

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Рожанський Роман Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 504.064

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розробка інтелектуального сенсорного модуля для моніторингу параметрів
довкілля з використанням бездротових технологій передачі даних

(назва роботи)

Метрологія і вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 - Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

Рожанський Р.Ю.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього
ступеня)

Науковий керівник

Барна О.Б., канд. техн. наук

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ
2025

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль			

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз методів моніторингу та контролю довкілля	15.10.–1.11.2024р.	
2.	Розроблення сенсорного модуля для моніторингу параметрів довкілля	02.11.–19.11.2024р.	
3.	Аналіз джерел невизначеності модуля для моніторингу параметрів довкілля	20.11–28.11.2024р.	
4.	Висновки по роботі	29.11–30.11.2024р.	
5.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.12.–13.12.2024р.	

Студент _____ Рожанський Р.Ю
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Барна О.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота “Розробка сенсорного модуля для моніторингу параметрів довкілля з використанням бездротових технологій передачі даних” Рожанський Р.Ю., ІФНТУНГ, 2025, 69 с., 13 рисунків, 4 табл, 11 джерел

Об’єкт дослідження: процеси інструментального вимірювання параметрів навколишнього середовища в розподілених бездротових системах моніторингу.

Мета роботи: підвищення достовірності та інформативності екологічного моніторингу шляхом розробки сенсорного модуля, що забезпечує безперервне вимірювання параметрів довкілля, локальну обробку сигналів та енергоефективну бездротову передачу даних.

У даній магістерській роботі здійснено аналіз сучасних методів та інструментальних засобів екологічного моніторингу, обґрунтовано вибір компонентної бази та розроблено структурно-функціональну схему автономного сенсорного модуля на базі мікроконтролера ESP32. Розроблено алгоритмічне забезпечення пристрою, що включає методи цифрової фільтрації та мультипараметричної компенсації похибок сенсорів PMS5003, MH-Z19C та VME680. Виконано аналіз джерел невизначеності, розраховано бюджет розширеної невизначеності вимірювань та проведено теоретичну оцінку енергоефективності й автономності спроектованої системи.

МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ, СЕНСОРНИЙ МОДУЛЬ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IoT), БЕЗДРОВОТА ПЕРЕДАЧА ДАНИХ, ESP32, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ, PMS5003, MH-Z19C, VME680.

ABSTRACT

Master's thesis: "Development of a sensor module for environmental parameter monitoring using wireless data transmission technologies", Rozhanskyi R.Yu., IFNTUOG, 2025, 69 p., 13 figures, 4 tables, 11 references.

Research object: processes of instrumental measurement of environmental parameters in distributed wireless monitoring systems.

Objective: increasing the reliability and informativeness of environmental monitoring by developing a sensor module that ensures continuous measurement of environmental parameters, local signal processing, and energy-efficient wireless data transmission.

This master's thesis analyzes modern methods and instrumental tools for environmental monitoring, substantiates the choice of the component base, and develops a structural-functional diagram of an autonomous sensor module based on the ESP32 microcontroller. The algorithmic support for the device has been developed, which includes methods for digital filtering and multi-parametric error compensation for the PMS5003, MH-Z19C, and BME680 sensors. An analysis of uncertainty sources was performed, the expanded measurement uncertainty budget was calculated, and a theoretical assessment of the energy efficiency and autonomy of the designed system was conducted.

ENVIRONMENTAL MONITORING, SENSOR MODULE, INTERNET OF THINGS (IoT), WIRELESS DATA TRANSMISSION, ESP32, MEASUREMENT UNCERTAINTY, PMS5003, MH-Z19C, BME680.

ВСТУП .....	.....
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ДОВКІЛЛЯ.....	.....
1.1 Процес виникнення та становлення потреби моніторингу довкілля .....	.....
1.2 Поняття моніторинг довкілля.....	.....
1.3 Аналіз принципів та методів вимірювання параметрів довкілля .....	.....
1.3.1 Аналіз принципів та методів вимірювання першої групи .....	.....
1.3.1.1 Вимірювання вологості повітря.....	.....
1.3.1.2 Вимірювання температури навколишнього середовища.....	.....
1.3.1.3 Аналіз принципів та методів вимірювання атмосферного тиску.....	.....
1.3.2 Аналіз принципів та методів вимірювання другої групи.....	.....
1.3.2.1 Аналіз принципів та методів вимірювання параметрів вітру.....	.....
1.3.2.2 Аналіз принципів та методів вимірювання параметрів опадів.....	.....
1.3.2.3 Аналіз принципів та методів вимірювання інтенсивності випаровування.....	.....
1.3.2.4 Аналіз принципів та методів вимірювання сонячного випромінювання .....	.....
1.3.3 Аналіз принципів та методів вимірювання третьої групи .....	.....
1.3.3.1 Аналіз принципів та методів вимірювання концентрації парникових газів і забруднювальних речовин .....	.....
1.3.3.2 Аналіз принципів та методів вимірювання параметрів ґрунтів .....	.....
1.4 Аналіз існуючих систем моніторингу довкілля.....	.....
1.4.1 Обмеження та потенціал застосування low-cost сенсорів.....	.....
1.4.2 Порівняльний аналіз еталонних і low-cost сенсорів .....	.....
2 РОЗРОБЛЕННЯ СЕНСОРНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ДОВКІЛЛЯ.....	.....
2.1 Аналіз вимог до системи та огляд інструментальних засобів моніторингу.....	.....
2.1.1 Аналіз сучасних інструментальних засобів та сенсорної бази .....	.....
2.2 Обґрунтування структурно-функціональної схеми пристрою .....	.....
2.3 Вибір та обґрунтування елементної бази .....	.....
2.3.1 Вибір обчислювального ядра та бездротового інтерфейсу.....	.....
2.3.2 Вибір сенсорів для реєстрації параметрів довкілля.....	.....
2.4 Розробка алгоритму функціонування мультипараметричного модуля .....	.....
2.5 Алгоритм функціонування сенсорного модуля.....	.....
Висновки до розділу .....	.....
3 АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ МОДУЛЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ДОВКІЛЛЯ.....	.....
3.1 Загальне поняття невизначеності та джерел невизначеності.....	.....
3.2 Класифікація невизначеностей за методами оцінювання .....	.....
3.2 Аналіз технічних характеристик датчиків сенсорного модуля .....	.....
3.2.1 Технічні характеристики лазерного датчика якості повітря PMS5003.....	.....
3.2.2 Технічні характеристики інфрачервоного датчика CO ₂ MH-Z19C .....	.....
3.2.3 Технічні характеристики інтегрального датчика параметрів довкілля VME680.....	.....

3.4	Аналіз невизначеності датчиків сенсорного модуля	
3.4.1	Сенсор ВМЕ680	
3.4.2	Сенсор МН-Z19С	
3.4.3	Сенсор PMS5003	
3.5	Розрахунок сумарної та розширеної невизначеності	
3.6.	Дослідження енергоефективності та автономності пристрою	
3.7	Тестування каналу передачі даних та візуалізація результатів	
3.8	Методика проведення експериментальних досліджень	
	Висновки до розділу 3	
	ВИСНОВОК	
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	

ВСТУП

В умовах сучасного техногенного навантаження, що характеризується глобальним погіршенням якості довкілля та незворотними змінами клімату, питання екологічної безпеки трансформуються з площини наукових дискусій у категорію критичних імперативів виживання людства. Визначення оперативних та довготривалих змін показників навколишнього середовища, а також прогнозування їх тенденцій у майбутньому набуває особливого, стратегічного значення для забезпечення сталого розвитку цивілізації. Традиційні підходи до моніторингу, що базуються на епізодичних вимірюваннях або використанні рідкісної мережі стаціонарних постів, вже не здатні задовольнити зростаючі вимоги до просторової та часової розрізненості даних, необхідних для ефективного управління екологічними ризиками.

Фундаментальні засади контролю стану довкілля та вимірювання його основних параметрів сьогодні потребують суттєвого переосмислення крізь призму новітніх технологій. Метою сучасної інженерії стає не просто фіксація перевищення нормативів, а створення проактивних систем, здатних прогнозувати стан довкілля на перспективу та надавати науково обґрунтовані рекомендації для проведення природоохоронних заходів у режимі реального часу.

Для України ця проблематика набуває специфічного, екзистенційного забарвлення. Екологічна ситуація, що десятиліттями залишалася складною через застарілу промислову інфраструктуру, сьогодні катастрофічно ускладнилася внаслідок воєнних дій. Руйнування промислових об'єктів, пожежі на нафтобазах, мінування територій створюють безпрецедентні виклики для національної системи екологічної безпеки. У регіонах, де навантаження на природне середовище зростає, а забруднення і виснаження природних ресурсів загрожують здоров'ю населення, розробка автономних, енергоефективних та інтелектуальних засобів моніторингу стає невід'ємною складовою стратегії післявоєнного відновлення та розбудови концепції «Smart City».

В цьому контексті розробка інтелектуального сенсорного модуля для моніторингу параметрів довкілля з використанням бездротових технологій передачі даних є актуальним науково-технічним завданням.

Метою роботи є підвищення достовірності та інформативності екологічного моніторингу шляхом розробки сенсорного модуля, що забезпечує **безперервне вимірювання параметрів довкілля**, локальну обробку сигналів та енергоефективну бездротову передачу даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних сенсорних технологій вимірювання параметрів довкілля з точки зору їх метрологічних характеристик (точності, чутливості, стабільності);
- дослідити вплив зовнішніх факторів (температури, вологості, завад) на результати вимірювань та визначити методи їх компенсації;
- обґрунтувати вибір первинних вимірювальних перетворювачів для контролю PM2.5, CO₂, VOC, температури та вологості;
- розробити архітектуру сенсорного модуля з урахуванням калібрування, синхронізації та систематичності вимірювань;
- реалізувати алгоритми попередньої обробки вимірювальних даних і корекції похибок;
- провести **теоретичну оцінку** точності вимірювань.

Об'єктом дослідження є процеси інструментального вимірювання параметрів навколишнього середовища в розподілених бездротових системах моніторингу.

Предметом дослідження є сенсорні модулі та датчики, методи обробки вимірювальних сигналів, метрологічні характеристики та алгоритми підвищення точності екологічних вимірювань.

У роботі використано такі методи:

- теоретичні дослідження;
- аналіз та синтез;
- математичне моделювання;

Наукова новизна полягає в удосконаленні підходів до метрологічного забезпечення недорогих сенсорів шляхом поєднання апаратного калібрування та програмної компенсації похибок, а також в обґрунтуванні гібридної архітектури передачі вимірювальних даних, що мінімізує втрати інформації та енергоспоживання.

Практичне значення роботи полягає у створенні універсального сенсорного модуля, який може застосовуватися в системах державного, муніципального та громадського екологічного моніторингу, а також у навчальному процесі для формування практичних навичок роботи з вимірювальними приладами та сенсорними системами.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ДОВКІЛЛЯ

1.1 Процес виникнення та становлення потреби моніторингу довкілля

Потреба у створенні системи моніторингу довкілля виникла внаслідок постійного зростання антропогенного навантаження на природне середовище, що є результатом розвитку взаємодії між суспільством і природою. Цей процес у науковій літературі розглядається як еволюція глобальної системи «суспільство – природа», яка пройшла кілька основних етапів.

На першому етапі, що охоплює період від появи людського суспільства до пізнього палеоліту, система була функціонально незамкненою: вплив людини на природу залишався мінімальним і не спричиняв помітних змін у природному середовищі.

Другий етап, який тривав приблизно від пізнього палеоліту до середини ХХ століття, характеризувався частковою функціональною замкненістю системи. У цей період антропогенний вплив посилювався, і природне середовище почало реагувати на втручання людини, однак масштабні негативні наслідки для людства ще не мали системного характеру.

Із середини ХХ століття розпочався третій етап — функціонально замкнена система, коли інтенсивна господарська діяльність людини створила реальну загрозу виникнення глобальних і потенційно незворотних екологічних процесів. Такі процеси здатні істотно погіршити умови існування біосфери та поставити під загрозу подальший розвиток цивілізації.

Протягом перших двох етапів розвиток суспільства відбувався в умовах, коли обсяги природних ресурсів і можливості їх відтворення значно перевищували реальні потреби людства. Однак починаючи з другої половини ХХ століття сформувалася глобальна екологічна криза, пов'язана з порушенням механізмів життєзабезпечення людства та стабільності біосфери загалом.

Одним із проявів цієї кризи стало зменшення концентрації стратосферного озону та утворення так званих «озонових дір», особливо над полярними

регіонами. Це явище викликає серйозне занепокоєння, оскільки озоновий шар виконує захисну функцію, поглинаючи жорстке ультрафіолетове випромінювання, небезпечне для живих організмів.

Поряд із цим людство стикається з проблемою вичерпання запасів мінеральних ресурсів, органічного палива та чистої прісної води. За прогнозами міжнародних організацій, значна частина доступної сировини може бути вичерпана вже до кінця XXI століття. Реалізація масштабних енергетичних проєктів, зокрема будівництво гідро- та атомних електростанцій, супроводжується значними екологічними ризиками та соціальними дискусіями.

Загострення екологічної ситуації в другій половині XX століття зумовило активний пошук інструментів для оцінювання, контролю та прогнозування змін стану довкілля. Саме з цією метою на Конференції ООН з питань навколишнього середовища людини, що відбулася у Стокгольмі в 1972 році, було запропоновано створення системи регулярних спеціалізованих спостережень за станом природного середовища. Тоді вперше було введено поняття «моніторинг» як науково організований процес цілеспрямованого спостереження.

Подальший розвиток теорії екологічного моніторингу пов'язаний із працями Р. Манна, а також із концепціями І. П. Герасимова та Ю. А. Ізраєля, які розширили початкове трактування моніторингу, наголосивши на необхідності врахування антропогенних чинників. У сучасному розумінні система моніторингу охоплює не лише спостереження, а й аналіз, оцінювання, прогнозування змін стану довкілля та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття управлінських рішень.

1.2 Поняття моніторинг довкілля

Моніторинг довкілля — це система регулярних і цілеспрямованих спостережень за елементами навколишнього природного середовища в просторі та часі відповідно до визначеної програми (Р. Манн).

— Екологічний моніторинг — комплекс спостережень, що дає змогу виявляти та аналізувати зміни стану біосфери під впливом діяльності людини (Ю. Израель, І. Герасимов).

Моніторинг навколишнього середовища людини — система контролю та попередження про небезпечні або критичні зміни довкілля, що можуть загрожувати здоров'ю людей і живих організмів (М. Реймерс).

Державний моніторинг довкілля — це сукупність спостережень, збору, обробки, аналізу та прогнозування інформації про стан довкілля з метою наукового обґрунтування управлінських рішень.

В умовах зростаючого техногенного навантаження та ускладнення екологічних процесів ключовим чинником забезпечення екологічної безпеки стає достовірність, точність і відтворюваність вимірювань параметрів довкілля. Саме якість вимірювальної інформації визначає можливість коректної оцінки стану навколишнього середовища, виявлення перевищень нормативів, аналізу динаміки змін та формування науково обґрунтованих управлінських рішень.

Традиційні системи екологічного контролю, що ґрунтуються на використанні обмеженої кількості стаціонарних постів з високоточним, але громіздким і дорогим аналітичним обладнанням, забезпечують високу метрологічну надійність, проте характеризуються низькою просторовою та часовою роздільною здатністю. У результаті значна частина локальних і короткочасних забруднень залишається невиявленою, а оперативність реагування суттєво знижується.

Сучасний етап розвитку вимірювальної техніки характеризується активним впровадженням **мініатюрних цифрових сенсорів**, вбудованих мікроконтролерів та бездротових засобів зв'язку. Це дозволяє перейти від поодиноких вимірювальних пунктів до **розподілених сенсорних мереж**, у яких кожен вузол виконує функції первинного вимірювального перетворювача, попередньої обробки сигналів та передачі даних. Однак використання недорогих сенсорів актуалізує низку метрологічних проблем: нелінійність

характеристик, температурну та вологісну залежність, дрейф показників, обмежену селективність і повторюваність вимірювань.

Для України питання інструментального моніторингу довкілля набуває особливої гостроти внаслідок поєднання застарілої промислової бази, високого рівня техногенного навантаження та наслідків воєнних дій. У таких умовах критично важливим є створення **автономних, мобільних та метрологічно обґрунтованих вимірювальних засобів**, здатних працювати в польових умовах, швидко розгортатися та забезпечувати прийнятну точність вимірювань за мінімальних енергетичних витрат.

У цьому контексті розробка інтелектуального сенсорного модуля для моніторингу параметрів довкілля з використанням бездротових технологій передачі даних є актуальним науково-технічним завданням, що поєднує питання сенсорики, метрології, обробки вимірювальних сигналів та системної інтеграції.

1.3 Аналіз принципів та методів вимірювання параметрів довкілля

Аналіз принципів та методів вимірювання параметрів довкілля є комплексним завданням, оскільки об'єкт дослідження характеризується багатокomпонентністю та складними внутрішніми зв'язками. Параметри довкілля складаються із багатьох величин, які умовно можна поділити на кілька функціональних груп, кожна з яких вимагає специфічних підходів до інструментального контролю.

Першу групу складають фундаментальні термодинамічні показники атмосфери. До них належать вологість повітря, температура та атмосферний тиск. Ці величини є базовими для будь-якої системи моніторингу, оскільки вони визначають фізичний стан повітряного середовища та безпосередньо впливають на розповсюдження домішок.

До другої групи входять динамічні та енергетичні характеристики. Це, насамперед, параметри вітру (швидкість і напрямок), які визначають

перенесення повітряних мас, а також характеристики опадів та інтенсивність випаровування, що формують водний баланс території. Важливим елементом тут також є вимірювання випромінювання, зокрема сонячного випромінювання, яке виступає первинним джерелом енергії для кліматичних процесів.

Третя група параметрів стосується хімічного складу та якості середовища. Сюди входить детальний аналіз атмосферного складу, включаючи концентрацію парникових газів і забруднювальних речовин, а також параметри ґрунтів, які тісно взаємодіють із приземним шаром атмосфери. Усі перелічені параметри підлягають вимірюванню з метою отримання об'єктивної картини екологічного стану.

1.3.1 Аналіз принципів та методів вимірювання першої групи

Одним із ключових параметрів, що визначає характеристики навколишнього середовища, є вологість повітря. Від її рівня залежить не лише комфорт людини, але й ефективність багатьох технологічних процесів, зокрема в промисловості, сільському господарстві та науці. Вимірювання вологості — одна з основних задач в атмосферних дослідженнях, екології та фізиці атмосфери [1].

1.3.1.1 Вимірювання вологості повітря

Будь-який прилад для вимірювання вологості називають гігрометром. Вимірювання вологості та зачасту постійне фіксування її значень, є важливою вимогою в більшості системах моніторингу довкілля. Існує багато методів та приладів для вимірювання вологості, до прикладу: психрометричний метод (психрометри), конденсаційний метод (гігрометри точки роси), спектрометри водяної пари, механічні методи (волосяний гігрометр), електричні сенсори та ін. [1].

До електричних сенсорів належать датчики вимірювання відносної вологості та температури. Електричні сенсори для вимірювання відносної вологості використовують зміну в електричних властивостях матеріалу від зміни водяної пари в повітрі [1]. Для вимірювання відносної вологості матеріалом часто слугує спеціальна полімерна плівка яка покрита електродами. Гігрометри відносної вологості на основі сенсорів набирають популярність через можливість дистанційного зчитування показів, та обов'язково застосовуються там, де необхідне пряме зчитування та автоматичне записування відносної вологості, прикладом таких сенсорів є датчики DHT11 та DHT22

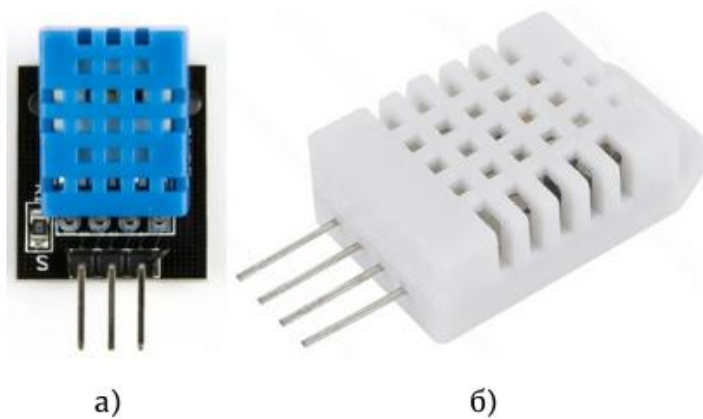


Рисунок 1.1 - а) датчик відносної вологості та температури DHT11; б) датчик відносної вологості та температури DHT22

1.3.1.2 Вимірювання теператури навколишнього середовища

Температура повітря є однією з фундаментальних фізичних величин, що характеризує термодинамічний стан атмосфери. Вона є ключовим параметром у метеорології, кліматології та екологічному моніторингу, оскільки визначає швидкість протікання хімічних реакцій в атмосфері, впливає на теплообмін живих організмів та є вихідною величиною для розрахунку багатьох похідних параметрів, наприклад, відносної вологості або точки роси. Прилад для вимірювання температури називають термометром. Основною вимогою до

вимірювання є досягнення теплової рівноваги між чутливим елементом датчика та навколишнім повітрям. При цьому критично важливою є мінімізація впливу радіаційних факторів (прямого сонячного випромінювання), для чого в професійних системах обов'язково використовують радіаційні захисні екрани або жалюзійні будки [1].

Існує широкий спектр методів вимірювання температури, які класифікують за фізичним принципом дії: рідинні (ртутні або спиртові термометри), деформаційні (біметалеві пластини), манометричні та електричні. У сучасних автоматизованих системах моніторингу доквілля традиційні рідинні прилади практично повністю витіснені електричними методами вимірювання. До електричних сенсорів температури належать термометри опору (RTD) та термістори. Принцип їхньої роботи базується на зміні електричного опору матеріалу (платини, міді або напівпровідників) залежно від температури [1].

Платинові термометри (наприклад, Pt100) вважаються еталонними для високоточних вимірювань завдяки своїй стабільності. Натомість у компактних мобільних системах частіше використовують напівпровідникові термочутливі елементи та інтегральні цифрові мікросхеми.

Сенсори на базі інтегральних схем набувають найбільшої популярності в дистанційних вимірювальних системах. Вони поєднують у собі первинний перетворювач та аналого-цифровий перетворювач, видаючи готовий цифровий сигнал. Це дозволяє нівелювати вплив довжини дротів на точність вимірювання та спрощує інтеграцію з мікроконтролерами. Типовими представниками таких сенсорів є DS18B20, які забезпечують високу швидкість реакції та низьке енергоспоживання.



Рисунок 1.2 - датчик вимірювання температури DS18B20

1.3.1.3 Аналіз принципів та методів вимірювання атмосферного тиску

Атмосферний тиск є однією з найважливіших термодинамічних змінних, що відображає вагу стовпа повітря над точкою вимірювання. Його значення та швидкість зміни (барометрична тенденція) є критичними індикаторами для прогнозування погодних умов, визначення переміщення циклонів та антициклонів, а також використовуються в авіації для альтиметрії (визначення висоти). Основною одиницею вимірювання, є гектопаскаль (гПа). Прилад для вимірювання атмосферного тиску називають барометром. Основною вимогою до встановлення барометра є забезпечення вимірювання саме статичного тиску навколишнього повітря. Це означає, що на прилад не повинен впливати динамічний тиск, спричинений поривами вітру або рухом повітряних потоків у приміщенні (наприклад, від кондиціонерів), оскільки це призводить до суттєвих похибок [1].

Методи вимірювання тиску історично еволюціонували від рідинних до сучасних електронних. Класичні ртутні барометри, які тривалий час були еталонними, зараз виводяться з експлуатації через токсичність ртуті. Механічні барометри-анероїди, що використовують пружну деформацію металевих коробок, є надійними, але мають обмежену точність для наукових цілей. У сучасних автоматизованих системах моніторингу довкілля (AWS) стандартом стали електронні барометри. Найпоширенішими принципами їхньої дії є

п'єзорезистивний (зміна опору матеріалу під дією тиску) та ємнісний (зміна ємності конденсатора при деформації мембрани). Також існують високоточні резонансні датчики, що вимірюють зміну частоти коливань кварцового кристала [1].

Електричні сенсори тиску, виконані за технологією MEMS (мікроелектромеханічні системи), дозволили створити мініатюрні та енергоефективні прилади. Такі сенсори часто мають вбудовану температурну компенсацію, оскільки чутливі елементи реагують на зміни температури. Яскравими прикладами таких сенсорів є серія BMP (BMP180, BMP280) та комбіновані датчики BME (BME280, BME680), які забезпечують високу роздільну здатність та стабільність показів



Рисунок 1.3 - сенсор атмосферного тиску BMP180

1.3.2 Аналіз принципів та методів вимірювання другої групи

1.3.2.1 Аналіз принципів та методів вимірювання параметрів вітру

Вітер є однією з найбільш динамічних характеристик стану атмосфери, що визначається як горизонтальне переміщення повітряних мас відносно земної поверхні. Вимірювання параметрів вітру є критично важливим для метеорологічного прогнозування, забезпечення безпеки авіації та будівництва, а також відіграє ключову роль у завданнях екологічного моніторингу, оскільки саме вітер визначає напрямок та швидкість розсіювання забруднювальних

речовин від джерел викидів. Вітер розглядається як векторна величина, що характеризується двома основними параметрами: швидкістю та напрямком. Напрямок вітру визначається як сторона горизонту, звідки дме вітер, і вимірюється в градусах за годинниковою стрілкою від географічного півночі. Швидкість вимірюється в метрах за секунду (м/с). Важливою вимогою є стандартизація висоти вимірювання, яка становить 10 метрів над рівнем землі на відкритій місцевості, оскільки тертя об поверхню суттєво впливає на повітряний потік у приземному шарі. Особливістю вітру як фізичної величини є його турбулентність та мінливість у часі. Тому в системах моніторингу розрізняють миттєву швидкість (пориви) та усереднену швидкість. Стандартом для синоптичних спостережень є усереднення показників за інтервал у 10 хвилин, що дозволяє нівелювати вплив короткочасних флуктуацій [1].

Прилади для вимірювання параметрів вітру поділяються на кілька класів. Найпоширенішим типом датчиків швидкості є чашкові анемометри, які використовують принцип перетворення динамічного тиску повітряного потоку в обертальний рух ротора. Для визначення напрямку традиційно застосовуються флюгери — асиметричні пластини, що орієнтуються за вітром під дією аеродинамічних сил. У сучасних автоматизованих метеостанціях та інтелектуальних системах моніторингу все більшого поширення набувають ультразвукові (акустичні) анемометри. Принцип їхньої дії базується на вимірюванні часу проходження звукового імпульсу між парами трансіверів: звук рухається швидше за вітром і повільніше проти нього. Такі прилади не мають рухомих частин, що усуває проблему механічного зносу підшипників та інерційності при слабких вітрах. Вони здатні вимірювати вітер практично з нульової швидкості та забезпечують високу частоту опитування, що дозволяє фіксувати турбулентні характеристики потоку, необхідні для точного моделювання розповсюдження домішок у повітрі [1].



Рисунок 1.4 - Чашковий анемометр JL-FS2

1.3.2.2 Аналіз принципів та методів вимірювання параметрів опадів

Атмосферні опади є ключовою ланкою глобального гідрологічного циклу та одним із найбільш мінливих метеорологічних параметрів у просторі та часі. До опадів відносять рідкі або тверді продукти конденсації водяної пари, що випадають з хмар або осідають з повітря на земну поверхню. Точне вимірювання кількості, інтенсивності та тривалості опадів є критично важливим для гідрологічного моделювання, прогнозування повеней, а також для потреб сільського господарства та кліматології. Одиницею вимірювання кількості опадів прийнято вважати лінійну товщину шару води (у міліметрах), що утворився б на горизонтальній поверхні за умови відсутності випаровування, стікання чи просочування. Для твердих опадів (сніг, град) вимірюють водний еквівалент після їх розтанення. Прилади для вимірювання

опадів називають опадомірами або пловіометрами. Ключовою проблемою при їх встановленні є вплив вітру. Корпус приладу створює аеродинамічну перешкоду, що деформує повітряний потік і змушує дрібні краплі або сніжинки оминати приймальний отвір. Тому приділяють особливу увагу розміщенню приладів на відкритих ділянках, захищених від сильних вітрів, але віддалених від дерев та будівель, щоб уникнути ефекту «затінення» [1].

Методи вимірювання поділяються на неелектричні (ручні) та автоматизовані. Класичний ручний опадомір являє собою збірну ємність з каліброваним отвором, воду з якої вимірюють мірним стаканом. У сучасних автоматичних системах моніторингу (AWS) стандартом є використання самописних приладів, які дозволяють фіксувати не лише сумарну кількість, але й інтенсивність дощу. Найпоширенішим типом датчика для автоматичних станцій є човниковий опадомір (tipping bucket rain gauge). Принцип його дії базується на механізмі з двома симетричними контейнерами, що балансують на осі. Коли один контейнер наповнюється певною кількістю води (зазвичай еквівалент 0,1 або 0,2 мм), він перекидається під дією ваги, спорожнюється і підставляє під потік інший контейнер. Кожне перекидання генерує електричний імпульс, що реєструється мікроконтролером. Для більш складних завдань використовують вагові опадоміри, які безперервно зважують накопичені опади, що дозволяє вимірювати сніг без нагріву воронки [1].

Найсучаснішим методом є оптична дисдрометрія. Лазерні дисдрометри вимірюють ослаблення світлового променя при проходженні крапель, що дозволяє визначити не тільки кількість води, але й спектр розподілу крапель за розмірами та швидкістю падіння, класифікуючи тип опадів (дощ, мряка, сніг, град) [1].



Рисунок 1.5 - Вимірювач кількості опадів DFRobot

1.3.2.3 Аналіз принципів та методів вимірювання інтенсивності випаровування

Випаровування визначається як фізичний процес переходу води з рідкого стану в газоподібний з поверхні ґрунту, водойм або рослинності (транспірація). У метеорології та гідрології цей параметр є критично важливим для розрахунку водного балансу територій, планування зрошувальних систем у сільському господарстві та управління водосховищами. Сукупний процес випаровування з ґрунту та рослинності називають сумарним випаровуванням або евапотранспірацією [1].

Пряме вимірювання випаровування є технічно складним завданням, оскільки на його інтенсивність впливає комплекс факторів: сонячна радіація, температура повітря та поверхні, вологість, швидкість вітру та атмосферний тиск. Одиницею вимірювання, аналогічно до опадів, є міліметр шару води (мм) за певний проміжок часу. Основним стандартним методом, для мережевих спостережень, є використання випарувальних басейнів (випарників). Еталонним приладом вважається випарник класу А (Class A Pan). Він являє собою циліндричний резервуар з оцинкованого заліза або нержавіючої сталі строго визначених розмірів (діаметр 120,7 см, глибина 25 см), що

встановлюється на дерев'яній підставці для забезпечення циркуляції повітря під дном [1].

Принцип вимірювання полягає у фіксації зміни рівня води у резервуарі за певний проміжок часу. Рівень вимірюється за допомогою високоточного мікрометричного гвинта з вимірювальною голкою, яка торкається поверхні води. При цьому обов'язково враховується кількість опадів, що випали за цей період: якщо рівень води не змінився, але пройшов дощ, це означає, що кількість випарованої вологи дорівнює кількості опадів [1].

Більш точним, але складним методом є використання лізіметрів — спеціальних ізольованих монолітів ґрунту з рослинністю, розміщених на високоточних вагах. Зміна маси моноліту дозволяє прямо визначити втрату вологи на евапотранспірацію. Цей метод вважається еталонним для наукових досліджень, однак через високу вартість та складність обслуговування рідко використовується в оперативному моніторингу [1].

У сучасних автоматичних метеостанціях та компактних сенсорних модулях пряме вимірювання випаровування (за допомогою басейнів) є неможливим. Тому застосовують непрямі вимірювання. Мікроконтролер обчислює інтенсивність випаровування за емпіричними формулами (наприклад, рівняння Пенмана-Монтейта), використовуючи дані з інших сенсорів: температури повітря, відносної вологості, швидкості вітру та сонячної радіації. Такий підхід дозволяє отримати достовірні дані про евапотранспірацію без громіздкого обладнання, що є оптимальним рішенням для інтелектуальних систем моніторингу довкілля [1].

1.3.2.4 Аналіз принципів та методів вимірювання сонячного випромінювання

Сонячне випромінювання є первинним джерелом енергії для всіх фізичних та біологічних процесів в атмосфері Землі. Його вимірювання є критично важливим для кліматології, агрометеорології (оцінка потенціалу фотосинтезу та

випаровування), а також для сектору відновлюваної енергетики при проектуванні сонячних електростанцій. Сонячне випромінювання — це енергія, що переноситься електромагнітними хвилями в діапазоні довжин від 0,29 до 3,0 мкм [1].

Основним параметром, що підлягає моніторингу в автоматизованих мережах, є сумарна (глобальна) сонячна радіація. Вона визначається як сума прямих сонячних променів та розсіяного випромінювання неба, що падають на горизонтальну поверхню. Одиницею вимірювання енергетичної освітленості (ірадіансу) є ват на квадратний метр (Вт/м²) [1].

Прилад для вимірювання сумарної радіації називають піранометром. До даних приладів є суворі вимоги до встановлення: вони повинні розміщуватися так, щоб чутливий елемент знаходився в горизонтальній площині, а горизонт був вільним від перешкод, щоб уникнути затінення в будь-який час доби та року [1].

Існує два основних фізичних принципи, на яких базується робота піранометрів: термоелектричний та фотоелектричний [1].

Термоелектричні піранометри (на основі термобатарей) вважаються еталонними приладами. Чутливий елемент являє собою зачорнену поверхню, яка поглинає сонячну енергію та нагрівається. Різниця температур між нагрітою поверхнею та холодним корпусом приладу перетворюється термопарою в електричну напругу, пропорційну інтенсивності випромінювання. Перевагою таких сенсорів є рівномірна спектральна чутливість у всьому сонячному діапазоні, проте вони мають певну інерційність (повільний час відгуку) [1].

Фотоелектричні піранометри (на основі кремнієвих фотодіодів) набувають широкого поширення в компактних системах моніторингу та агрометеорології. Принцип їхньої дії базується на фотоелектричному ефекті: світло генерує електричний струм у напівпровідниковому кристалі. Такі сенсори мають миттєву реакцію (мікросекунди), низьку вартість та компактні розміри. Основним недоліком

фотодіодних сенсорів є обмежена спектральна чутливість (зазвичай 0,4–1,1 мкм), тобто вони «не бачать» частину інфрачервоного спектра Сонця [1].

Однак у сучасних інтелектуальних модулях цей недолік компенсується програмним калібруванням під природне сонячне світло. Прикладом таких рішень для вбудованих систем є сенсори освітленості (люксметри) з алгоритмами перерахунку в Вт/м² (наприклад, МАХ44009 або ВН1750), а також спеціалізовані PAR-сенсори (фотосинтетично активна радіація) для потреб сільського господарства [1].

1.3.3 Аналіз принципів та методів вимірювання третьої групи

1.3.3.1 Аналіз принципів та методів вимірювання концентрації парникових газів і забруднювальних речовин

Моніторинг хімічного складу атмосфери є ключовим елементом глобальної стратегії боротьби зі зміною клімату та оцінки якості повітря. Згідно з класифікацією Програми Глобальної служби атмосфери (GAW) Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО), об'єкти спостереження поділяються на дві основні групи: парникові гази (GHGs), до яких належать насамперед діоксид вуглецю (CO₂), метан (CH₄) та закис азоту (N₂O), та реакційноздатні гази (забруднювальні речовини), такі як оксид вуглецю (CO), оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO₂), приземний озон (O₃) та леткі органічні сполуки (VOCs) [1].

Основною одиницею вимірювання концентрації газових домішок, рекомендованою ВМО, є молярна частка сухого повітря (dry mole fraction). Вона виражається у частинах на мільйон (ppm або μmol/mol) для основних парникових газів та частинах на мільярд (ppb або nmol/mol) для слідів забруднювальних речовин. Використання молярної частки є кращим за об'ємні концентрації, оскільки вона не залежить від тиску та температури повітря, що спрощує порівняння даних з різних станцій. Для вимірювання концентрації

діоксиду вуглецю (CO₂) золотим стандартом є метод недисперсійної інфрачервоної спектроскопії (NDIR). Принцип дії базується на здатності молекул CO₂ поглинати інфрачервоне випромінювання на специфічній довжині хвилі (близько 4,26 мкм). Детектор порівнює інтенсивність світла, що пройшло через камеру з пробєю повітря, з еталонним значенням [1].

Цей метод забезпечує високу селективність та стабільність, тому використовується як у прецизійних станційних аналізаторах, так і в сучасних компактних сенсорах для IoT-систем.

Для детектування забруднювальних газів (NO_x, SO₂, O₃) на референтних станціях застосовують методи, що базуються на хемілюмінесценції (для оксидів азоту) та ультрафіолетовій флуоресценції (для діоксиду сірки). Ці методи забезпечують високу точність та низьку межу виявлення, проте відповідне обладнання є громіздким та дорогим. У контексті розвитку розподілених мереж моніторингу ВМО окремо виділяє роль недорогих екологічних сенсорів (low-cost sensors). Для вимірювання токсичних газів (CO, NO₂) у таких модулях найчастіше використовують електрохімічні комірки. Принцип їхньої дії полягає у виникненні електричного струму внаслідок окисно-відновної реакції газу на електроді, сила якого пропорційна концентрації. Для визначення летких органічних сполук (VOCs) застосовують метал-оксидні напівпровідникові сенсори (MOX), опір яких змінюється при адсорбції молекул газу на нагрітій поверхні. Настанови ВМО наголошують, що хоча low-cost сенсори дозволяють суттєво підвищити просторову роздільну здатність моніторингу, вони мають метрологічні обмеження: дрейф нуля, перехресну чутливість до інших газів та залежність від температури й вологості. Тому критично важливою умовою їх використання є застосування методів регулярного калібрування та математичної корекції даних, зокрема з використанням алгоритмів машинного навчання, що дозволяє наблизити їхні показники до референтних значень [1].

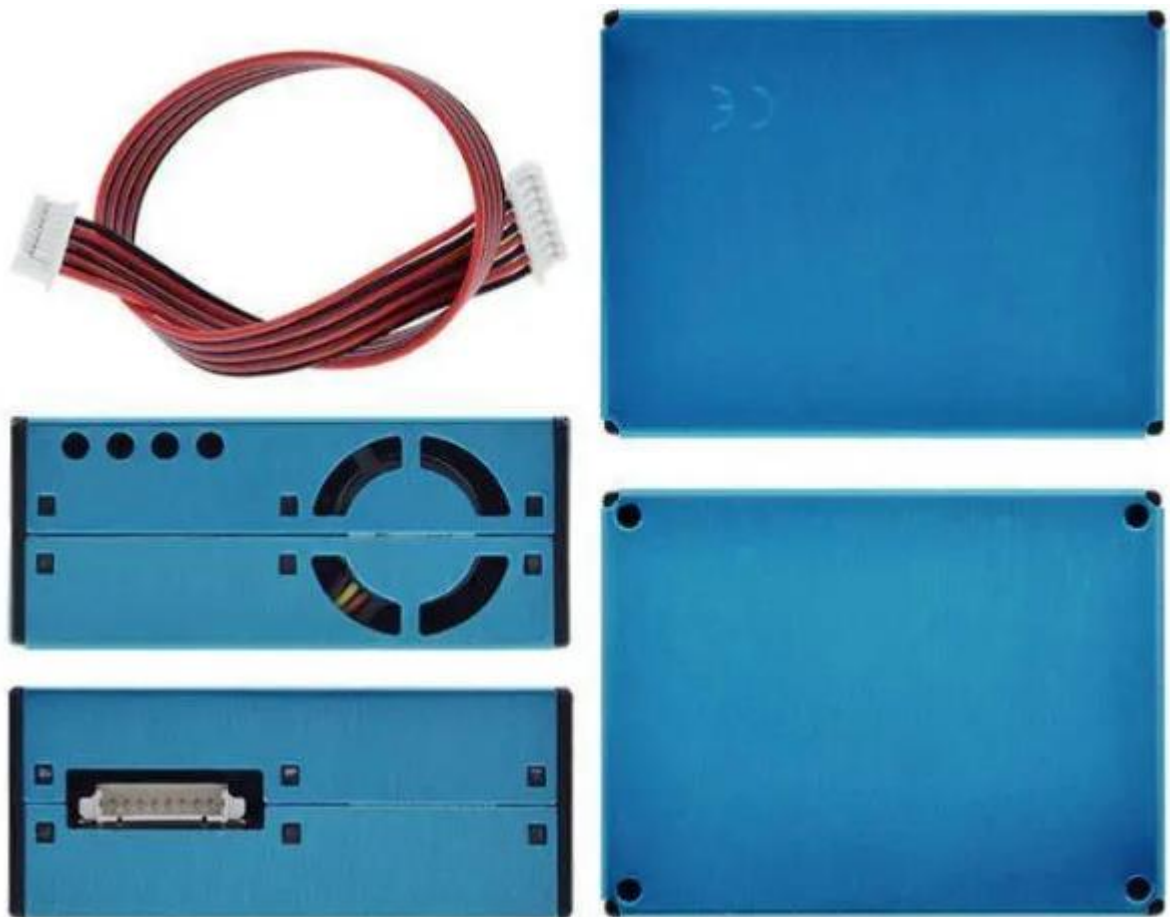


Рисунок 1.6 - Датчик якості повітря PMS5003

1.3.3.2 Аналіз принципів та методів вимірювання параметрів ґрунтів

Фізичний стан ґрунту є визначальним фактором для багатьох процесів у приземному шарі атмосфери, зокрема для енергообміну та водного балансу. У системах агрометеорологічного та екологічного моніторингу ключовими параметрами, що підлягають інструментальному контролю, є температура ґрунту та вологість ґрунту. Ці показники критично важливі для оцінки умов вегетації рослин, прогнозування заморозків на поверхні ґрунту та моделювання паводків. Вимірювання температури ґрунту здійснюється на стандартних глибинах: 5, 10, 20, 50 та 100 см, а також безпосередньо на поверхні. Основною вимогою до встановлення датчиків є збереження непорушеної структури ґрунтового покриву, оскільки наявність повітряних порожнин навколо сенсора призводить до значних похибок через порушення теплового контакту [1].

Історично еталонними приладами були рідинні скляні термометри (колінчасті термометри Савінова), конструкція яких дозволяла зчитувати покази, не виймаючи термометр із землі. У сучасних автоматизованих системах (AWS) застосовуються виключно електричні датчики — платинові термометри опору або термістори, поміщені у захисні металеві гільзи. Вони забезпечують високу точність та можливість дистанційної передачі даних, що є обов'язковим для інтелектуальних модулів.

Вимірювання вологості ґрунту є складнішим завданням через високу просторову варіабельність цього параметра. Еталонним методом, визнаним ВМО як еталон, є гравіметричний (термостатно-ваговий) метод. Він полягає у відборі зразків ґрунту, їх зважуванні, висушуванні у термостаті та повторному зважуванні. Цей метод є прямим і найбільш точним, проте він трудомісткий, руйнує структуру ґрунту і не дозволяє отримувати дані в режимі реального часу. Для автоматичного моніторингу використовуються непрямі методи, що базуються на вимірюванні діелектричної проникності середовища. Оскільки діелектрична проникність води (близько 80) значно вища, ніж у сухого ґрунту (3–5), зміна вологості суттєво впливає на електромагнітні характеристики ґрунту [1].

Найпоширенішими є методи рефлектометрії у часовій області (TDR) та частотній області (FDR/Capacitive). У сегменті компактних IoT-пристроїв та low-cost сенсорів домінують ємнісні датчики (FDR). Вони вимірюють ємність конденсатора, де діелектриком виступає ґрунт навколо електродів. Такі сенсори стійкі до корозії (на відміну від резистивних) і забезпечують прийнятну точність для завдань моніторингу трендів зволоження. Однак покази діелектричних сенсорів залежать від типу ґрунту та його засоленості, тому для отримання точних кількісних даних необхідне індивідуальне калібрування сенсора під конкретний тип ґрунту на місці встановлення.



Рисунок 1.7 - Ємнісний датчик вологості ґрунту DAT264

Підсумовуючи аналіз принципів та методів вимірювання параметрів довкілля, можна стверджувати, що забезпечення комплексного екологічного моніторингу вимагає застосування широкого спектра фізичних та хімічних методів реєстрації. Розглянуті підходи до вимірювання термодинамічних показників, динамічних характеристик атмосфери та концентрації домішок демонструють стійку технологічну тенденцію до переходу від класичних механічних і рідинних приладів до електронних твердотільних сенсорів та MEMS-технологій. Такий перехід дозволяє суттєво зменшити габарити вимірювальних вузлів та забезпечити автоматизацію збору даних, що є критичним для сучасних інформаційних систем. Разом із тим, впровадження новітніх сенсорних технологій вимагає чіткого розуміння їхнього місця в існуючій ієрархії засобів вимірювальної техніки. Це зумовлює необхідність детального порівняльного аналізу між традиційними референтними приладами, що становлять основу державного моніторингу, та доступними low-cost сенсорами, які відкривають нові перспективи для створення щільних розподілених мереж спостережень.

1.4 Аналіз існуючих систем моніторингу довкілля

Історично системи моніторингу довкілля формувалися на основі **референтних вимірювальних приладів**, що відповідали вимогам державної метрологічної служби та міжнародних стандартів. Основною метою таких систем було отримання юридично значущих результатів вимірювань, придатних для контролю дотримання гранично допустимих концентрацій забруднювальних речовин і застосування регуляторних санкцій.

Референтні станції екологічного моніторингу обладнані високоточними аналітичними приладами, які характеризуються стабільними метрологічними характеристиками, тривалою міжповірочною інтервальністю та повною простежуваністю результатів вимірювань до національних або міжнародних еталонів. До таких приладів належать гравіметричні аналізатори пилу (рис. 1.8), хемілюмінесцентні газоаналізатори (рис. 1.9), інфрачервоні та ультрафіолетові спектрометри. (рис. 1.10).



Рисунок 1.8 - Прилад для моніторингу пилу в реальному часі
CEL 712 Microdust PRO



Рисунок 1.9 - Хемілюмінесцентний газоаналізатор
Servomex SERVOPRO NO_x



Рисунок 1.10 - Інфрачервоний спектрометр Nicolet iS50 FTIR Spectrometer

Разом із тим, висока вартість, складність обслуговування та стаціонарний характер таких приладів обмежують щільність мережі спостережень. З метрологічної точки зору це призводить до репрезентативної похибки, коли точні вимірювання в одній точці не відображають реального просторового розподілу забруднень.

Розвиток мікроелектроніки та сенсорних технологій сприяв появі low-cost сенсорів, які мають значно нижчу вартість і дозволяють створювати щільні розподілені мережі вимірювань. Проте їх використання пов'язане з низкою метрологічних обмежень, що потребують спеціальних методів корекції та верифікації.

Таким чином, сучасна концепція моніторингу довкілля базується не на протиставленні, а на комплементарному поєднанні референтних приладів і low-cost сенсорів у межах єдиної вимірювальної інфраструктури.

1.4.1 Обмеження та потенціал застосування low-cost сенсорів

Low-cost сенсори призначені не для юридичного контролю, а для індикативного та оперативного моніторингу. Їх основними перевагами є:

- низька вартість;
- малі габарити;
- низьке енергоспоживання;
- можливість масового розгортання.

Проте з метрологічної точки зору вони характеризуються:

- підвищеною випадковою похибкою;
- значною температурною та вологісною залежністю;
- дрейфом чутливості з часом;
- обмеженою селективністю.

1.4.2 Порівняльний аналіз еталонних і low-cost сенсорів

Ключова відмінність між референтними та low-cost сенсорами полягає у рівні простежуваності та контрольованості похибок.

Таблиця 1.1 Порівняльний аналіз метрологічних та економічних характеристик сенсорів індикативного типу та еталонних засобів вимірювання

Параметр вимірювання	Сенсор індикативного типу	Еталонний метод / Еталонний прилад	Основні відмінності	Вартість (Сенсор / Еталон)
Зважені частки (PM2.5)	PMS5003 (Метод лазерного розсіювання)	Гравіметричний метод (Зважування фільтрів) або TEOM	Референтний метод вимагає відбору проби протягом 24 годин. Сенсор дає дані в реальному часі, але залежить від вологості.	~\$20 / >\$5000
Вуглекислий газ (CO ₂)	MH-Z19C (NDIR спрощеної конструкції)	Лабораторний NDIR-спектрометр	Еталонні прилади мають довгу оптичну кювету та систему термостабілізації, що усуває дрейф нуля.	~\$30 / >\$3000
Температура повітря	BME680 (MEMS-сенсор)	Платиновий термометр опору (Pt100) у захисній будці	MEMS-сенсор схильний до саморозігріву від роботи плати. Еталон вимагає примусової вентиляції (аспірації).	~\$20 / >\$500
Відносна вологість	BME680 (Ємнісний метод)	Гігрометр точки роси або психрометр	Ємнісні сенсори мають гістерезис та дрейф з часом. Еталонні методи є прямими та стабільнішими.	(у складі BME) / >\$1500

Атмосферний тиск	ВМЕ680 (П'єзорезистивний метод)	Ртутний барометр або резонансний цифровий барометр	Бюджетні сенсори мають високу роздільну здатність, але більший температурний дрейф порівняно з професійними метеостанціями.	(у складі ВМЕ) / >\$1000
------------------	---------------------------------	--	---	--------------------------

Отже, low-cost сенсори не замінюють референсні прилади, але доповнюють їх, забезпечуючи високу просторово-часову деталізацію даних за умови метрологічної корекції.

2 РОЗРОБЛЕННЯ СЕНСОРНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ДОВКІЛЛЯ

У попередньому розділі було проведено аналіз існуючих методів екологічного моніторингу та визначено, що традиційні референтні станції, незважаючи на високу точність, не забезпечують необхідної просторової роздільної здатності даних через високу вартість та складність масштабування. Водночас розвиток технологій Інтернету речей та поява доступних сенсорів створюють передумови для розгортання щільних бездротових мереж моніторингу. Згідно з рекомендаціями Всесвітньої метеорологічної організації, використання таких сенсорів є перспективним напрямом, однак вимагає вирішення низки інженерних завдань, пов'язаних із компенсацією впливу зовнішніх факторів, забезпеченням енергоефективності та стабільності передачі даних.

Метою цього розділу є проектування інтелектуального сенсорного модуля, який поєднує в собі функції вимірювання широкого спектра екологічних параметрів, локальної обробки сигналів для мінімізації похибок та автономної роботи в польових умовах. Розробка базується на принципах модульності, енергоефективності та використання гібридних методів калібрування.

2.1 Аналіз вимог до системи та огляд інструментальних засобів моніторингу

Для ефективного моніторингу біосфери ключовим завданням є створення репрезентативної мережі спостережень, яка охоплює найважливіші чинники впливу та індикатори стану довкілля. Вибір цих параметрів залежить від конкретних цілей моніторингу та базується на компромісі між точністю даних і технічною можливістю їх отримання.

Вимоги до екологічних показників

Якісний показник повинен мінімізувати втрати інформації та відповідати таким критеріям:

Практичність: бути інформативним та придатним для реального вимірювання.

Доступність: спрощувати складні дані для прийняття управлінських рішень та інформування громадськості.

Системність: розглядатися у взаємозв'язку з іншими екологічними параметрами.

Класифікація показників за методикою Європейської агенції з довкілля

Показники використовуються для розробки екологічної політики, порівняльного аналізу регіонів та вивчення причинно-наслідкових зв'язків [9].

Виділяють п'ять типів:

Описові (А): відображають поточний стан (наприклад, площа заповідних зон).

Виконання (В): демонструють прогрес у досягненні встановлених екологічних цілей.

Ефективності (С): співвідношення навантаження на довкілля до економічних результатів (наприклад, обсяг викидів на одиницю ВВП).

Політичної ефективності (D): оцінюють результативність впроваджених природоохоронних заходів.

Добробуту (Е): комплексні індикатори сталого розвитку суспільства [9].

Класифікація забруднювачів за класами пріоритетності (Ізраель, 1984)

Клас	Забруднювальна речовина	Середовище	Тип програми
1	Діоксид сірки, завислі частинки. Радіонукліди ($^{90}\text{Sr} + ^{137}\text{Cs}$)	Повітря Їжа	I, P, B I, P
2	Озон	Тропосфера, стратосфера	I B
	ДДТ та інші хлорорганічні сполуки	Біота	I, P
	Кадмій та його сполуки	Їжа, вода	I
3	Нітрати, нітрити	Питна вода, їжа	I
	Оксиди азоту	Повітря	I
4	Ртуть та її сполуки	Їжа, вода	I, P
	Свинець	Повітря, їжа	I
	Діоксид вуглецю	Повітря	B
5	Оксид вуглецю	Повітря	I
	Нафтовуглеводні	Морська вода	P, B
6	Фториди	Свіжа вода	I
7	Азбест	Повітря	I
	Арсен (миш'як)	Питна вода	I
8	Мікротоксини	Їжа	I, P
	Мікробіологічні зараження	Їжа	I, P
	Реакційноспроможні забруднення	Повітря	I

Головна мета системи — виявлення критичних факторів впливу, що спричиняють довгострокові зміни, та пошук найвразливіших елементів екосистем. Згідно з методологією, прийнятою на нараді в Найробі (1974 р.), забруднювальні речовини класифікують за вісьмома рівнями пріоритетності. Програми вимірювань при цьому поділяються на: імпакті (локальний моніторинг у зонах впливу), регіональні, базові та глобальні.

Найвищу значущість у системі спостережень мають території з високою щільністю населення (міста) та зони джерел питного водопостачання. Щодо природних середовищ, першочерговий контроль встановлюється за атмосферним повітрям (пил, оксиди сірки, вуглецю та азоту) та прісними водоймами. Важливо враховувати контекст впливу: наприклад, підвищення

концентрації вуглекислого газу може бути позитивним для рослин, проте глобально спричиняє парниковий ефект.

Моніторинг факторів впливу та реакції біосистем

Програма моніторингу включає контроль за хімічними, фізичними (радіація, шум) та біологічними чинниками. Особлива увага приділяється відгуку біологічних систем на ці впливи. Інтегральні показники екологічної рівноваги включають баланс біопродуктивності, темп оновлення біомаси та інтенсивність кругообігу речовин.

Специфіка забруднення середовищ

Близько 85% забруднення повітря формується за рахунок чотирьох основних компонентів: діоксиду сірки, пилу, оксидів вуглецю та азоту. Критичні проблеми міських екосистем включають накопичення бенз(а)пірену та важких металів. Для коректної інтерпретації даних моніторинг обов'язково супроводжується вимірюванням фізико-хімічних параметрів середовища (рН води, мутність атмосфери) та метеорологічних факторів.

2.1.1 Аналіз сучасних інструментальних засобів та сенсорної бази

Для моніторингу вказаних екологічних показників використовують як професійні методи хімічного аналізу, так і доступні рішення на базі мікроконтролерів (наприклад, Arduino, ESP32). Нижче наведено порівняльний аналіз методів.

1. Моніторинг атмосферного повітря

Тверді частинки (PM_{2.5} / PM₁₀). Професійний метод: гравіметричний (еталонний) або оптичний (лазерна дифракція). Сенсори для вбудованих систем:

SDS011: використовує лазерне розсіювання, вважається одним із найточніших у бюджетному сегменті.

PMS5003 / PMS7003: компактні лазерні сенсори, що вимірюють концентрацію частинок різного розміру.

Газові компоненти (CO, SO_x, NO_x). Професійний метод: хемілюмінесценція та ІЧ-спектроскопія. Сенсори для вбудованих систем:

Серія MQ (напівпровідникові): потребують прогріву та чутливі до вологості.

Електрохімічні сенсори (напр., Winsen ZE15-CO): значно точніші та споживають менше енергії.

2. Моніторинг водного середовища

Кислотність (pH) та Мутність. Метод: потенціометрія та нефелометрія.

Доступні рішення включають аналогові pH-метри та оптичні сенсори мутності.

Біогенні речовини та важкі метали. Професійний метод: атомно-абсорбційна спектроскопія. Для IoT-систем використовують TDS-метри, що вимірюють загальну електропровідність як непрямий показник чистоти.

3. Моніторинг радіації

Метод: газорозрядні лічильники. Для мікроконтролерів доступні модулі на базі трубок Гейгера-Мюллера (СТС-5, J305).

Важливо зазначити, що бюджетні сенсори чудово підходять для індикативного моніторингу, проте не можуть замінити сертифіковані метрологічні прилади без додаткового калібрування. Одним із найпоширеніших рішень є DIY-монітори якості повітря на платформі Arduino, проте їхня точність потребує алгоритмічного підвищення.

Узагальнені технічні характеристики доступних сенсорів, що розглядалися як потенційні компоненти для системи моніторингу, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Зведена таблиця характеристик сенсорів для платформ Arduino/ESP32

Параметр	Модель сенсора	Тип сигналу	Примітка
Чадний газ (CO)	MQ-7 / ZE15-CO	Аналоговий / UART	Чутливий до температури, потребує прогріву
Пил (PM2.5/10)	SDS011 / PMS5003	UART (Цифровий)	Має вбудований вентилятор для забору повітря
Кислотність води	pH meter kit (DFRobot)	Аналоговий	Потребує періодичного калібрування та обслуговування електрода
Радіація	Geiger Counter Kit	Переривання (Digital)	Вимірює бета- та гамма-випромінювання
Метеодані (T, P, H)	BME280	I2C	Висока точність, дозволяє виконувати корекцію газівідчуття

2.2 Обґрунтування структурно-функціональної схеми пристрою

Проектування складного електронного пристрою починається з розробки структурної схеми, яка визначає основні функціональні вузли та інформаційні зв'язки між ними. Враховуючи вимоги до автономності та багатофункціональності, архітектура сенсорного модуля будується навколо центрального керуючого пристрою (мікроконтролера), який координує роботу периферії.

Структурна схема розроблюваного пристрою складається з чотирьох основних підсистем. Першою є вимірювальна підсистема, що включає набір цифрових датчиків для реєстрації фізичних та хімічних параметрів атмосфери. Другою є обчислювальна підсистема, яка відповідає за опитування сенсорів, первинну фільтрацію шумів та формування пакетів даних. Третьою є комунікаційна підсистема, що забезпечує бездротову передачу інформації на сервер або шлюз. Четвертою є підсистема живлення, яка гарантує стабільну напругу для всіх компонентів та керує зарядом акумуляторної батареї.

Особливістю запропонованої архітектури є використання двонаправленого обміну даними. Це дозволяє не лише передавати результати вимірювань, але й дистанційно оновлювати параметри калібрування сенсорів та змінювати інтервали опитування, що є критично важливим для адаптації пристрою до динамічних змін умов довкілля. Структурна схема пристрою зображена на рисунку 2.1

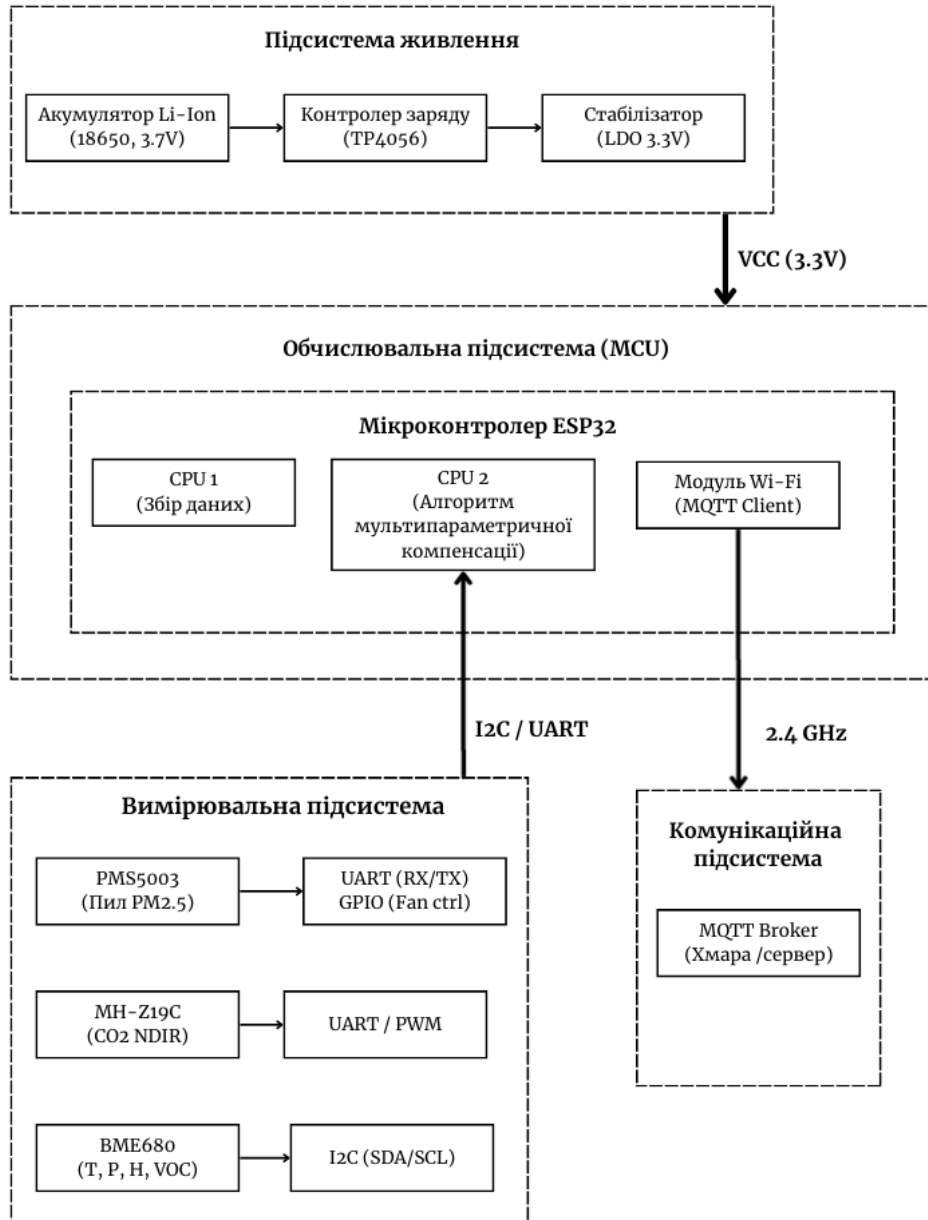


Рисунок 2.1 - Структурна схема моделі сенсорного модуля

2.3 Вибір та обґрунтування елементної бази

Вибір компонентів здійснювався на основі критеріїв оптимального співвідношення ціни та метрологічних характеристик, енергоефективності, доступності документації та підтримки середовищ розробки.

2.3.1 Вибір обчислювального ядра та бездротового інтерфейсу

Ключовим елементом системи є мікроконтролер. Для задач екологічного моніторингу необхідна висока обчислювальна потужність при збереженні низького енергоспоживання. Було проведено порівняльний аналіз платформ Arduino (ATmega328P), STM32 (Cortex-M) та ESP32.

Платформа Arduino, хоч і є енергоефективною, має обмежені обчислювальні ресурси (частота 16 МГц) та потребує зовнішніх модулів для бездротового зв'язку, що ускладнює схемотехніку. Мікроконтролери STM32 є потужними, але також вимагають окремої інтеграції радіомодулів. Оптимальним вибором визначено SoC (System on Chip) ESP32 від компанії Espressif Systems.

Цей чіп оснащений двоядерним процесором Xtensa LX6 з частотою до 240 МГц, що дозволяє виконувати складні математичні алгоритми фільтрації та лінійну регресію безпосередньо на пристрої. Головною перевагою є наявність інтегрованих модулів Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth Low Energy (BLE), що дозволяє реалізувати гнучкі сценарії передачі даних. Підтримка режиму глибокого сну (Deep Sleep) зі споживанням близько 10 мкА забезпечує тривалий час автономної роботи від акумулятора.

2.3.2 Вибір сенсорів для реєстрації параметрів довкілля

Для забезпечення достовірності вимірювань необхідно обирати сенсори, принцип дії яких мінімізує вплив перехресних завад.

Для вимірювання концентрації зважених часток (PM2.5, PM10) обрано лазерний сенсор PMS5003. На відміну від дешевших світлодіодних аналогів, він використовує метод лазерного розсіювання, що дозволяє детектувати частки розміром від 0,3 мкм. Сенсор має вбудований вентилятор для забезпечення стабільного потоку повітря та цифровий інтерфейс UART, що забезпечує високу завадостійкість передачі даних.

Для моніторингу концентрації вуглекислого газу (CO₂) обрано сенсор MH-Z19C, що працює за принципом недисперсійної інфрачервоної спектроскопії

(NDIR). Цей метод є еталонним для визначення CO₂, оскільки він забезпечує високу селективність і не реагує на інші гази, що є типовою проблемою для електрохімічних датчиків.

Для комплексного вимірювання температури, вологості, тиску та летких органічних сполук (VOC) обрано інтегральний сенсор VME680. Його перевагою є мініатюрність та використання шини I2C, що спрощує трасування друкованої плати. Використання одного корпусу для чотирьох параметрів дозволяє реалізувати програмну температурну компенсацію показників газового сенсора безпосередньо в момент зчитування даних.

2.4 Розробка алгоритму функціонування мультипараметричного модуля

Проведений аналіз метрологічних характеристик бюджетних сенсорів (low-cost sensors), обраних для реалізації пристрою, виявив низку суттєвих недоліків. Зокрема, оптичні сенсори твердих часток (PMS5003) демонструють залежність результатів вимірювання від вологості повітря через гігроскопічне збільшення розміру часток, а газоаналізатори (MH-Z19C, VME680) схильні до температурного дрейфу та перехресної чутливості. Використання традиційних лінійних методів калібрування не дозволяє повністю компенсувати ці динамічні похибки.

Традиційна архітектура IoT-систем передбачає передачу «сирих» даних на хмарний сервер для подальшого аналізу. Однак такий підхід має критичні недоліки для автономних систем: значні витрати енергії на безперервну передачу великих обсягів даних, залежність від стабільності каналу зв'язку та затримки в отриманні результатів. Враховуючи обмежену ємність акумулятора, мінімізація часу роботи радіопередавача є пріоритетним завданням.

Вирішення комплексу зазначених проблем можливе шляхом імплементації алгоритмів мультипараметричної компенсації. Ця парадигма передбачає перенесення обчислювальних процесів безпосередньо на кінцевий пристрій. Обрана платформа ESP32 володіє достатніми ресурсами для реалізації алгоритму функціонування мультипараметричного модуля, це дозволяє

реалізувати механізм «віртуальних сенсорів», коли вихідне значення розраховується на основі сукупності показників кількох фізичних датчиків, компенсуючи нелінійні похибки в реальному часі [2].

У метрологічному аспекті використання мультипараметричної компенсації на мікроконтролері дозволяє компенсувати фізичні недоліки бюджетних сенсорів, перетворюючи їх на так звані «інтелектуальні» сенсори. Алгоритм вирішує три ключові завдання:

По-перше, мультипараметрична компенсація похибок. Класична формула лінійної корекції часто не справляється зі складними нелінійними залежностями (наприклад, вплив вологості на оптичний сенсор). Алгоритм може враховувати сукупний вплив температури, вологості та тиску на вихідний сигнал основного сенсора, значно наближаючи результат до еталонного значення.

По-друге, фільтрація аномалій та шумів. Програмні алгоритми здатні класифікувати випадкові сплески як «шум» і відфільтрувати його ще до етапу усереднення даних.

2.5 Алгоритм функціонування сенсорного модуля

Для забезпечення узгодженої роботи апаратної частини та програмних алгоритмів, розроблено загальний алгоритм функціонування модуля. Робота пристрою відбувається циклічно.

Алгоритм розділено на чотири функціональні фази:

I. Фаза ініціалізації та збору даних (Data Acquisition), що включає:

- пробудження, тобто мікроконтролер ESP32 виходить із режиму глибокого сну (*Deep Sleep*);
- ініціалізація периферії - активація шин I2C (для BME680) та UART (для PMS5003 та MH-Z19C);

- опитування сенсорів - зчитування концентрації частинок PM2.5/PM10 з PMS5003; отримання рівня CO₂ з MH-Z19C; збір метеоданих (Т, Н, Р) та VOC з BME680;
- первинна фільтрація шляхом програмного усунення шумів (наприклад, медіанний фільтр) для підготовки «сирих» даних.

II. Фаза інтелектуальної обробки

- здійснюється мультипараметрична компенсація сформованих даних коригування показників PM2.5 залежно від вологості та температурна компенсація газових сенсорів на основі даних з BME680.

- формування виходу шляхом отримання очищених, метрологічно скоригованих значень.

III. Фаза комунікації (Connectivity)

- активація зв'язку - увімкнення модуля Wi-Fi;
- передача даних на сервер або у хмару;
- зворотний зв'язок: очікування команд на зміну інтервалу опитування або оновлення коефіцієнтів калібрування.

IV. Фаза енергозбереження

- завершення сесії: вимкнення Wi-Fi та периферії.
- перехід у режим мікроспоживання (10 мкА) до наступного таймера.

Даний алгоритм подано на рисунку 2.2

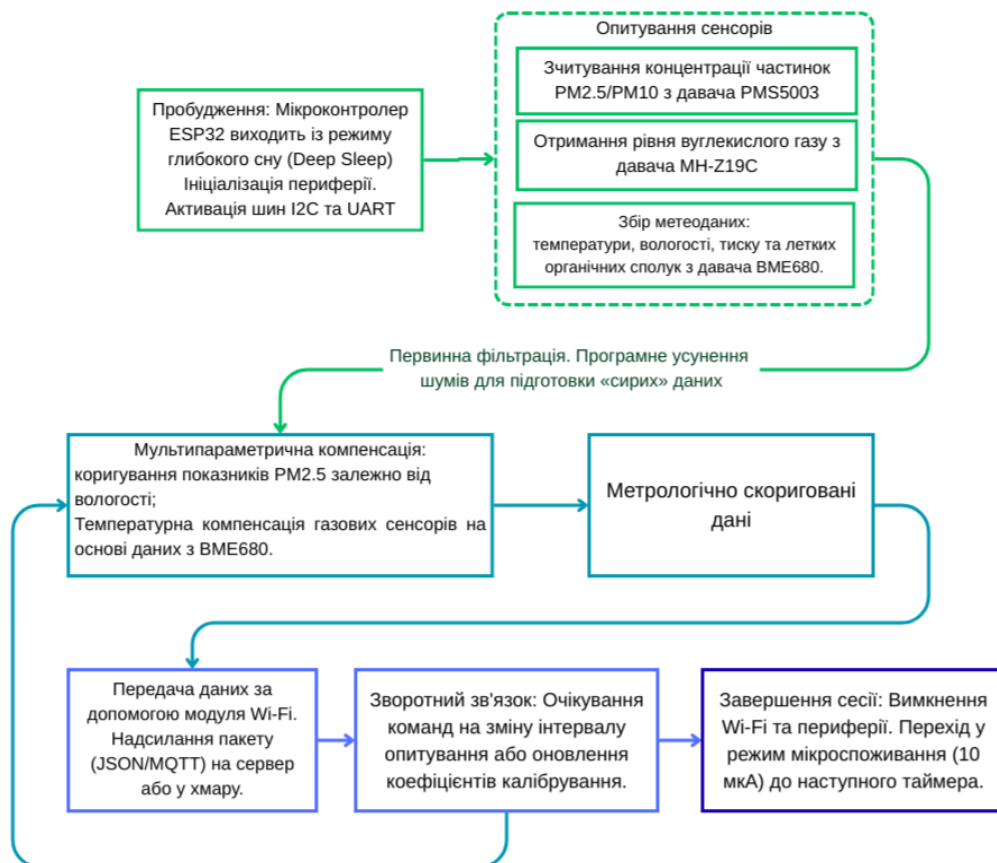


Рисунок 2.2 - Алгоритм функціонування сенсорного модуля

Усі елементи запропонованого сенсорного модуля можна в загальному віднести до 4-х підсистем: вимірювальна, обчислювальна, комунікаційна та система живлення. В таблиці 2.2 подані Структурно-функціональні зв'язки розробленого модуля.

Таблиця 2.2 - Структурно-функціональні зв'язки розробленого модуля

Підсистема	Компоненти	Функція
Вимірювальна	PMS5003, MH-Z19C, BME680	Реєстрація фізичних параметрів
Обчислювальна	ESP32 (Xtensa LX6) + TFLite	Фільтрація, інференс
Комунікаційна	Wi-Fi / BLE	Передача даних, OTA-оновлення
Живлення	Li-ion + Контролер заряду	Автономність, енергоменеджмент

Висновки до розділу

У даному розділі здійснено обґрунтування та проектування апаратно-програмного комплексу для екологічного моніторингу. Обрана елементна база на основі ESP32 та сенсорів PMS5003, MH-Z19C, VME680 дозволяє створити компактний та енергоефективний пристрій. Впровадження алгоритму мультипараметричної компенсації забезпечує підвищення метрологічної точності вимірювань безпосередньо на пристрої, що відповідає сучасним вимогам до автоматизованих систем моніторингу довкілля, також розроблено структурну схему сенсорного модуля.

3 АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ МОДУЛЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ДОВКІЛЛЯ

У попередньому розділі було розроблено апаратну архітектуру та програмний алгоритм функціонування сенсорного модуля для моніторингу параметрів довкілля. Ключовою гіпотезою розробки є твердження, що застосування бюджетних сенсорів (Low-cost sensors) у поєднанні з методами цифрової фільтрації та алгоритмічної компенсації дозволяє отримати результати вимірювань, придатні для оцінки екологічного стану з прийнятною точністю.

3.1 Загальне поняття невизначеності та джерел невизначеності

Вимірювання — це пізнавальний процес, метою якого є отримання значення фізичної величини. Центральною проблемою метрології є співвідношення між отриманим результатом та об'єктивною реальністю. Класична теорія базується на понятті **істинного значення** фізичної величини — значення, яке ідеально відображає властивість об'єкта. Проте, істинне значення є філософською абстракцією, оскільки будь-яке вимірювання супроводжується недосконалістю методу, технічних засобів та органів чуття спостерігача. Тому на практиці оперують поняттям **дійсного значення**, яке отримане експериментальним шляхом і настільки наближається до істинного, що для даної цілі може бути використане замість нього [7].

Невизначеність – це невід'ємний параметр результату вимірювання, що характеризує розсіяння значень, які обґрунтовано можуть бути приписані вимірюваній величині. Якщо похибка — це різниця між результатом і істиною (яка невідома), то невизначеність — це інтервал, у якому з заданою ймовірністю знаходиться це істинне значення. Ця зміна підходу вимагає від інженерів глибокого розуміння статистики та теорії ймовірностей, оскільки оцінка якості вимірювання стає імовірнісною задачею [7].

Джерела невизначеності вимірювань згідно ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2014 (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT). Невизначеність вимірювання. Частина 3. Настанова щодо вираження невизначеності у вимірюванні та ДСТУ JCGM 200:2015 (JCGM 200:2012, IDT). Міжнародний словник метрології. Основні й загальні поняття та пов'язані з ними терміни (VIM) [7]:

1. **Неповне визначення:** опис вимірюваної величини є недостатньо точним.
2. **Технічна реалізація:** неточне відтворення визначення величини (наприклад, через недосконалість еталонів).
3. **Умови навколишнього середовища:** неточні відомості про вплив температури, тиску чи вологості.
4. **Інструментальні похибки:** характеристики засобів вимірювальної техніки (ЗВТ).
5. **Суб'єктивний фактор:** похибки оператора при зчитуванні показань (паралакс тощо).
6. **Роздільна здатність:** обмежена чутливість приладу.
7. **Моделльні припущення:** невідповідність фізичного об'єкта його математичній моделі.
8. **Зовнішні константи:** використання неточних значень з довідників [7].

3.2 Класифікація невизначеностей за методами оцінювання

Згідно з міжнародними стандартами, за способом оцінювання компоненти невизначеності поділяються на два типи. Цей поділ базується на методах аналізу, а не на природі самих помилок [7].

Оцінювання за типом А: проводиться шляхом статистичного аналізу серії повторних спостережень (обчислення експериментального стандартного відхилення u_A).

Оцінювання за типом В проводиться іншими методами, ніж статистичний аналіз серії спостережень. Базується на апіорній інформації:

- дані сертифікатів калібрування;
- паспортні дані виробника про клас точності приладу;
- попередній досвід роботи з об'єктом;
- довідкові дані про фізичні константи [7].

Для повної характеристики точності використовують наступні форми подання результатів вимірювань [10]:

Стандартна невизначеність (u) - невизначеність результату вимірювання, виражена як стандартне відхилення.

Сумарна стандартна невизначеність (u_c) отримується шляхом поєднання стандартних невизначеностей типу А та типу В за законом додавання дисперсій.

Розширена невизначеність (U): величина, що визначає інтервал навколо результату вимірювання, в межах якого, як очікується, знаходиться велика частина розподілу значень. Обчислюється таким чином:

$$U = k \cdot u_c, \quad (3.1)$$

де k — коефіцієнт охоплення (зазвичай $k=2$ для довірчої ймовірності $P=0,95$).

На практиці процес оцінювання включає такі етапи розрахунку [7,8]:

1. Складання моделі вимірювання: встановлення функціональної залежності між вимірюваною величиною та вхідними величинами.
2. Внесення поправок: усунення відомих систематичних ефектів.
3. Оцінювання стандартних невизначеностей: розрахунок компонентів типів А та В.
4. Розрахунок сумарної невизначеності: врахування кореляції між вхідними величинами.
5. Визначення розширеної невизначеності: вибір коефіцієнта охоплення залежно від закону розподілу.

Оскільки розроблений сенсорний модуль є поки що лише моделлю і експериментальні дослідження не здійснювалися, то основним джерелом невизначеності будуть інструментальні похибки елементів модуля, що є апіорною інформацією. Таким чином, у розділі оцінюється невизначеність типу В.

Інструментальна невизначеність – складова невизначеності вимірювань типу В, яка обумовлена використанням ЗВТ. Інформація, що стосується інструментальної невизначеності, може бути наведена у специфікації ЗВТ [6].

Для повірених ЗВТ оцінювання стандартної інструментальної невизначеності типу В проводиться відповідно до табл. 3.1. У таблиці застосовані відомі формули, що зв'язують границі відносної δ та зведених γ і λ похибок, через які виражається клас точності ЗВТ, з границями максимально-допустимої абсолютної похибки θ в припущенні її рівномірного розподілу всередині границь. [6]

Таблиця 3.1 Формули для розрахунку стандартної інструментальної невизначеності [6]

Приклад позначення класу точності	Вид та позначення нормованої похибки	Формула для розрахунку стандартної невизначеності типу
1,0	Зведена, γ	$u_B = \gamma \frac{X_{\text{макс}}}{\sqrt{3} \cdot 100}$
$\textcircled{1,0}$	Відносна, δ	$u_B = \delta \frac{X_{\text{вим}}}{\sqrt{3} \cdot 100}$
$\nabla 1,0$	Зведена до довжини нерівномірної шкали, λ	$u_B = \lambda \frac{(X_{\text{сер}} + X_{\text{вим}})^2}{X_{\text{сер}} \sqrt{3} \cdot 100}$

2,0/0,1	Відносна, c/d	$u_B = \left[c + d \left( \left| \frac{X_{\text{макс}}}{X_{\text{вим}}} \right| - 1 \right) \right] \frac{X_{\text{вим}}}{\sqrt{3} \cdot 100}$
---------	---------------	---

В таблиці використані позначення: $X_{\text{вим}}$ – вимірне значення (показання ЗВТ), $X_{\text{макс}}$ – максимальне значення вимірюваної величини; $X_{\text{сер}}$ – значення вимірюваної величини, що відповідає геометричній середині істотно нерівномірної шкали [6].

Пряме вимірювання (direct measurement) – вимірювання, при якому шукане значення величини отримують безпосередньо від засобу вимірювань. Прямі вимірювання – найбільш поширений і простий вид вимірювань. Ці вимірювання є складовим елементом непрямих, сумісних і сукупних вимірювань. Прямі вимірювання можна проводити шляхом одноразових і багаторазових спостережень. Найбільш поширеними на практиці є вимірювання з одноразовими спостереженнями (одноразові вимірювання), як найбільш прості, продуктивні і дешеві [6].

Виконання одноразових вимірювань обґрунтовують наступними факторами:

- виробничою необхідністю (руйнування зразка, неможливість повторення вимірювання, економічна доцільність і т.д.);
- можливістю нехтування випадковими похибками;
- випадкові похибки істотні, але довірна границя похибки результату вимірювання не перевищує допустимої похибки вимірювань. За числове значення результату одноразового вимірювання приймають значення величини, отримане при вимірюванні. Вимірювання з багаторазовими спостереженнями (багаторазові вимірювання) проводяться при підвищених вимогах до точності вимірювань. Такі вимірювання характерні для професійної метрологічної діяльності і виконуються в основному співробітниками метрологічних служб, а також при тонких наукових експериментах [6].

Мета обробки результатів вимірювань з багаторазовими спостереженнями полягає в зменшенні випадкової похибки результату вимірювань.

При обробці багаторазових вимірювань вирішують дві задачі:

- по-перше, визначають деяке наближене значення вимірюваної величини, зване оцінкою, яке найкращим чином відповідає отриманим результатам;
- по-друге, характеристику повторюваності вимірюваної величини визначають апостеріорно – за результатами її окремих спостережень [6].

3.2 Аналіз технічних характеристик датчиків сенсорного модуля

У приладів котрі використовуються в сенсорному модулі є відповідні технічні характеристики, що вказані в технічній документації на прилад, що складаються підприємствами після виготовлення приладу

3.2.1 Технічні характеристики лазерного датчика якості повітря PMS5003

1. Принцип вимірювання: лазерне розсіювання (MIE theory);
2. Діапазон вимірювання діаметра частинок: 0.3–1.0 мкм, 1.0–2.5 мкм, 2.5–10 мкм;
3. Ефективний діапазон вимірювання концентрації (PM2.5): 0–500 мкг/м³;
4. Максимальний діапазон вимірювання концентрації (PM2.5): ≥ 1000 мкг/м³;
5. Роздільна здатність: 1 мкг/м³;
6. Максимальна похибка вимірювання (Consistency Error): $\pm 10\%$ (у діапазоні 100–500 мкг/м³) та ± 10 мкг/м³ (у діапазоні 0–100 мкг/м³);
7. Ефективність підрахунку частинок: 50% для діаметра 0.3 мкм, 98% для діаметра ≥ 0.5 мкм;
8. Стандартний об'єм проби повітря: 0.1 л;
9. Час одиничного відгуку: менше 1 с;
10. Загальний час відгуку: менше 10 с;
11. Напруга живлення: 5.0 В (мін. 4.5 В, макс. 5.5 В);

12. Струм споживання в активному режимі: менше 100 мА;
13. Струм споживання в режимі очікування: менше 200 мкА;
14. Логічний рівень інтерфейсу (UART): 3.3 В (High > 2.7 В, Low < 0.8 В);
15. Діапазон робочих температур: від -10 до +60 °С;
16. Діапазон робочої вологості: 0–99%;
17. Середній час напрацювання на відмову (MTTF): ≥ 3 років;
18. Габаритні розміри: 50 × 38 × 21 мм [3].

3.2.2 Технічні характеристики інфрачервоного датчика CO₂ MH-Z19C

1. Цільовий газ: вуглекислий газ (CO₂);
2. Принцип вимірювання: недисперсійна інфрачервона спектроскопія (NDIR);
3. Діапазон вимірювання: 400–5000 ppm;
4. Точність вимірювання: ± (50 ppm + 5% від зчитаного значення);
5. Напруга живлення: 5.0 В ± 0.1 В постійного струму;
6. Середній струм споживання: менше 40 мА (при живленні 5 В);
7. Піковий струм споживання: 125 мА (при живленні 5 В);
8. Логічний рівень інтерфейсу: 3.3 В (сумісний з 5 В);
9. Вихідні сигнали: UART (Serial) та PWM (широотно-імпульсна модуляція);
10. Час попереднього розігріву (Preheat time): 1 хв;
11. Час відгуку (T₉₀): менше 120 с;
12. Діапазон робочих температур: від -10 до 50 °С;
13. Діапазон робочої вологості: від 0 до 95 % відносної вологості (без конденсації);
14. Термін служби: понад 5 років;
15. Маса: 5 г [4].

3.2.3 Технічні характеристики інтегрального датчика параметрів довкілля BME680

1. Параметри вимірювання вологості:

- Робочий діапазон: від 0 до 100 % відносної вологості;
- Абсолютна похибка вимірювання: ± 3 % р.Н. (в діапазоні 20–80 % р.Н. при 25°C);

- Гістерезис: ± 1.5 % р.Н.;
- Час відгуку ($\tau_{63\%}$): приблизно 8 с;
- Роздільна здатність: 0.008 % р.Н..

2. Параметри вимірювання атмосферного тиску:

- Робочий діапазон: від 300 до 1100 гПа;
- Абсолютна похибка вимірювання: ± 0.6 гПа (в діапазоні 300–1100 гПа при 0...65°C);

- Відносна похибка вимірювання: ± 0.12 гПа (в діапазоні 700–900 гПа при 25...40°C);

- Шуми (RMS Noise): 0.12 Па (еквівалент 1.7 см висоти) при найвищому оверсемплінгу;

- Температурний коефіцієнт зміщення: ± 1.3 Па/К.

3. Параметри вимірювання температури:

- Робочий діапазон: від -40 до +85°C;
- Абсолютна похибка вимірювання: ± 0.5 °C (при 25°C);
- Абсолютна похибка у повному діапазоні (0...65°C): ± 1.0 °C;
- Роздільна здатність вихідних даних: 0.01°C.

4. Параметри газового сенсора (VOC):

- Цільові гази: леткі органічні сполуки (етан, ізопрен, етанол, ацетон, чадний газ);

- Вихідний сигнал: Індекс якості повітря (IAQ) в діапазоні 0–500;

- Час відгуку ($\tau_{33-63\%}$): менше 1 с;

- Споживання струму в режимі Ultra-low power: менше 0.1 мА.

5. Загальні електричні та фізичні характеристики:

- Напруга живлення (VDD): від 1.71 В до 3.6 В;

- Інтерфейси передачі даних: I2C та SPI;

- Струм споживання в режимі сну (Sleep mode): 0.15 мкА;

- Піковий струм споживання (при роботі нагрівача газу): до 18 мА;
- Тип корпусу: LGA з металевою кришкою;
- Габаритні розміри: 3.0 x 3.0 x 0.93 мм [5].

3.4 Аналіз невизначеності датчиків сенсорного модуля

Оцінювання невизначеності за типом В базується на апріорній інформації про точність засобів вимірювальної техніки, наведеній у специфікаціях виробника. У технічній документації на сенсори VME680, MH-Z19C та PMS5003 наведено границі допустимої абсолютної похибки (Δ).

Оскільки закон розподілу похибок у межах цих границь не вказано, згідно з рекомендаціями GUM (Настанови з вираження невизначеності), приймається рівномірний (прямокутний) закон розподілу. У цьому випадку стандартна невизначеність за типом В (u_B) розраховується за формулою [11]:

$$u_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 1.732$$

3.4.1 Сенсор VME680

Згідно з технічним паспортом BST-VME680-DS001-00, прилад має наступні метрологічні характеристики:

Канал вимірювання температури:

Абсолютна похибка вимірювання становить $\Delta_T = \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (при $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Розрахунок стандартної невизначеності:

$$u_B(T) = \frac{0.5}{1.732} = 0.29 \text{ }^\circ\text{C}$$

Канал вимірювання відносної вологості:

Гранична похибка (tolerance) становить $\Delta_{RH} = \pm 3 \%$.

Розрахунок стандартної невизначеності:

$$u_B(RH) = \frac{3}{1.732} = 1.73 \%$$

Канал вимірювання атмосферного тиску:

Абсолютна точність становить $\Delta_p = \pm 0.6 \text{ гПа}$ (у діапазоні 300...1100 гПа).

Розрахунок стандартної невизначеності:

$$u_B(P) = \frac{0.6}{1.732} = 0.35 \text{ гПа}$$

3.4.2 Сенсор МН-Z19С

Згідно з технічною документацією), абсолютна похибка вимірювання концентрації вуглекислого газу визначається складною залежністю:

$$\Delta_{CO_2} = \pm(50 \text{ ppm} + 5\% \text{ від виміряного значення})$$

Для розрахунку невизначеності оберемо типове значення концентрації для приміщень, наприклад, 1000 ppm.

Розрахунок граничної похибки:

$$\Delta_{CO_2} = 50 + 0.05 \cdot 1000 = 50 + 50 = 100 \text{ ppm}$$

Розрахунок стандартної невизначеності:

$$u_B(CO_2) = \frac{100}{1.732} = 57.74 \text{ ppm}$$

3.4.3 Сенсор PMS5003

Згідно з технічним паспортом, максимальна похибка узгодженості залежить від діапазону концентрацій:

$\pm 10 \text{ мкг/м}^3$ (у діапазоні 0...100 мкг/м³);

$\pm 10\%$ (у діапазоні 100...500 мкг/м³).

Для моніторингу якості повітря у звичайних умовах (Concentration < 100 мкг/м³) використовується фіксоване значення абсолютної похибки $\Delta_{PM} = 10 \text{ мкг/м}^3$.

Розрахунок стандартної невизначеності:

$$u_B(PM_{2.5}) = \frac{10}{1.732} = 5.77 \text{ мкг/м}^3$$

3.5 Розрахунок сумарної та розширеної невизначеності

Після оцінювання стандартних невизначеностей за типом А (статистична обробка серії вимірювань) та типом В (інструментальна складова) необхідно визначити сумарну стандартну невизначеність. Вона характеризує загальну

дисперсію результату вимірювання, зумовлену дією всіх джерел випадкових і систематичних похибок. Оскільки вхідні величини (покази сенсорів) вважаються некорельованими, сумарна стандартна невизначеність розраховується як геометрична сума компонентів:

$$u_c = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}$$

У нашому випадку, враховуючи домінування інструментальної похибки бюджетних сенсорів над випадковим розкидом показів (при умові застосування медіанної фільтрації), основний внесок у невизначеність робить складова типу В.

Для переходу від стандартної невизначеності до розширеної невизначеності, яка визначає інтервал з високим рівнем довіри (зазвичай $P = 95\%$), використовується коефіцієнт охоплення k . Для нормального закону розподілу, який приписується результату вимірювання при великій кількості ступенів свободи, приймається $k = 2$.

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot u_c$$

Розрахуємо прогнозовану розширену невизначеність для основних параметрів, базуючись на значеннях інструментальної складової (u_B), отриманих у попередньому пункті:

Для температури (BME680):

$$U_T = 2 \cdot 0.29 = 0.58$$

Для відносної вологості (BME680):

$$U_{RH} = 2 \cdot 1.73 = 3.46$$

Для атмосферного тиску (BME680)

$$U_P = 2 \cdot 0.35 = 0.7$$

Для концентрації CO₂ (MH-Z19C при 1000 ppm):

$$U_{CO_2} = 2 \cdot 57.74 \approx 115$$

Для концентрації PM_{2.5} (PMS5003 при < 100 мкг/м³):

$$U_{PM} = 2 \cdot 5.77 \approx 11.5$$

Отримані значення розширеної невизначеності визначають межі довірчого інтервалу, в якому з імовірністю 95% знаходиться дійсне значення вимірюваної величини. Ці показники є базовими метрологічними характеристиками розробленого модуля без застосування додаткових методів програмної корекції.

Результати розрахунків інструментальної складової невизначеності зведено в бюджет невизначеності.

Таблиця 3.2. Бюджет невизначеності сенсорного модуля для моніторингу параметрів довкілля

Джерело невизначеності	Тип оцінки	Результати розрахунків
Невизначеність спричинена інструментальною похибкою приладу (відносна вологість, сенсор VME680)	Б	$u_B(RH) = 1.73$
Невизначеність спричинена інструментальною похибкою приладу (температура, сенсор VME680)	Б	$u_B(T) = 0.29$
Невизначеність спричинена інструментальною похибкою приладу (атмосферний тиск, сенсор VME680)	Б	$u_B(P) = 0.35$
Невизначеність спричинена інструментальною похибкою приладу (Концентрація PM2.5, сенсор PMS5003)	Б	$u_B(PM2.5) = 5.77$
Невизначеність спричинена інструментальною похибкою приладу (Концентрація CO ₂ сенсор MH-Z19C)	Б	$u_B(CO_2) = 57.74$
Розширена невизначеність (температура, сенсор VME680)		$U_T = 2 \cdot 0.29 = 0.58$
Розширена невизначеність (відносна вологість, сенсор VME680)		$U_{RH} = 2 \cdot 1.73 = 3.46$
Розширена невизначеність (атмосферний тиск, сенсор VME680)		$U_P = 2 \cdot 0.35 = 0.7$
Розширена невизначеність (Концентрація CO ₂ сенсор MH-Z19C)		$U_{CO_2} = 2 \cdot 57.74 \approx 115$

Розширена
(Концентрація PM2.5, сенсор PMS5003)

невизначеність

$$U_{PM} = 2 \cdot 5.77 \approx 11.5$$

3.6. Дослідження енергоефективності та автономності пристрою

Важливим експлуатаційним параметром автономного сенсорного модуля є час його роботи від одного заряду акумуляторної батареї. Для теоретичної оцінки автономності проведено розрахунок середнього споживання струму системою.

Вихідні дані для розрахунку (згідно з технічними паспортами):

Ємність акумулятора Li-Ion (типорозмір 18650): 2500 мА·год.

Напруга живлення системи: 3.3 В (після стабілізатора).

Режим роботи пристрою — циклічний:

Активна фаза (вимірювання та передача даних): тривалість 60 с (t_{active}).

Фаза глибокого сну (Deep Sleep): тривалість 14 хв = 840 с (t_{sleep}).

Споживання струму компонентами в активній фазі:

Мікроконтролер ESP32 (з увімкненим Wi-Fi): ~160 мА.

Сенсор PMS5003: < 100 мА.

Сенсор MH-Z19C: < 40 мА (середнє).

Сенсор BME680: ~18 мА (пікове).

Сумарний струм активного режиму (I_{active}): ≈ 318 мА.

Споживання струму у фазі сну:

Мікроконтролер ESP32 (Deep Sleep): 0.01 мА.

Сенсор PMS5003 (Standby): 0.2 мА.

Сенсори BME680 та MH-Z19C (Sleep): знехтувано мало.

Сумарний струм режиму сну (I_{sleep}): ≈ 0.21 мА.

Розрахунок середнього струму споживання за цикл (I_{avg}):

$$I_{avg} = \frac{(I_{active} \cdot t_{active} + I_{sleep} \cdot t_{sleep})}{(t_{active} + t_{sleep})} = \frac{(318 \cdot 60 + 0.21 \cdot 840)}{(60 + 840)} = 21.4 \text{ мА}$$

Розрахунковий час автономної роботи (T):

$$T = \frac{C_{bat}}{I_{avg}} = \frac{2500}{21.4} \approx 116.8 \text{ годин} \approx 4.8 \text{ доби}$$

Отриманий результат свідчить, що при обраному алгоритмі роботи модуль здатний функціонувати автономно близько 5 діб. Для збільшення цього показника доцільно збільшити інтервал між вимірюваннями або використовувати акумулятор більшої ємності.

3.7 Тестування каналу передачі даних та візуалізація результатів

Перевірка комунікаційної підсистеми включає тестування стабільності з'єднання з бездротовою мережею Wi-Fi та надійності передачі пакетів даних за протоколом MQTT.

У ході тестування модуль повинен підключатись до локальної точки доступу та здійснювати публікацію повідомлень у форматі JSON у визначений топик на хмарному MQTT-брокері.

Для візуалізації отриманих даних налаштовано веб-інтерфейс, який здатний відображати поточні значення температури, вологості, тиску та концентрації забруднюючих речовин у вигляді графіків та цифрових індикаторів. Це підтверджує повну працездатність інформаційного тракту системи — від первинного сенсора до інтерфейсу кінцевого користувача.

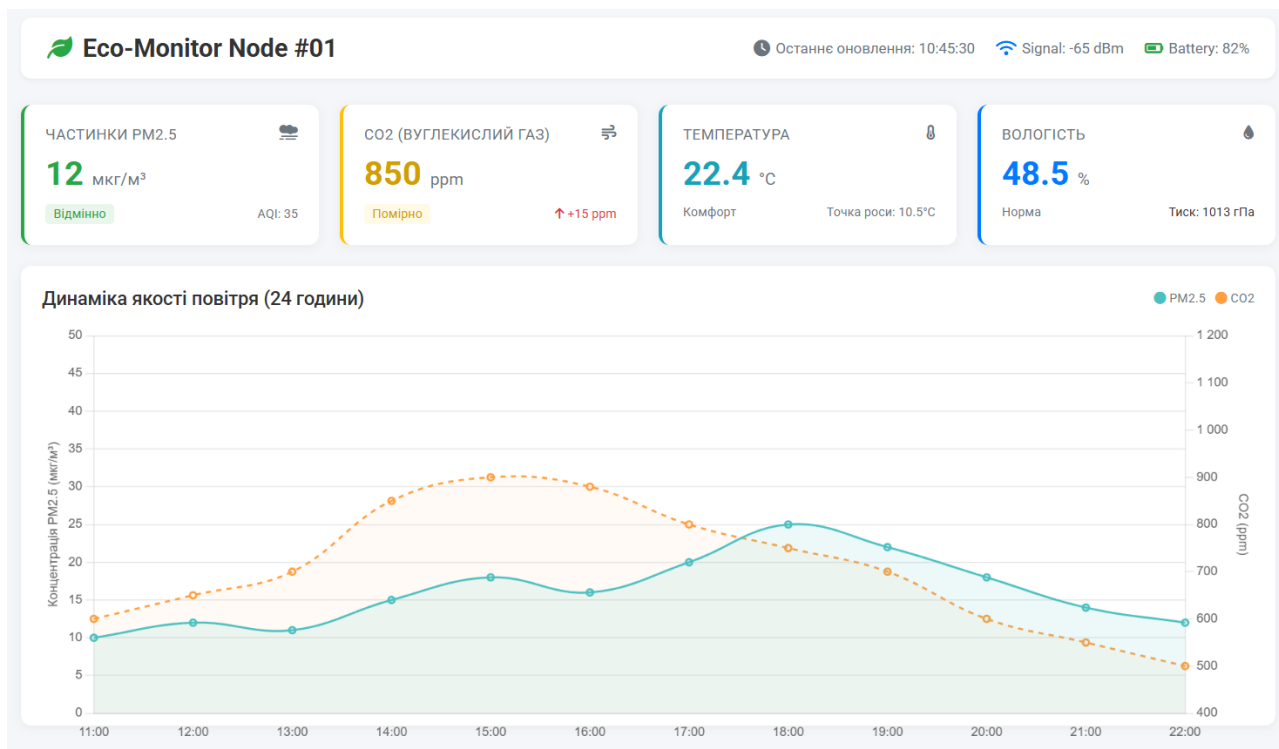


Рисунок 3.1 - вигляд розробленого веб-інтерфейсу сенсорного модуля моніторингу довкілля

3.8 Методика проведення експериментальних досліджень

Для об'єктивної оцінки працездатності та точності сенсорного модуля розроблено комплексну програму випробувань, яка включає лабораторний та польовий етапи.

Об'єктом випробувань є дослідний зразок сенсорного модуля, реалізований на базі мікроконтролера ESP32 та набору сенсорів PMS5003, MH-Z19C, VME680. Предметом дослідження є масиви вимірювальних даних, отримані пристроєм, та їх кореляція з показами еталонного обладнання.

Порядок проведення досліджень передбачає наступні етапи:

По-перше, перевірка функціональності підсистем. Здійснюється контроль стабільності ініціалізації сенсорів, коректності зчитування даних по інтерфейсах UART та I2C, а також надійності з'єднання з MQTT-брокером.

По-друге, статичне тестування (оцінка збіжності). Модуль розміщується в стабільних умовах (ізольоване приміщення) на період 24 години для визначення рівня власного шуму сенсорів та стабільності "нульових" показів.

По-третє, порівняльні випробування (співставне калібрування). Дослідний зразок розміщується у безпосередній близькості до сертифікованої станції моніторингу якості повітря або професійного газоаналізатора. Проводиться синхронний запис даних протягом 48 годин з інтервалом дискретизації 1 хвилина. Це дозволяє охопити добові коливання температури та вологості, які є основними факторами впливу.

По-четверте, енергетичний аудит. За допомогою лабораторного мультиметра або осцилографа вимірюється профіль споживання струму у різних режимах роботи (активний режим, передача даних Wi-Fi, режим глибокого сну) для розрахунку реального часу автономної роботи.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі змодельовано комплексне експериментальне дослідження розробленого сенсорного модуля. Виконано розрахунок розширеної невизначеності вимірювань на основі паспортних даних компонентної бази, який показав, що для температури вона становить $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для концентрації $\text{PM}_{2.5}$ — 11.5 мкг/м^3 . Розрахунок енергоспоживання засвідчив, що в циклічному режимі роботи пристрій забезпечує автономність на рівні 5 діб, що є достатнім для завдань оперативного моніторингу.

ВИСНОВОК

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання розробки проєктної моделі автономного сенсорного модуля для моніторингу параметрів довкілля. На основі проведеного теоретичного аналізу та математичного моделювання можна зробити наступні висновки:

Проведено аналітичний огляд методів екологічного моніторингу та встановлено, що існуючі стаціонарні пости не забезпечують необхідної щільності покриття. Обґрунтовано концепцію використання мереж IoT на базі бюджетних сенсорів (Low-cost sensors). Теоретично доведено, що головним недоліком таких систем є інструментальна похибка, яку запропоновано компенсувати програмними методами цифрової фільтрації без внесення змін у конструкцію сенсорів.

Розроблено структурно-функціональну схему пристрою на базі мікроконтролера ESP32, яка, на відміну від існуючих аналогів, передбачає розділення обчислювальних процесів між двома ядрами процесора для підвищення енергоефективності. Обґрунтовано вибір компонентної бази (сенсори PMS5003, MH-Z19C, VME680), що дозволяє комплексно контролювати п'ять параметрів стану повітря в одному компактному модулі.

Спроектовано алгоритмічне забезпечення системи, яке базується на циклічній архітектурі «вимірювання — передача — глибокий сон». Розроблено логіку взаємодії з хмарним сервером через протокол MQTT, що теоретично забезпечує гарантовану доставку пакетів даних при нестабільному інтернет-з'єднанні. Запропоновано застосування медіанного фільтра для попередньої обробки "сирих" даних, що дозволить програмно відсіювати випадкові викиди значень.

Виконано розрахунок бюджету невизначеності вимірювань за методикою GUM на основі технічних паспортів компонентів. Встановлено, що без застосування додаткового калібрування прогнозована розширена невизначеність (при $k=2$) становитиме: для температури — 0.58 °C, для відносної вологості — 3.46 %, для концентрації PM2.5 — 11.5 мкг/м³. Отримані

розрахункові значення підтверджують, що спроектований модуль відповідає вимогам до індикативних засобів моніторингу.

Проведено теоретичний розрахунок енергоспоживання спроектованої системи. Математичне моделювання режимів роботи показало, що при використанні акумулятора ємністю 2500 мА·год та періодичності вимірювань 15 хвилин, розрахунковий час автономної роботи складає близько 5 діб. Це підтверджує доцільність обраних апаратних рішень для створення автономних мобільних постів.

Розроблено віртуальну модель інтерфейсу користувача (Dashboard) для візуалізації екологічних даних. Запропонована структура інформаційної системи дозволяє масштабувати рішення від одного модуля до розгалуженої сенсорної мережі. Результати роботи створюють теоретичну та інженерну базу для подальшого виготовлення дослідного зразка та його фізичного тестування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Guide to Instruments and Methods of Observation. – 2021. – Geneva : World Meteorological Organization. – 8th ed. – (WMO-No. 8). – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://library.wmo.int/records/item/68695-guide-to-instruments-and-methods-of-observation?offset=8>
2. Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. *Sensors*, 23(15), 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739>
3. Digital universal particle concentration sensor PMS5003 series data manual : Datasheet V2.3 [Electronic resource] / Plantower. – Beijing, 2016. – 15 p.
4. Сенсор MH-Z19C: Infrared CO2 Sensor Module (Model: MH-Z19C) : User's Manual Version 1.0 [Electronic resource] / Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. – Zhengzhou, 2020. – 6 p.
5. BME680. Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor : Datasheet BST-BME680-DS001-00 / Bosch Sensortec GmbH. – Reutlingen : Bosch Sensortec GmbH, 2017. – 50 p.
6. Математичні основи оцінювання невизначеності вимірювань: навчальний посібник / О. А. Боцюра, І. П. Захаров. – Харків: ТОВ «Оберіг», 2025. – 136 с.
7. ДСТУ JCGM 200:2015 (JCGM 200:2012, IDT). Міжнародний словник метрології. Основні й загальні поняття та пов'язані з ними терміни (VIM). [Чинний від 2016-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 92 с. (Національний стандарт України).
8. Васілевський, О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань : підручник / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 230 с.
9. Smeets E., Weterings R. Environmental indicators: Typology and overview : Technical report No 25. Copenhagen : European Environment Agency, 1999. 19 p.
10. ДСТУ-Н РМГ 43:2006. Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2003, IDT). [Чинний від

2007-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 30 с. (Національна настанова).

11. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2014 (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT). Невизначеність вимірювання. Частина 3. Настанова щодо вираження невизначеності у вимірюванні. [Чинний від 2016-01-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 116 с. (Національний стандарт України).