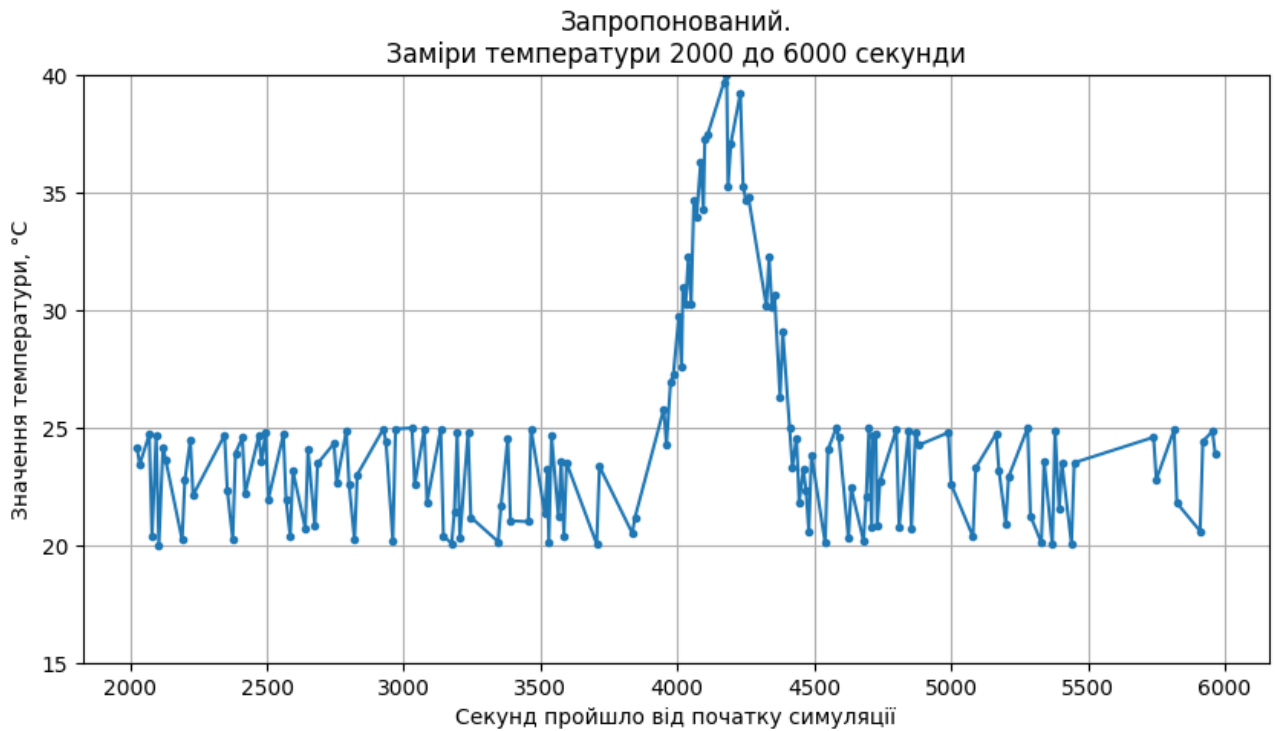


Рис. 4.4 Графік значення температури за часом, створений на основі записів у базі даних, створеній реалізацією модифікованого методу

Як видно на рисунках 4.2 та 4.3, запропонований метод згенерував значно меншу кількість записів значень температур в певні моменти часу, але при цьому зберіг здатність відслідковувати стрибок температур, і при тому зберіг тільки ключеві значення цього стрибка.

Можна сказати, що результати експерименту засвідчили, що запропонований метод демонструє здатність ефективно відслідковувати короткотривалі збурення, зокрема синусоїдальний стрибок температури. Незважаючи на зменшену кількість згенерованих записів у порівнянні з базовим методом, запропонований підхід зберігає ключові значення показників під час збурення.

Висновок до розділу 4

У розділі проведено експериментальне дослідження ефективності запропонованого методу збору та зберігання даних. На основі датасету IoTSDD_2025 реалізовано модель у середовищі Google Collaboratory, що дозволила оцінити вплив методу на обсяг збереженої інформації. Результати показали зменшення кількості записів більш ніж у 2,5 раза без втрати важливої інформації, зокрема виявлення короткотривалих змін параметрів середовища.

Отримані дані підтвердили, що запропонований метод забезпечує високу енергоефективність, знижує навантаження на сховища та зберігає аналітичну цінність даних. Таким чином, цілі дослідження були досягнуті, а розроблене рішення може бути ефективно застосоване в реальних умовах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У межах проведеного дослідження було здійснено аналіз ключових проблем збору та зберігання інформації в сенсорних мережах Інтернету речей, що дозволило сформувавши основу для розробки ефективних методів програмної обробки даних. Сутність виявлених проблем полягає, зокрема, в надмірному обсязі переданої інформації, обмежених енергетичних ресурсах сенсорних вузлів, складнощах синхронізації даних та забезпеченні їх достовірності в умовах розподіленого середовища.

Враховуючи ці чинники, в роботі було обґрунтовано доцільність орієнтації на підвищення ефективності обробки даних саме на рівні програмного забезпечення як ключового інструменту для оптимізації функціонування сенсорних мереж.

У процесі дослідження було розроблено модифікований метод збору інформації, в основі якого лежить концепція агрегації даних на проміжних вузлах. Запропоноване рішення передбачає контекстно-залежну компресію інформації, динамічне регулювання частоти опитування сенсорів відповідно до змін параметрів середовища та семантичної значущості даних. Реалізація даного методу дозволяє не лише зменшити кількість збережених даних, але й забезпечити збереження релевантної інформації без суттєвих втрат її аналітичної цінності.

Було проведено імітаційне моделювання розробленого методу та реалізовано серію експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку ефективності впровадженого підходу. Результати експериментів підтвердили доцільність застосування запропонованого методу: обсяг збережених даних зменшено в 2,54 рази у порівнянні з традиційними підходами, при цьому було збережено необхідний рівень якості аналітичної обробки даних. Отримані результати свідчать про досягнення поставленої мети дослідження та підтверджують гіпотезу щодо ефективності адаптивного підходу до збору та зберігання інформації в сенсорних мережах IoT.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антонова Г. В., Кедич А. В., Ковирьова О. В. Інтернет речей та бездротові смарт-мережі в точному землеробстві. Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2019. URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/168487>
2. Барчук Д. О. Метод та система збору даних протоколу маршрутизації RPL з датчиків Zolertia Z1 у мережах Інтернету речей. 2023.
3. Волошко С. В., Курца Д. О. Інформаційна безпека в безпроводових сенсорних мережах. Новітні інформаційні системи та технології. 2018. № 9. URL: <https://journals.nupp.edu.ua/mist/article/view/1039>
4. Войтех М. Ю. Програмний засіб для збирання та зберігання даних з розподілених сенсорних модулів. 2023. URL: <https://er.nau.edu.ua/items/cbeecfe0-bec7-4114-808c-d259558cf773>
5. Гненний А. П., Гордієнко Ю. Г. Актуальні механізми ідентифікації особистості в інтернеті речей. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2018. № 30-31. С. 19-25.
6. Гусак О. А. Розробка моделі обміну даними вузла літаючої сенсорної мережі. 2019. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/2c88f684-bbba-4a0e-a9d1-736fc5729e20>
7. Джулій В. М. та ін. Дослідження задач побудови бездротових сенсорних мереж. 2022. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/8d47ce1b-c0c4-49c2-b45c-d449a7a9ec74>
8. Джулій В. М. та ін. Модель оцінки ймовірно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережі інтернет речей. 2019. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/d07d41b0-846e-49e2-a982-0e98364c2bae>
9. Жураковський Б. Ю., Пархомей І. Р., Дружинін В. А. Обробка інформації в сенсорних мережах. Адаптивні системи автоматичного управління. 2018. № 1. С. 42-57.
10. Карпенко А. та ін. Забезпечення інформаційної безпеки в бездротових сенсорних мережах. Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека:

- освіта, наука, техніка». 2020. Т. 2, № 10. С. 54-66. URL: <https://www.csecurity.kubg.edu.ua/index.php/journal/article/view/207>
- 11.Кисіль А. І. Метод енергоефективної кластеризації в безпроводових сенсорних мережах із використанням БПЛА. 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/57c98928-a5b8-40f7-8d07-a98e50e29637>
- 12.Ковбаса А. О. Метод побудови IoT рішення для високопродуктивних сенсорних мереж із застосуванням BigData технологій. 2020. URL: <https://ela.kpi.ua/items/b7d17e20-f3a9-434e-a4fa-04c4689961e6>
- 13.Ковбаса А. О., Петрова В. М. Методи балансування навантаження в бездротових сенсорних мережах. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ». 2019. URL: <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/168749/168555>
- 14.Колісник Д. О. Аналіз методів управління доступом до середовища в безпроводових сенсорних мережах. 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/1637262d-d18b-4d66-a941-776faf6a5c83>
- 15.Крайник О. В. Методи та алгоритми взаємодії безпроводних сенсорних мереж : магістерська дис. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48116>
- 16.Кравчук С. О. та ін. Основи побудови безпроводових сенсорних мереж. 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/d51dad0c-3c4a-4cf9-8ebb-b714ddef2362>
- 17.Кременецький С. О. Метод побудови структури сенсорної мережі за критерієм швидкість передачі. 2024. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/9987fc76-6ba3-4941-86e8-32449db26959>
- 18.Левченко А. О. Метод призначення завдань обчислювальним вузлам IoT. 2024. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/7769c97a-202b-48dc-ab89-7dae7e5162e2>
- 19.Машталір В. та ін. Концептуальні підходи застосування бездротових сенсорних мереж арміями передових країн світу. Сучасні інформаційні

- технології у сфері безпеки та оборони. 2023. Т. 47, № 2. С. 96-112. URL: <https://sit.nuou.org.ua/article/view/286346>
20. Міхненко Я. О. Модифікований метод передачі даних в мережі Інтернету Речей. 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8e1cd61f-c1e2-4ed9-bb2a-a987a1639e39/content>
21. Муляр І. В. та ін. Модель оцінки ймовірно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережі Інтернет речей. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2019. № 63. С. 96-107.
22. Оборін О. О. Методи виявлення аномального трафіку в IoT. 2022. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/cfa5a123-d771-41b1-ae97-6218c04d0b9e>
23. Олефіренко В. С. Розвиток методів синхронізації в безпроводних сенсорних мережах. 2024. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/15472>
24. Павліченко О. С. Методи підвищення швидкості побудови топології сенсорної мережі. 2022. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/6dca45f5-445b-42dd-8a50-0e2e4fcde272>
25. Романченко Д. О. Модель сенсорної мережі комунального господарства. 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/534257aa-bc1b-4167-93f8-a5945e98ff6b>
26. Романюк А. В. Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами. 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/44daf502-f314-48bc-ae4e-e277324ae038/content>
27. Семенюк О. М. Розробка алгоритмів для визначення місцезнаходження сенсорів в бездротових сенсорних мережах. Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології. 2023. С. 168-173. URL: <https://conf.nltu.edu.ua/index.php/conf1/article/view/52>

- 28.Сергійчук Д. М. Розвиток алгоритмів застосування технологій MIMO у мобільних сенсорних мережах. 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8cb12709-7f77-46d4-948c-2a85f8547fc7/content>
- 29.Синявіна Є. П. Розвиток алгоритмів синхронізації в мобільних сенсорних мережах. 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/items/ac3b3c42-c1ea-4ffe-b524-95be0c823b3f>
- 30.Стрела Т. С. Метод вибору головного вузла кластеру в безпроводових сенсорних мережах з використанням нечіткої логіки. Збірник наукових праць [Військового інституту телекомунікацій та інформатизації]. 2018. № 4. С. 113-124.
- 31.Таранець В. В. Аналіз методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/e7157e26-5860-475f-ad6b-a1abf22d581c>
- 32.Терьохін В. Л., Стервоєдов М. Г., Рідозуб О. В. Застосування технологій IoT та хмарних сервісів для радіаційного моніторингу. Control systems & computers. 2021.
- 33.Третяк А. В. Застосування літальних сенсорних мереж для побудови Інтернету речей. 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/items/a0a9355c-74c1-4039-8496-fff9648ed8aa>
- 34.Третяк А. В. Порівняльний аналіз методів стиску даних в безпроводових сенсорних мережах. 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/173dd96f-8b89-4eef-b108-de0295815543>
- 35.Ушаков С. М. Метод кодування даних в мережі Інтернету Речей за допомогою нейромережі. 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8c5322e9-a406-48b4-a5e7-8d04d7f62e36/content>
- 36.Черняк Т. Г. Методика оцінки ризиків кібербезпеки в системах Інтернет-речей : дис. 2022. URL: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/46652/1/Черняк.pdf>

37. Шаповалова Т., Сухотеплий В., Луценко О. Проблематика використання безпроводних сенсорних мереж у військових цілях. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. Т. 331, № 1. С. 97-100. URL: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/16>
38. Янченков О. С. Програмне забезпечення для побудови сенсорної мережі на основі Raspberry Pi. 2022. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/805bf9d1-6d58-4edb-9baf-7c21348444e8/content>
39. Ясеновський Е. П. Розробка моделі вузла літаючої сенсорної мережі. 2019. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/01a7a5ca-c294-40dd-a8b1-8c6f07b4847d>
40. Zharovskyi R. O., Martseniuk I. V., Palamar A. M. Комп'ютеризована система виявлення небезпечних концентрацій метану на основі сенсорних мереж. *Актуальні задачі сучасних технологій*. 2024. С. 494.
41. Sofia, et al. "A comparative analysis of data collection methods in internet of things." *Proceedings of the Third International Conference on Advanced Informatics for Computing Research*. 2019.
42. Biradar, Rajashree V., et al. "Classification and comparison of routing protocols in wireless sensor networks." *Special Issue on Ubiquitous Computing Security Systems* 4.2 (2009): 704-711.
43. Gavrillov, Andrei, et al. "Using IoT Protocols in Real-Time Systems: Protocol Analysis and Evaluation of Data Transmission Characteristics." *Journal of Computer Networks and Communications* 2022.1 (2022): 7368691.
44. Harb, Hassan, and Abdallah Makhoul. "Energy-efficient sensor data collection approach for industrial process monitoring." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14.2 (2017): 661-672.
45. Zagrouba, Rachid, and Amine Kardi. "Comparative study of energy efficient routing techniques in wireless sensor networks." *Information* 12.1 (2021): 42.
46. Kaur, Mandeep, and Amit Munjal. "Data aggregation algorithms for wireless sensor network: A review." *Ad hoc networks* 100 (2020): 102083.

47. Bashir, Ali Kashif, et al. "Energy efficient in-network RFID data filtering scheme in wireless sensor networks." *Sensors* 11.7 (2011): 7004-7021.
48. Bakirov, Kuanysh (2025). Datasets from IoT devices. figshare. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28667981.v1>
49. S. Ushakov, L. Globa and V. Kurdecha, "EVOLVING INDUSTRY 4.0: A METHODOLOGICAL APPROACH TO OPTIMIZING IOT ONTOLOGIES FOR ENHANCED AUTOMATION," 2024 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Tbilisi, Georgia, 2024, pp. 131-134, doi: 10.1109/BlackSeaCom61746.2024.10646225.
50. Ushakov Serhii and Kurdecha Vasyl, "Optimizing Data Transmission in IoT Networks through Enhanced Compression and Edge Computing Techniques," 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Kyiv, Ukraine, 2023, pp. 76-79, doi: 10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380347.
51. Globa, L., Kurdecha, V., Ushakov, S. (2023). The Modified Approach to Internet of Things Data Transmission Based on a Combined Neural Network Autoencoder. In: Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Ustimenko, V., Globa, L. (eds) Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_13
52. Eduard Siemens, Vasyl Kurdecha, Serhii Ushakov, "INTERNET OF THINGS DATA TRANSFER METHOD USING NEURAL NETWORK AUTOENCODER" *Information and Telecommunication Sciences*, 2023, #1, DOI: 10.20535/2411-2976.12023.9-15
53. Globa, L., Kurdecha, V., Popenko, D., Bezvuhliak, M., Porolo, Y. (2022). Data Collection and Processing Method in the Networks of Industrial IOT. In: Perakovic, D., Knapcikova, L. (eds) Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures. FABULOUS 2022. Lecture Notes of the Institute for

Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol 445. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15101-9_11

54. J. Yamnenko, V. Kurdecha and N. Gvozdetska, "Domestic Solid Waste Disposal Logistic Optimization Using Internet of Things Technologies," 2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odesa, Ukraine, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716596.