

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Системи моніторингу навколишнього середовища на
основі технологій Інтернету речей»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології
(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

_____ Ростислав ЗАКРОЙЩИКОВ
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав: здобувач вищої освіти група ІСД-42

Ростислав Закройщиков
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник
д.т.н., професор

Каміла СТОРЧАК
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Київ 2026

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедру _____ Каміла СТОРЧАК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ростислава ЗАКРОЙЩИКОВА

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Системи моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей».

керівник кваліфікаційної роботи Каміла СТОРЧАК, д.т.н., професор,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій
від « ____ » _____ 2026 р. № ____

2. Строк подання кваліфікаційної роботи « ____ » _____ 2026 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: наукові та технічні джерела з Інтернету речей, екологічного моніторингу, сенсорних мереж, бездротових технологій передавання даних і засобів візуалізації телеметрії.

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

- 1) проаналізувати теоретичні основи екологічного моніторингу та IoT-технології;
- 2) сформулювати вимоги й архітектуру системи;
- 3) обґрунтувати вибір апаратних і програмних компонентів;
- 4) описати функціонування, обробку даних і перспективи розвитку системи;
- 5) представити MVP-прототип.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір теми, уточнення мети, об'єкта, предмета та завдань роботи	01.02–07.02.2026	
2	Аналіз джерел з екологічного моніторингу та технологій Інтернету речей	08.02–21.02.2026	
3	Дослідження сенсорних засобів і технологій передавання даних	22.02–07.03.2026	
4	Формування вимог до системи та постановка задачі проектування	08.03–14.03.2026	
5	Розроблення функціональної та структурної архітектури системи	15.03–04.04.2026	
6	Обґрунтування вибору апаратних і програмних компонентів	05.04–18.04.2026	
7	Опис алгоритму функціонування, обробки, візуалізації даних і MVP-прототипу	19.04–09.05.2026	
8	Оформлення роботи, підготовка висновків і демонстраційних матеріалів	10.05–31.05.2026	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Ростислав ЗАКРОЙЩИКОВ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник
кваліфікаційної роботи

(підпис)

Каміла СТОРЧАК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 77 с., 16 рис., 13 табл., 35 джерел.

Мета роботи – обґрунтувати архітектуру та склад програмно-апаратних компонентів системи моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей, а також визначити особливості її функціонування, обробки й візуалізації даних.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу стану навколишнього середовища із застосуванням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій.

Предмет дослідження – методи, засоби, архітектурні рішення та програмно-апаратні компоненти систем моніторингу навколишнього середовища, побудованих на основі технологій Інтернету речей.

Методи дослідження – аналіз наукових і технічних джерел, порівняльне оцінювання апаратних платформ і мережевих технологій, системний підхід до проєктування IoT-архітектури. За результатами застосування зазначених методів обґрунтовано структуру системи моніторингу та склад її ключових апаратних і програмних компонентів.

Завдання роботи – проаналізувати предметну область екологічного моніторингу; дослідити технології Інтернету речей і сенсорні засоби; обґрунтувати архітектуру системи; вибрати апаратні та програмні компоненти; описати алгоритм функціонування; оцінити переваги, обмеження та перспективи розвитку запропонованого рішення.

Короткий зміст роботи. У роботі стисло охарактеризовано сутність екологічного моніторингу, параметри довкілля та засоби їх вимірювання, розглянуто архітектурні рівні IoT-систем і технології передавання даних. Обґрунтовано структуру системи моніторингу, визначено склад апаратної та програмної частини, описано алгоритм функціонування, обробки й візуалізації даних, а також узагальнено переваги, обмеження та перспективи розвитку запропонованого підходу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ,
СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ, WI-FI, LORAWAN,
ESP32, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ	12
1.1 Сутність і завдання екологічного моніторингу	12
1.2 Основні параметри навколишнього середовища та засоби їх вимірювання	13
1.3 Технології Інтернету речей у системах збору екологічних даних	15
1.4 Аналіз сучасних підходів і проблем реалізації IoT-систем моніторингу	18
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ	21
2.1 Формування вимог до системи та постановка задачі проєктування	21
2.2 Розроблення функціональної та структурної архітектури системи	26
2.3 Вибір апаратних компонентів і каналів передавання даних	32
2.4 Проєктування програмного забезпечення та сховища даних	38
РОЗДІЛ 3. ФУНКЦІОНУВАННЯ, ОБРОБКА ДАНИХ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ	45
3.1 Алгоритм функціонування системи та сценарії використання	46
3.2 Організація обробки, візуалізації та аналізу даних	53
3.3 Оцінювання переваг, обмежень і практичної доцільності впровадження	59
3.4 Перспективи розвитку та напрями вдосконалення системи	63
3.5 Програмна реалізація MVP-прототипу системи моніторингу	68
ВИСНОВКИ	71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	73
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)	76

ВСТУП

Моніторинг параметрів довкілля є важливою складовою екологічної безпеки, оскільки якість повітря, води, ґрунту, шумове навантаження та мікроклімат безпосередньо впливають на здоров'я населення і стан інфраструктури. Традиційні підходи, що спираються на поодинокі стаціонарні пости та періодичні вимірювання, не забезпечують належної оперативності, просторової деталізації й масштабованості [29; 35].

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що сучасні підходи до екологічного моніторингу орієнтуються на поєднання сенсорних мереж, енергоефективних каналів передавання даних, хмарних платформ і засобів візуалізації. У наукових та прикладних роботах особлива увага приділяється точності недорогих сенсорів, масштабованості мережі вимірювальних вузлів, захищеності телеметрії та придатності рішень до тривалої польової експлуатації. Водночас питання побудови доступних модульних систем, які поєднують простоту реалізації, достатню інформативність і можливість подальшого розширення, залишаються актуальними [11; 28].

Перспективним напрямом розвитку є використання технологій Інтернету речей, які дають змогу поєднати сенсори, канали зв'язку, серверну інфраструктуру, бази даних і вебінтерфейси в єдину систему безперервного спостереження. Такий підхід забезпечує автоматизований збір, передавання, зберігання, аналіз і візуалізацію екологічних даних у режимі, наближеному до реального часу [1; 3; 5].

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання: проаналізувати сутність і завдання екологічного моніторингу; дослідити параметри довкілля та засоби їх вимірювання; розглянути архітектурні рівні IoT-систем і канали передавання даних; сформулювати вимоги до системи; обґрунтувати вибір апаратних і програмних компонентів; описати алгоритм функціонування, обробки та візуалізації даних; оцінити переваги, обмеження і перспективи розвитку системи.

Метою бакалаврської роботи є обґрунтування архітектури та складу програмно-апаратних компонентів системи моніторингу навколишнього

середовища на основі технологій Інтернету речей, а також визначення особливостей її функціонування, обробки й візуалізації даних. Для досягнення цієї мети проаналізовано предметну область екологічного моніторингу, розглянуто типові параметри довкілля і сенсорні засоби їх вимірювання, досліджено архітектуру IoT-систем та обґрунтовано склад їх апаратних і програмних компонентів.

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу стану навколишнього середовища із застосуванням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Предметом дослідження є методи, засоби, архітектурні рішення та програмно-апаратні компоненти систем моніторингу, побудованих на основі технологій Інтернету речей.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в узагальненні та систематизації вимог до побудови модульної системи моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей, а також у запропонуванні узгодженої архітектури взаємодії сенсорного вузла, каналу зв'язку, серверної платформи та засобів візуалізації для локальних і розподілених сценаріїв застосування [1; 7].

У роботі використано методи аналізу наукових і технічних джерел, порівняльного оцінювання апаратних платформ, мережевих технологій та засобів збирання даних, а також системний підхід до побудови архітектури IoT-систем. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованих підходів під час проєктування систем контролю якості повітря, мікроклімату, пилового навантаження та інших екологічних параметрів [3; 11; 18].

Теоретичне значення одержаних результатів полягає в систематизації підходів до побудови IoT-систем екологічного моніторингу, уточненні складу їх функціональних рівнів і визначенні вимог до взаємодії сенсорного вузла, мережевої інфраструктури та серверної платформи. Апробація результатів і публікації за темою роботи не заявляються [7; 23].

Структура роботи складається зі вступу, трьох розділів, висновків і переліку посилань. У першому розділі розглянуто теоретичні основи екологічного

моніторингу та роль IoT, у другому — питання проектування системи, у третьому — алгоритм функціонування, обробку даних, оцінювання практичної доцільності та короткий опис MVP-прототипу.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

1.1 Сутність і завдання екологічного моніторингу

Екологічний моніторинг — це систематичне спостереження, оцінювання та прогнозування стану компонентів довкілля з метою своєчасного виявлення небезпечних змін і підтримки управлінських рішень. У сучасних умовах зростання антропогенного навантаження він виконує не допоміжну, а базову інформаційну функцію в системі екологічної безпеки територій, громад і підприємств [13; 29].

Функціонально моніторинг охоплює кілька взаємопов'язаних етапів: отримання достовірних даних, аналітичну обробку результатів, порівняння з нормативами та формування прогнозів. Практична цінність таких систем полягає не лише у фіксації поточного стану середовища, а й у ранньому виявленні ризиків та швидкому реагуванні на відхилення [13; 28].

За масштабом розрізняють глобальний, національний, регіональний і локальний моніторинг, а за об'єктом — атмосферний, водний, ґрунтовий, біологічний, радіаційний, шумовий та комплексний. Для IoT-рішень найбільш характерним є локальний і регіональний рівень, де потрібна густа мережа відносно недорогих сенсорних вузлів і безперервний обмін даними [14; 15].

До основних завдань екологічного моніторингу належать виявлення джерел негативного впливу, оцінювання фактичних рівнів забруднення, аналіз просторово-часової динаміки, підтримка природоохоронних заходів і попередження надзвичайних ситуацій. Ефективність системи визначається якістю даних: достовірністю, оперативністю, репрезентативністю та можливістю коректного порівняння результатів у часі й просторі.

Традиційні системи спостереження забезпечують високу точність, але залишаються дорогими та важко масштабованими. Інтеграція технологій Інтернету речей дає змогу поєднати референсні пости з розподіленими

сенсорними мережами, підвищити деталізацію вимірювань і забезпечити безперервне цифрове представлення стану довкілля. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 1.1.

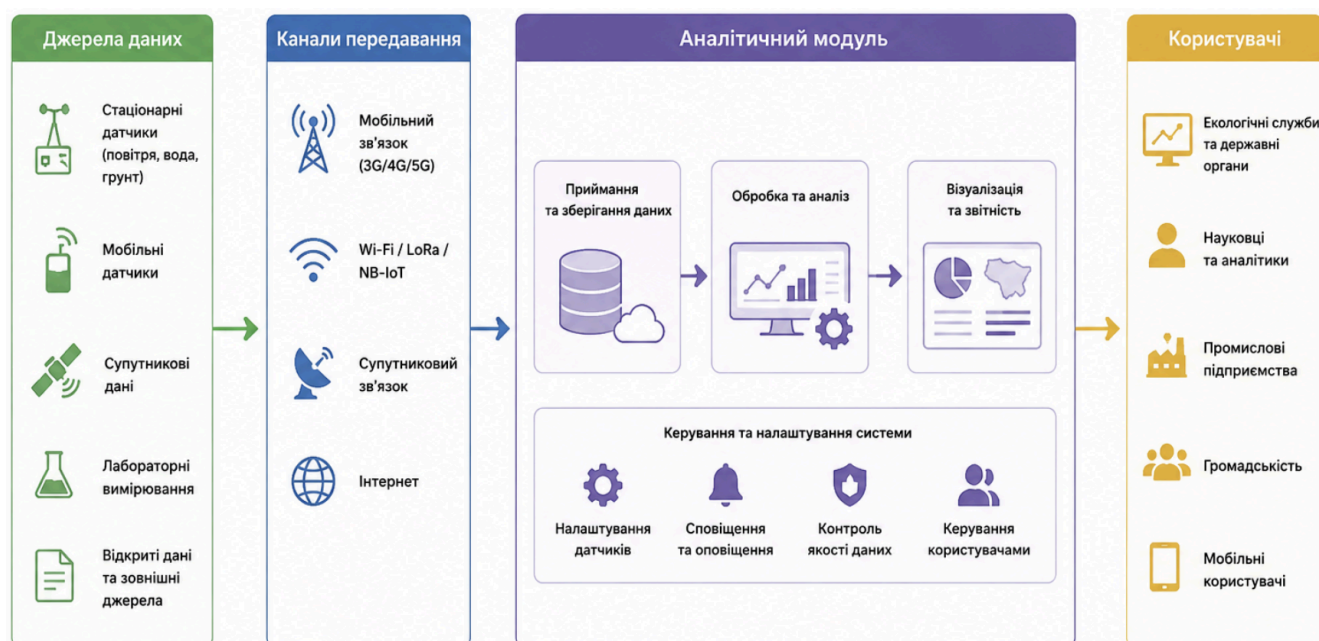


Рисунок 1.1 – Загальна структура системи екологічного моніторингу: джерела даних, канали передавання, аналітичний модуль, користувачі

1.2 Основні параметри навколишнього середовища та засоби їх вимірювання

Результативність екологічного моніторингу залежить від правильного вибору контрольованих параметрів і засобів їх вимірювання. У прикладних IoT-системах зазвичай контролюють показники атмосферного повітря, водного середовища, ґрунту та фізичні фактори впливу на людину й інфраструктуру [29; 35].

Для повітря найбільш важливими є температура, вологість, тиск, концентрації CO₂, CO, NO₂, SO₂, VOC, а також масова концентрація твердих частинок PM_{2.5} і PM₁₀. Їх вимірюють за допомогою цифрових метеосенсорів, газових датчиків електрохімічного або напівпровідникового типу та оптичних пиломірів, що різняться точністю, селективністю, вартістю й потребою в калібруванні [29; 35].

У водному моніторингу контролюють температуру, рН, електропровідність, розчинений кисень, каламутність, рівень води та вміст домішок. Для ґрунту найчастіше відстежують вологість, температуру, електропровідність, кислотність і солоність, що особливо важливо для аграрних і рекультиваційних задач [27; 28].

Окрему групу становлять датчики шуму, вібрації, освітленості, ультрафіолетового випромінювання та радіаційного фону. У міському середовищі саме ці показники часто доповнюють дані про якість повітря і дозволяють формувати більш повну картину екологічного стану території [11; 27].

Під час вибору сенсора необхідно враховувати діапазон вимірювання, чутливість, похибку, часову стабільність, умови експлуатації та енергоспоживання. Важливими процедурами є калібрування, валідація та програмна компенсація впливу температури, вологості та інших зовнішніх чинників, оскільки саме вони визначають практичну придатність одержаних даних [11; 35]. Узагальнені дані наведено в табл. 1.1. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 1.2.

Таблиця 1.1 – Основні параметри навколишнього середовища, одиниці вимірювання та типи сенсорів

Параметр	Одиниця	Типи сенсорів
Температура	°C	BME280, SHT31, DS18B20
Вологість	%	BME280, SHT31, DHT22
Тиск	гПа	BME280, BMP280
CO ₂	ppm	MH-Z19B, SenseAir S8
PM2.5 / PM10	мкг/м ³	PMS5003, PMS7003, SDS011
Шум	дБ	Шумоміри, мікрофонні модулі

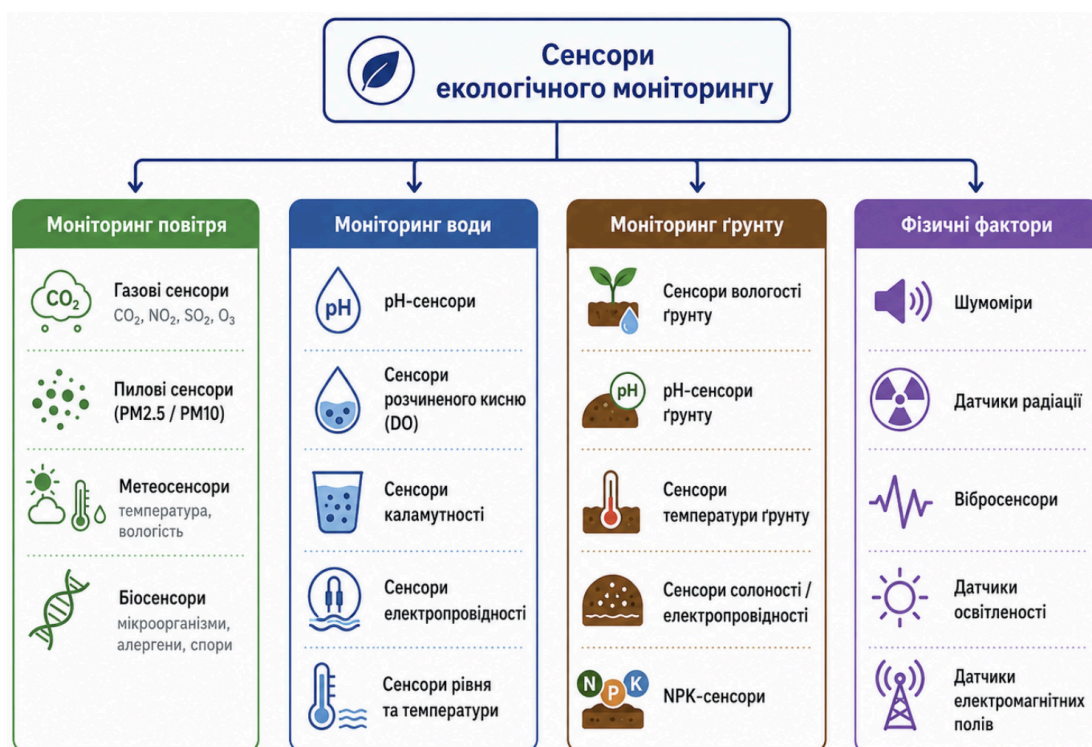


Рисунок 1.2 – Класифікація сенсорів для моніторингу повітря, води, ґрунту та фізичних факторів

1.3 Технології Інтернету речей у системах збору екологічних даних

Технології Інтернету речей формують технічну основу сучасних систем екологічного моніторингу. Типова IoT-система містить рівень сенсорів і виконавчих пристроїв, комунікаційний рівень, рівень обробки та зберігання даних, а також користувацький рівень, на якому реалізується візуалізація, аналітика і підтримка прийняття рішень [1; 2; 3].

На рівні сенсорних вузлів використовують мікроконтролерні платформи, цифрові та аналогові датчики, модулі живлення і засоби локальної попередньої обробки. Вузол виконує опитування сенсорів, первинну фільтрацію, формування повідомлень та передавання телеметрії до шлюзу або безпосередньо до сервера [8; 10].

Для передавання даних залежно від сценарію застосовують Wi-Fi, Bluetooth Low Energy, Zigbee, LoRaWAN, NB-IoT та інші технології. Wi-Fi забезпечує високу швидкість у локальних мережах, LoRaWAN орієнтована на енергоефективний зв'язок на великих відстанях, а стільникові технології доцільні для віддалених точок із широким покриттям [18; 19; 20].

На серверному рівні дані приймаються через HTTP або MQTT, нормалізуються, зберігаються у реляційних чи часових базах, після чого використовуються для побудови дашбордів, сповіщень і звітів. Важливими властивостями такої інфраструктури є масштабованість, надійність, захищеність каналів зв'язку та можливість інтеграції з аналітичними сервісами [2; 3; 23].

Для екологічного моніторингу IoT-підхід є особливо цінним, оскільки поєднує автономність сенсорних вузлів, безперервність спостереження та доступність даних для різних категорій користувачів. Це створює передумови для впровадження систем раннього попередження, цифрових сервісів громади та інструментів підтримки сталого розвитку [4; 11; 24]. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 1.3. Узагальнені дані наведено в табл. 1.2.

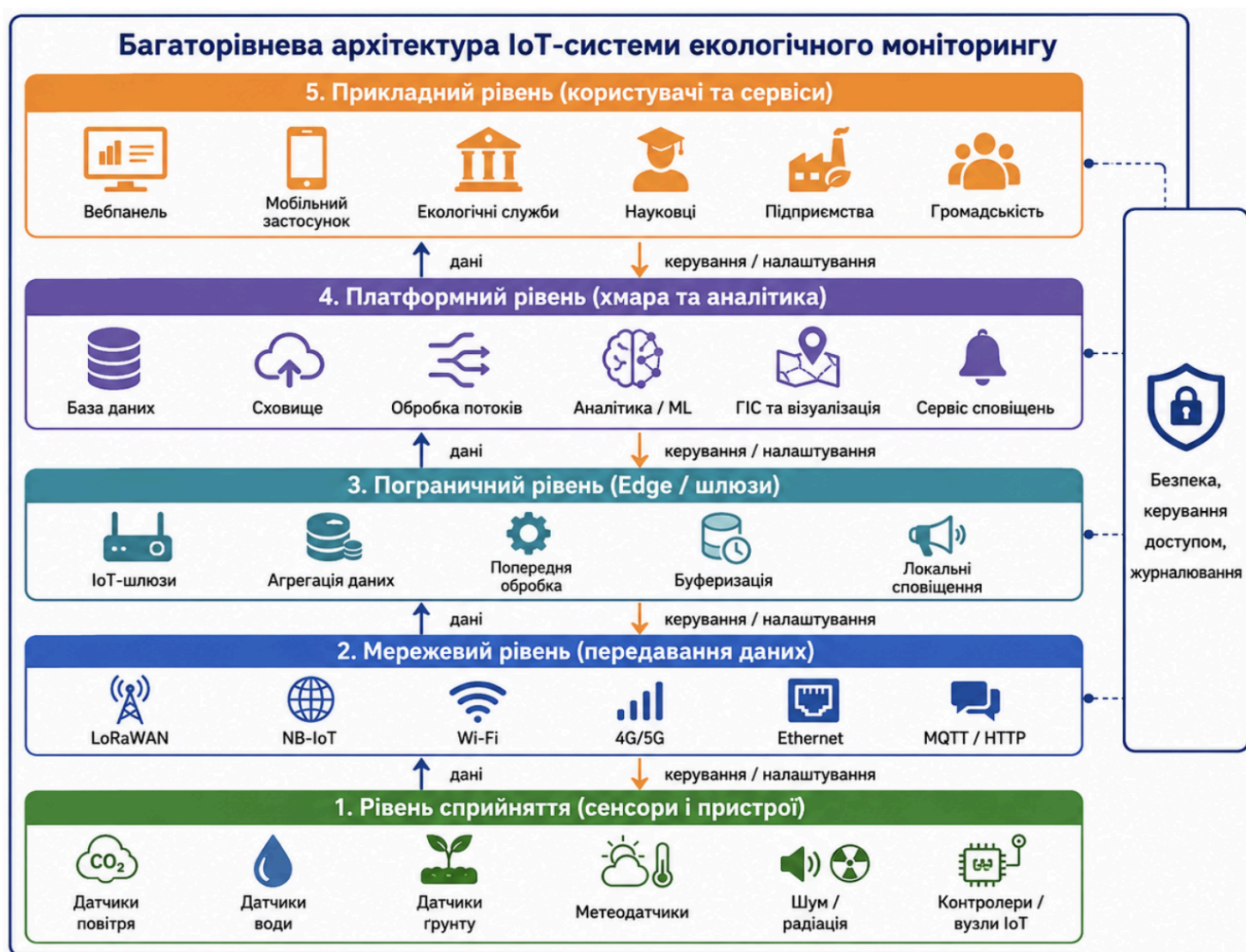


Рисунок 1.3 – Багаторівнева архітектура IoT-системи екологічного моніторингу

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика IoT-технологій зв'язку для екологічного моніторингу

Технологія	Дальність	Енергоспоживання	Особливості
Wi-Fi	десятки метрів	середнє	висока швидкість, локальне покриття
LoRaWAN	кілометри	низьке	велика дальність, малі пакети
NB-IoT	широке операторське покриття	низьке/середнє	добре для віддалених вузлів
LTE-M	широке	середнє	вища швидкість, мобільність
ZigBee	десятки-сотні метрів	низьке	mesh-мережі

1.4 Аналіз сучасних підходів і проблем реалізації IoT-систем моніторингу

Сучасні системи моніторингу докільця дедалі частіше будуються як розподілені IoT-платформи, що поєднують стаціонарні пости, локальні шлюзи, хмарні сервіси та вебінтерфейси. Їх перевагами є безперервний збір даних, висока просторово-часова деталізація спостережень і можливість швидкого масштабування [4; 11].

Водночас практична реалізація таких систем пов'язана з низкою типових проблем. До них належать похибки недорогих сенсорів, дрейф калібрування, чутливість до погодних умов, нестабільність живлення автономних вузлів, обмеження каналів зв'язку та складність довготривалої польової експлуатації [11; 18; 27].

Окрему увагу необхідно приділяти безпеці та надійності: захисту телеметрії, автентифікації пристроїв, резервуванню серверної частини, контролю цілісності даних і стійкості до збоїв. Для багатовузлових систем важливою також є інтеоперабельність обладнання, уніфікація форматів повідомлень та можливість централізованого адміністрування [3; 23].

Ефективним вважається комбінований підхід, за якого референсні засоби вимірювання доповнюються мережею доступніших сенсорних вузлів, а програмна

частина забезпечує валідацію, фільтрацію та агрегування даних. Така модель дозволяє поєднати прийнятну вартість, достатню точність і гнучкість масштабування [11; 27; 28].

Отже, перспективні IoT-системи моніторингу мають розглядатися як поєднання апаратної інфраструктури, телекомунікацій, захищеної серверної платформи та алгоритмів аналітики. Саме комплексний підхід створює основу для побудови практично придатних рішень у сфері контролю стану навколишнього середовища [2; 4]. Узагальнені дані наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні проблеми реалізації IoT-систем екологічного моніторингу та шляхи їх мінімізації

Проблема	Прояв	Шлях мінімізації
Похибка сенсорів	дрейф і нестабільність вимірювань	калібрування, фільтрація, валідація
Перебої зв'язку	втрата пакетів даних	буферизація, повторна передача
Енергетичні обмеження	мала автономність вузлів	sleep-режими, сонячне живлення
Кіберзагрози	підміна та перехоплення даних	шифрування, автентифікація

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

2.1 Формування вимог до системи та постановка задачі проєктування

Проектування системи моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей потребує чіткого визначення вимог до її функціонування, структури, експлуатаційних характеристик та інформаційної взаємодії між складовими. На відміну від локальних вимірювальних комплексів, сучасна IoT-система повинна не лише збирати дані від сенсорів, а й забезпечувати їх передавання, попередню обробку, накопичення, візуалізацію, аналіз та формування повідомлень для користувачів у реальному часі або з мінімальною затримкою. Тому формування вимог є ключовим етапом, від якого залежить логіка подальшого проєктування апаратної та програмної частини.

Актуальність створення таких систем зумовлена потребою оперативного контролю за параметрами довкілля в міських, промислових, аграрних та природоохоронних зонах. Традиційні підходи до екологічного спостереження часто базуються на періодичних виїзних вимірюваннях або використанні обмеженої кількості стаціонарних постів контролю. Це не дозволяє отримувати достатньо щільну просторово-часову картину змін параметрів середовища. Натомість IoT-підхід передбачає розгортання мережі інтелектуальних вузлів, здатних працювати автономно, передавати інформацію через бездротові канали та інтегруватися з хмарною інфраструктурою [29; 35].

У загальному випадку система моніторингу навколишнього середовища має забезпечувати контроль таких параметрів, як температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск, концентрація газів, рівень запиленості, освітленість, рівень шуму, а за потреби й інші показники, що характеризують стан повітря, води або ґрунту. Конкретний набір параметрів визначається сферою застосування системи. Для бакалаврської роботи доцільно орієнтуватися на універсальну

модульну архітектуру, яка дозволяє масштабувати систему та адаптувати її до різних сценаріїв використання без повної зміни концепції [11; 27].

Під час формування вимог до системи доцільно враховувати інтереси декількох груп користувачів. По-перше, це оператори або адміністратори системи, які відповідають за налаштування вузлів, контроль їх працездатності, оновлення програмного забезпечення та аналіз технічного стану мережі. По-друге, це кінцеві користувачі, які переглядають поточні показники, історичні графіки, отримують сповіщення про перевищення граничних значень та формують звітність. По-третє, це зовнішні інформаційні системи або сервіси, які можуть використовувати відкриті або захищені програмні інтерфейси для інтеграції даних моніторингу з іншими платформами аналітики, диспетчеризації чи підтримки прийняття рішень [3; 18].

Функціональні вимоги до системи визначають набір дій, які вона повинна виконувати. Насамперед система має забезпечувати періодичне зчитування даних із сенсорів за заданим часовим інтервалом. Частота вимірювання залежить від динаміки контрольованих параметрів і енергетичних можливостей вузла. Для повільно змінних параметрів, таких як температура чи атмосферний тиск, інтервал може становити від однієї до кількох хвилин. Для контролю газового складу або пилу в умовах промислового майданчика інтервал може бути скорочений. Після зчитування система повинна виконати первинну перевірку коректності даних, наприклад виявити відсутність відповіді сенсора, вихід значень за фізично допустимі межі або наявність різких стрибків, що вказують на похибку вимірювання [24; 30].

Наступною функціональною вимогою є передавання отриманих даних до центрального вузла або хмарного сервера. Передавання має здійснюватися з використанням енергоефективних і надійних мережевих протоколів. Система повинна підтримувати буферизацію даних у разі тимчасової відсутності зв'язку та подальшу синхронізацію після відновлення каналу. Це особливо важливо для вузлів, розташованих у віддалених районах або в умовах нестабільного покриття.

Важливою функцією є централізоване зберігання вимірювань із можливістю подальшого пошуку, агрегації та візуалізації. Дані повинні бути доступні у вигляді поточних показників, історичних рядів, статистичних зведень за періодами, картографічного відображення та повідомлень про події. Також система має надавати засоби налаштування порогових значень для кожного контролюваного параметра. У разі перевищення порога, швидкої зміни показника або відмови обладнання має формуватися сповіщення для оператора [14; 15].

До функціональних вимог слід віднести і можливість адміністрування системи. Адміністратор повинен мати доступ до переліку вузлів, стану їх підключення, рівня заряду джерела живлення, версії програмного забезпечення, журналу помилок та параметрів конфігурації. Це дозволить забезпечити технічну підтримку системи протягом тривалого часу та мінімізувати витрати на обслуговування [35].

Нефункціональні вимоги визначають якісні характеристики системи. Насамперед ідеться про надійність. Система моніторингу повинна працювати безперервно впродовж тривалих періодів, стійко переносити короточасні втрати зв'язку, збої окремих сенсорів або вузлів та забезпечувати відновлення після відмови. Для досягнення цієї вимоги слід передбачити механізми самодіагностики, локального кешування даних, підтвердження доставки повідомлень та резервування на рівні програмної логіки [18; 19; 20].

Другою критичною нефункціональною вимогою є масштабованість. Проєктована система повинна підтримувати поступове збільшення кількості вузлів без необхідності суттєвої перебудови архітектури. Якщо на початковому етапі мережа може складатися з кількох експериментальних станцій, то надалі вона має бути розширювана до десятків або сотень точок вимірювання. Це накладає вимоги на адресацію вузлів, організацію черг повідомлень, структуру бази даних і продуктивність серверної частини [3; 23].

Третьою важливою характеристикою є енергоефективність. Багато вузлів екологічного моніторингу функціонують у польових умовах і живляться від акумуляторів або автономних джерел енергії. Тому апаратна платформа, сенсори

та мережевий інтерфейс повинні мати режими низького енергоспоживання. Алгоритм роботи вузла має передбачати сон між циклами вимірювання, оптимізацію кількості передаваних пакетів і мінімізацію часу активності радіомодуля.

Четверта нефункціональна вимога пов'язана з точністю та достовірністю вимірювань. Для задач екологічного контролю неприпустимо використовувати дані без оцінки похибок, калібрування та перевірки стабільності сенсорів. Отже, у системі слід передбачити можливість зберігання метаданих про калібрування, коефіцієнтів корекції, часу останньої перевірки та рівня довіри до показників [3; 11].

П'ята вимога стосується безпеки. Оскільки система передає дані через мережі зв'язку та надає віддалений доступ до інформаційних ресурсів, необхідно забезпечити автентифікацію пристроїв і користувачів, захист каналів передавання, розмежування прав доступу та цілісність даних. У контексті бакалаврської роботи достатньо передбачити базові механізми: захищені API-запити, токеніву автентифікацію, шифрування трафіку на рівні транспортного або прикладного протоколу.

Під час постановки задачі проектування необхідно визначити, у яких умовах експлуатації буде працювати система. Передбачається, що вузли розміщуються як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі. Це означає наявність перепадів температури, вологості, пилового навантаження, можливих опадів і механічних впливів. Відповідно, корпуси пристроїв повинні мати необхідний ступінь захисту, а вибрані сенсори та електронні компоненти — працювати в розширеному температурному діапазоні.

Окремо слід сформулювати інформаційні вимоги. Система повинна оперувати структурованими даними про вузли, сенсори, типи параметрів, серії вимірювань, події тривоги, конфігураційні параметри та облікові записи користувачів. Для подальшої аналітики доцільно зберігати не лише значення параметра і часову мітку, а й службову інформацію: ідентифікатор пристрою, рівень сигналу, напругу живлення, статус достовірності, географічні координати або місце встановлення.

На основі сформульованих вимог можна визначити основну задачу проектування: розробити модульну IoT-систему моніторингу навколишнього середовища, яка забезпечує автоматизоване збирання, передавання, накопичення та відображення екологічних параметрів у реальному часі, є масштабованою, енергоефективною, надійною та придатною до практичного впровадження в локальних і розподілених мережах спостереження.

Для деталізації цієї загальної задачі її доцільно декомпонувати на низку підзадач. По-перше, необхідно визначити перелік контрольованих параметрів і вимоги до точності їх вимірювання. По-друге, слід обрати принцип побудови вузла збору даних, включаючи мікроконтролер, сенсорні модулі та засоби зв'язку. По-третє, потрібно розробити функціональну й структурну архітектуру всієї системи, встановити взаємозв'язки між польовими пристроями, мережевою інфраструктурою та серверною платформою. По-четверте, необхідно спроектувати програмне забезпечення вбудованого рівня й серверної частини. По-п'яте, слід визначити модель даних і структуру сховища, що забезпечить ефективну роботу з часовими рядами екологічних показників.

У межах проектування важливо також врахувати критерії ефективності майбутньої системи. До таких критеріїв можна віднести тривалість автономної роботи вузла, середню затримку доставки даних, відсоток успішно доставлених повідомлень, похибку вимірювання основних параметрів, кількість вузлів, що підтримуються без зниження продуктивності, а також зручність інтерфейсу для користувача. Наявність критеріїв ефективності дозволяє оцінити якість проектних рішень та обґрунтувати вибір конкретних технологій.

При постановці задачі необхідно зважати й на обмеження, характерні для бакалаврського проекту. Зокрема, система має спиратися на доступні та поширені апаратні компоненти, для яких існує достатня кількість технічної документації та програмних бібліотек. Бажано використовувати відкриті протоколи та інструменти розроблення, що полегшить відтворення результатів і потенційне масштабування проекту. Також важливо, щоб складність системи залишалася помірною, але

водночас відображала реальні підходи, які застосовуються у сучасних IoT-рішеннях.

Узагальнюючи, можна зазначити, що формування вимог до системи моніторингу навколишнього середовища є не формальною процедурою, а основою для всіх подальших етапів проектування. Саме на цьому етапі визначаються межі задачі, критерії якості, пріоритети між вартістю, точністю, енергоефективністю та функціональністю. Від правильності постановки задачі залежить, чи буде розроблена система не лише працездатною, а й практично цінною для застосування в задачах екологічного контролю. Узагальнені дані наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Узагальнені функціональні та нефункціональні вимоги до системи

Група вимог	Зміст
Функціональні	збір, передавання, зберігання, візуалізація, сповіщення
Нефункціональні	надійність, масштабованість, енергоефективність, безпека
Експлуатаційні	простота монтажу, підтримка, оновлення, ремонтпридатність

2.2 Розроблення функціональної та структурної архітектури системи

Після визначення вимог наступним логічним етапом є розроблення архітектури системи. Архітектурне проектування має забезпечити узгодженість між функціями системи, її апаратною реалізацією, програмною логікою та інформаційними потоками. Для систем моніторингу навколишнього середовища на основі Інтернету речей найбільш доцільною є багаторівнева архітектура, у якій окремі рівні відповідають за сприйняття даних, комунікацію, обробку, зберігання та представлення інформації користувачу [1; 2; 7].

Функціонально система може бути поділена на чотири основні рівні. Перший рівень — сенсорний або польовий. Він охоплює фізичні датчики, виконавчі схеми їх опитування, мікроконтролер та локальні програмні модулі, що реалізують зчитування й попередню обробку даних. Другий рівень — комунікаційний. На цьому рівні забезпечується передавання даних від польових вузлів до центрального сервера або шлюзу. Третій рівень — серверний або

платформний, де виконується приймання повідомлень, перевірка, нормалізація, запис у базу даних, аналіз та формування подій. Четвертий рівень — прикладний, орієнтований на взаємодію з користувачем через вебінтерфейс, мобільний застосунок або API [1; 8].

На сенсорному рівні ключовим об'єктом є вузол моніторингу. Він являє собою автономний електронний модуль, що містить мікроконтролер, набір сенсорів, модуль зв'язку, джерело живлення та, за необхідності, локальні індикатори або допоміжні компоненти. Залежно від конфігурації вузол може вимірювати один або декілька параметрів. Перевагою модульного підходу є можливість створення як компактних недорогих вузлів для базового контролю мікроклімату, так і розширених станцій для оцінювання якості повітря [18; 20].

Функціонування вузла доцільно організувати циклічно. У типовому циклі пристрій активується після режиму сну, ініціалізує сенсори, зчитує їх значення, виконує фільтрацію та нормалізацію, формує пакет даних і передає його через мережу. Після успішного завершення циклу вузол зберігає службову інформацію, наприклад час останнього вимірювання чи статистику роботи, а потім переходить у режим зниженого енергоспоживання. Така схема є типовою для енергоефективних IoT-пристроїв і дає змогу досягти компромісу між актуальністю даних і тривалістю автономної роботи [3; 23].

На комунікаційному рівні архітектура залежить від вибраної технології передавання даних. У найпростішому варіанті кожен вузол безпосередньо під'єднується до мережі Wi-Fi та передає інформацію на сервер через інтернет. Такий підхід є зручним для приміщень або територій із наявною бездротовою інфраструктурою. Якщо ж вузли розташовані на великій площі, більш доцільним може бути використання LPWAN-технологій, зокрема LoRa, де локальні вузли передають дані на шлюз, а шлюз уже пересилає їх до серверної частини. У межах розроблюваної концепції можна закласти підтримку обох моделей, але за базову реалізацію обрати Wi-Fi або LoRa залежно від цільового сценарію.

Серверний рівень є центральною ланкою всієї системи. Він виконує роль приймального вузла, диспетчера повідомлень, середовища зберігання та

аналітичної обробки. У серверній частині доцільно виділити декілька логічних компонентів. Перший компонент — сервіс приймання телеметрії, який взаємодіє з пристроями через HTTP, MQTT або інший протокол прикладного рівня. Другий компонент — модуль обробки повідомлень, який виконує валідацію структури даних, перетворення одиниць вимірювання, перевірку меж та збагачення службовими атрибутами. Третій компонент — підсистема збереження даних у базі або спеціалізованому сховищі часових рядів. Четвертий компонент — модуль аналітики й правил, який контролює порогові умови та генерує події тривоги. П'ятий компонент — API та користувацький інтерфейс для перегляду інформації. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 2.1.

Багаторівнева архітектура IoT-системи моніторингу

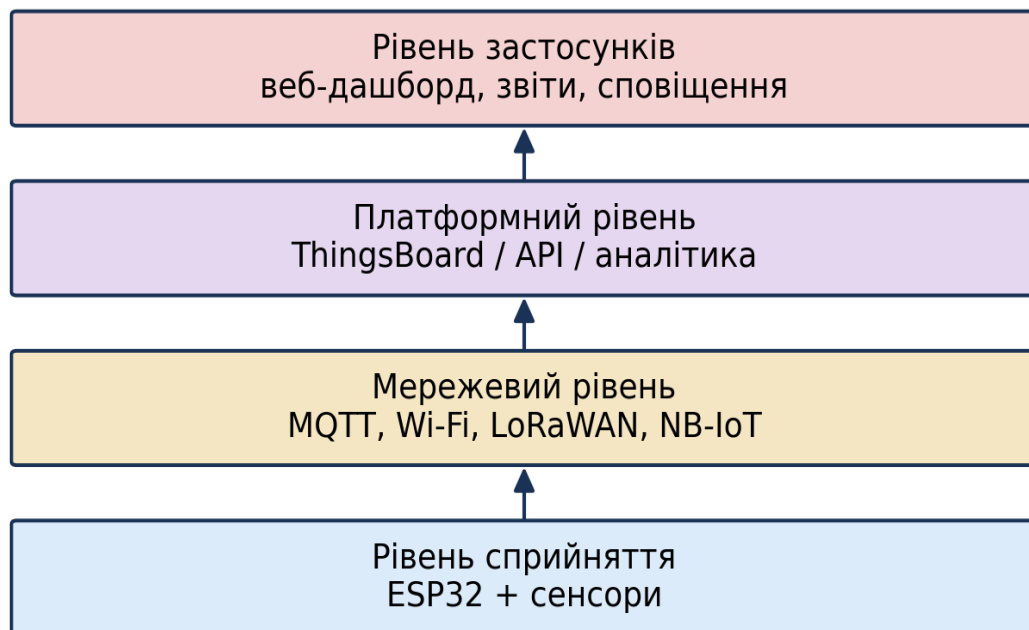


Рисунок 2.1 – Функціональна архітектура IoT-системи моніторингу навколишнього середовища

З позицій структурної архітектури систему доцільно представити як сукупність взаємопов'язаних підсистем: підсистема збору даних, підсистема зв'язку, підсистема обробки та накопичення, підсистема візуалізації та адміністрування. Такий поділ полегшує реалізацію, тестування і подальше супроводження, оскільки кожна підсистема має чітко визначені функції та інтерфейси взаємодії.

Підсистема збору даних включає сенсори температури, вологості, тиску, газів, пилу та інші вимірювальні елементи. До її функцій належать перетворення

фізичних величин в електричні сигнали, оцифрування, первинна компенсація похибок та передавання результатів мікроконтролеру. Важливо, щоб архітектура передбачала можливість заміни одного типу сенсора іншим без принципових змін у вищих рівнях системи. Для цього доцільно використовувати абстрактний інтерфейс роботи з каналами вимірювання, у якому кожен сенсор реалізує стандартні операції ініціалізації, зчитування, самодіагностики та повернення ознаки достовірності.

Підсистема зв'язку забезпечує маршрутизацію даних від вузлів до сервера. На цьому рівні важливими є формати пакетів, структура адресації пристроїв, політика повторних передач, механізми буферизації та обробка втрат зв'язку. Для систем моніторингу екологічних параметрів передавані дані мають невеликий обсяг, але високу цінність щодо часової прив'язки. Тому архітектура повинна передбачати включення до кожного пакета ідентифікатора вузла, часової мітки, переліку виміряних параметрів, службових атрибутів та контрольної інформації для перевірки цілісності.

Підсистема обробки та накопичення реалізує централізоване управління потоками даних. Одним із важливих архітектурних рішень тут є відокремлення приймання даних від їх довготривалого зберігання. Це дозволяє масштабувати систему: сервіс приймання може працювати з високою частотою вхідних запитів, а сервіс запису до бази — оптимізувати збереження та агрегацію. Для цього можуть застосовуватися черги повідомлень або брокери, які буферизують потік телеметрії. Навіть якщо в бакалаврському проєкті реалізується спрощений сервер, сама архітектурна модель повинна враховувати такі підходи як перспективні.

Підсистема візуалізації та адміністрування надає користувачу засоби доступу до результатів спостереження. На функціональному рівні вона повинна підтримувати панель поточних показників, графіки зміни параметрів у часі, журнали подій, карту розміщення вузлів, налаштування порогів і параметрів сповіщення. Для адміністратора доцільно окремо відображати статус підключення вузлів, відсоток втрат пакетів, рівень живлення та статистику оновлень.

В архітектурі системи важливим є питання синхронізації часу. Для коректного аналізу екологічних даних потрібно, щоб часові мітки вимірювань були узгодженими. Це може забезпечуватися двома способами: або час встановлюється на вузлі через мережеву синхронізацію, або сервер пропоставляє власну часову мітку під час приймання повідомлення. Більш коректним є комбінований підхід, коли вузол додає локальний час вимірювання, а сервер зберігає також час приймання. Це дає змогу оцінювати затримки та виявляти нештатні ситуації в мережі зв'язку.

З погляду інформаційної взаємодії доцільно передбачити використання формату JSON для представлення телеметрії у випадку HTTP або MQTT-передавання. Такий формат є універсальним, добре підтримується мовами програмування та зручний для інтеграції. Водночас для каналів із жорсткими обмеженнями пропускної здатності можлива бінарна оптимізація формату. У межах концепції бакалаврського проєкту достатньо орієнтуватися на текстовий формат із чітко визначеною схемою повідомлення. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 2.2.

Контекстна діаграма системи моніторингу навколишнього середовища

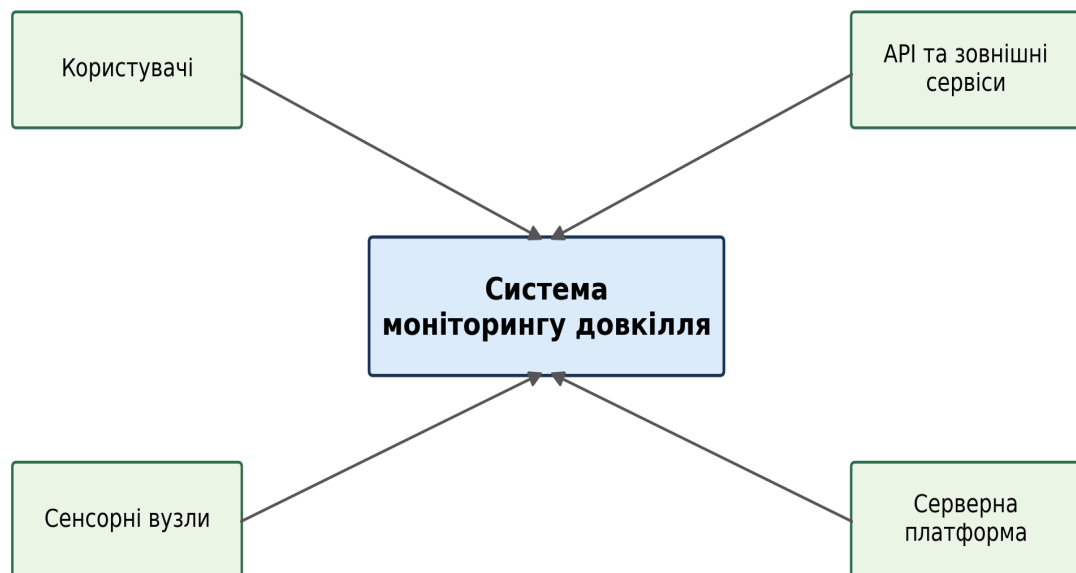


Рисунок 2.2 – Контекстна діаграма системи моніторингу навколишнього середовища

Важливою архітектурною вимогою є модульність. Модульний принцип означає, що заміна або доопрацювання однієї частини системи не повинні вимагати суттєвого перепроєктування інших частин. Наприклад, якщо змінюється

тип датчика твердих частинок, це не повинно впливати на серверну логіку зберігання температури чи відображення карти вузлів. Аналогічно заміна протоколу передавання з HTTP на MQTT має бути локалізована в комунікаційному шарі. Для досягнення такої гнучкості слід використовувати інтерфейсний підхід і чітке розмежування відповідальності між компонентами.

Окремої уваги потребує відмовостійкість архітектури. Для польового вузла основними ризиками є зависання мікроконтролера, помилки сенсорів і тимчасова втрата зв'язку. Тому до архітектури слід включити механізм сторожового таймера, періодичну перевірку відповідей від сенсорів та повторні спроби передавання. На серверному рівні доцільно вести журнал прийнятих повідомлень, помилок і станів вузлів. Це забезпечує діагностику та покращує обслуговування системи.

З урахуванням принципів сучасного проєктування доцільно закласти в архітектуру можливість розширення аналітичних функцій. На першому етапі система може обмежуватися накопиченням даних і відображенням графіків. У перспективі вона повинна підтримувати прогнозування трендів, виявлення аномалій, порівняння показників між зонами, оцінювання індексів якості повітря та формування рекомендацій. Тому модель даних і API повинні мати резерв гнучкості для інтеграції з аналітичними модулями в майбутньому.

У структурній схемі доцільно передбачити також шлюзовий режим. У цьому режимі частина вузлів може працювати через локальний агрегатор або gateway, який збирає дані від малопотужних пристроїв, виконує проміжну обробку та передає агреговану телеметрію далі. Такий підхід особливо корисний у разі використання LoRa, ZigBee або Bluetooth Low Energy у локальних кластерах. Хоча в базовій реалізації шлюз може бути відсутнім, його включення до архітектури підвищує універсальність проєкту.

Таким чином, функціональна та структурна архітектура проєктованої системи повинна забезпечити цілісність, масштабованість, надійність і зрозумілий розподіл ролей між складовими. Багаторівнева організація дозволяє розглядати систему не як набір окремих пристроїв і програм, а як інтегровану платформу екологічного моніторингу, у якій кожен елемент виконує визначені функції та

взаємодіє з іншими через стандартизовані інтерфейси. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 2.3.

Конкретизована структура запропонованої системи

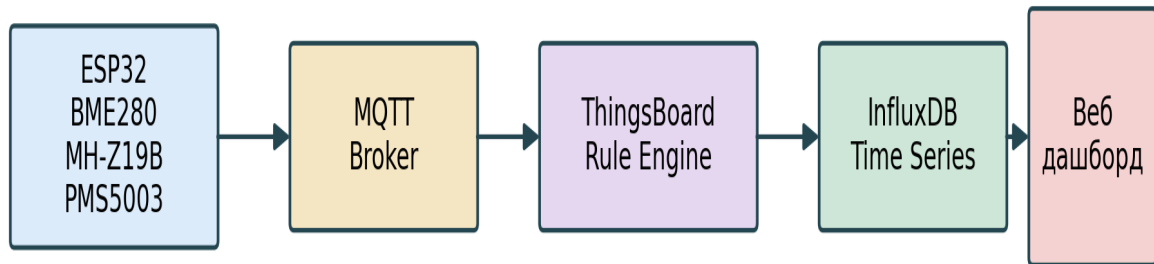


Рисунок 2.3 – Структурна схема взаємодії сенсорного вузла, каналу зв'язку та серверної платформи

2.3 Вибір апаратних компонентів і каналів передавання даних

Одним із найвідповідальніших етапів проєктування є вибір апаратних компонентів, оскільки саме від нього залежать точність вимірювань, стабільність функціонування, енергоспоживання, вартість системи та можливості подальшого масштабування. Апаратна платформа системи моніторингу навколишнього середовища повинна відповідати низці критеріїв: підтримка потрібних інтерфейсів підключення сенсорів, достатня обчислювальна продуктивність, наявність засобів бездротового зв'язку, доступність інструментів розроблення, низьке енергоспоживання та прийнятна ціна [8; 18].

У ролі центрального елемента сенсорного вузла доцільно використовувати мікроконтролерну платформу з інтегрованим модулем бездротового зв'язку. Серед поширених рішень варто виділити сімейства ESP32, ESP8266, STM32 у поєднанні із зовнішнім комунікаційним модулем, а також спеціалізовані плати для LoRaWAN. Для бакалаврського проєкту особливо привабливим є ESP32, оскільки цей мікроконтролер має достатню обчислювальну потужність, підтримує Wi-Fi та Bluetooth, має широкий набір периферійних інтерфейсів і добре документований. Крім того, для нього існує значна кількість бібліотек для роботи з екологічними сенсорами [14; 15; 16].

Перевагами ESP32 є двоядерна архітектура, достатній обсяг пам'яті для реалізації мережевого стека та прикладної логіки, підтримка режимів глибокого сну, наявність інтерфейсів I2C, SPI, UART, ADC та PWM. Це дозволяє під'єднувати різноманітні датчики без складної апаратної адаптації. Водночас потрібно враховувати, що для задач наднизького енергоспоживання та великої дальності передавання може бути доцільним використання мікроконтролера класу STM32L або AVR разом із модулем LoRa. Отже, вибір ESP32 є виправданим для конфігурацій із доступом до Wi-Fi або в умовах, де енергетичні обмеження не є критичними [18; 19; 20].

Щодо сенсорної підсистеми, для вимірювання параметрів мікроклімату доцільно застосовувати цифрові комбіновані датчики, які одночасно вимірюють температуру, вологість і, за потреби, атмосферний тиск. До таких належать BME280 або BME680. Датчик BME280 є поширеним, недорогим, має цифровий інтерфейс I2C/SPI, достатню точність для прикладних задач і мале енергоспоживання. BME680, окрім температури, вологості та тиску, може надавати орієнтовну оцінку летких органічних сполук та якості повітря, однак є складнішим у калібруванні [10; 11].

Для контролю концентрації твердих частинок PM2.5 і PM10 раціонально використовувати лазерні оптичні сенсори, наприклад PMS5003, SDS011 або їх аналоги. Такі сенсори забезпечують кращу інформативність порівняно з дешевими аналоговими датчиками пилу, оскільки повертають оцінки масової концентрації частинок різного розміру. Однак необхідно враховувати їх відносно високе енергоспоживання та чутливість до забруднення оптичної камери, що потребує періодичного обслуговування [35].

Для вимірювання газового складу можливе застосування електрохімічних, напівпровідникових або комбінованих сенсорів. У бюджетних проєктах часто використовують датчики сімейства MQ, наприклад MQ-135 для орієнтовної оцінки якості повітря. Проте такі сенсори мають значні недоліки: високе енергоспоживання нагрівача, тривалий час прогрівання, нестабільність показів і складність кількісного калібрування. Тому їх варто розглядати лише як

демонстраційні або допоміжні рішення. Для більш коректного моніторингу доцільніше використовувати цифрові сенсори з заводським калібруванням або спеціалізовані модулі вимірювання CO₂, TVOC чи інших газів, наприклад SCD30, SCD41, CCS811, ENS160 залежно від задачі та бюджету. Узагальнені дані наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Склад підсистем та їх функції

Підсистема	Призначення
Сенсорна	зняття показників довкілля
Мережева	доставка телеметрії
Серверна	зберігання та аналітика
Користувацька	відображення даних і звітність

Якщо система орієнтована на контроль шумового забруднення, до вузла може бути додано мікрофонний модуль із перетворенням сигналу на еквівалентний рівень звукового тиску. Для освітленості придатні цифрові датчики, наприклад BH1750 або TSL2561. Усі ці компоненти підключаються до мікроконтролера через стандартні шини й можуть бути інтегровані модульно.

При виборі сенсорів важливо оцінювати не лише технічні характеристики з паспорта, а й умови реальної експлуатації. Для зовнішнього середовища потрібні сенсори, стійкі до вологості, пилу та температурних коливань. Для газових і пилових датчиків необхідно забезпечити правильну циркуляцію повітря, але водночас захист від прямого потрапляння опадів. Отже, конструкція корпусу сенсорного вузла має враховувати компроміс між захищеністю та доступом контрольованого середовища до вимірювальних елементів.

Джерело живлення є окремим критично важливим елементом системи. Якщо вузол встановлюється у приміщенні, доцільно використовувати стабілізоване живлення від мережевого адаптера. Для автономних вузлів слід передбачити акумуляторне живлення з можливістю підзарядження, наприклад від сонячної панелі. Вибір конфігурації залежить від середнього струму споживання, тривалості циклу сну, активності радіомодуля та частоти вимірювань. Для забезпечення стабільної роботи важливо використовувати якісний перетворювач напруги, а також контролювати рівень заряду джерела живлення засобами мікроконтролера.

Корпус і монтажні елементи також входять до складу апаратної частини. Для експлуатації на відкритому повітрі бажано використовувати корпуси зі ступенем захисту не нижче IP54–IP65 залежно від умов. Однак повністю герметичний корпус не завжди підходить, оскільки перешкоджає надходженню повітря до сенсорів. Тому конструкція може включати вентиляційні отвори з водовідштовхувальними мембранами, захисні сітки та окремі камери для електроніки й вимірювальних модулів. Правильна механічна компоновка значною мірою впливає на якість вимірювань і довговічність системи.

Не менш важливим є вибір каналів передавання даних. Для IoT-систем моніторингу навколишнього середовища найчастіше розглядають Wi-Fi, GSM/4G, LoRa/LoRaWAN, ZigBee, Bluetooth Low Energy та NB-IoT. Кожна технологія має свої переваги та обмеження, тому вибір залежить від сценарію використання.

Wi-Fi є зручним рішенням у разі наявності готової інфраструктури доступу до мережі. Його основними перевагами є висока швидкість передавання, широка підтримка обладнанням, простота інтеграції з вебсервісами та невисока вартість. Для внутрішніх приміщень або територій навчального закладу, офісу чи підприємства Wi-Fi є цілком прийнятним вибором. Водночас ця технологія має порівняно високе енергоспоживання, обмежений радіус дії та залежність від стабільності локальної мережі.

GSM або 4G-зв'язок дозволяє розгортати вузли практично в будь-якому місці, де є покриття мобільного оператора. Це забезпечує високу автономність від локальної мережевої інфраструктури, однак збільшує вартість як апаратури, так і експлуатації через потребу в SIM-картках і тарифних планах. Крім того, споживання енергії в стільникових модулях істотно вище, ніж у LPWAN-рішеннях. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 2.4.

Багаторівнева архітектура IoT-системи моніторингу

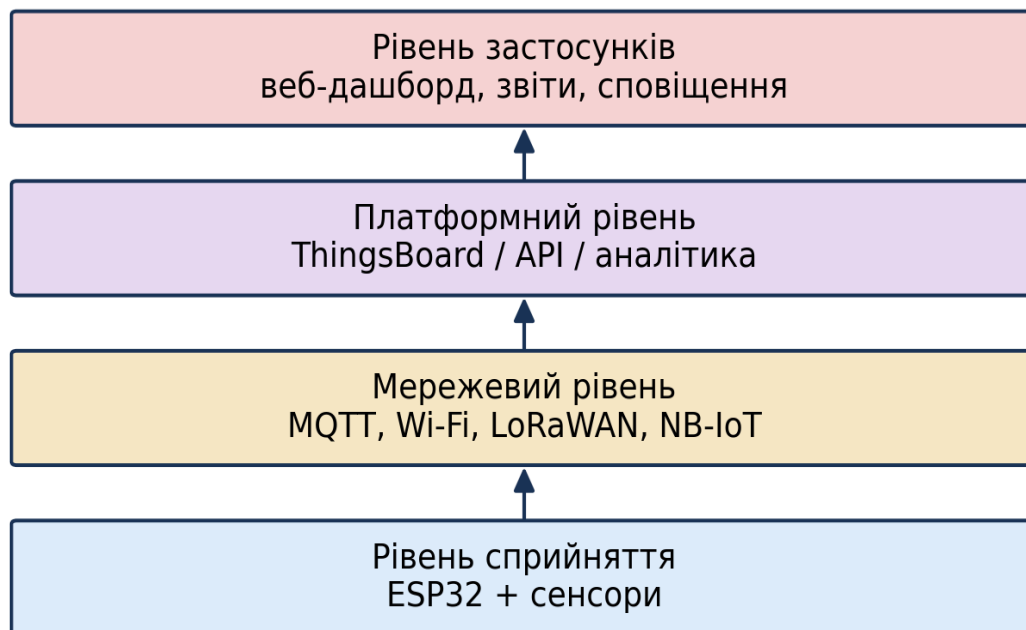


Рисунок 2.4 – Функціональна архітектура IoT-системи моніторингу навколишнього середовища

Технології LoRa та LoRaWAN особливо привабливі для екологічного моніторингу на великих територіях. Вони забезпечують значну дальність передавання при відносно низькому енергоспоживанні, що робить їх придатними для автономних польових вузлів. Недоліками є невисока пропускна здатність, обмеження на частоту передач і потреба в шлюзі або мережевій інфраструктурі LoRaWAN. Для системи, де передаються короткі телеметричні пакети раз на кілька хвилин, ці обмеження не є критичними. Саме тому LoRa часто вважається одним із найкращих варіантів для розподілених сенсорних мереж моніторингу довкілля.

ZigBee та Bluetooth Low Energy більше підходять для локальних мереж із невеликою дальністю зв'язку та наявністю центрального координатора або шлюзу. Їх можна ефективно використовувати в межах будівлі, теплиці, лабораторії або компактної технічної зони. Однак для розподіленого екологічного моніторингу на відкритих територіях вони менш універсальні.

NB-IoT поєднує деякі переваги стільникового зв'язку та енергоефективних IoT-технологій. Він орієнтований на передавання невеликих пакетів даних, підтримує глибоке проникнення сигналу та тривалу автономну роботу пристроїв.

Водночас доступність цієї технології залежить від операторів і регіону, а вартість модулів може бути вищою порівняно з Wi-Fi або LoRa-рішеннями.

Для даного проєкту доцільно обґрунтувати базовий вибір каналу передавання залежно від цільового середовища застосування. Якщо розглядається експериментальний макет або впровадження у межах локальної мережі навчального закладу чи підприємства, оптимальним є Wi-Fi завдяки простоті реалізації та низькому порогу входження. Якщо ж акцент робиться на масштабованій розподіленій системі екологічного спостереження для міської чи природної території, більш раціональним виглядає LoRa з серверним шлюзом. У тексті бакалаврської роботи можна зазначити, що архітектура залишається технологічно нейтральною, а на рівні прототипу реалізується один із каналів зв'язку як основний.

Крім фізичного каналу, слід обрати прикладний протокол передавання даних. Для Wi-Fi-рішень найуживанішими є HTTP/HTTPS та MQTT. HTTP є простим у налагодженні та інтеграції, але створює більші накладні витрати. MQTT краще пристосований до IoT-застосувань, оскільки працює за моделлю видавець–підписник, підтримує різні рівні якості обслуговування і є легковаговим. Для системи моніторингу, де важлива ефективність передавання невеликих повідомлень і централізована маршрутизація, MQTT є доцільним вибором. Водночас для спрощення реалізації прототипу може застосовуватися й HTTP API.

На етапі вибору апаратних компонентів важливо оцінювати загальну сумісність системи. Наприклад, якщо вузол використовує декілька I2C-сенсорів, потрібно врахувати можливі конфлікти адрес. Якщо підключається пиловий датчик через UART, слід перевірити достатність апаратних послідовних портів. Якщо застосовується живлення від акумулятора, потрібно порівняти пікові струми роботи радіомодуля й сенсорів із можливостями перетворювача та акумуляторного блоку. Такі інженерні нюанси прямо впливають на реальну працездатність пристрою.

Отже, вибір апаратних компонентів і каналів передавання даних повинен ґрунтуватися на системному підході, коли кожен елемент оцінюється не

ізолювано, а в контексті всієї архітектури. У проєктованій системі доцільно використовувати мікроконтролер ESP32 як універсальну основу сенсорного вузла, цифрові датчики типу BME280 для мікроклімату, один або кілька спеціалізованих сенсорів пилу та газів відповідно до задачі, а також бездротовий канал Wi-Fi або LoRa залежно від умов розгортання. Така конфігурація поєднує доступність, достатню точність, технологічну зрілість та придатність до подальшого масштабування. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 2.5. Узагальнені дані наведено в табл. 2.3.

Конкретизована структура запропонованої системи

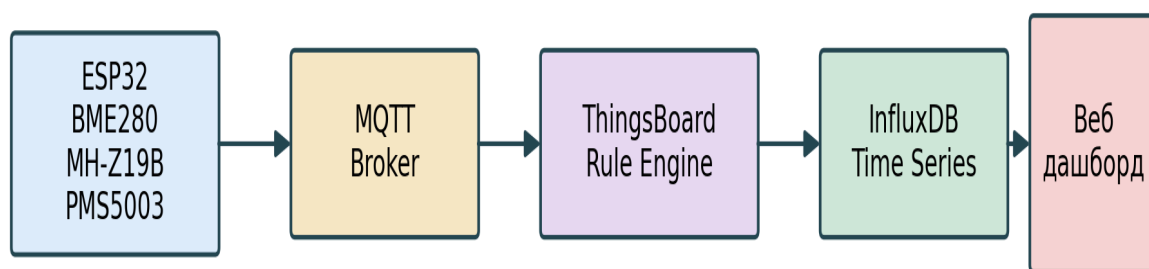


Рисунок 2.5 – Узагальнена схема взаємодії сенсорного вузла, каналу зв'язку та серверної платформи

Таблиця 2.3 – Порівняння мікроконтролерних платформ для сенсорного вузла

Платформа	Переваги	Недоліки
ESP32	Wi-Fi/Bluetooth, низька ціна	обмежені ресурси
STM32	енергоефективність, стабільність	складніше налаштування
Raspberry Pi	повноцінна ОС, зручний серверний стек	високе енергоспоживання

2.4 Проєктування програмного забезпечення та сховища даних

Програмне забезпечення системи моніторингу навколишнього середовища є тим компонентом, який об'єднує апаратні засоби в єдину функціональну платформу. Саме програмна логіка визначає порядок роботи сенсорного вузла, механізми обміну даними, обробку телеметрії, зберігання часових рядів і способи

взаємодії з користувачем. Проектування програмного забезпечення доцільно здійснювати з урахуванням розподіленої природи IoT-системи, тобто окремо розглядати вбудоване програмне забезпечення вузлів, серверну частину, програмні інтерфейси та підсистему зберігання даних [2; 3].

Вбудоване програмне забезпечення сенсорного вузла виконує низку критичних функцій. По-перше, воно ініціалізує мікроконтролер, сенсори та модулі зв'язку після ввімкнення живлення або пробудження із режиму сну. По-друге, забезпечує зчитування даних із сенсорів згідно з розкладом або подієвою логікою. По-третє, виконує локальну обробку отриманих значень: усереднення, перевірку допустимих меж, компенсацію з урахуванням калібрувальних коефіцієнтів, формування ознак помилки. По-четверте, пакує дані у визначений формат і передає їх на сервер. По-п'яте, здійснює самодіагностику та контроль енергоспоживання, зокрема вимірювання напруги живлення та керування переходом у режим сну [23].

Архітектуру вбудованого програмного забезпечення доцільно реалізувати за модульним принципом. Окремі модулі можуть відповідати за роботу з сенсорами, мережеве підключення, буферизацію повідомлень, конфігурацію пристрою, ведення журналу та обробку помилок. Такий підхід підвищує повторне використання коду, спрощує тестування й дає змогу замінювати апаратні компоненти з мінімальними змінами у програмі. Наприклад, модуль датчика температури може реалізовувати уніфікований інтерфейс `read()`, а конкретна реалізація BME280 або іншого сенсора визначатиметься в конфігурації [3; 23].

Одним із центральних питань є організація циклу роботи вузла. У типовому сценарії після пробудження пристрій перевіряє доступність сенсорів, зчитує їх значення, формує структуру телеметрії, встановлює мережеве з'єднання, передає пакет і, якщо це успішно, переходить у режим сну до наступного циклу. Якщо зв'язок недоступний, дані зберігаються у локальному буфері та можуть бути відправлені пізніше. Така логіка підвищує надійність і дозволяє уникнути втрати даних під час короткочасних проблем мережі [3; 11].

Особливе значення має формат телеметричного повідомлення. Доцільно, щоб кожен пакет містив такі поля: ідентифікатор вузла, часову мітку вимірювання, географічну прив'язку або ідентифікатор місця встановлення, набір значень сенсорів, напругу живлення, рівень сигналу та ознаку коректності. Наприклад, у JSON-структурі це може бути представлено як об'єкт із вкладеним словником *measurements*. Така форма полегшує подальший аналіз, масштабування системи та інтеграцію з іншими сервісами [1; 2].

На серверному рівні програмне забезпечення повинно забезпечити приймання телеметрії, перевірку автентичності джерела, валідацію вхідних даних, збереження у сховище та надання доступу через API і графічний інтерфейс. Сервер може бути реалізований із використанням сучасних вебтехнологій, наприклад Node.js, Python Flask/FastAPI, Django, Go або іншого інструментарію. Для бакалаврської роботи доречно орієнтуватися на технології, що мають прості засоби створення REST API та роботи з базами даних. У цьому контексті Python із FastAPI або Flask є вдалим варіантом завдяки лаконічності, великій кількості бібліотек та зручності прототипування [3; 23]. Узагальнені дані наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Характеристики обраних сенсорів екологічного моніторингу

Сенсор	Призначення	Інтерфейс
BME280	температура, вологість, тиск	I2C/SPI
MH-Z19B	концентрація CO ₂	UART
PMS5003	частинки PM2.5/PM10	UART

Серверне програмне забезпечення доцільно поділити на декілька рівнів: рівень API, рівень бізнес-логіки та рівень доступу до даних. Рівень API приймає HTTP-запити або повідомлення від брокера MQTT, розбирає пакет і передає його на обробку. Рівень бізнес-логіки перевіряє коректність структури, ідентифікатор пристрою, допустимість значень, формує події у разі перевищення порогів і готує об'єкти для запису до бази. Рівень доступу до даних інкапсулює операції збереження, вибірки та агрегації. Така багатошарова побудова сприяє підтримованості системи.

Проектування API має враховувати потреби різних категорій клієнтів. Пристрої потребують одного набору кінцевих точок, наприклад для надсилання телеметрії, отримання конфігурації чи підтвердження оновлення. Вебклієнт або мобільний застосунок використовує інший набір: отримання списку вузлів, поточних значень, історії за період, журналу подій, статистики та налаштувань. Для безпеки доступ до API повинен бути автентифікованим і авторизованим. На практиці доцільно застосовувати токени доступу, а для міжсерверної взаємодії — захищені ключі.

Окремим напрямом є підсистема сповіщень. Вона повинна реагувати на події, що визначені правилами: перевищення граничної концентрації пилу, вихід температури за діапазон, втрата зв'язку з вузлом, критично низький рівень живлення. Подія формується на сервері після аналізу чергового пакета телеметрії або на основі періодичної перевірки стану. Після цього користувачеві може бути надіслане повідомлення через електронну пошту, месенджер, push-канал чи відображене попередження в інтерфейсі. Навіть якщо повна реалізація такої підсистеми не входить до мінімального прототипу, її необхідно передбачити архітектурно.

Ключове місце в системі займає сховище даних. Оскільки екологічний моніторинг генерує часові ряди, база даних повинна ефективно зберігати записи з часовою прив'язкою та підтримувати вибірки за діапазонами часу, агрегацію та статистичний аналіз. Для цієї мети можуть застосовуватися як реляційні бази даних, так і спеціалізовані time-series рішення. Реляційна база, наприклад PostgreSQL, є універсальною, надійною та добре підходить для зберігання структурованих сутностей: пристроїв, користувачів, конфігурацій і подій. Для оптимізації часових рядів доцільним є використання розширення TimescaleDB, яке поєднує можливості PostgreSQL з ефективним зберіганням телеметрії.

Альтернативою є спеціалізовані бази типу InfluxDB, які орієнтовані саме на часові ряди та зручні для швидкого запису й візуалізації через інструменти на зразок Grafana. Однак у дипломній роботі часто бажано мати більш універсальну модель зберігання, де в одній системі підтримуються як телеметричні, так і

довідкові дані. Тому вибір PostgreSQL або PostgreSQL з розширенням для time-series є обґрунтованим компромісом між функціональністю та складністю впровадження.

Логічна модель даних повинна містити щонайменше такі сутності: Device, Sensor, Measurement, Location, Alert, User, Configuration. Сутність Device описує фізичний вузол, його унікальний ідентифікатор, тип, дату введення в експлуатацію, статус, версію прошивки та прив'язку до місця встановлення. Сутність Sensor містить відомості про конкретний вимірювальний канал: тип параметра, одиницю вимірювання, серійний номер, калібрувальні дані. Сутність Measurement зберігає значення, часову мітку, статус достовірності, посилання на пристрій і сенсор, а також службові поля. Сутність Alert відображає спрацювання правил. Configuration зберігає порогові значення, інтервали вимірювання та мережеві параметри. Така модель забезпечує достатню гнучкість і нормалізацію.

Важливим питанням є стратегія зберігання й агрегації даних. Якщо вузол надсилає показники кожні 1–5 хвилин, за місяць накопичується значний обсяг записів. Тому доцільно передбачити багаторівневе зберігання: детальні сирі дані зберігати протягом певного періоду, а для довготривалого аналізу формувати агреговані ряди за годину, добу або тиждень. Це знижує навантаження на систему та прискорює побудову графіків. У PostgreSQL таку агрегацію можна реалізувати через матеріалізовані подання, окремі таблиці або засоби розширення TimescaleDB. Узагальнені дані наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Порівняння технологій бездротового передавання даних

Технологія	Перевага	Обмеження
Wi-Fi	простота інтеграції	вище енергоспоживання
LoRaWAN	велика дальність	невелика пропускна здатність
NB-IoT	операторське покриття	залежність від мережі оператора

Необхідно також визначити політику забезпечення цілісності та якості даних. На рівні бази слід встановити обмеження типів, діапазонів, зовнішніх ключів і правил унікальності. На рівні бізнес-логіки — перевіряти аномальні

значення, дублювати пакетів, некоректні часові мітки та невідповідність формату. У системах екологічного моніторингу особливо важливо відрізнати реальне перевищення показника від помилки датчика. Тому бажано зберігати не лише значення, а й статус валідності, ознаку заміщення або прапорець необхідності перевірки оператором.

Для доступу користувача до даних потрібен інтерфейс візуалізації. У межах проекту це може бути вебзастосунок, який відображає поточні показники, графіки за обраний період, карту вузлів та журнал подій. Інтерфейс повинен бути інтуїтивним, оскільки він використовується не лише фахівцями з ІТ, а й працівниками, відповідальними за екологічний контроль. Доцільно реалізувати фільтрацію за типом параметра, вузлом, часовим діапазоном, а також виділення критичних показників кольором або значками тривоги.

У сучасних умовах важливо передбачити й можливість оновлення програмного забезпечення вузлів. Віддалене оновлення прошивки, тобто ОТА-механізм, суттєво полегшує супровід мережі, особливо якщо вона складається з багатьох вузлів. Архітектурно сервер має зберігати інформацію про доступні версії прошивки, а вузол — періодично перевіряти наявність оновлень і за дозволом завантажувати їх. Якщо повна реалізація ОТА не передбачається, у роботі слід принаймні описати її як перспективний напрям розширення функціональності.

Ще одним важливим аспектом є журналювання та моніторинг самої системи. Для забезпечення надійності серверне ПЗ повинно вести логи приймання повідомлень, помилок обробки, подій автентифікації, спрацювань правил і змін конфігурації. Аналогічно на вузлі доцільно фіксувати коди помилок сенсорів, кількість невдалих спроб підключення та статистику циклів вимірювання. Наявність журналів дозволяє оперативно виявляти причини збоїв і підвищує експлуатаційну придатність системи.

Отже, проектування програмного забезпечення та сховища даних для IoT-системи моніторингу навколишнього середовища передбачає комплексний підхід, що охоплює вбудовану логіку сенсорних вузлів, серверну обробку

телеметрії, захищені інтерфейси взаємодії та ефективну модель збереження часових рядів. Рациональне поєднання модульного вбудованого ПЗ, серверного API, правил аналітики та гнучкої бази даних забезпечує основу для створення надійної, масштабованої та зручної в експлуатації системи, здатної підтримувати як поточний моніторинг, так і подальший розвиток функцій аналітики та прогнозування. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 2.6.

Структурна схема апаратного вузла моніторингу

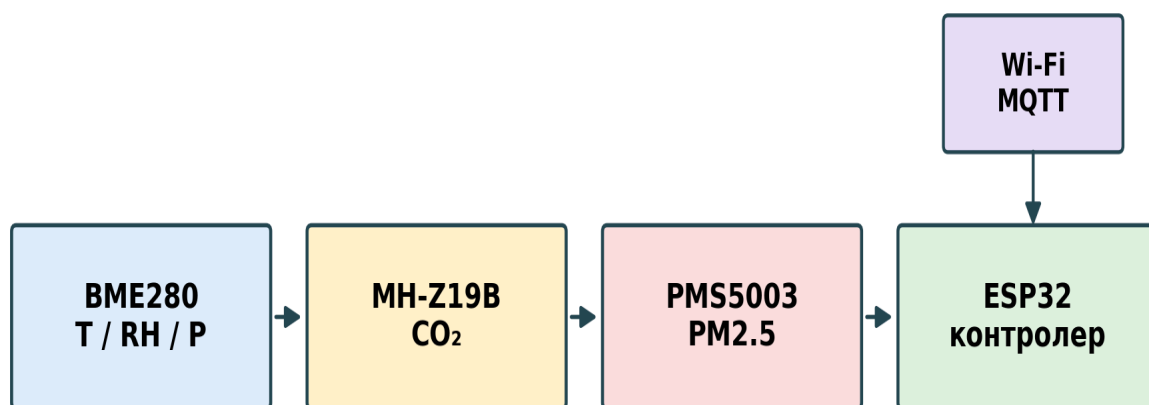


Рисунок 2.6 – Структурна схема апаратного вузла моніторингу

РОЗДІЛ 3. ФУНКЦІОНУВАННЯ, ОБРОБКА ДАНИХ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

У цьому розділі розглянуто практичні аспекти функціонування системи моніторингу навколишнього середовища, побудованої на основі технологій Інтернету речей. Основну увагу приділено алгоритму роботи системи, сценаріям її використання, організації збору, передавання, обробки, візуалізації та аналізу даних, а також оцінюванню переваг і обмежень запропонованого рішення. Окремо проаналізовано перспективи розвитку системи та напрями її подальшого вдосконалення з урахуванням сучасних тенденцій цифровізації екологічного контролю. Такий підхід дає змогу не лише описати технічну архітектуру рішення, а й оцінити його прикладну цінність у контексті реальних потреб екологічного моніторингу, муніципального управління, промислового контролю та інформування населення.

Система моніторингу навколишнього середовища на основі Інтернету речей є багаторівневим програмно-апаратним комплексом, у якому поєднуються сенсорні вузли, мережеві засоби зв'язку, серверна інфраструктура, програмні компоненти для обробки даних та інтерфейси для кінцевих користувачів. На відміну від традиційних локальних вимірювальних комплексів, така система працює в режимі постійного автоматизованого спостереження, забезпечує дистанційний доступ до результатів вимірювань та підтримує швидке реагування на екологічні відхилення. Це особливо важливо в умовах урбанізації, зростання антропогенного навантаження, зміни кліматичних умов та підвищення вимог до екологічної безпеки територій.

Ефективність функціонування подібних систем визначається не лише точністю застосованих датчиків, а й логікою їх взаємодії, стійкістю передавання даних, якістю алгоритмів фільтрації та агрегування інформації, а також зручністю подання результатів для прийняття рішень. Саме тому в межах цього розділу система розглядається як цілісний інформаційно-технічний механізм, у якому кожен етап — від зняття показників із сенсорів до формування аналітичних

висновків — має важливе значення для досягнення практичного результату. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 2.7.

Схема програмної взаємодії компонентів системи



Телеметрія → правила обробки → сховище → інтерфейс користувача

Рисунок 2.7 – Узагальнена схема програмної взаємодії компонентів системи

3.1 Алгоритм функціонування системи та сценарії використання

Функціонування системи моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей ґрунтується на циклічному процесі вимірювання, передавання, накопичення, обробки та представлення даних. У загальному вигляді алгоритм роботи такої системи можна подати як послідовність логічно пов'язаних етапів, кожен із яких виконує окрему функцію в межах єдиного комплексу екологічного контролю [1; 2].

На першому етапі відбувається ініціалізація системи. Після ввімкнення сенсорний вузол виконує перевірку працездатності підключених датчиків, налаштовує інтерфейси зв'язку, синхронізує внутрішній час та завантажує параметри конфігурації. До таких параметрів можуть належати періодичність вимірювання, граничні пороги спрацювання попереджень, правила локальної фільтрації даних, ідентифікатор пристрою, координати точки встановлення та параметри автентифікації для зв'язку із сервером. Ініціалізація має принципове значення, оскільки забезпечує узгоджене функціонування всіх вузлів мережі та мінімізує ризик появи помилок на початковому етапі збору даних [1; 3].

Другий етап передбачає збір первинних вимірювань. Залежно від конфігурації системи можуть використовуватися датчики температури повітря,

відносної вологості, атмосферного тиску, концентрації дрібнодисперсних часток PM2.5 та PM10, вмісту вуглекислого газу, чадного газу, оксидів азоту, летких органічних сполук, рівня шуму, освітленості, вологості ґрунту та інших параметрів. Зчитування показників виконується з певною періодичністю, яка визначається метою спостереження. Наприклад, для контролю якості атмосферного повітря в міському середовищі доцільним є інтервал від 30 секунд до 5 хвилин, тоді як для агроекологічного моніторингу вологості ґрунту можливе рідше опитування [11; 27; 29].

Зібрані дані проходять етап попередньої локальної обробки. На цьому рівні мікроконтролер може виконувати усереднення кількох послідовних вимірів, перевірку допустимих меж, усунення очевидних аномалій та перетворення показників до уніфікованого формату. Локальна обробка є доцільною, оскільки вона зменшує обсяг передаваних даних, підвищує їх стійкість до випадкових коливань і дає змогу частково компенсувати недоліки бюджетних сенсорів. У разі виявлення критичного перевищення заданих порогів вузол може перейти в режим пріоритетної передачі інформації та сформував аварійне повідомлення без очікування чергового сеансу зв'язку [11; 27].

Третій етап пов'язаний із передаванням даних каналами зв'язку. Залежно від умов експлуатації система може використовувати Wi-Fi, GSM/4G, NB-IoT, LoRaWAN або інші технології бездротової комунікації. Вибір способу передачі визначається дальністю розміщення вузлів, енергоспоживанням, доступністю мережевої інфраструктури та вимогами до затримки доставки повідомлень. У типовому сценарії сенсорний вузол формує пакет даних, що містить часову мітку, ідентифікатор вузла, координати або код місця встановлення, набір вимірюваних параметрів та службову інформацію про стан пристрою, зокрема рівень заряду акумулятора, якість сигналу й код помилки у разі її виникнення [18; 19; 20].

Після надходження на сервер дані проходять процедуру приймання та валідації. Серверний модуль перевіряє коректність структури повідомлення, достовірність ідентифікатора пристрою, відповідність формату значень установленим правилам, а також часову послідовність записів. У разі виявлення

пропусків, дублювання або некоректних пакетів система може позначати відповідні записи як підозрілі, направляти їх на повторну перевірку або виключати з подальшого аналітичного опрацювання. Така перевірка є необхідною, адже екологічні дані нерідко використовуються як підстава для формування попереджень, управлінських рішень або звітних матеріалів [3; 23]. Узагальнені дані наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Основні сутності сховища даних та їх атрибути

Сутність	Ключові атрибути
Пристрій	id, назва, локація, стан
Вимірювання	timestamp, параметр, значення
Подія	рівень, опис, час
Користувач	роль, логін, права доступу

Після валідації виконується запис даних до бази. Залежно від архітектури системи можуть використовуватися реляційні бази даних, часові ряди або комбіновані сховища. Для екологічного моніторингу важливо забезпечити не лише надійне зберігання великих масивів вимірювань, а й швидкий доступ до історичних даних для побудови графіків, трендів, карт, порівняльних таблиць та аналітичних звітів. Крім того, система має підтримувати прив'язку вимірювань до географічного розташування та типу об'єкта спостереження [2; 23].

Наступним етапом є аналітична обробка. Вона може включати обчислення ковзних середніх, мінімальних та максимальних значень, добових і тижневих агрегатів, індексів якості повітря, темпів зміни показників, виявлення аномалій, оцінювання ризику перевищення допустимих норм. У разі потреби до системи можуть бути інтегровані моделі прогнозування, які на основі історичних рядів і зовнішніх факторів оцінюють ймовірний розвиток ситуації у короткостроковій перспективі. Це особливо важливо для міських систем, де різкі погіршення якості повітря можуть бути пов'язані з транспортним навантаженням, температурною інверсією, погодними умовами або локальними викидами [11; 23].

Завершальний етап алгоритму полягає у візуалізації результатів і доведенні інформації до користувача. Для цього можуть використовуватися вебпанель, мобільний застосунок, інформаційні дашборди, електронні повідомлення, push-сповіщення або інтеграція з зовнішніми системами. Користувач отримує

доступ до поточного стану середовища, історичних графіків, просторового розподілу показників та повідомлень про відхилення від норми. Таким чином, повний цикл роботи системи замикається: від вимірювання параметрів середовища до створення інформаційної основи для прийняття рішень [4; 24].

Важливою особливістю описаного алгоритму є його циклічність і адаптивність. Система не лише повторює послідовність дій через визначені часові інтервали, а й може змінювати режим роботи залежно від контексту. Наприклад, у нормальному режимі вузли передають дані раз на кілька хвилин для економії енергії, а під час виявлення різкого зростання концентрації забруднювачів — переходять у режим підвищеної частоти опитування та передачі. Подібна адаптивність є важливою перевагою IoT-підходу, оскільки дає змогу балансувати між енергоспоживанням, навантаженням на мережу та інформативністю отриманих даних [1; 18].

З точки зору користувачів система може підтримувати декілька типових сценаріїв використання. Перший сценарій пов'язаний із постійним фоновим моніторингом міського середовища. У цьому випадку сенсорні вузли встановлюються у різних районах міста: поблизу автомобільних магістралей, житлових кварталів, промислових зон, парків, навчальних закладів та об'єктів соціальної інфраструктури. Основною метою є отримання актуальної картини стану атмосферного повітря та мікрокліматичних параметрів у різних просторових точках. Отримані дані дають змогу порівнювати екологічну ситуацію між районами, виявляти території підвищеного ризику та підтримувати обґрунтоване планування природоохоронних заходів [11; 29].

Другий сценарій використання передбачає локальний контроль поблизу потенційно небезпечних об'єктів. Йдеться про промислові підприємства, котельні, сміттєпереробні комплекси, великі транспортні розв'язки, склади хімічних речовин або будівельні майданчики. У таких умовах система виконує функцію раннього виявлення небажаних екологічних змін. Якщо концентрація певних речовин або рівень шуму перевищують установлені пороги, відповідальні особи оперативно отримують сповіщення й можуть вжити відповідних заходів.

Практична цінність такого сценарію полягає у зменшенні часу реагування на інциденти та підвищенні екологічної відповідальності операторів об'єктів [28; 35].

Третій сценарій стосується застосування системи в аграрному секторі. Для сільськогосподарських угідь важливими є дані про температуру, вологість повітря, вологість і температуру ґрунту, інтенсивність освітлення, кількість опадів та параметри мікроклімату в теплицях. Система дає змогу не лише спостерігати за станом навколишнього середовища, а й оптимізувати режими поливу, вентиляції, затінення або внесення добрив. У цьому разі екологічний моніторинг безпосередньо поєднується з підвищенням ресурсоефективності та врожайності [12; 29]. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 2.8.

Логічна модель бази даних системи моніторингу

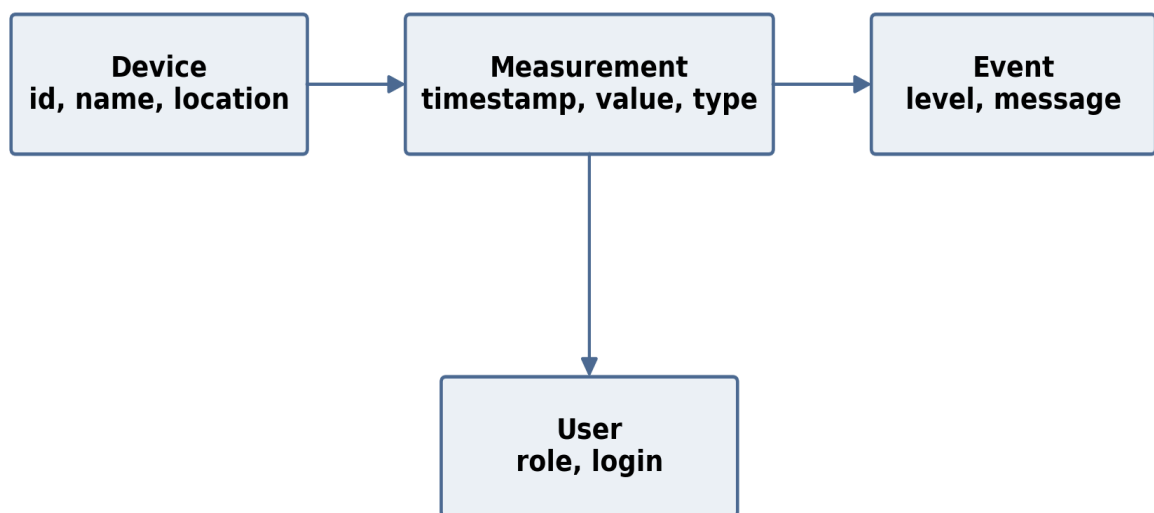


Рисунок 2.8 – Логічна модель бази даних системи моніторингу

Четвертий сценарій використання пов'язаний з освітніми та науковими цілями. У закладах вищої та середньої освіти IoT-система моніторингу може бути використана як інструмент для проведення лабораторних занять, польових досліджень, навчання основ екологічного аналізу та цифрових технологій. Студенти або учні отримують можливість працювати з реальними даними, аналізувати часові ряди, виявляти закономірності змін екологічних показників і оцінювати вплив антропогенних факторів. Такий підхід формує міждисциплінарні компетентності на перетині екології, інформатики, електроніки та аналізу даних [12; 30].

П'ятий сценарій орієнтований на інформування населення та підтримку концепції «розумного міста». Дані з системи можуть відображатися на публічному вебпорталі або інформаційних екранах, що дозволяє мешканцям отримувати відомості про якість повітря у своєму районі, обирати безпечніші маршрути пересування, планувати фізичну активність на відкритому повітрі та своєчасно реагувати на несприятливі умови. Важливо, що відкритість екологічної інформації сприяє підвищенню довіри до органів місцевого самоврядування, формуванню екологічної свідомості та залученню громадян до вирішення проблем навколишнього середовища [4; 24].

Окремо слід розглянути сценарій технічного обслуговування системи. Для забезпечення безперервної роботи адміністратор або технічний персонал має отримувати відомості не лише про екологічні параметри, а й про стан самих вузлів: заряд батареї, температуру корпусу, якість зв'язку, пропуски передачі, можливі помилки датчиків. У разі виявлення деградації показників або зникнення вузла з мережі система повинна формувати службове повідомлення. Це дає змогу планувати профілактичне обслуговування, своєчасну калібровку, заміну сенсорів чи акумуляторів і таким чином підтримувати належну якість вимірювань [3; 23].

Для зручності аналізу алгоритм функціонування доцільно деталізувати у вигляді таблиці з описом основних етапів, вхідних та вихідних даних, а також потенційних ризиків.

У практичному впровадженні важливу роль відіграє визначення режимів роботи системи. Як правило, можна виділити штатний режим, режим тривоги, режим енергозбереження та режим технічного обслуговування. У штатному режимі система виконує періодичні вимірювання та передає дані із запланованою частотою. У режимі тривоги активуються додаткові механізми сповіщення, а частота вимірювань може збільшуватися. У режимі енергозбереження скорочується інтенсивність передавання даних, відключаються другорядні функції, а частина обробки виконується локально. Режим технічного обслуговування використовується для калібрування, оновлення прошивки, тестування зв'язку та перевірки достовірності роботи сенсорів.

Отже, алгоритм функціонування системи моніторингу навколишнього середовища на основі IoT не обмежується простим зчитуванням показників із датчиків. Він охоплює комплекс взаємопов'язаних операцій, що забезпечують безперервність спостереження, цілісність даних, своєчасність їх опрацювання та практичну доступність для різних категорій користувачів. Саме узгодженість усіх етапів визначає ефективність системи як інструмента сучасного екологічного контролю. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 3.1.

Алгоритм функціонування системи



Рисунок 3.1 – Узагальнений алгоритм функціонування системи моніторингу навколишнього середовища на основі IoT

Поданий на рис. 3.1 алгоритм відображає загальну послідовність проходження даних у системі та слугує основою для подальшого розгляду процедур їх обробки, зберігання, візуалізації й аналітичного опрацювання [2; 3; 23].

3.2 Організація обробки, візуалізації та аналізу даних

Якість функціонування системи моніторингу значною мірою залежить від того, наскільки раціонально організовано процес обробки, візуалізації та аналізу екологічних даних. У системах Інтернету речей кількість вимірювань швидко зростає, оскільки дані надходять від багатьох вузлів у режимі, наближеному до реального часу. За таких умов недостатньо лише накопичувати інформацію в базі даних; необхідно забезпечити її структурованість, очищення, інтерпретацію та зручне подання для різних груп користувачів [2; 23].

Першим кроком організації обробки є стандартизація формату даних. Повідомлення, що надходять від сенсорних вузлів, мають бути приведені до єдиної схеми, яка містить часову мітку, унікальний ідентифікатор пристрою, набір вимірюваних параметрів, одиниці вимірювання, інформацію про місце встановлення та службові поля. Стандартизація є обов'язковою передумовою подальшого аналізу, оскільки різні типи датчиків і вузлів можуть генерувати інформацію в неоднаковому вигляді. Крім того, уніфікація спрощує інтеграцію системи з зовнішніми сервісами, аналітичними платформами та засобами візуалізації [11; 27].

Далі виконується попереднє очищення даних. Екологічні сенсори, особливо недорогі, можуть формувати шумові значення, короткочасні викиди, пропуски або повтори. Тому обробка повинна включати перевірку діапазонів допустимих значень, пошук неконсистентних часових міток, виявлення дублікатів, оцінювання швидкості зміни показника між сусідніми спостереженнями. Наприклад, якщо температура повітря за одну хвилину змінюється на десятки градусів без об'єктивних підстав, таке значення слід вважати підозрілим. Для дрібнодисперсних часток характерні короткі піки, однак надто різкі одиничні

стрибки без підтвердження сусідніми вимірами можуть бути наслідком похибки сенсора або електричних завад [27; 28].

Важливим компонентом обробки є калібрування та корекція показників. Частина датчиків потребує періодичного звіряння з еталонними приладами, а деякі показники залежать від супутніх умов. Наприклад, точність вимірювання газових сенсорів може змінюватися залежно від температури та вологості. У зв'язку з цим доцільно застосовувати калібрувальні коефіцієнти, корекційні функції або моделі компенсації, що враховують вплив додаткових факторів. Якщо система розгортається на кількох вузлах однакового типу, корисним є міжвузлове порівняння для виявлення сенсорів, показники яких систематично відрізняються від інших [2; 23].

Після очищення й корекції інформація може бути збережена у сховищі часових рядів. Такий підхід є доцільним, оскільки екологічні дані за своєю природою є часовими послідовностями. Організація зберігання повинна підтримувати швидкий запис поточних значень, вибірку за часовими інтервалами, агрегацію за хвилинами, годинами, днями та можливість зв'язування з довідковою інформацією про вузли, локації та типи сенсорів. На практиці часто застосовується комбінована модель: сирі дані зберігаються окремо від агрегованих наборів, що використовуються для побудови графіків і звітів. Такий підхід підвищує продуктивність системи й одночасно дозволяє зберегти повну історію вимірювань для поглибленого аналізу [11; 23].

Одним із ключових аспектів є вибір методів агрегації даних. Для поточних дашбордів зазвичай достатньо відображати останнє значення або короткочасне усереднення. Для аналітичних звітів більш інформативними є середні, медіанні, мінімальні, максимальні та перцентильні значення за певні періоди. У разі оцінювання якості атмосферного повітря доцільно обчислювати також тривалість перебування параметра вище нормативного порога, кількість епізодів перевищення та індекси екологічного ризику. Такі агреговані характеристики дають змогу перейти від простого спостереження до змістовного аналізу динаміки стану середовища. Узагальнені дані наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Етапи алгоритму функціонування системи, їх призначення та результати

Етап	Призначення	Результат
Ініціалізація	запуск вузла і перевірка компонентів	готовність до вимірювання
Вимірювання	зчитування параметрів	первинні дані
Передавання	доставка телеметрії	дані на сервері
Візуалізація	відображення користувачу	графіки, картки, сповіщення

Особливе значення має часовий аналіз даних. Накопичені спостереження дозволяють виявляти добові, тижневі та сезонні закономірності. Наприклад, підвищення концентрації забруднювачів може збігатися з піковими транспортними навантаженнями вранці та ввечері, а зростання рівня пилу — з сухою та вітряною погодою. Аналіз часових рядів дає змогу не лише зафіксувати наявність проблеми, а й зрозуміти її регулярність, типові умови виникнення та ймовірні причини. Для цього використовують ковзні середні, трендовий аналіз, розклад ряду на сезонну та випадкову компоненти, кореляційне зіставлення з метеорологічними факторами [4; 11].

Поряд із часовим підходом важливим є просторовий аналіз. Якщо система охоплює кілька локацій, дані можна порівнювати між собою, виявляючи локальні осередки забруднення, райони стабільно підвищеного шумового навантаження або ділянки зі сприятливішим мікрокліматом. Просторова інтерпретація потребує географічної прив'язки вузлів та інтеграції з картографічними сервісами. Результатом може бути карта з кольоровою індикацією рівня показників, кластеризація територій за подібністю параметрів або побудова теплових карт. Для органів місцевого самоврядування така візуалізація особливо корисна, оскільки допомагає пов'язувати екологічні проблеми з конкретними джерелами чи зонами впливу [4; 24].

Візуалізація даних є завершальним, але не менш важливим етапом інформаційного циклу. Її мета полягає у тому, щоб перетворити масив числових значень на зрозумілу форму, придатну для швидкого сприйняття та прийняття рішень. Для оперативного контролю доцільно використовувати дашборди, на яких відображаються поточні значення параметрів, кольорові індикатори стану, графіки

зміни показників у часі, статус пристроїв та повідомлення про тривоги. Для керівників, аналітиків і дослідників важливими є більш розгорнуті інтерфейси з можливістю вибору періоду, порівняння локацій, експорту даних та побудови аналітичних звітів [4; 24].

Ефективна візуалізація має відповідати кільком принципам. По-перше, показники повинні супроводжуватися одиницями вимірювання та інтерпретаційними підказками. По-друге, слід уникати перевантаження екрана надмірною кількістю одночасно відображуваних елементів. По-третє, критичні перевищення норм повинні бути одразу помітними за допомогою кольору, символів або сповіщень. По-четверте, користувач повинен мати змогу переходити від загальної картини до деталізації, наприклад, від карти міста — до графіка конкретного сенсорного вузла, а від добового усереднення — до поминутних значень [24; 30].

Для різних категорій користувачів можуть використовуватися різні форми подання інформації. Технічний персонал потребує доступу до сирих даних, службових логів та діагностичних параметрів. Екологи й аналітики працюють з агрегованими часовими рядами, статистичними характеристиками та просторовими картами. Керівники та представники місцевого самоврядування, як правило, зацікавлені у стислих зведеннях, рейтингах проблемних зон і показниках дотримання нормативів. Населенню доцільно надавати просту й інтуїтивно зрозумілу інформацію, наприклад узагальнений рівень якості повітря за шкалою ризику, рекомендації щодо перебування на відкритому повітрі та попередження про несприятливі умови [11; 23].

Аналітичні можливості системи можуть бути розширені за рахунок автоматичного виявлення аномалій. Під аномалією в даному випадку розуміють таке відхилення у часовому ряді, яке не відповідає типовій поведінці показника. Для цього використовують порогові правила, статистичні критерії, алгоритми кластеризації або машинного навчання. Наприклад, якщо рівень PM_{2.5} у конкретній локації різко зростає в порівнянні з середнім фоновим значенням і аналогічними вузлами, система може позначити ситуацію як потенційно

небезпечну та ініціювати тривожне повідомлення. Автоматичне виявлення аномалій особливо корисне у великих мережах, де ручний контроль усіх потоків даних стає неможливим [11; 23].

Ще одним важливим напрямом аналізу є прогнозування. На основі історичних даних, поточних вимірювань і зовнішніх чинників, зокрема метеорологічних параметрів, система може оцінювати ймовірну зміну екологічних показників у найближчі години або дні. Прогнозні моделі можуть бути як відносно простими, наприклад на основі ковзного тренду, так і складнішими — з використанням регресії, часових моделей або нейронних мереж. Практична користь прогнозування полягає в можливості завчасно попереджати користувачів про очікуване погіршення якості повітря, підвищення температурного навантаження чи інші несприятливі явища. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 3.2.

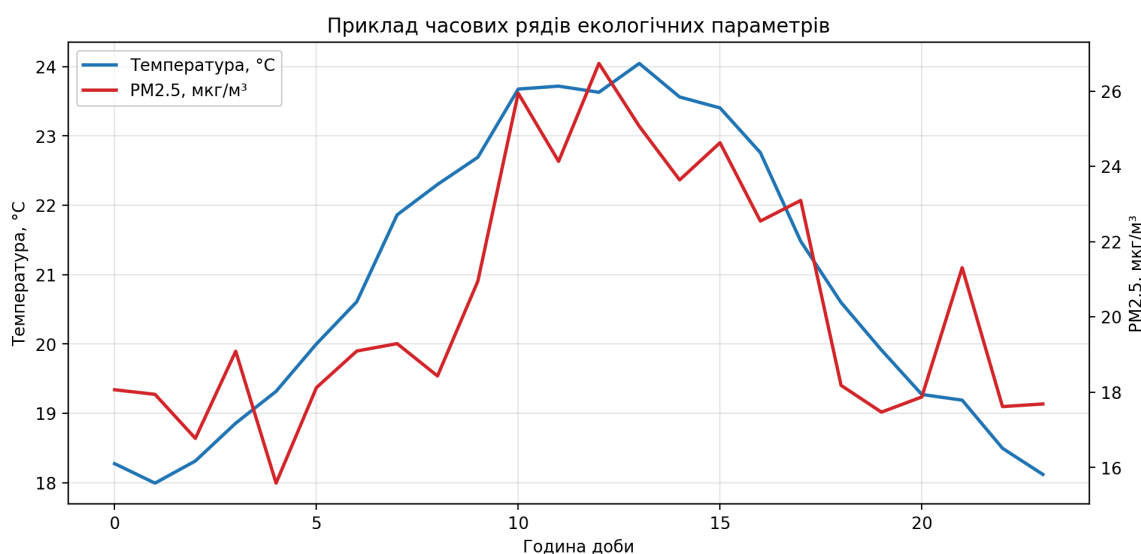


Рисунок 3.2 – Схема обробки, зберігання та візуалізації даних у системі IoT-моніторингу

У контексті організації аналізу даних важливо також враховувати питання достовірності висновків. Дані системи IoT-моніторингу часто мають вищу просторову й часову деталізацію, ніж спостереження традиційних стаціонарних постів, однак можуть поступатися їм за метрологічною точністю. Тому результати аналізу слід інтерпретувати з урахуванням класу застосованих сенсорів, умов їх встановлення, регулярності калібрування та впливу зовнішніх факторів. Для

підвищення надійності доцільним є поєднання даних IoT-вузлів із референсними вимірюваннями, метеоданими та результатами незалежного лабораторного контролю [2; 23].

З огляду на обсяг і різноманітність інформації суттєвим є питання масштабованості. Якщо кількість вузлів збільшується від кількох одиниць до сотень або тисяч, система повинна підтримувати балансування навантаження, ефективну обробку потоків повідомлень, архівування старих даних і швидку генерацію запитів користувачів. Це вимагає продуманого поділу системи на окремі сервіси: приймання повідомлень, обробка, зберігання, аналітика, візуалізація, сповіщення. Подібна модульність підвищує гнучкість і полегшує модернізацію окремих компонентів без повної перебудови всієї системи [3; 23].

Не менш важливими є питання безпеки та захисту даних. Хоча екологічна інформація здебільшого не є конфіденційною, у системі можуть зберігатися технічні параметри об'єктів, геолокація пристроїв, службові облікові записи та історія взаємодії користувачів. Тому потрібні механізми автентифікації, розмежування прав доступу, шифрування каналів зв'язку, резервного копіювання та журналювання подій. Надійна організація обробки даних неможлива без урахування цих аспектів, оскільки компрометація системи здатна призвести не лише до втрати інформації, а й до викривлення аналітичних результатів [2; 3; 23].

Таким чином, організація обробки, візуалізації та аналізу даних у системі моніторингу навколишнього середовища є багатокomпонентним процесом, що включає стандартизацію повідомлень, очищення та калібрування вимірювань, зберігання часових рядів, статистичну й просторово-часову аналітику, виявлення аномалій, прогнозування та побудову зручних інтерфейсів для користувачів. Саме на цьому рівні первинні вимірювання перетворюються на практично значущу інформацію, яка може бути використана для екологічного контролю, наукового аналізу, управлінських рішень і підвищення обізнаності населення. Узагальнені дані наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні методи обробки та аналізу даних у системі моніторингу

Метод	Призначення
Фільтрація	усунення випадкових шумів

Метод	Призначення
Агрегація	обчислення середніх значень
Пороговий аналіз	виявлення перевищення норм
Аналіз трендів	визначення тенденцій зміни показників

3.3 Оцінювання переваг, обмежень і практичної доцільності впровадження

Впровадження систем моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей є перспективним напрямом розвитку сучасної екологічної інфраструктури. Однак для об'єктивної оцінки доцільності їх використання необхідно проаналізувати не лише переваги, а й обмеження, ризики та умови ефективного застосування. Практична цінність таких систем визначається балансом між вартістю, точністю, масштабованістю, надійністю, доступністю експлуатації та можливістю інтеграції з реальними управлінськими процесами [11; 28].

До ключових переваг IoT-систем передусім належить безперервність спостереження. На відміну від епізодичних ручних вимірювань, автоматизована система забезпечує регулярне або навіть потокове надходження даних. Це дозволяє отримувати динамічну картину змін стану навколишнього середовища, фіксувати короточасні піки забруднення, оцінювати добові ритми та відстежувати тенденції в реальному часі. Безперервність спостереження особливо важлива для параметрів, що можуть швидко змінюватися під впливом транспортного навантаження, погодних умов або технологічних процесів на промислових об'єктах [11; 29].

Наступною суттєвою перевагою є просторове охоплення. Завдяки відносно невисокій вартості сенсорних вузлів можна розгортати мережі спостереження у великій кількості точок, що значно підвищує деталізацію екологічної інформації. Якщо традиційні стаціонарні пости є дорогими й обмеженими за чисельністю, то IoT-рішення здатні заповнювати прогалини у спостереженнях, особливо в районах, де відсутня розвинена система контролю. Це створює передумови для

формування більш репрезентативної картини екологічного стану території [28; 29].

Важливою перевагою є оперативність реагування. У разі перевищення порогових значень система може автоматично надсилати повідомлення відповідальним особам або користувачам. Такий механізм скорочує час між виникненням небажаної події та початком реагування. У контексті екологічного моніторингу це може мати критичне значення, наприклад, під час аварійних викидів, пожеж, пилових буревіїв, різкого зростання концентрації шкідливих речовин або погіршення мікроклімату в закритих приміщеннях [1; 2].

Ще однією перевагою є гнучкість і масштабованість архітектури. Система може починатися з невеликої кількості вузлів і поступово розширюватися без кардинальної зміни концепції. Модульний підхід дозволяє додавати нові типи датчиків, інтегрувати додаткові сервіси обробки та візуалізації, змінювати канали зв'язку залежно від умов застосування. Це особливо корисно для муніципалітетів, освітніх установ і підприємств, які бажають впроваджувати моніторинг поетапно, відповідно до бюджету й актуальних потреб [4; 24; 30].

Слід також відзначити підвищення доступності екологічної інформації. Дані можуть бути оприлюднені через вебінтерфейси, мобільні застосунки або інтегровані в платформи «розумного міста». Внаслідок цього інформація стає корисною не лише для вузького кола спеціалістів, а й для населення, громадських організацій, дослідників і медіа. Відкритість даних сприяє громадському контролю, підвищенню екологічної культури та залученню суспільства до обговорення природоохоронної політики [27; 28].

Проте поряд із перевагами існують і вагомі обмеження. Одним із головних є обмежена метрологічна точність бюджетних сенсорів. У багатьох випадках недорогі датчики достатні для виявлення загальних тенденцій і відносних змін, але не завжди забезпечують точність, необхідну для офіційного контролю чи юридично значущих висновків. На точність впливають старіння сенсорів, температурна й вологісна залежність, дрейф показників, забруднення вимірювальних елементів, електричні завади та особливості монтажу. Це означає,

що IoT-системи доцільно розглядати як інструмент оперативного спостереження та попередньої оцінки, а не завжди як повну заміну референсних станцій [18; 19; 20].

Іншим обмеженням є залежність від якості зв'язку та енергопостачання. У разі використання бездротових мереж можливі втрати пакетів, нестабільність сигналу, затримки передачі або тимчасове зникнення покриття. Для автономних вузлів із живленням від акумулятора чи сонячної панелі важливими є сезонні зміни освітленості, температурні режими та загальне енергоспоживання пристрою. У складних польових умовах ці фактори можуть істотно впливати на безперервність спостереження [11; 27].

До обмежень слід віднести також потребу в регулярному технічному обслуговуванні. Сенсорні вузли вимагають періодичної перевірки, очищення, калібрування, оновлення програмного забезпечення та інколи фізичної заміни окремих компонентів. Якщо система містить десятки або сотні вузлів, організація такого обслуговування стає окремим управлінським завданням, що потребує кадрових і фінансових ресурсів. Недостатня увага до цього аспекту призводить до поступового зниження якості даних [24; 30].

Окремо варто зазначити ризик неправильної інтерпретації результатів. Поширення відкритих екологічних даних є позитивним явищем, проте без належного контексту користувачі можуть робити хибні висновки. Наприклад, короткочасне локальне перевищення не завжди означає систематичну екологічну небезпеку, а відмінності між двома точками спостереження можуть бути зумовлені не лише реальним рівнем забруднення, а й умовами розміщення сенсорів. Тому публічна візуалізація повинна супроводжуватися поясненнями щодо методики вимірювання, інтерпретації індексів і обмежень системи [4; 11; 12].

Практична доцільність впровадження значною мірою залежить від сфери застосування. Для муніципального управління такі системи особливо корисні як інструмент оперативного картування екологічної ситуації, виявлення проблемних районів і підтримки інформаційної політики міста. Для промислових підприємств вони можуть бути частиною внутрішнього екологічного контролю та механізмом

зниження ризиків виробничих інцидентів. Для аграрних господарств практичний ефект проявляється у підвищенні ресурсоефективності та точності управління мікрокліматом. Для освітньо-наукових установ доцільність полягає у створенні цифрового дослідницького середовища та розвитку прикладних компетентностей [11; 24].

Для оцінювання доцільності впровадження доцільно враховувати економічний аспект. Хоча вартість окремого IoT-вузла зазвичай нижча, ніж традиційної стаціонарної станції, повна вартість системи включає також серверну інфраструктуру, розробку програмного забезпечення, зв'язок, монтаж, захисні корпуси, джерела живлення, технічне обслуговування та заміну елементів, що зношуються. Отже, економічна ефективність повинна оцінюватися не тільки через ціну пристрою, а через повну вартість життєвого циклу системи. У багатьох випадках саме поєднання порівняно низької початкової ціни та високої інформаційної віддачі робить такі рішення привабливими. Узагальнені дані наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Переваги та обмеження системи моніторингу навколишнього середовища на основі IoT

Переваги	Обмеження
масштабованість, доступність, оперативність	калібрування, залежність від зв'язку, кіберризик

Доцільно також порівняти IoT-підхід з альтернативними способами організації моніторингу. Традиційні лабораторні та стаціонарні методи забезпечують високу точність, але мають вищу вартість, нижчу просторову щільність і часто меншу оперативність. Ручні польові вимірювання є відносно гнучкими, але не дозволяють реалізувати безперервне спостереження. Супутниковий моніторинг охоплює великі території, однак має обмеження щодо просторової та часової роздільності, а також потребує складної інтерпретації. На цьому тлі IoT-системи займають проміжну й дуже важливу нішу: вони забезпечують високу оперативність, гнучкість і щільність спостережень, хоча потребують коректної калібровки та продуманого обслуговування [24; 30].

Щодо практичної реалізації особливо важливим є організаційний аспект. Впровадження системи не може зводитися лише до закупівлі обладнання.

Необхідно визначити відповідальних за технічну підтримку, обробку даних, інтерпретацію результатів і реагування на тривожні повідомлення. Без сформованих процедур навіть технічно якісна система може не принести очікуваної користі, оскільки дані не будуть використовуватися в управлінні. Тому ефективне впровадження потребує поєднання технологічної, організаційної та методичної складових [24; 30].

Оцінюючи практичну доцільність, варто враховувати й соціальний ефект. Наявність доступної системи моніторингу підвищує прозорість екологічної ситуації, стимулює громадське обговорення проблем якості повітря, шуму або мікроклімату, сприяє екологічній освіті населення. У довгостроковій перспективі це може позитивно впливати на екологічну поведінку громадян, рівень суспільної довіри та підтримку природоохоронних ініціатив. Таким чином, цінність системи виходить за межі суто технічного рішення [11; 24].

З урахуванням наведеного можна стверджувати, що впровадження IoT-систем моніторингу навколишнього середовища є практично доцільним за умови чіткого визначення цілей, правильного вибору сенсорів, організації калібрування та технічного обслуговування, забезпечення надійного зв'язку, створення зручних аналітичних інструментів і підготовки користувачів до коректного трактування даних. Такі системи не повинні розглядатися як універсальне рішення для всіх задач екологічного контролю, однак вони є надзвичайно ефективним засобом розширення спостережної мережі, підвищення оперативності інформування та цифрової трансформації екологічного моніторингу.

3.4 Перспективи розвитку та напрями вдосконалення системи

Подальший розвиток систем моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей безпосередньо пов'язаний із загальними тенденціями цифрової трансформації, мініатюризації сенсорної електроніки, поширенням штучного інтелекту та інтеграцією екологічних даних у платформи управління територіями. Якщо на початковому етапі основна увага

зосереджувалася на самому факті автоматизованого збору даних, то сучасний етап розвитку передбачає підвищення точності, автономності, інтелектуальності та міжсистемної сумісності таких рішень [11; 27].

Одним із пріоритетних напрямів удосконалення є підвищення якості вимірювань. Для цього перспективним є використання комбінованих сенсорних модулів, де поряд із бюджетними датчиками можуть застосовуватися вищі за класом еталонні або напівреференсні компоненти для періодичної самоперевірки. Іншим шляхом є розробка алгоритмів програмної корекції, які використовують температурну компенсацію, міжсенсорне порівняння, статистичне вирівнювання та моделі машинного навчання для зменшення похибок. У результаті навіть відносно недорогі мережі можуть наближатися за інформативністю до більш складних професійних систем [18; 20].

Перспективним напрямом є вдосконалення енергетичної автономності вузлів. Для польових і віддалених умов важливо мінімізувати споживання енергії та забезпечити тривалу роботу без втручання людини. Це може досягатися завдяки застосуванню енергоощадних мікроконтролерів, адаптивному режиму опитування, використанню протоколів зв'язку з низьким енергоспоживанням, а також інтеграції систем енергозбору — сонячних панелей, мікровітрогенераторів або інших засобів harvesting-технологій. Удосконалення автономності прямо впливає на масштабованість системи та знижує витрати на технічне обслуговування [2; 23].

Іншим важливим напрямом є розвиток периферійної, або edge-обробки даних. Традиційно значна частина аналітичних операцій виконується на сервері або в хмарній інфраструктурі. Проте зростання кількості вузлів і обсягів даних робить доцільним перенесення частини обробки безпосередньо на край мережі, тобто на сам сенсорний вузол або локальний шлюз. Це дозволяє зменшити обсяг передавання, швидше реагувати на критичні ситуації, працювати в умовах нестабільного зв'язку та підвищувати конфіденційність локально зібраної інформації. У майбутньому edge-аналітика може включати локальне виявлення

аномалій, короткострокове прогнозування та адаптивне керування режимами роботи вузла [11; 23].

Суттєві перспективи відкриває інтеграція з алгоритмами штучного інтелекту. Машинне навчання може застосовуватися для калібрування сенсорів, прогнозування екологічних показників, виявлення аномалій, класифікації джерел забруднення та побудови рекомендацій для користувачів. Наприклад, на основі спільного аналізу даних про якість повітря, метеопараметри, транспортні потоки та часові закономірності система може не лише сигналізувати про проблему, а й оцінювати її ймовірне походження. Це значно підвищує цінність системи як інструмента підтримки прийняття рішень [4; 24].

Особливу роль у майбутньому відіграватиме інтеграція з геоінформаційними системами та цифровими двійниками територій. Якщо дані моніторингу поєднуються з картографічними шарами забудови, транспортної інфраструктури, зелених зон, промислових об'єктів і метеорологічних моделей, з'являється можливість комплексного просторового аналізу. Цифровий двійник міського середовища дозволяє не лише відстежувати поточний стан, а й моделювати наслідки управлінських рішень, наприклад зміни транспортних схем, збільшення зелених насаджень або перенесення джерел викидів. Таким чином, система моніторингу стає частиною ширшої інтелектуальної інфраструктури управління територіями [11; 29].

Перспективним є й розширення переліку контрольованих параметрів. Окрім стандартних метеорологічних і газоаерозольних показників, сучасні системи можуть включати моніторинг ультрафіолетового випромінювання, радіаційного фону, параметрів водного середовища, якості ґрунту, біологічних індикаторів, акустичного навантаження та навіть візуальних ознак стану середовища за допомогою камер і комп'ютерного зору. Багатопараметричність робить систему більш універсальною та корисною для міжгалузевих завдань. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 3.3.

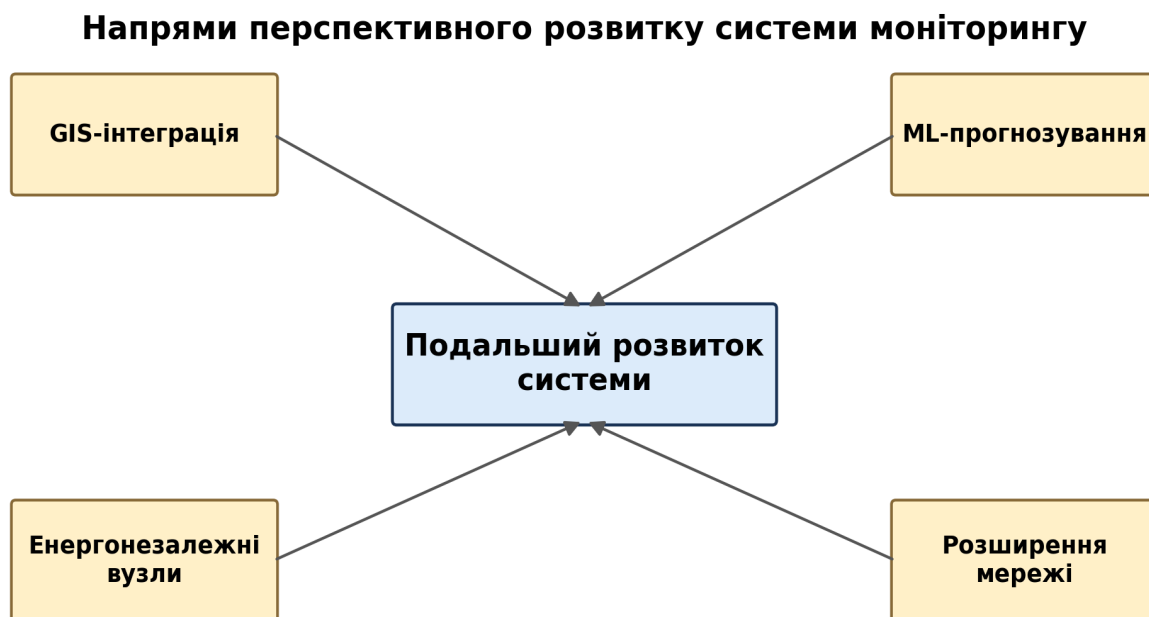


Рисунок 3.3 – Напрями перспективного розвитку системи моніторингу навколишнього середовища

Водночас подальше вдосконалення повинно охоплювати не тільки технічні, а й нормативно-методичні аспекти. Для широкого впровадження систем потрібні стандартизовані підходи до калібрування, оцінювання точності, опису метаданих, публікації відкритих екологічних даних і взаємодії з референсними мережами спостереження. Відсутність уніфікованих вимог ускладнює порівняння даних між різними системами та обмежує можливість їх офіційного використання. Тому розвиток галузі повинен супроводжуватися формуванням методичних рекомендацій, технічних регламентів і протоколів обміну даними [11; 27].

Актуальним напрямом є також підвищення кібербезпеки. Зі збільшенням кількості підключених пристроїв зростає поверхня потенційних атак. У майбутніх системах особливе значення матимуть захищене оновлення прошивки, криптографічний захист комунікацій, апаратні модулі безпеки, моніторинг аномальної мережевої активності та механізми ізоляції компрометованих вузлів. Для критично важливих об'єктів екологічного спостереження це питання може бути не менш значущим, ніж точність самих вимірювань [18; 20].

Ще одним напрямом розвитку є підтримка участі громадян у моніторингу, тобто розвиток підходів citizen science. Громадські мережі датчиків, персональні переносні пристрої та мобільні платформи можуть значно розширити просторове покриття та залучити населення до екологічного спостереження. Однак для того

щоб такі дані були корисними, потрібні механізми перевірки якості, репутаційні моделі джерел даних, автоматичне виявлення хибних вимірювань та інструменти верифікації. Поєднання професійних і громадських мереж може стати важливим фактором демократизації екологічної інформації [2; 23].

Суттєвий потенціал має міжсистемна інтеграція. У майбутньому системи моніторингу навколишнього середовища доцільно об'єднувати з платформами керування транспортом, енергетикою, цивільним захистом, охороною здоров'я та міською аналітикою. Наприклад, дані про забруднення повітря можуть використовуватися для адаптивного регулювання транспортних потоків, інформування медичних служб, коригування роботи вентиляційних систем у громадських будівлях або автоматичного запуску додаткових вимірювальних сценаріїв. Така інтеграція переводить систему з пасивного режиму спостереження у режим активної підтримки управлінських рішень [11; 23].

Важливим напрямом є вдосконалення користувацьких інтерфейсів. З часом користувачі очікуватимуть не лише перегляду графіків, а й отримання персоналізованих висновків, прогнозів та рекомендацій. Для фахівця це можуть бути інструменти сценарного аналізу та поглибленої статистики, для представника громади — прості індикатори ризику та поради щодо поведінки, а для адміністратора — інтерактивні засоби керування мережею пристроїв. Інтерфейс майбутньої системи має бути адаптивним, багаторівневим і орієнтованим на прийняття рішень, а не лише на відображення даних [4; 24].

Необхідно також враховувати екологічну сталість самих технічних рішень. Оскільки системи моніторингу створюються для підтримки екологічної безпеки, доцільно мінімізувати їхній власний негативний вплив. Це означає використання енергоефективних компонентів, довговічних корпусів, змінних сенсорних модулів, ремонтпридатних конструкцій та підходів до відповідальної утилізації електронних відходів. Такий підхід відповідає концепції сталого розвитку й робить систему не лише корисною за функцією, а й екологічно збалансованою за життєвим циклом [24; 30].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що майбутнє IoT-систем моніторингу навколишнього середовища пов'язане з переходом від простої автоматизації вимірювань до формування інтелектуальних, автономних, масштабованих і інтегрованих платформ екологічного спостереження. Подальше вдосконалення має здійснюватися одночасно за кількома напрямками: підвищення точності й надійності сенсорів, розвиток edge- та AI-аналітики, покращення енергетичної автономності, посилення безпеки, стандартизація обміну даними, інтеграція з геоінформаційними й управлінськими системами та орієнтація на різні категорії користувачів. Саме комплексне поєднання цих напрямів забезпечить високий практичний потенціал системи в умовах зростаючих екологічних викликів. Узагальнені дані наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Перспективні напрями вдосконалення системи та очікуваний ефект від їх реалізації

Напрямок	Очікуваний ефект
GIS-інтеграція	просторовий аналіз і карти ризиків
ML-моделі	прогнозування погіршення стану довкілля
Енергонезалежні вузли	триваліша автономна робота
Розширення мережі	більша деталізація спостережень

3.5 Програмна реалізація MVP-прототипу системи моніторингу

Для перевірки працездатності запропонованого підходу розроблено MVP-прототип системи моніторингу, який охоплює сенсорний вузол, канал передавання повідомлень, серверну частину та веб-інтерфейс користувача. Прототип призначений для збору базових екологічних показників, їх оперативної обробки та відображення у зручній формі [23].

Серверна частина реалізує приймання даних через MQTT/HTTP, базову валідацію, збереження вимірювань і формування відповідей для клієнтського застосунку. Для тестування використано симулятор сенсорного вузла, який відтворює типові значення параметрів довкілля та дозволяє перевіряти роботу системи без постійного підключення фізичного обладнання [11; 23].

Клієнтський веб-інтерфейс відображає поточні значення показників, їх динаміку та стан тривоги при перевищенні порогових значень. Такий підхід забезпечує наочне представлення телеметрії, спрощує контроль роботи системи й дозволяє швидко оцінювати екологічну ситуацію на об'єкті спостереження [24; 30].

Розроблений MVP-прототип підтверджує можливість поетапного впровадження системи в навчальних, дослідницьких та прикладних сценаріях. Він може бути використаний як основа для подальшого розширення переліку сенсорів, підключення додаткових вузлів, інтеграції з аналітичними модулями та побудови повноцінної платформи екологічного моніторингу. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 3.4. Відповідну ілюстрацію наведено на рис. 3.5.

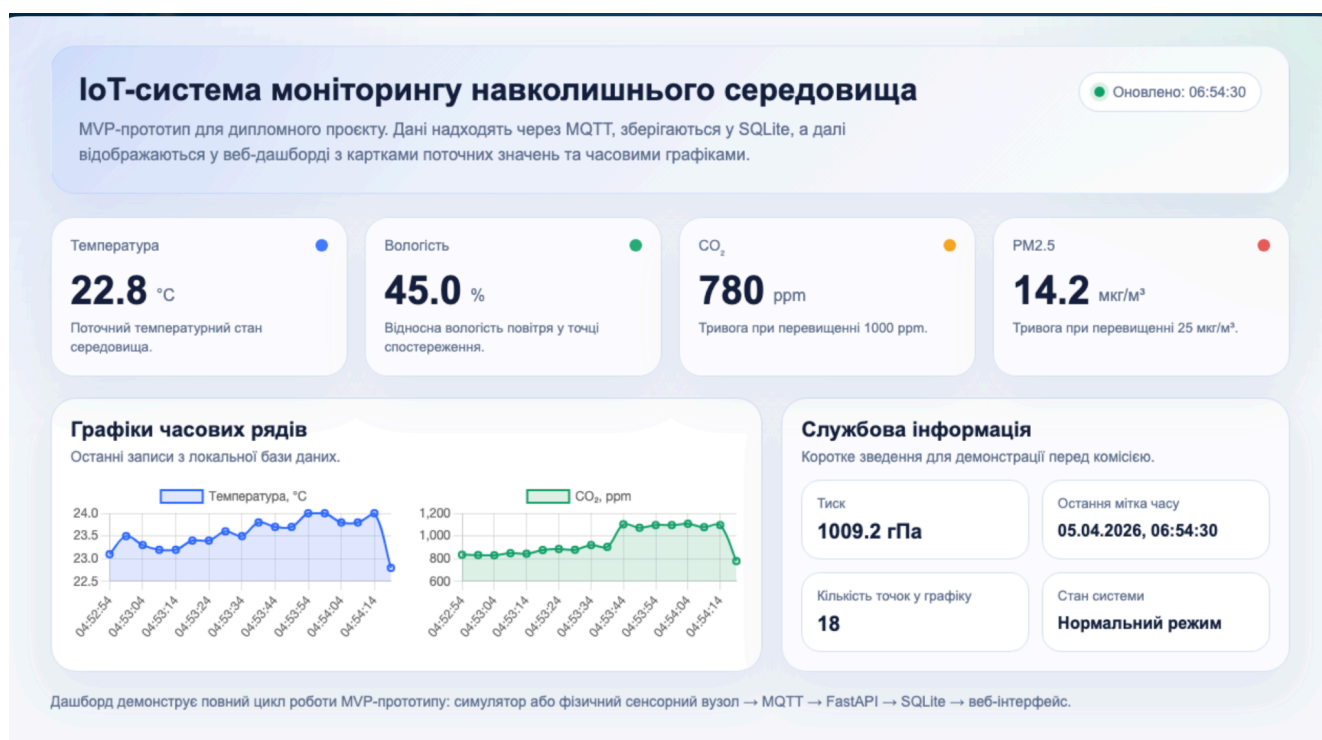


Рисунок 3.4 – Веб-дашборд MVP-прототипу системи моніторингу у нормальному режимі

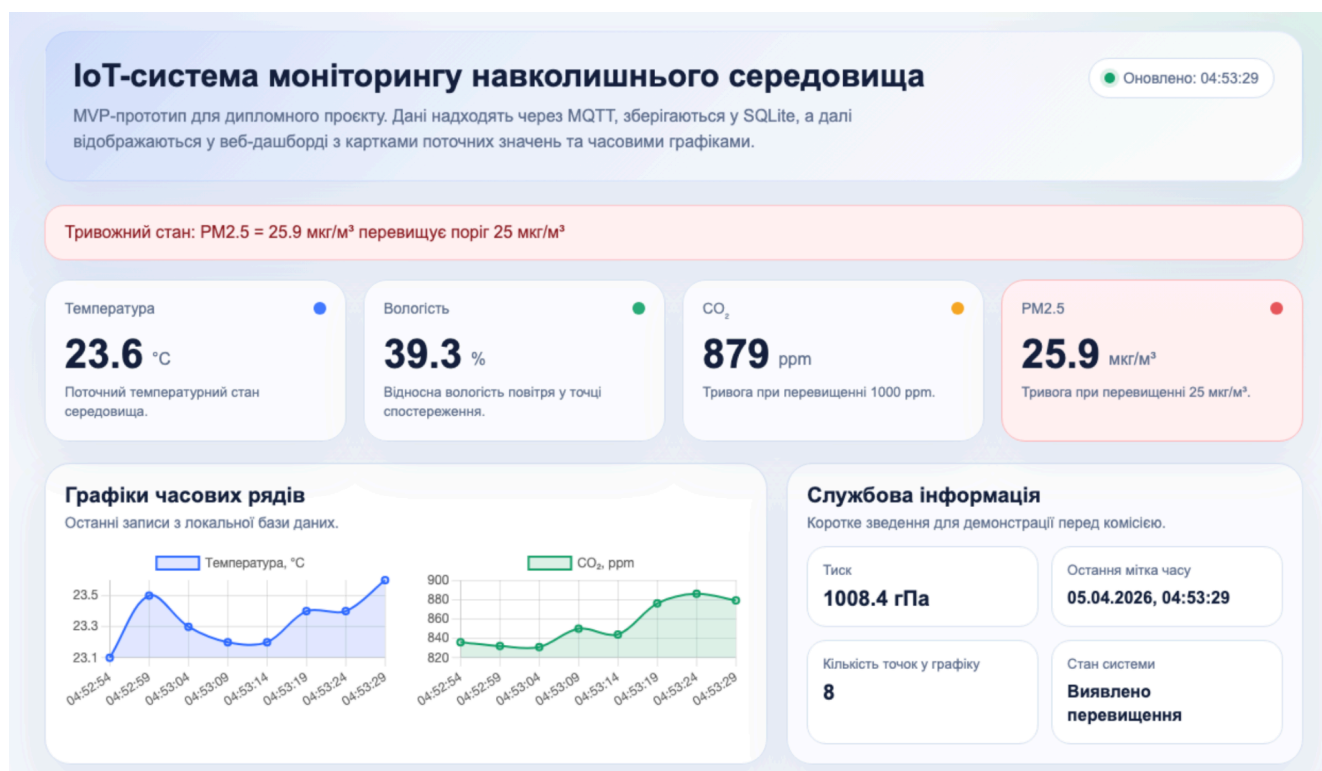


Рисунок 3.5 – Веб-дашборд MVP-прототипу системи моніторингу в режимі тривоги

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні та практичні аспекти побудови систем моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей. Актуальність теми зумовлена потребою у безперервному, масштабованому та технічно обґрунтованому контролі екологічних параметрів у міському, промисловому й локальному середовищі.

У першому розділі узагальнено зміст екологічного моніторингу, визначено його функції, рівні та основні завдання. Показано, що інтеграція IoT дає змогу перейти від фрагментарних вимірювань до розподілених систем спостереження з високою оперативністю й кращою просторовою деталізацією даних.

Проаналізовано основні параметри довкілля, що підлягають контролю, та відповідні сенсорні засоби їх вимірювання. Встановлено, що практична ефективність системи залежить не лише від вибору датчиків, а й від процедур калібрування, валідації, енергоефективності вузлів і коректної інтерпретації результатів.

У другому розділі сформовано вимоги до системи моніторингу, обґрунтовано її функціональну та структурну архітектуру, а також виконано вибір апаратних і програмних компонентів. Запропонований підхід передбачає використання сенсорного вузла на базі мікроконтролера, бездротового передавання даних, серверного модуля приймання телеметрії та сховища для накопичення вимірювань.

У третьому розділі розглянуто алгоритм функціонування системи, організацію обробки та візуалізації даних, а також переваги, обмеження і напрями розвитку запропонованого рішення. Показано, що система може забезпечити автоматизоване збирання даних, формування сповіщень, підтримку базової аналітики та наочне представлення показників у веб-інтерфейсі.

Практичним результатом роботи є опис і узагальнення MVP-прототипу, який підтверджує доцільність поетапної реалізації IoT-системи екологічного моніторингу. Такий прототип може бути використаний як основа для навчальних

проектів, локальних систем спостереження та подальшого масштабування до багатовузлової інфраструктури.

Отже, поставлену мету роботи досягнуто: досліджено принципи побудови систем моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей, визначено їх ключові компоненти, переваги та обмеження. Подальший розвиток напряму пов'язаний із підвищенням точності вимірювань, удосконаленням алгоритмів аналітики, покращенням енергоефективності вузлів і розширенням можливостей інтеграції з цифровими платформами управління довкіллям.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*. 2010. Vol. 54, No. 15. P. 2787–2805.
2. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*. 2013. Vol. 29, No. 7. P. 1645–1660.
3. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17, No. 4. P. 2347–2376.
4. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*. 2014. Vol. 1, No. 1. P. 22–32.
5. Vermesan O., Friess P. *Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems*. Aalborg: River Publishers, 2013. 336 p.
6. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*. 2015. Vol. 3, No. 5. P. 164–173.
7. Ray P. P. A survey on Internet of Things architectures. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2018. Vol. 30, No. 3. P. 291–319.
8. Kumar N. M., Mallick P. K. The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 132. P. 109–117.
9. da Xu L., He W., Li S. Internet of Things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. Vol. 10, No. 4. P. 2233–2243.
10. Li S., Xu L. D., Zhao S. The Internet of Things: A survey. *Information Systems Frontiers*. 2015. Vol. 17. P. 243–259.
11. Bacco M., Colucci M., Gotta A., Ruggeri M., Raffaelli C., Valori L. Smart monitoring for sustainable environments using wireless sensor networks and IoT. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 3. Art. 698.
12. Dlodlo N., Kalezhi J. The internet of things in agriculture for sustainable rural development. *2015 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications*. 2015. P. 13–18.

13. Hart J. K., Martinez K. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? *Earth-Science Reviews*. 2006. Vol. 78, No. 3–4. P. 177–191.
14. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*. 2002. Vol. 38, No. 4. P. 393–422.
15. Yick J., Mukherjee B., Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*. 2008. Vol. 52, No. 12. P. 2292–2330.
16. Buratti C., Conti A., Dardari D., Verdone R. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors*. 2009. Vol. 9, No. 9. P. 6869–6896.
17. Islam S. M. R., Kwak D., Kabir M. H., Hossain M., Kwak K.-S. The Internet of Things for health care: A comprehensive survey. *IEEE Access*. 2015. Vol. 3. P. 678–708.
18. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 855–873.
19. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*. 2016. Vol. 23, No. 5. P. 60–67.
20. Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*. 2019. Vol. 5, No. 1. P. 1–7.
21. Minerva R., Biru A., Rotondi D. Towards a definition of the Internet of Things (IoT). *IEEE Internet Initiative White Paper*. 2015. 86 p.
22. Borgia E. The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*. 2014. Vol. 54. P. 1–31.
23. Perera C., Zaslavsky A., Christen P., Georgakopoulos D. Context aware computing for The Internet of Things: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2014. Vol. 16, No. 1. P. 414–454.
24. Stankovic J. A. Research directions for the Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2014. Vol. 1, No. 1. P. 3–9.
25. Xu G., Shen W., Wang X. Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: A survey. *Sensors*. 2014. Vol. 14, No. 9. P. 16932–16954.

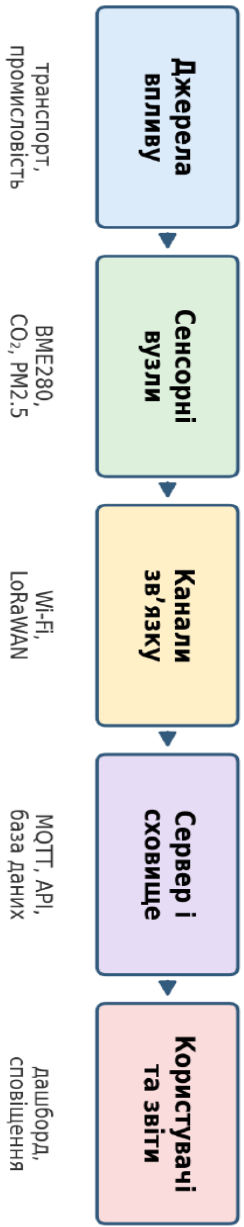
26. Kumar A., Kumar S., Kaur J. Wireless sensor networks for environmental monitoring: A review. *International Journal of Computer Applications*. 2016. Vol. 146, No. 11. P. 1–5.
27. Jovašević-Stojanović M., Bartonova A., Topalović D., Lazović I., Pokrić B., Ristovski Z. On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter. *Environmental Pollution*. 2015. Vol. 206. P. 696–704.
28. Snyder E. G., Watkins T. H., Solomon P. A. et al. The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, No. 20. P. 11369–11377.
29. World Health Organization. *Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease*. Geneva: WHO, 2016. 131 p.
30. United Nations. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations, 2015. 41 p.
31. Єременко О. В., Коваленко А. М. Інтернет речей: технології, архітектура, напрями застосування. Системи управління, навігації та зв'язку. 2020. № 2. С. 84–90.
32. Коваленко І. І., Мельник В. М. Бездротові сенсорні мережі для екологічного моніторингу: принципи побудови та сфери застосування. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія: Радіотехніка, радіоапаратобудування. 2019. № 76. С. 55–63.
33. Бойко Ю. П., Сидоренко Р. Л. Технології LPWAN у системах інтернету речей. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2021. № 4. С. 37–45.
34. Петренко С. В., Марченко Д. О. Системи моніторингу якості повітря на основі IoT-платформ. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2022. № 3. С. 72–80.
35. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 30 с.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (ПРЕЗЕНТАЦІЯ)

Системи моніторингу навколишнього середовища на основі технологій Інтернету речей

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Загальна структура системи екологічного моніторингу на основі IoT



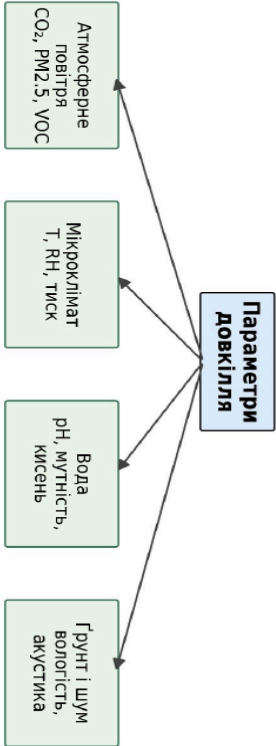
Закройшиков Ростислав Олександрович
Група: (ІСД-41)

Керівник: (Каміла СТОРЧАК)
Київ 2026

Актуальність теми

зростання антропогенного навантаження на довкілля
потреба в оперативному екологічному контролі
обмеженість традиційних постів спостереження
доступність сенсорів, мікроконтролерів і хмарних сервісів

Класи контролюваних параметрів і типові групи сенсорів



Мета, об'єкт, предмет і завдання

мета – дослідити та обґрунтувати архітектуру IoT-системи моніторингу довкілля

об'єкт – процеси моніторингу стану навколишнього середовища

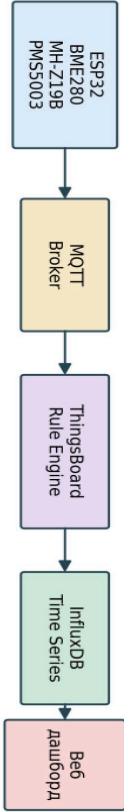
предмет – методи, засоби, архітектурні та програмно-апаратні рішення

завдання – аналіз предметної області, вибір компонентів, опис алгоритмів, оцінювання ефективності

Структура запропонованої системи

сенсорний вузол
канал передавання даних
MQTT / платформа ThingsBoard
сховище часових рядів
веб-дашборд і сповіщення

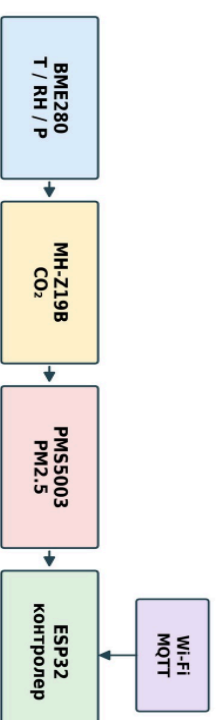
Конкретизована структура запропонованої системи



Апаратна складова

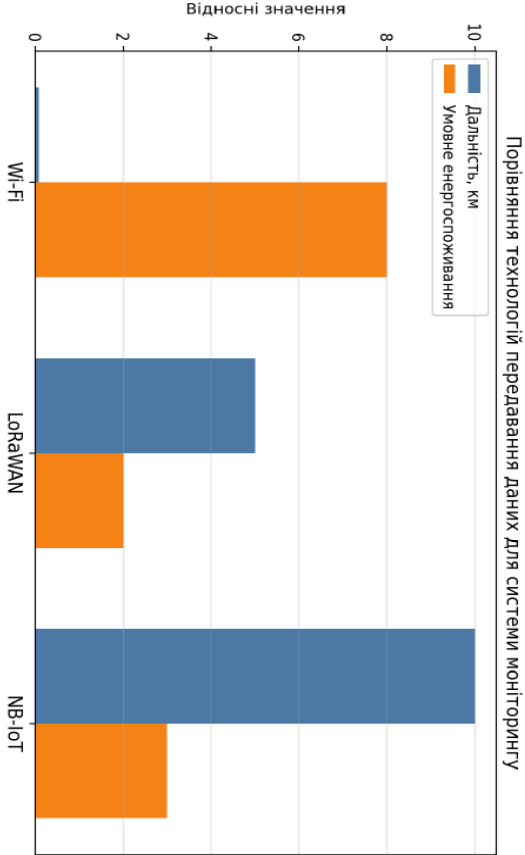
ESP32 як ядро сенсорного вузла
BME280 / SHT31 – мікроклімат
MH-Z19B – CO₂
PMS5003 / PMS7003 – PM2.5

Структурна схема апаратного вузла моніторингу



Канали зв'язку

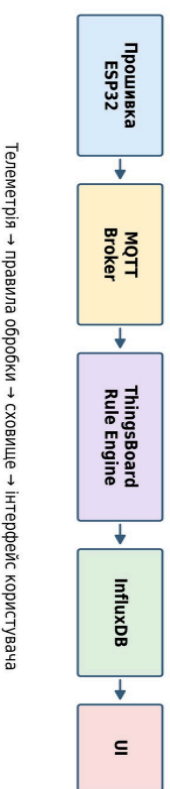
- Wi-Fi – локальні мережі
 - LoRaWAN – велика дальність
 - NB-IoT – віддалені вузли
- вибір залежить від масштабу, бюджету і режиму роботи



Програмна архітектура

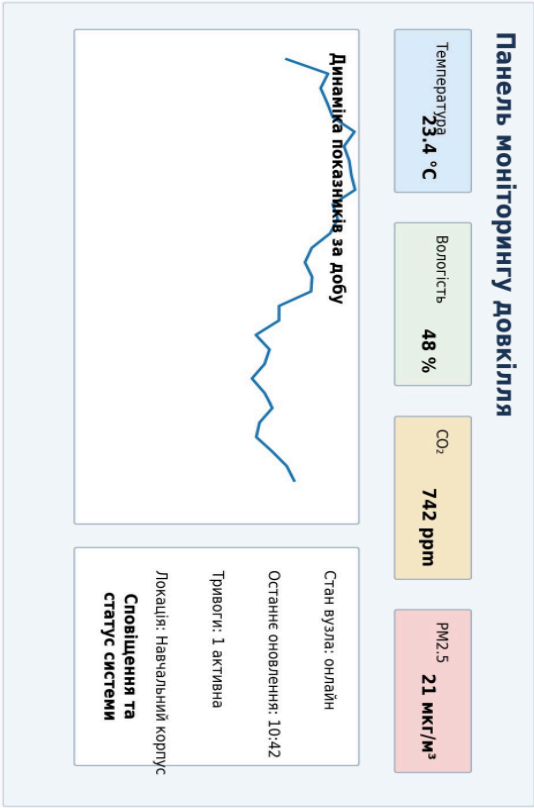
прошивка вузла
MQTT-брокер
ThingsBoard / API
база часових рядів
рольова модель доступу

Схема програмної взаємодії компонентів системи



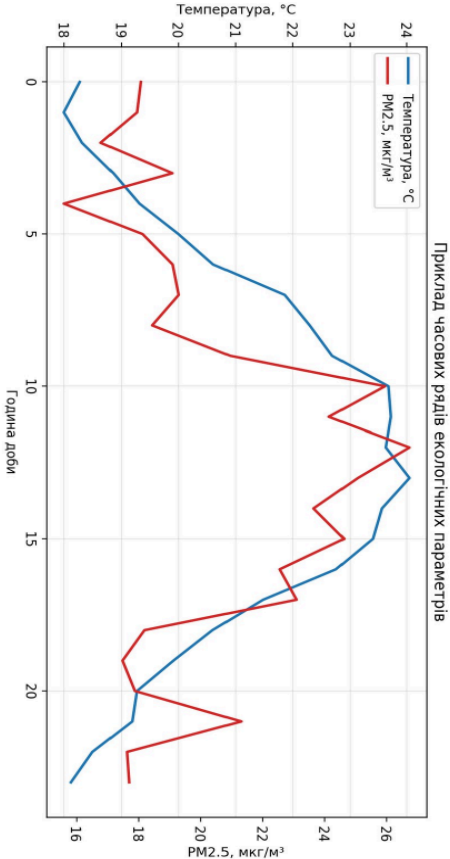
Обробка та візуалізація даних

збирання і валідація телеметрії
агрегація та побудова часових рядів
дашборд і повідомлення про перевищення
норм



Приклад аналітики часових рядів

аналіз температури та PM2.5
виявлення добових циклів
основа для подальшого прогнозування



Переваги та обмеження

переваги: масштабованість, доступність, оперативність
обмеження: калібрування сенсорів, зв'язок, кібербезпеки
практична цінність: застосування у містах, на підприємствах, в освіті

Висновки

IoT є ефективною технологічною основою екологічного моніторингу запропонована структура забезпечує збір, зберігання й аналіз даних подальший розвиток пов'язаний з GIS та машинним навчанням

