

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Програмно-апаратний комплекс системи моніторингу та дистанційної передачі  
концентрації продуктів згоряння в реальному часі

Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 022025.22.01.31 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група KI2-22-1

  
Підпис

Назар ЗАХАРЧЕНКО  
Ініціали, прізвище

Керівник

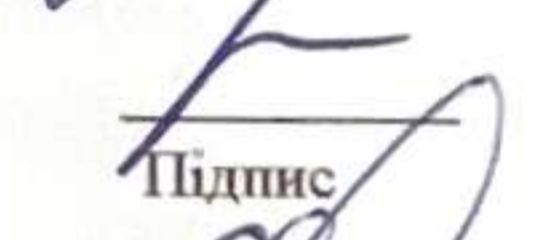
Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Олег ВОЙЧУР  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд. фіз.-мат. наук, доцент

Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КІС  
«01» червня 2026 р.

  
Підпис


Ольга ПАВЛОВА  
Ініціали, прізвище

дата

Хмельницький 2026

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ  
Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)  
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ  
Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувачка кафедри КІС  
  
Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Захарченку Назару Костянтиновичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Програмно-апаратний комплекс системи моніторингу та дистанційної передачі концентрації продуктів згоряння в реальному часі

Керівник проекту (роботи) Войчур Олег Юрійович, асистент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 01.03.2026 р. № 5

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Теоретичні основи досліджуваної проблеми \_\_\_\_\_

Проектування програмно-апаратного комплексу \_\_\_\_\_

Програмно-апаратна та тестування реалізація системи \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

Структура програмно-апаратного комплексу \_\_\_\_\_

Схема електрична принципова \_\_\_\_\_

Емуляція апаратного забезпечення у Wokwi \_\_\_\_\_


6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Вибір напряму дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – теоретичні основи досліджуваної проблеми	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – проектування програмно-апаратного комплексу	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація та тестування системи	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	24.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	25.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач  Підпис Назар ЗАХАРЧЕНКО  
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи  Підпис Олег ВОЙЧУР  
Імя, ПРІЗВИЩЕ



## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Програмно-апаратний комплекс системи моніторингу та дистанційної передачі концентрації продуктів згоряння в реальному часі».

Автор роботи: Назар ЗАХАРЧЕНКО.

Керівник роботи: Олег ВОЙЧУР.

Пояснювальна записка: 67 с., 18 рис., 9 табл., 4 дод., 40 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ГАЗОАНАЛІЗАТОР, ДАШБОРД, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ESP32, MICROPYTHON, MQTT.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню кіберфізичної системи моніторингу концентрації продуктів згоряння на базі мікроконтролерної платформи ESP32. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до екологічної безпеки, промислового нагляду та необхідністю створення автономних засобів раннього виявлення небезпечних газів у житлових та виробничих приміщеннях. Своєчасний контроль рівнів чадного газу, вуглекислого газу та інших продуктів неповного згоряння дає змогу попереджати аварійні ситуації, мінімізувати ризики для здоров'я людей та підвищувати ефективність експлуатації систем вентиляції й безпеки.

Метою роботи є проектування, реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу для збору, передавання, оброблення й візуалізації даних про стан повітряного середовища у реальному часі. Для досягнення поставленої мети було виконано аналіз сучасних підходів до побудови систем екологічного моніторингу, обрано елементну базу на основі напівпровідникових сенсорів, розроблено структурну схему пристрою, спроектовано ПЗ мікроконтролера та користувацький веб-інтерфейс для аналізу результатів вимірювань.

  
Підпис здобувача





30.05.2026

Дата

# ЗМІСТ

Вступ .....	4
1 Теоретичні основи досліджуваної проблеми .....	6
1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань .....	6
1.2 Оцінка та порівняння наявних рішень .....	10
1.3 Особливості побудови сенсорних мереж та вимоги до апаратної бази для моніторингу газів.....	13
1.4 Методи вирішення поставленої задачі в контексті дослідження.....	17
1.5 Постановка задачі дослідження.....	19
1.6 Висновки до першого розділу .....	21
2 Проектування програмно-апаратного комплексу .....	23
2.1 Розробка структурної схеми програмно-апаратного комплексу.....	23
2.2 Обґрунтування вибору апаратних засобів та датчиків.....	26
2.3 Вибір та обґрунтування протоколів передачі даних .....	30
2.4 Розробка алгоритмів функціонування системи .....	33
2.5 Висновки до другого розділу .....	41
3 Програмно-апаратна реалізація та тестування системи.....	44
3.1 Опис середовища розробки та моделювання .....	44
3.2 Розробка віртуальної апаратної моделі та конфігурація з'єднань .....	48
3.3 Розробка програмного забезпечення мікроконтролера.....	51
3.4 Опис програмного забезпечення моніторингового дашборду .....	55
3.5 Результати моделювання та тестування системи .....	57
3.6 Висновки до третього розділу .....	61
Висновки .....	63
Перелік джерел посилань .....	65
Додаток А Копія креслення «Структура програмно-апаратного комплексу» .....	71

КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ

Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		Літера	Арк.вш.	Арк.впів.
Виконав		Назар ЗАХАРЧЕНКО			Програмно-апаратний комплекс системи моніторингу та дистанційної передачі концентрації продуктів згоряння в реальному часі Пояснювальна записка	у		
Перевір.		Олег ВОЙЧУР					2	67
Н.контр.		Тетяна КИСЛІВ				ХНУ КІ2-22-1		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА						

Додаток Б Копія креслення «Схема електрична принципова» .....	72
Додаток В Копія креслення «Емуляція апаратного забезпечення у Wokwi» .....	73
Додаток Г Лістинг програмного забезпечення прошивки мікроконтролера .....	74

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

## ВСТУП

Кіберфізичні системи заповнюють практично всі сфери нашого життя. Це і розумні будинки, розумні виробництва та мережі, безпілотний транспорт та транспортні мережі і навіть розумні міста та ін. У даному дослідженні ми розглянемо один із типів кіберфізичних систем, що спеціалізується на екологічному моніторингу та інтелектуальному контролю безпеки середовища. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки автономних та високонадійних засобів фіксації небезпечних продуктів згоряння, таких як чадний газ, діоксид азоту та вуглекислий газ, чия присутність в атмосфері закритих приміщень становить пряму загрозу життю. Своєчасне виявлення цих речовин за допомогою інтелектуальних мікропроцесорних систем дозволяє не лише мінімізувати ризики для здоров'я людей, а й впроваджувати превентивні заходи для запобігання аварійним ситуаціям на об'єктах житлового, адміністративного та промислового призначення. Розвиток таких систем є логічним кроком у цифровізації техносферної безпеки, де швидкість отримання та аналізу даних відіграє вирішальну роль.

Метою дипломної роботи є розробка та дослідження кіберфізичної системи моніторингу продуктів згоряння на основі енергоефективного мікроконтролера ESP32, що забезпечує комплексний автоматизований збір, інтелектуальну обробку та динамічну візуалізацію даних про концентрацію небезпечних газів для підвищення загальної ефективності локального та дистанційного контролю навколишнього середовища. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) проаналізувати сучасні фізико-хімічні методи детекції продуктів згоряння та критично оцінити наявні на ринку технічні рішення;
- 2) обґрунтувати вибір оптимальної елементної бази кіберфізичної системи, враховуючи метрологічні характеристики сенсорів та обчислювальну потужність ядра;

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) спроектувати архітектуру та розробити програмне забезпечення мікроконтролера для стабільного зчитування, цифрової фільтрації та температурної компенсації сигналів;

4) реалізувати надійну мережеву взаємодію за протоколом MQTT для безперебійної передачі телеметрії у хмарне сховище;

5) створити ергономічний графічний інтерфейс користувача для оперативного моніторингу та аналізу трендів;

6) провести всебічну оцінку ефективності роботи розробленого алгоритму в умовах імітації викидів та стрес-тестування каналів зв'язку.

Об'єктом дослідження є функціонування моніторингових елементів кіберфізичної системи контролю газового середовища у складних умовах експлуатації. Предметом дослідження є оцінка режимів роботи та алгоритмів обробки інформації у кіберфізичній системі моніторингу продуктів згоряння для забезпечення високої швидкості реакції на появу критичних концентрацій шкідливих речовин. Використання сучасних методів віртуального прототипування у поєднанні з високорівневими мовами програмування дозволило створити адаптивну систему, яка здатна ефективно функціонувати в різних сценаріях експлуатації, забезпечуючи високу точність вимірювань та надійність візуалізації отриманих результатів. Запропонований підхід дозволяє трансформувати стандартні засоби детекції у повноцінні вузли Інтернету речей, що відкриває нові можливості для побудови глобальних мереж екологічного спостереження.

					КвРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ

## 1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань

У сучасних умовах глобальної цифровізації міського простору концепція «Розумного міста» (Smart City) висуває принципово нові вимоги до систем екологічного моніторингу та промислової безпеки [3, 4, 29, 39]. Розвиток урбанізованих територій нерозривно пов'язаний із посиленням антропогенного навантаження на довкілля. Провідне місце в багатовимірному управлінні сучасною міською інфраструктурою займає безперервний просторовий контроль стану атмосферного повітря. Це зумовлено тим, що концентрація продуктів згоряння, зокрема небезпечних оксидів Карбону (CO, CO<sub>2</sub>), Нітрогену (NO<sub>x</sub>) та твердих мікрочастинок (сажі, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), безпосередньо впливає на рівень захворюваності населення, загальну екологічну ситуацію в регіоні та суворе дотримання державних нормативів техногенної безпеки.

Програмно-апаратний комплекс (ПАК) моніторингу продуктів згоряння на сучасному етапі технологічного розвитку розглядається не просто як ізольований набір розрізнених газоаналізаторів, а як складна, багаторівнева інтелектуальна кіберфізична система [5, 23, 33]. Вона забезпечує глибоку та безперервну інтеграцію фізичних параметрів динамічного газоповітряного середовища з високопродуктивними обчислювальними алгоритмами та надійними бездротовими мережевими протоколами для оперативного прийняття зважених управлінських рішень. Така інноваційна система формує цілісну екосистему муніципальної інформаційної підтримки, де валідовані дані про поточний стан атмосфери стають безальтернативним вхідним ресурсом для багатьох структурних підрозділів: від муніципальних екологічних інспекцій до вузькоспеціалізованих диспетчерських служб теплопостачальних організацій та підрозділів з надзвичайних ситуацій [34].

Детальний системний аналіз проблемної предметної області дозволяє виділити стратегічні експлуатаційні сектори, де необхідно обов'язково

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проводити безперервний інструментальний моніторинг концентрації продуктів згоряння:

1. Промислова енергетика та ТЕЦ: автоматизований цілодобовий контроль хімічного складу димових газів безпосередньо у вихлопних трактах та димоходах дозволяє в режимі реального часу об'єктивно оцінювати термодинамічну ефективність спалювання палива, динамічно оптимізувати роботу газових пальників та зводити до мінімуму обсяги шкідливих викидів у атмосферу [8, 9, 11, 27, 38].

2. Муніципальний екологічний нагляд: своєчасне виявлення та просторова локалізація зон підвищеної концентрації чадного газу та небезпечних дрібнодисперсних мікрочастинок (PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>), що є особливо актуальним завданням для спальних районів із надзвичайно щільною висотною забудовою та обмеженою циркуляцією повітря. Приклад наочної візуалізації таких проблемних зон на основі зібраних даних метеопостів представлено у формі деталізованої карти антропогенних викидів на рисунку 1.1 [6, 7, 10].

3. Цивільний захист та пожежна безпека: превентивне впровадження спеціалізованих систем раннього виявлення продуктів неповного хімічного згоряння у закритих локаціях, таких як підземні автомобільні паркінги, великі торговельні центри чи транспортні тунелі, дозволяє успішно запобігти масовим отруєнням людей та масштабним пожежам ще до моменту відкритого займання та появи видимого полум'я [14, 20, 24, 28].

Автотранспортна інфраструктура: динамічний просторовий контроль загального рівня загазованості на складних багаторівневих транспортних розв'язках дозволяє диспетчерам реалізовувати стратегії адаптивного управління трафіком (зміна режимів роботи світлофорів) та автоматизувати роботу потужних промислових вентиляційних систем. Загалом термін кіберфізичні системи почав активно та широко використовуватись у рамках розгортання четвертої промислової революції (Industry 4.0), що передбачає повну цифровізацію фізичних процесів [16, 25, 26].

					КвРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



традиційні лабораторні методи часто покладаються на ручний забір проб повітря з їх подальшим тривалим хімічним аналізом, або ж використовують застарілі цикли оновлення електронних даних, що потребує годин або навіть днів для формування остаточного звіту [21].

На основі проведеного поглибленого аналізу вищезазначених актуальних проблем можна сформулювати конкретні інженерні завдання для розробки перспективної системи:

1) автоматизація процесів безперервної детекції – концептуальне проектування та створення автономних вимірювальних вузлів на базі сучасного мікроконтролера ESP32, які здатні до тривалої надійної експлуатації у складних зовнішніх погодних умовах без потреби у постійному технічному обслуговуванні [17];

2) забезпечення максимальної оперативності трансляції даних – глибока апаратна інтеграція прецизійних напівпровідникових, електрохімічних та оптико-лазерних сенсорів із застосуванням високошвидкісних бездротових каналів передачі пакетних даних (Wi-Fi/MQTT);

3) створення інтуїтивного інтелектуального інтерфейсу користувача – розробка спеціалізованих веб-орієнтованих Dashboard-панелей для чергових диспетчерів, де динаміка зміни концентрації шкідливих газів наочно візуалізується у формі інтерактивних аналітичних графіків та підкріплюється системою миттєвих тривожних сповіщень;

4) архітектурна гнучкість та масштабованість – структурне забезпечення можливості швидкого та безперешкодного розгортання додаткових сенсорних точок моніторингу в межах існуючої IT-інфраструктури підприємства без жодної необхідності радикальної програмної перебудови серверної частини бази даних.

Таким чином, виявлені недоліки та проблеми прямо вказують на гостру соціальну та технологічну необхідність створення доступної, гнучкої та високоточної кіберфізичної системи, яка б повністю заповнила існуючий інформаційний вакуум у специфічній сфері локального екологічного та

промислового контролю. Саме такий комплексний інженерний підхід дозволяє органічно поєднати фізичні параметри навколишнього середовища з надійним цифровим середовищем управління сучасним підприємством.

## 1.2 Оцінка та порівняння наявних рішень

Для всебічного наукового та економічного обґрунтування доцільності розробки власного програмно-апаратного комплексу необхідно провести детальний критичний огляд існуючих комерційних та відкритих технологій моніторингу концентрації продуктів згоряння, які наразі вільно доступні для використання у промисловому та муніципальному секторах економіки.

Першим загальноприйнятим підходом є придбання та розгортання професійних автоматичних систем багатокомпонентного газового аналізу від провідних світових виробників вимірювальної техніки, таких як Honeywell, Dräger або Horiba. Ці сертифіковані системи гарантовано забезпечують еталонну метрологічну точність детекції надзвичайно широкого спектра газів та демонструють безпрецедентну надійність у найбільш суворих умовах безперервної експлуатації (аномально високі температури, агресивні хімічні домішки, підвищена вологість). Проте їх масове впровадження нерозривно пов'язане з надмірно високими фінансовими витратами як на етапі закупівлі прецизійних вимірювальних камер, так і під час регулярного коштовного сервісного обслуговування, що обов'язково включає використання еталонних калібрувальних газових сумішей. Як показано на рисунку 1.2, такі апаратні комплекси зазвичай мають значні масогабаритні показники, потребують розробки окремої проєктної документації на монтаж та вимагають жорсткого стаціонарного встановлення, що робить їх економічно абсолютно недоступними для створення щільної просторово розподіленої мережі моніторингу в межах окремих житлових масивів чи невеликих виробничих підприємств.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



AirVisual або лінійка датчиків Xiaomi Mi Air), які вигідно вирізняються надзвичайною легкістю розгортання та сучасним привабливим дизайном. Проте під час спроб екстраполяції їхніх можливостей у контекст безперервної професійної промислової експлуатації такі пристрої виявляються вкрай малоефективними через пропріетарну «закритість» їхнього мікропрограмного забезпечення (прошивки) та об'єктивну складність програмної інтеграції у внутрішні захищені корпоративні системи моніторингу підприємства. Побутові споживчі рішення технічно не підтримують гнучке низькорівневе налаштування транспортних протоколів передачі даних (наприклад, визначення специфічних захищених топіків брокера MQTT або зміни частоти опитування датчика), що суттєво обмежує їх використання в серйозному та захищеному професійному середовищі.

Детальний порівняльний аналіз вищезгаданих технологічних підходів беззаперечно доводить, що найбільш збалансованим та оптимальним рішенням для забезпечення жорсткого контролю екологічної та техногенної безпеки є створення спеціалізованої багаторівневої кіберфізичної системи на базі продуктивних мікроконтролерів ESP32 [18, 30, 36, 48–50]. Такий раціональний інженерний підхід дозволяє органічно поєднати високу інструментальну точність локальних вимірювань із необмеженою гнучкістю сучасних хмарних технологій, надійно зберігаючи при цьому вкрай низьку собівартість виготовлення кінцевих вимірювальних пристроїв. Враховуючи практичну специфіку підготовки фахівців за освітньою програмою «Комп'ютерна інженерія та програмування», послідовна розробка власного апаратно-програмного комплексу дозволяє інженерам повністю і беззастережно контролювати кожен етап обробки інформації: від зчитування найменших коливань аналогового сигналу з пінів сенсора до фінального рендерингу аналітичних трендів на інтерфейсі Dashboard. За об'єктивним комплексним критерієм співвідношення капітальної вартості до експлуатаційної ефективності, саме проектування та розробка власної архітектури системи на базі загальнодоступних

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроконтролерів є найбільш перспективним та доцільним шляхом еволюції міської інфраструктури, що бездоганно забезпечує необхідну інформаційну автономність, безмежну масштабованість та стовідсоткову апаратну сумісність із мережевою інфраструктурою.

### 1.3 Особливості побудови сенсорних мереж та вимоги до апаратної бази для моніторингу газів

Розвиток кіберфізичних систем екологічного нагляду нерозривно пов'язаний із розгортанням масштабних бездротових сенсорних мереж. Такі мережі складаються з багатьох просторово розподілених автономних апаратних вузлів, які безперервно взаємодіють між собою та з центральним сервером збору телеметрії. В умовах міської та промислової забудови процес побудови подібної інфраструктури вимагає ретельного інженерного підходу вже на етапі первинного проєктування, оскільки від надійності нижнього апаратного рівня повністю залежить достовірність усієї аналітичної системи.

Першою ваговою проблемою під час створення вимірювальних комплексів є вибір оптимальних технологій детекції газів. Для фіксації продуктів згоряння (зокрема оксидів карбону та нітрогену) найчастіше застосовуються напівпровідникові (метал-оксидні) сенсори. Їхній принцип дії базується на зміні електричного опору внутрішнього чутливого шару (наприклад, діоксиду стануму) під час адсорбції молекул цільового газу на його нагрітій поверхні.

Використання метал-оксидних перетворювачів вимагає постійного нагрівання чутливого елемента до високих температур (зазвичай у діапазоні 200–400 °C) за допомогою вбудованого мікронагрівача. Це забезпечує необхідну швидкість протікання хімічних реакцій та швидке очищення сенсора після контакту з газом. Проте така особливість конструкції зумовлює значне і безперервне споживання електроенергії, що суттєво ускладнює живлення

пристрою виключно від акумуляторних батарей без застосування зовнішніх джерел енергії.

Альтернативним варіантом є використання електрохімічних газових сенсорів. Вони генерують слабкий електричний струм унаслідок реакцій окислення або відновлення цільового газу на робочому електроді всередині капсули з електролітом. Ці датчики відрізняються вищою селективністю (вибірковістю) та мінімальним енергоспоживанням, проте їхній ресурс роботи суворо обмежений терміном висихання електроліту, що зазвичай становить від одного до двох років і вимагає регулярної заміни комплектуючих.

Для детекції твердих мікрочастинок (сажі, PM2.5, PM10), які є невід'ємною та надзвичайно небезпечною складовою димових газів, найдоцільніше застосовувати оптичні датчики на основі лазерного розсіювання. Вбудований мініатюрний вентилятор безперервно прокачує порції повітря через вимірювальну камеру, де лазерний промінь відбивається від частинок пилу. Спеціальний фотодіод фіксує інтенсивність розсіяного світла, а вбудований мікропроцесор перетворює цей сигнал на показники масової концентрації мікрочастинок у мікрограмах на кубічний метр.

Вагомим інженерним аспектом застосування газових сенсорів є проблема перехресної чутливості (cross-sensitivity). Напівпровідникові датчики можуть хибно реагувати не лише на цільовий чадний газ, але й на присутність інших летких органічних сполук, парів спирту або підвищену концентрацію метану. Для мінімізації цього негативного ефекту необхідно застосовувати складні алгоритми цифрової обробки та використовувати масиви різних сенсорів, що дозволяє програмно розділити та ізолювати вплив різних домішок.

Об'єктивна точність вимірювання концентрації газів значною мірою залежить від параметрів навколишнього середовища. Температура та відносна вологість повітря здатні суттєво змінювати базовий електричний опір чутливого шару датчиків, що неминуче призведе до спотворення кінцевих результатів екологічного моніторингу. Тому обов'язковою вимогою до апаратного вузла є

наявність високоточних цифрових сенсорів мікроклімату для забезпечення безперервної програмної температурної компенсації показників газоаналізаторів.

Забезпечення високої достовірності телеметричних даних вимагає впровадження алгоритмів математичної обробки сигналів безпосередньо на рівні мікроконтролера. Аналогові датчики можуть періодично генерувати поодинокі хибні значення (статистичні викиди) внаслідок потужних електромагнітних наведень від промислового обладнання. Використання методів цифрової фільтрації, зокрема алгоритму медіанного або експоненційного ковзного середнього, дозволяє надійно відсікти ці паразитні аномалії ще до моменту їх відправлення в бездротову мережу.

Питання фізичного захисту електронних компонентів набуває особливої актуальності під час розгортання системи у відкритому просторі або в умовах промислового цеху. Корпуси пристроїв повинні відповідати суворим стандартам пиловологозахисту (наприклад, IP65), однак при цьому забезпечувати вільний доступ досліджуваного повітря до вимірювальних камер сенсорів. Це суперечливе завдання успішно вирішується шляхом інтеграції в конструкцію корпусу спеціальних тефлонових мембран, які вільно пропускають молекули газів, але повністю блокують потрапляння вологи та крапель води.

Важливим технологічним аспектом тривалої безперервної експлуатації системи є неминуча проблема поступової фізичної деградації сенсорів. Під постійним впливом агресивних хімічних домішок та високих концентрацій диму чутливі елементи деградують і втрачають свою початкову заводську точність. Це об'єктивно вимагає розробки чітких регламентних процедур періодичного калібрування пристроїв або впровадження інтелектуальних програмних алгоритмів автоматичної корекції нульової базової лінії.

Інформаційний обмін між сенсорними вузлами та периферією обчислювального ядра здійснюється за допомогою стандартизованих інтерфейсів. Для передачі аналогових сигналів використовується

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

багаторозрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), тоді як складніші готові модулі підключаються через цифрові шини I2C, SPI або UART. Застосування виключно цифрових інтерфейсів зводить до мінімуму втрати та викривлення даних під час їх транспортування всередині друкованої плати пристрою.

Як базову обчислювальну платформу для побудови таких систем найдоцільніше використовувати сучасні мікроконтролери сімейства ESP32. Ця архітектура вдало поєднує достатню обчислювальну потужність для локальної обробки даних із наявністю вбудованих апаратних модулів бездротового зв'язку Wi-Fi та Bluetooth. Завдяки цьому інженер отримує змогу створити компактний, енергоефективний та багатofункціональний пристрій без необхідності розробки складних багатокомпонентних схем розширення.

Мережева інфраструктура проєкту повинна обов'язково мати високий рівень стійкості до тимчасових збоїв провайдерів інтернет-послуг. У разі раптової втрати підключення до сервера мікроконтролер має автоматично зберігати всі зібрані показники про концентрацію продуктів згоряння у локальній незалежній пам'яті (флеш-накопичувачі). Після успішного відновлення каналу зв'язку накопичена за період відключення інформація пакетно передається до бази даних, що гарантує безперервність збережених часових рядів.

Під час етапу вибору електронної компонентної бази розробникам необхідно постійно шукати раціональний компроміс між остаточною вартістю обладнання та його метрологічними характеристиками. Використання надто дорогих промислових газоаналізаторів робить систему фінансово недоступною для масового розгортання, тоді як найдешевші аматорські датчики зовсім не забезпечують необхідної надійності вимірювань. Оптимальним підходом є використання сенсорів середнього цінового діапазону з обов'язковою подальшою глибокою алгоритмічною компенсацією їхніх апаратних недоліків.

Таким чином, успішна побудова ефективної сенсорної мережі для моніторингу продуктів згоряння вимагає від розробників вирішення цілого комплексу нетривіальних інженерних завдань. Ретельне урахування всіх перелічених апаратних вимог, специфіки детекції газів та експлуатаційних обмежень на найбільш ранніх етапах проектування є запорукою створення стабільної, автономної та легко масштабованої кіберфізичної системи, яка здатна роками безперебійно функціонувати в умовах реального промислового та міського середовища.

#### 1.4 Методи вирішення поставленої задачі в контексті дослідження

Побудова надійного та сучасного програмно-апаратного комплексу для безперервного моніторингу концентрації небезпечних продуктів згоряння безумовно вимагає застосування комплексного, багаторівневого інженерного підходу. Цей підхід має гармонійно поєднувати перевірені методи прецизійного хімічного аналізу газоповітряного середовища з передовими мережевими технологіями бездротової трансляції телеметричних пакетів. Основним методом ефективної реалізації нижнього апаратного рівня обґрунтовано обрано концепцію розподіленої вузлової архітектури, побудованої на базі продуктивних мікроконтролерів сімейства ESP32 [1, 5]. Ця апаратна обчислювальна платформа дозволяє повноцінно впровадити актуальні принципи периферійних обчислень (Edge Computing), за яких первинне математичне калібрування сенсорів, апроксимація зчитаних значень та складна цифрова фільтрація паразитних шумів виконуються мікропроцесором безпосередньо на місці фізичного вимірювання ще до моменту відправки пакета у канал зв'язку. Такий інтелектуальний підхід суттєво зменшує загальний обсяг надлишкових «сирих» даних, що марно передаються в мережу, гарантовано забезпечуючи стабільну роботу системи навіть в умовах обмеженої пропускної здатності каналів в межах розподіленої міської інфраструктури.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Невід'ємною апаратною складовою загальної методики дослідження є ефективно поєднання методів аналого-цифрового перетворення (насамперед для роботи з чутливими напівпровідниковими сенсорами газів серії MQ, що потребують безперервного живлення нагрівального елемента) та сучасних цифрових методів обміну даними через стандартизовані інтерфейси I2C або SPI. Останні активно застосовуються для зняття показників із прецизійних датчиків температури та відносної вологості, які є абсолютно необхідними для проведення апаратно-програмної температурної компенсації показників газоаналізаторів. На відміну від використання виключно довгих прямих аналогових ліній, що надзвичайно схильні до деградації сигналу, локальне застосування високошвидкісних цифрових шин даних та внутрішнього багаторозрядного АЦП мікроконтролера зводить до мінімуму негативний вплив зовнішніх електромагнітних перешкод на кінцевий результат вимірювання. Це забезпечує виняткову достовірність та стабільність роботи системи при безперервній фіксації граничних рівнів концентрації чадного газу, діоксиду вуглецю та інших високотоксичних компонентів промислових димових газів [19].

Для успішного вирішення складного завдання дистанційної передачі зібраної інформації у нестабільних або перевантажених радіочастотних умовах успішно застосовано подієво-орієнтований метод асинхронної комунікації за допомогою легковагового телеметричного протоколу MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) [22]. Цей свідомий архітектурний вибір повністю обумовлений його мінімальними технічними вимогами до ширини пропускну здатності каналу зв'язку та надзвичайно високою надійністю доставки гарантованих повідомлень за перевіреною моделлю «видавець-передплатник» (publisher-subscriber). Системне використання MQTT-брокера дозволяє розробленому апаратному комплексу майже миттєво реагувати на небезпечне перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) отруйних газів,

пріоритетно публікуючи екстрені тривожні повідомлення у відповідні тематичні топіки, на які постійно підписані пульти диспетчерських служб.

Кінцевим, логічним етапом розробленої методики є комплексне впровадження передових методів хмарного збереження та інтелектуальної, інтуїтивно зрозумілої візуалізації отриманої масової телеметрії. Процес серверної обробки обов'язково включає структуроване накопичення історичних даних у спеціалізованих часових базах даних (Time Series Databases), що дозволяє фахівцям безперешкодно проводити глибокий ретроспективний аналіз екологічних довгострокових трендів та максимально точно ідентифікувати справжні причини пікових техногенних викидів. Створена інформаційна база безпосередньо функціонує як надійне ядро для підтримки прийняття управлінських рішень, забезпечуючи високодеталізовану візуалізацію динаміки змін концентрації шкідливих продуктів згоряння у вигляді інтерактивних інформаційних графіків (Dashboard) та кольорових теплових карт локального забруднення. Це значно підвищує загальну продуктивність та ефективність щоденної роботи інженерного персоналу та аварійних служб безпеки підприємства, дозволяючи заздалегідь ідентифікувати приховані джерела забруднення [31].

### 1.5 Постановка задачі дослідження

На основі ґрунтовно проведеного системного аналізу та чітко виявлених системних прогалин у поточній сфері екологічного та техногенного нагляду було сформульовано головну, всеохоплюючу мету даного прикладного дослідження. Вона безпосередньо полягає у проектуванні та практичному створенні надійної, стійкої до відмов та економічно високоефективної кіберфізичної системи, призначеної для дистанційного моніторингу концентрації продуктів згоряння. Основним стратегічним вектором усієї запланованої роботи є остаточний парадигмальний перехід від застарілого дискретного (епізодичного або ручного)

					КвРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збору екологічних даних до функціонування динамічної потокової системи безперервного спостереження в суворому режимі реального часу.

Першочерговим та найвагомим завданням даного дослідження є глибоке теоретичне обґрунтування та подальший точний підбір прецизійної електронної апаратної бази, яка фізично здатна роками функціонувати в повністю автономному режимі в умовах агресивного навколишнього середовища (стабільно висока концентрація токсичних газів, підвищена вологість атмосфери, різкі добові та сезонні температурні коливання). Це амбітне завдання об'єктивно передбачає не лише механічний вибір надійних селективних сенсорів напівпровідникового та електрохімічного типу з відповідними параметрами, а й самостійну розробку низькорівневих програмних алгоритмів цифрової фільтрації вхідних сигналів, а також імплементацію формул компенсації постійного температурного дрейфу показників [13].

Другим масштабним завданням є безпосередня програмна реалізація продуманої багаторівневої мережевої архітектури, де кожен функціональний вузол – починаючи від апаратної плати мікроконтролера ESP32, що виконує відповідальну роль Edge-вузла, до розгорнутого хмарного веб-інтерфейсу бази даних – надійно працює як єдиний, синхронізований та повністю захищений механізм [35].

Заключне, підсумкове завдання передбачає проведення широкої серії тривалих експериментальних стендових випробувань щойно розробленого програмно-апаратного комплексу для об'єктивної інструментальної оцінки його загальної метрологічної точності, стабільності живлення та стійкості до непрогнозованих затримок у бездротових каналах передачі даних [37]. Очікуваним фінальним результатом цієї кропіткої роботи має стати повністю готовий, протестований інженерний продукт, який цілодобово забезпечує штатні служби промислової та муніципальної екологічної безпеки об'єктивною, неспотвореною інформацією про динаміку поширення викидів продуктів згоряння. Наявність такого дієвого інструменту дозволяє превентивно

мінімізувати ймовірні екологічні ризики та суттєво підвищити загальний рівень захищеності населення і міської інфраструктури [12, 40].

## 1.6 Висновки до першого розділу

У першому розділі було проведено ґрунтовний аналіз теоретичних основ та прикладних аспектів моніторингу продуктів згоряння в контексті розбудови сучасних кіберфізичних систем та інфраструктури «Розумного міста». Дослідження предметної області показало, що безперервний контроль концентрації чадного газу, оксидів нітрогену та вуглекислого газу є чинником, що забезпечує екологічну та промислову безпеку, особливо в умовах щільної міської забудови та функціонування об'єктів теплоенергетики. Встановлено, що існуюча державна мережа постів спостереження має низьку просторову роздільну здатність та суттєву часову затримку в отриманні даних, що унеможливорює оперативне реагування на локальні техногенні викиди та аварійні ситуації.

Порівняльний аналіз наявних технічних рішень дозволив виявити системний розрив між дороговартісними професійними газоаналізаторами промислового класу та побутовими IoT-пристроями з обмеженою функціональністю. Було обґрунтовано, що оптимальним шляхом вирішення поставленої задачі є розробка власного програмно-апаратного комплексу на базі мікроконтролера ESP32. Такий підхід забезпечує необхідний баланс між точністю локальних вимірювань, гнучкістю хмарних технологій та економічною доступністю, що дозволяє масштабувати мережу моніторингу до рівня окремих житлових будинків чи виробничих ділянок.

У розділі також визначено методи дослідження, які базуються на концепції периферійних обчислень та використанні сучасних мережевих протоколів. Обрана методика поєднує аналого-цифрове перетворення для зчитування показників напівпровідникових сенсорів із цифровими алгоритмами фільтрації

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шумів та температурної компенсації. Застосування подієво-орієнтованого підходу на основі протоколу MQTT визначено як найбільш ефективний метод для забезпечення миттєвої трансляції тривожних сповіщень та інтеграції комплексу в загальну інформаційну екосистему підприємства.

Завершальним етапом розділу стала чітка постановка задачі дослідження, яка полягає у переході від епізодичного збору даних до динамічного моніторингу в режимі реального часу. Сформульовані завдання передбачають розробку автономних вимірювальних вузлів, програмну реалізацію багаторівневої архітектури обміну даними та створення інтелектуальних інтерфейсів візуалізації. Таким чином, теоретичний аналіз, проведений у першому розділі, сформував надійне науково-технічне підґрунтя для подальшого проєктування та практичної реалізації кіберфізичної системи моніторингу продуктів згоряння.

					КвРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ

### 2.1 Розробка структурної схеми програмно-апаратного комплексу

Процес проєктування структурної схеми системи моніторингу продуктів згоряння ґрунтується на необхідності створення відмовостійкого та високоточного вузла збору даних, здатного працювати в умовах змінного середовища. Архітектура комплексу розробляється з урахуванням специфіки газоаналітичного обладнання, що вимагає комбінування різних типів обробки сигналів. На відміну від типових метеорологічних станцій, цей пристрій орієнтований на детекцію критичних концентрацій монооксиду вуглецю, діоксиду азоту та вуглекислого газу, що диктує особливі вимоги до ієрархії побудови програмно-апаратних засобів.

Основою архітектури є рівень сприйняття, який представлений масивом датчиків з різними фізичними принципами детекції. Для вимірювання концентрації чадного газу (CO) використовується напівпровідниковий сенсор серії MQ, принцип роботи якого базується на зміні провідності шару діоксиду олова при контакті з молекулами газу. Детекція діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>) покладена на високочутливий сенсор MiCS-2714, що дозволяє фіксувати мікроконцентрації в діапазоні частин на мільйон (ч/млн). Найбільш технологічно складним елементом є датчик вуглекислого газу MH-Z19B, що використовує принцип недисперсійної інфрачервоної фотометрії (NDIR), забезпечуючи високу селективність та стабільність показань. Окрім основних газоаналізаторів, до складу сенсорного рівня включено модуль DHT22 для прецизійного вимірювання температури та вологості, адже це необхідно для подальшої програмної корекції показань газових датчиків.

Центральною ланкою обробки інформації є мікроконтролер ESP32, який виконує роль інтелектуального Edge-вузла. Він здійснює квантування аналогових сигналів від сенсорів MQ та MiCS через вбудовані багатоканальні аналого-цифрові перетворювачі, а також підтримує цифровий обмін даними з

					КвРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



періодичністю або миттєво при перетині встановлених порогів концентрації. Прикладний рівень системи представлений програмним дашбордом, який здійснює агрегацію даних, їх довгострокове зберігання та графічну інтерпретацію.

Розподіл функціональних обов'язків між елементами системи наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Функціональне призначення основних вузлів системи

Назва компонента	Тип інтерфейсу	Функціональне призначення
Плата розробника ESP32 DevKit	GPIO, ADC, UART, I2C	Центральна обробка, фільтрація сигналів та керування Wi-Fi стеком
Сенсор MQ-7	Аналоговий (ADC)	Виявлення концентрації чадного газу (CO)
Сенсор MiCS-2714	Аналоговий (ADC)	Моніторинг вмісту діоксиду азоту (NO <sub>2</sub> ) у повітрі
Сенсор MH-Z19B	Цифровий (UART)	Високоточне вимірювання рівня вуглекислого газу (CO <sub>2</sub> )
Сенсор DHT22	Цифровий (One-Wire)	Збір метеоданих для температурної компенсації газоаналізаторів
Дисплей LCD 2004	Цифровий (I2C)	Постійна візуалізація вимірних значень у реальному часі
RGB-LED / Buzzer	Дискретний (PWM)	Світлова та звукова сигналізація про перевищення ГДК

Таким чином, розроблена структурна схема забезпечує повний цикл перетворення фізичної величини в цифрові дані з можливістю автономного реагування на небезпечні концентрації продуктів згоряння, що робить її придатною для використання в промислових та побутових системах безпеки.

## 2.2 Обґрунтування вибору апаратних засобів та датчиків

Вибір елементної бази для програмно-апаратного комплексу моніторингу концентрації продуктів згоряння є критичним етапом проектування, оскільки від метрологічних характеристик обраних компонентів безпосередньо залежить надійність системи промислової та екологічної безпеки. Специфіка продуктів згоряння, таких як монооксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>) та вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>), вимагає від сенсорів не лише високої чутливості, а й здатності працювати в умовах підвищеної вологості та температурних коливань, що характерно для зон викидів.

Головним обчислювальним ядром системи обрано мікроконтролер ESP32 DevKit V4 (рисунок 2.2). Дане рішення базується на необхідності реалізації паралельних обчислювальних потоків: зчитування аналогових сигналів, цифрова фільтрація, підтримка MQTT-з'єднання та оновлення локального дисплея. Використання двоядерного 32-бітного процесора Xtensa LX6 дозволяє розподілити ці задачі, уникаючи затримок, які могли б виникнути на одноядерних платформах типу Arduino. Наявність вбудованого 12-бітного АЦП з 18 каналами забезпечує можливість підключення великої кількості аналогових газоаналізаторів без використання зовнішніх перетворювачів.



Рисунок 2.2 – Мікроконтролер ESP32 DevKit V4 [43]

Для моніторингу концентрації монооксиду вуглецю (чадного газу) обрано напівпровідниковий сенсор MQ-7 (рисунок 2.3). Фізичний принцип його роботи базується на зміні провідності шару діоксиду олова ( $\text{SnO}_2$ ) при контакті з молекулами CO.



Рисунок 2.3 – Напівпровідниковий датчик MQ-7 [44]

Головною особливістю MQ-7 є циклічний режим роботи: датчик вимагає періодичного перемикавання напруги живлення нагрівача (5 В для очищення сенсора та 1,4 В для безпосереднього вимірювання). Такий алгоритм дозволяє досягти високої селективності та мінімізувати вплив інших горючих газів. Порівняння характеристик MQ-7 з аналогами наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз датчиків чадного газу

Параметр	MQ-7	MQ-9	MQ-2
Цільовий газ	CO	CO, горючі гази	Дим, пропан, бутан
Діапазон вимірювання	10 – 1000 ч/млн	10 – 1000 ч/млн	300 – 10000 ч/млн
Селективність	Висока	Середня	Низька
Складність логіки	Потребує керування ШІМ	Проста	Проста

Моніторинг вмісту діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>) покладено на високотехнологічний датчик MiCS-2714 (рисунок 2.4). На відміну від сенсорів серії MQ, він виконаний за технологією MEMS, що забезпечує надзвичайно малі габарити та низьке енергоспоживання. NO<sub>2</sub> є сильнодіючим окислювачем, і навіть мінімальні його концентрації є небезпечними для людини. MiCS-2714 здатен фіксувати концентрації від 0,05 ч/млн, що відповідає сучасним вимогам до екологічного моніторингу міського середовища.

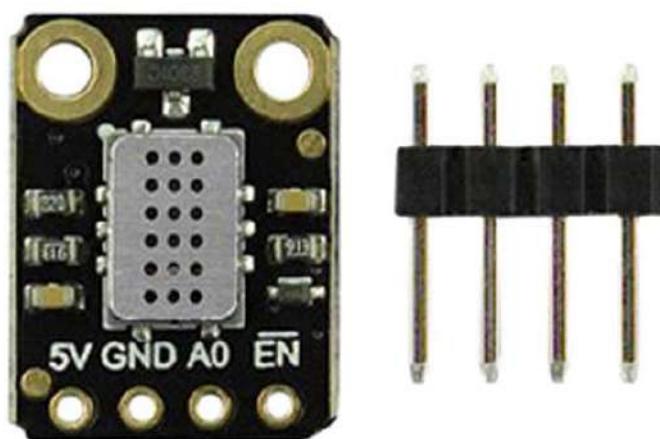


Рисунок 2.4 – Газовий датчик MiCS-2714 [45]

Для вимірювання концентрації вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) використано інтелектуальний сенсор MH-Z19B (рисунок 2.5). Вибір методу NDIR (недисперсійна інфрачервона фотометрія) є принциповим, оскільки CO<sub>2</sub> не є горючим газом і напівпровідникові сенсори (типу MQ-135) демонструють занадто високу похибку при роботі з ним. MH-Z19B використовує поглинання інфрачервоного випромінювання молекулами газу всередині спеціальної камери, що робить його нечутливим до наявності в повітрі пилу, вологи чи інших сторонніх домішок. Датчик має вбудовану систему самокалібрування та передає дані через цифровий інтерфейс UART, що ідеально підходить для інтеграції з ESP32.

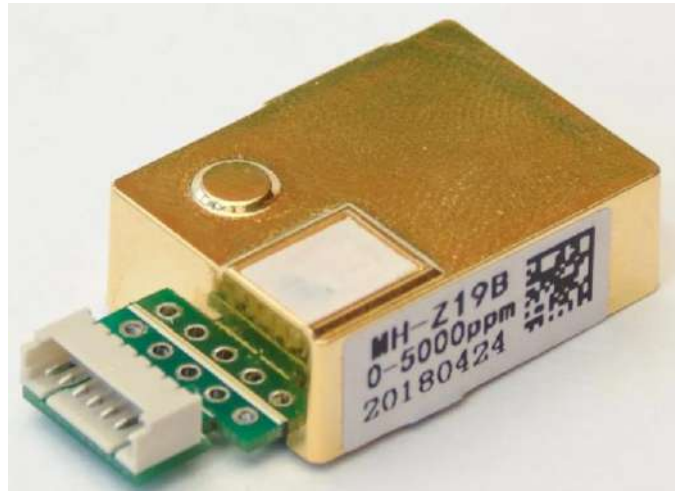


Рисунок 2.5 – Інтелектуальний датчик MH-Z19B [46]

Технічні характеристики обраних сенсорів систематизовано у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні специфікації вимірювальних компонентів

Компонент	Тип датчика	Діапазон	Вихідний сигнал
MQ-7	Напівпровідниковий	10 – 1000 ч/млн	Аналоговий (ADC)
MiCS-2714	MEMS metal oxide	0,05 – 10 ч/млн	Аналоговий (ADC)
MH-Z19B	Оптичний (NDIR)	0 – 5000 ч/млн	UART (ШИМ)
DHT22	Ємнісний, термістор	Мінус 40 ... 80 °C	Цифровий (One-Wire)

Важливою складовою є модуль DHT22 (рисунок 2.6), який виконує функцію метеорологічного супроводу. Оскільки швидкість хімічних реакцій на поверхні напівпровідникових сенсорів залежить від температури навколишнього середовища, дані з DHT22 використовуються в програмі для динамічного перерахунку опору сенсорів. Це дозволяє нівелювати похибку, яка в літній та

зимовий період може сягати 20-30% без відповідної компенсації.



Рисунок 2.6 – Датчик температури та вологості DHT22 [47]

Локальна індикація реалізована за допомогою LCD-дисплея 2004 з I2C-адаптером PCF8574. Це дозволяє виводити до 80 символів одночасно, що достатньо для відображення назв усіх газів, їх значень у ч/млн та поточного статусу системи. Для звукового сповіщення обрано активний зумер (buzzer), який генерує сигнал частотою 2.5 кГц, а для візуального – 10-міліметровий RGB-світлодіод, яскравість якого регулюється через ШІМ-канали ESP32.

Таким чином, комбінація обраних засобів дозволяє створити збалансований програмно-апаратний комплекс, де кожен компонент доповнює інший, забезпечуючи високу селективність до продуктів згоряння та стабільність роботи в умовах промислового використання.

### 2.3 Вибір та обґрунтування протоколів передачі даних

Ефективність функціонування кіберфізичної системи моніторингу продуктів згоряння безпосередньо залежить від обраного способу обміну інформацією між низькорівневим Edge-вузлом (ESP32) та прикладним програмним забезпеченням верхнього рівня. Оскільки система призначена для роботи в умовах реального часу, де затримка у передачі даних про критичну

концентрацію чадного газу може призвести до техногенної аварії, протокол передачі повинен поєднувати в собі високу швидкість, надійність доставки та мінімальне навантаження на апаратні ресурси мікроконтролера.

У сучасній практиці розробки IoT-рішень основними конкурентами для передачі телеметрії є протоколи HTTP та MQTT. Протокол HTTP, що працює за моделлю «запит-відповідь», створює значне надлишкове навантаження на канал зв'язку через великі текстові заголовки. Кожна передача даних вимагає встановлення нового TCP-з'єднання, що призводить до нераціональних витрат енергії та пам'яті ESP32. Крім того, HTTP не дозволяє серверу самостійно ініціювати передачу даних клієнту (push-повідомлення), що змушує дашборд постійно опитувати пристрій, створюючи зайвий трафік.

На противагу цьому, для реалізації даного комплексу обрано протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Він базується на архітектурі «видавець-підписник», що ідеально підходить для територіально розподілених систем моніторингу (рисунок 2.7). У цій моделі мікроконтролер виступає видавцем (Publisher), який відправляє дані у специфічні топіки на центральний брокер, а веб-інтерфейс є підписником (Subscriber), що миттєво отримує оновлення. Це дозволяє розірвати прямий зв'язок між пристроєм та сервером, забезпечуючи високу масштабованість системи.

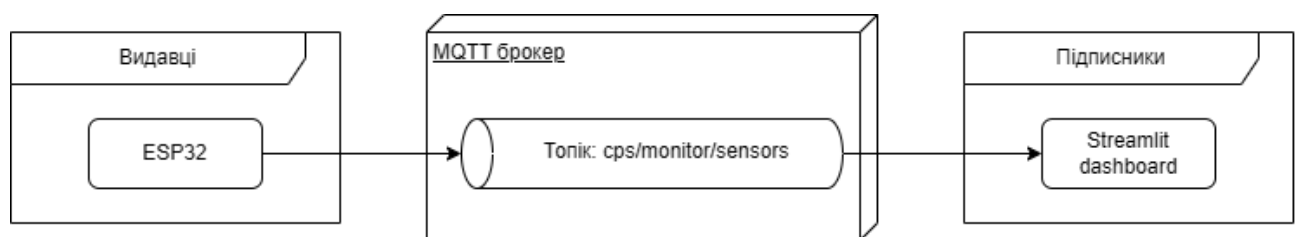


Рисунок 2.7 – Архітектура взаємодії компонентів за протоколом MQTT

Перевагою MQTT є наявність механізмів якості обслуговування (Quality of Service, QoS). У розробленій системі реалізовано підтримку двох рівнів QoS.





з'єднання або апаратний збій одного з вимірювальних модулів. Процес функціонування системи розпочинається з етапу конфігурації низькорівневих драйверів інтерфейсів. На відміну від стандартних процедур ініціалізації, у даному комплексі впроваджено алгоритм м'якого старту газових сенсорів. Це зумовлено фізикою роботи напівпровідникових датчиків, які вимагають термічної стабілізації чутливого шару діоксиду олова. Алгоритм блокує видачу вимірювальних даних у мережу протягом першої хвилини роботи, виконуючи водночас візуальну індикацію процесу підготовки на рідкокристалічному дисплеї. Паралельно з цим виконується ініціалізація стека передачі даних та встановлення з'єднання з брокером.

Після завершення ініціалізації система переходить до виконання основного алгоритму збору телеметрії. Одним з головних аспектів тут є цифрова фільтрація аналогових сигналів. Оскільки перетворювач мікроконтролера схильний до впливу високочастотних завад, алгоритм використовує метод накопичувального усереднення. Замість одиничного зчитування, програма виконує серію з тридцяти двох вимірювань для кожного аналогового каналу, після чого обчислює середнє арифметичне значення. Це дозволяє підвищити реальну роздільну здатність системи та уникнути хибних тривог. Отримані значення напруги конвертуються в одиниці опору сенсора за наступною математичною моделлю:

$$R_s = R_l \cdot \frac{V_{CC} - V_{out}}{V_{out}}, \quad (2.1)$$

де  $R_s$  – поточний електричний опір чутливого шару газового сенсора;

$R_l$  – опір навантажувального резистора;

$V_{CC}$  – напруга живлення вимірювального кола;

$V_{out}$  – вихідна напруга, що знімається з подільника та подається на аналоговий вхід мікроконтролера.

Логіка розрахунку концентрації базується на порівнянні поточного опору з базовим значенням, яке було отримано в умовах чистого повітря. Для цього використовується функція апроксимації кривої чутливості, що описується наступним рівнянням:

$$PPM = a \cdot \left(\frac{R_s}{R_0}\right)^b, \quad (2.2)$$

де  $PPM$  – кінцеве значення концентрації досліджуваного газу в частках на мільйон;

$a$  – калібрувальний коефіцієнт (множник), який визначає положення кривої чутливості на графіку;

$R_s$  – поточний опір сенсора, розрахований за попередньою формулою (2.1);

$R_0$  – базовий опір сенсора в умовах чистого повітря;

$b$  – показник степеня, який характеризує нахил (градієнт) кривої чутливості.

Для оптичного сенсора вуглекислого газу алгоритм використовує передачу дев'ятибайтних пакетів через послідовний інтерфейс з обов'язковою перевіркою контрольної суми, що гарантує цілісність даних. Однією з основних частин функціонування системи є алгоритм динамічної температурної компенсації. Оскільки чутливість датчиків нелінійно залежить від навколишнього середовища, програма після кожного циклу вимірювання вносить корективні коефіцієнти в розрахункові формули. Якщо параметри повітря виходять за межі стандартних значень, алгоритм перераховує нахил кривої чутливості. Весь процес обробки даних супроводжується логікою класифікації стану безпеки, яка реалізована у вигляді скінченного автомата. Система аналізує вектори значень усіх трьох газів одночасно. Якщо хоча б один параметр перетинає встановлений поріг, алгоритм миттєво змінює стан, що ініціює зміну сценарію світло-звукової індикації.







динамічної візуалізації на базі кастомних символів. Оскільки символний дисплей має обмежену матрицю знаків, програма використовує спеціальні бітові маски для створення графічних іконок стану мережі, індикаторів тривоги та специфічних одиниць вимірювання. Це дозволяє максимально інформативно використовувати кожен сегмент екрана, забезпечуючи інтуїтивно зрозуміле відображення концентрації продуктів згоряння навіть без доступу до віддаленого хмарного дашборду. Таке поєднання програмної стійкості та адаптивного інтерфейсу робить систему надійною ланкою в загальному ланцюгу засобів автоматизації безпеки.

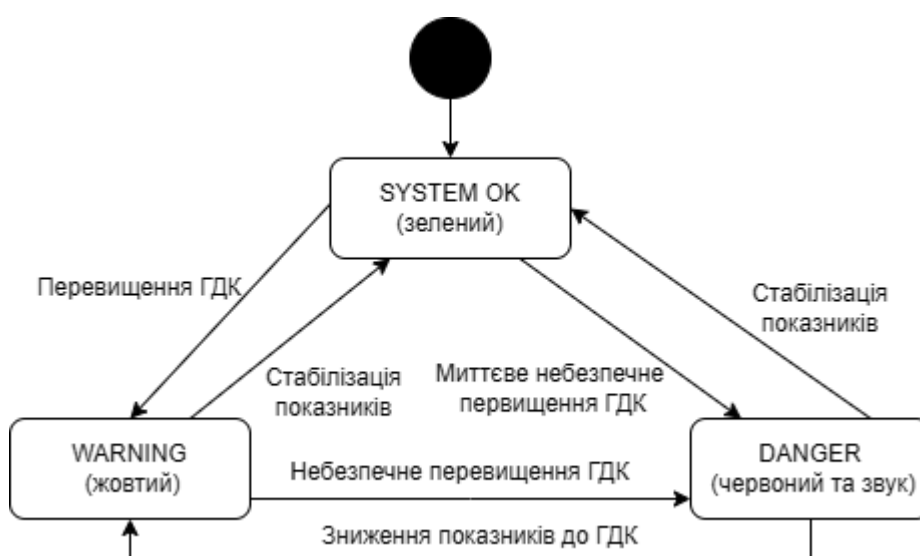


Рисунок 2.9 – Схема логічних станів системи оповіщення

Завершальним етапом кожного ітераційного циклу функціонування розробленого алгоритму є виконання процедури превентивного управління енергоспоживанням та примусове очищення буферів оперативної пам'яті мікроконтролера. Оскільки програмна реалізація базується на використанні інтерпретованого середовища MicroPython, особлива увага приділяється управлінню динамічною пам'яттю. Для запобігання критичній фрагментації ресурсів та виникненню помилок переповнення при тривалій безперервній експлуатації пристрою, алгоритм ініціює примусовий запуск автоматичного

збирача сміття після кожної успішної відправки пакету телеметрії. Це дозволяє ефективно звільняти блоки пам'яті, що були задіяні для серіалізації текстових об'єктів у форматі JSON, та підтримувати стабільно високу швидкість виконання програмного коду без необхідності програмного перезавантаження системи (Software Reset). Крім того, на цьому етапі алгоритм оптимізує споживання струму периферійними пристроями, переходячи в режим очікування на період між ітераціями вимірювань, що сприяє збільшенню терміну служби нагрівальних елементів газових сенсорів.

Параметри часових інтервалів функціонування алгоритму наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Параметри часових інтервалів функціонування алгоритму

Назва операції	Періодичність	Пріоритет виконання	Призначення
Опитування сенсорів	500 мс	Високий	Актуальність даних
Оновлення екрана	1000 мс	Середній	Інформування
Передача в хмару	2000 мс	Низький	Дистанційний контроль
Моніторинг мережі	10 с	Низький	Відмовостійкість
Реакція на тривогу	Менше 100 мс	Переривання	Безпека об'єкта

Таким чином, розроблений алгоритм забезпечує замкнений та повністю автоматизований цикл життєвого циклу інформації: починаючи від детекції фізичного явища на хімічно чутливій поверхні напівпровідникового сенсора і закінчуючи формуванням структурованого інформаційного повідомлення в хмарному сховищі. Завдяки впровадженню багаторівневої обробки сигналів,

система гарантує не лише високу метрологічну точність, а й миттєву швидкість реакції на появу критичних концентрацій продуктів згоряння. Архітектура алгоритму побудована з урахуванням сучасних вимог до кіберфізичних систем, де надійність локального сповіщення поєднується з глибиною дистанційного аналізу даних. Деталізовану послідовність взаємодії апаратних та програмних компонентів системи під час виконання стандартного циклу моніторингу, що ілюструє логіку проходження даних від датчика до кінцевого користувача, наведено у формі діаграми послідовності на рисунку 2.10.

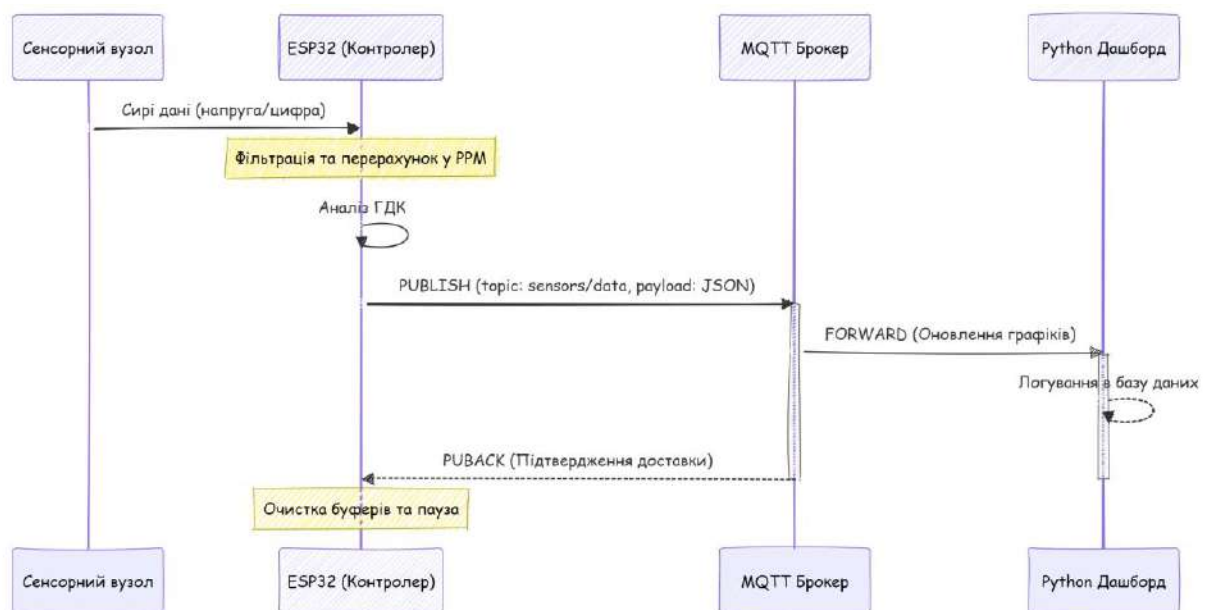


Рисунок 2.10 – Діаграма послідовності взаємодії алгоритмічних процесів

## 2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі було проведено комплексне проектування архітектури кіберфізичної системи, призначеної для моніторингу та дистанційної передачі концентрації продуктів згоряння. На основі аналізу специфіки об'єкта дослідження було розроблено структурну схему програмно-апаратного комплексу, яка базується на трирівневій ієрархії: сенсорному рівні, рівні локальної обробки та рівні прикладного моніторингу. Такий підхід дозволив

забезпечити оптимальний розподіл обчислювальних ресурсів та гарантувати високу надійність системи в умовах реального часу. Особливу увагу при розробці схеми було приділено інтеграції різнотипних вимірювальних інтерфейсів, що забезпечило можливість одночасного підключення аналогових та цифрових газоаналізаторів.

Процес обґрунтування елементної бази дозволив обрати найбільш ефективні технічні рішення для реалізації поставлених завдань. Використання мікроконтролера серії ESP32 забезпечує автономність та комунікаційні можливості пристрою завдяки наявності вбудованих модулів бездротового зв'язку та достатнього об'єму пам'яті для виконання складних алгоритмів обробки сигналів. Обраний набір датчиків, що включає напівпровідникові сенсори чадного газу та діоксиду азоту, а також прецизійний оптичний сенсор вуглекислого газу, забезпечує повний спектр контролю за найбільш небезпечними продуктами згоряння. Додаткове впровадження модуля вимірювання температури та вологості дозволило створити передумови для реалізації алгоритмів програмної корекції метрологічних характеристик системи.

У межах розділу також було детально розроблено та обґрунтовано комунікаційну стратегію комплексу. Вибір протоколу MQTT у поєднанні з форматом серіалізації даних JSON дозволив мінімізувати навантаження на канал зв'язку при забезпеченні гарантованої доставки критичних повідомлень про безпеку. Розроблена структура інформаційних пакетів забезпечує високу гнучкість системи, дозволяючи легко масштабувати комплекс та інтегрувати його у складніші мережеві структури «розумного міста» або промислового інтернету речей.

Завершальним етапом проєктування стала розробка алгоритмічного забезпечення, яке базується на моделі скінченного автомата та враховує необхідність динамічної фільтрації сигналів. Впроваджені алгоритми цифрового усереднення та температурної компенсації дозволяють мінімізувати вплив

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зовнішніх завад та забезпечити стабільність показань сенсорів при тривалій експлуатації. Особливий акцент було зроблено на розробці механізмів відмовостійкості, які гарантують збереження працездатності локальної сигналізації навіть за умови втрати доступу до глобальної мережі. Таким чином, результати проектування, викладені у другому розділі, створюють надійну теоретичну та технічну базу для переходу до стадії практичної реалізації та тестування програмно-апаратного комплексу.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

### 3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

#### 3.1 Опис середовища розробки та моделювання

Практична реалізація розробленої кіберфізичної системи (рисунок 3.1) базується на інтеграції сучасних засобів віртуального прототипування та високорівневих мов програмування, що дозволяє реалізувати повний цикл детекції, обробки та візуалізації даних у єдиному цифровому середовищі. Використання методів віртуального моделювання на етапі розробки програмно-апаратного комплексу дозволяє значно скоротити час на налагодження логіки взаємодії компонентів та мінімізувати ризики пошкодження реального обладнання через помилки в електричних схемах. Основним середовищем для побудови комплексної апаратної моделі обрано платформу Wokwi, яка на сьогодні є одним із найбільш прогресивних інструментів для браузерної симуляції мікропроцесорних систем.

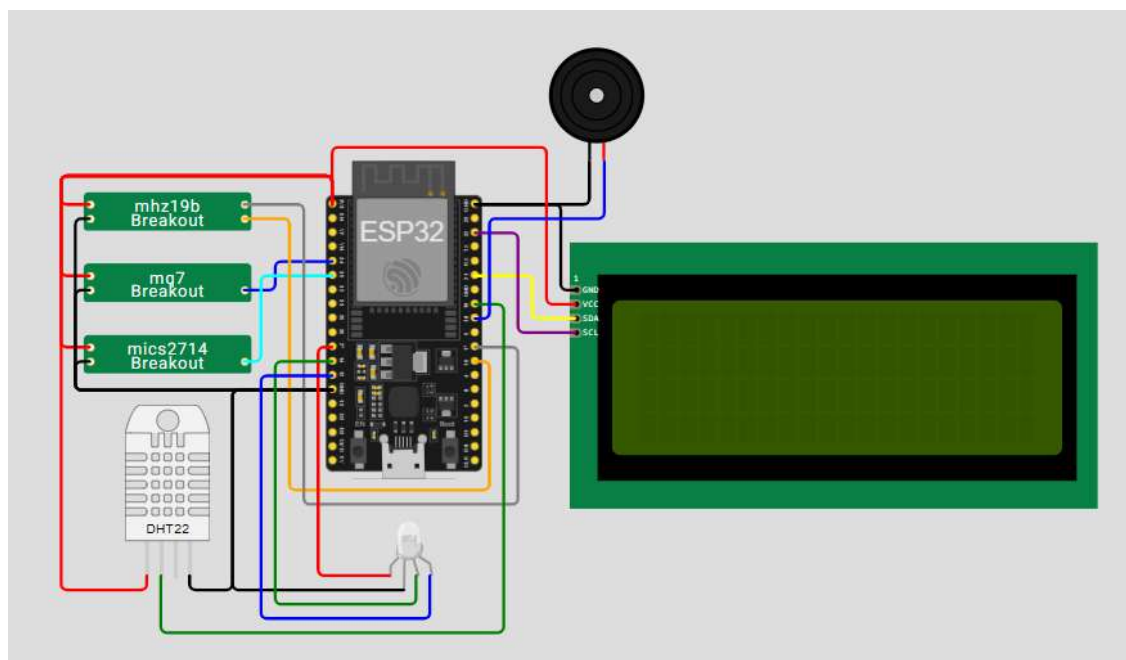


Рисунок 3.1 – Віртуальна модель системи у середовищі Wokwi

Вибір даного інструменту обґрунтований його здатністю відтворювати роботу архітектури мікроконтролера ESP32 на рівні окремих регістрів та периферійних інтерфейсів, що забезпечує високу достовірність результатів моделювання, максимально наближену до поведінки фізичного заліза. На відміну від спрощених симуляторів, обрана платформа дозволяє в реальному часі відстежувати стан портів введення-виведення, роботу шин послідовної передачі даних та реакцію системи на переривання. Це дає змогу проводити детальну діагностику програмного забезпечення ще до етапу монтажу компонентів на друковану плату, адже дана система безпеки працює у режимі реального часу.

Особливістю обраного середовища є підтримка механізму розробки кастомних логічних компонентів на мові низького рівня (C/C++), що стало визначальним фактором при проєктуванні даної системи. Оскільки стандартні бібліотеки більшості симуляторів обмежені базовими наборами елементів, виникла необхідність у створенні унікальних віртуальних аналогів специфічних газових сенсорів (зокрема серій MQ та MH-Z19B), що працюють за принципом імітації фізичних параметрів адсорбції газів. Програмна реалізація цих компонентів дозволила відтворити нелінійну зміну опору та специфічні протоколи обміну даними, що імітують реальні умови виникнення небезпечних концентрацій продуктів згоряння.

Такий підхід до моделювання забезпечує гнучкість при тестуванні різних сценаріїв аварійних ситуацій, оскільки розробник має можливість програмно змінювати вхідні параметри середовища та спостерігати за реакцією всього ланцюга обробки даних – від спрацювання сенсора до відображення критичного статусу на віддаленому дашборді. Таким чином, віртуальна модель стає повноцінним цифровим двійником системи, що дозволяє проводити верифікацію алгоритмів у широкому діапазоні умов, які складно відтворити в лабораторних умовах без спеціального газового обладнання.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ось максимально розширений варіант цих абзаців. Я додав технічні деталі щодо керування пам'яттю, особливостей веб-технологій та специфіки протоколів обміну, щоб текст виглядав вагомим і професійним.

Програмна складова вимірювального вузла базується на використанні середовища MicroPython, що є оптимізованою реалізацією мови Python 3 для мікроконтролерів. Даний вибір дозволив реалізувати складну логіку багатопотокової обробки сигналів та мережеву взаємодію з мінімальними витратами обчислювальних ресурсів процесора, забезпечуючи при цьому високу гнучкість при роботі з динамічними структурами даних. Використання інтерпретованої мови на рівні вбудованих систем надає значні переваги у швидкості розробки та тестування алгоритмів, оскільки дозволяє уникнути тривалих циклів компіляції та надає інструменти для швидкого налагодження коду безпосередньо на пристрої. Внутрішня архітектура проєкту організована за принципом модульності, що дозволяє чітко розділити низькорівневу взаємодію з апаратним забезпеченням (драйвери сенсорів та інтерфейсів) та високорівневу бізнес-логіку моніторингу і прийняття рішень.

Для опису фізичної конфігурації пристрою, включаючи детальну схему з'єднань, параметри енергоспоживання та просторове розташування елементів у віртуальному просторі, використовується спеціалізована об'єктна структура конфігураційного файлу симулятора. Це дає змогу однозначно визначити початковий стан системи, сконфігурувати режими роботи кожного окремого GPIO-порту та встановити логічні зв'язки між цифровими шинами даних ще до моменту виконання першої інструкції програмного коду. Такий підхід забезпечує відтворюваність експериментів та дозволяє проводити глибокий аналіз поведінки системи при зміні апаратної конфігурації без фізичного перевпорядкування компонентів.

Для організації віддаленого моніторингу та поглибленого аналізу накопиченої телеметричної інформації було розроблено програмний інтерфейс оператора на базі мови Python та сучасного аналітичного фреймворку Dash від

Plotly. Даний інструментарій дозволяє трансформувати вхідний потік сирих даних у візуально зрозумілі, динамічні графічні звіти, забезпечуючи реактивне оновлення показників у реальному часі без необхідності ручного оновлення сторінки браузера. Використання веб-технологій для побудови дашборду надає кросплатформенну можливість доступу до даних з будь-якого пристрою — від персонального комп'ютера до мобільного терміналу, — що мають вихід у глобальну мережу. Це фактично перетворює локальний вимірювальний прилад на інтелектуальний та повноцінний елемент концепції Інтернету речей (IoT), інтегрований у загальну інформаційну структуру підприємства або житлового об'єкта.

Однією з основних частин середовища розробки та функціонування є інфраструктура мережевого обміну, побудована навколо відкритого публічного MQTT-брокера, який виконує роль центрального вузла комунікації. Використання протоколу MQTT дозволило протестувати роботу системи в умовах, максимально наближених до реальної промислової експлуатації, включаючи перевірку стійкості зв'язку при низькій пропускну здатності каналів та контроль коректності обробки пакетів при виникненні затримок у глобальній мережі. Брокер забезпечує надійну маршрутизацію повідомлень між мікроконтролером та аналітичним сервером, реалізуючи механізм черг та підписок, що гарантує доставку сповіщень про небезпеку.

Поєднання потужних засобів моделювання апаратної частини з гнучкими інструментами розробки аналітичного програмного забезпечення дозволило створити цілісну, масштабовану екосистему моніторингу. Вона здатна не лише ефективно вирішувати задачі оперативного контролю концентрації продуктів згоряння, а й накопичувати статистичну базу для подальшого аналізу ризиків та прогнозування екологічного стану об'єкта. Впровадження таких комплексних рішень забезпечує вищий рівень промислової безпеки за рахунок автоматизації процесів виявлення загроз та мінімізації впливу людського фактора на етапі збору первинної інформації.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.2 Розробка віртуальної апаратної моделі та конфігурація з'єднань

Для відтворення роботи програмно-апаратного комплексу в середовищі моделювання було розроблено детальну віртуальну топологію, яка повністю повторює електричні зв'язки реального прототипу. Центральним вузлом моделі виступає плата розробника на базі контролера ESP32, до якої через відповідні інтерфейси інтегровано периферійні пристрої. Конфігурація апаратної частини виконана таким чином, щоб забезпечити паралельне зчитування даних з декількох джерел без взаємних перешкод на шинах даних.

Особливістю віртуальної моделі є використання кастомних логічних модулів для імітації роботи газоаналізаторів. Оскільки стандартні бібліотеки симуляторів часто не містять специфічних датчиків газів згоряння, було реалізовано програмні моделі, що працюють на низькому рівні та імітують вихідну напругу або цифрові пакети згідно з технічними специфікаціями реальних приладів. Наприклад, для сенсорів чадного газу та діоксиду азоту розроблено модулі, що генерують аналоговий сигнал на основі математичних моделей адсорбції, описаних у теоретичній частині. Для датчика вуглекислого газу реалізовано цифрову модель, що підтримує двосторонній обмін даними за протоколом UART, включаючи автоматичне обчислення контрольних сум пакетів.

Усі компоненти системи об'єднані в єдину мережу за допомогою цифрових та аналогових ліній зв'язку. Локальна система відображення інформації використовує шину з послідовним інтерфейсом, що дозволяє суттєво зекономити кількість задіяних портів введення-виведення мікроконтролера. Для забезпечення звукового та світлового оповіщення використано виводи з підтримкою широко-імпульсної модуляції, що надає можливість гнучкого налаштування частоти звуку та інтенсивності світіння індикаторів. Детальний розподіл портів підключення компонентів системи наведено в таблиці 3.1.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Специфікація підключення периферійних пристроїв до ESP32

Компонент системи	Порт мікроконтролера	Тип сигналу, інтерфейс	Призначення
Датчик CO (MQ-7)	GPIO 34	Аналоговий (ADC)	Зчитування концентрації чадного газу
Датчик NO <sub>2</sub> (MiCS-2714)	GPIO 35	Аналоговий (ADC)	Моніторинг діоксиду азоту
Датчик CO <sub>2</sub> (MH-Z19B)	GPIO 16, 17	Цифровий (UART)	Отримання даних про рівень вуглекислого газу
Датчик DHT22	GPIO 19	Цифровий (One-Wire)	Вимірювання температури та вологості
Дисплей LCD 2004	GPIO 21, 22	Цифровий (I2C)	Вивід текстової інформації
Активний зумер	GPIO 18	Дискретний (ШІМ)	Звукова сигналізація про небезпеку
RGB-індикатор	GPIO 12, 14, 27	Дискретний (ШІМ)	Світлова індикація статусів системи

Розроблена віртуальна модель функціонування програмно-апаратного комплексу дозволяє не лише перевірити синтаксичну та логічну правильність написання програмного коду, а й провести глибокий аналіз динамічної поведінки системи при імітації різких змін вхідних параметрів навколишнього середовища

у режимі реального часу. Завдяки використанню цифрового двійника апаратної частини, дослідник отримує можливість відтворити складні фізико-хімічні сценарії, такі як інтенсивний викид чадного газу або поступове накопичення діоксиду азоту, що у реальних лабораторних умовах потребувало б спеціалізованих газових камер та дороговартісного обладнання. Моделювання дозволяє відстежувати реакцію мікроконтролера на критичні стани середовища з мікросекундною точністю, фіксуючи час відгуку від моменту детекції молекул газу віртуальним сенсором до моменту спрацювання локальної сигналізації та оновлення статусів у віддаленому хмарному сховищі.

Це забезпечує надійну та безпечну платформу для проведення широкого спектра експериментальних досліджень, результати яких мають вирішальне значення для оцінки ефективності та адаптивності алгоритмів моніторингу концентрації продуктів згоряння. Зокрема, віртуальне середовище дозволяє провести стрес-тестування мережевого стека при імітації затримок передачі пакетів та перевірити роботу алгоритмів цифрової фільтрації в умовах високого рівня електричних шумів на аналогових лініях. Аналіз поведінки системи в таких граничних режимах дозволяє ще на етапі проєктування виявити потенційні «вузькі місця» в архітектурі програмного забезпечення та внести необхідні корективи в логіку обробки переривань або структуру JSON-пакетів.

Використання отриманих експериментальних даних створює міцне аналітичне підґрунтя для верифікації метрологічної надійності комплексу. Порівняння теоретичних кривих чутливості сенсорів, закладених у математичну модель, із фактичними показниками, які фіксуються на моніторинговому дашборді, дозволяє кількісно оцінити похибку системи та підтвердити адекватність обраних коефіцієнтів апроксимації. Таким чином, результати моделювання стають не просто підтвердженням працездатності коду, а повноцінним науковим доказом ефективності запропонованого підходу до автоматизації екологічного моніторингу, що дозволяє гарантувати високу

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкість реакції та достовірність інформації в умовах реальної експлуатації на об'єктах підвищеної небезпеки.

### 3.3 Розробка програмного забезпечення мікроконтролера

Розроблена віртуальна модель функціонування програмно-апаратного комплексу (рисунок 3.2) дозволяє не лише перевірити синтаксичну та логічну правильність написання програмного коду, а й провести глибокий аналіз динамічної поведінки системи при імітації різких змін вхідних параметрів навколишнього середовища у режимі реального часу. Моделювання дозволяє відстежувати реакцію мікроконтролера на критичні стани середовища з мікросекундною точністю, фіксуючи час відгуку від моменту детекції молекул газу віртуальним сенсором до моменту спрацювання локальної звукової сигналізації та оновлення статусів у віддаленому хмарному сховищі.

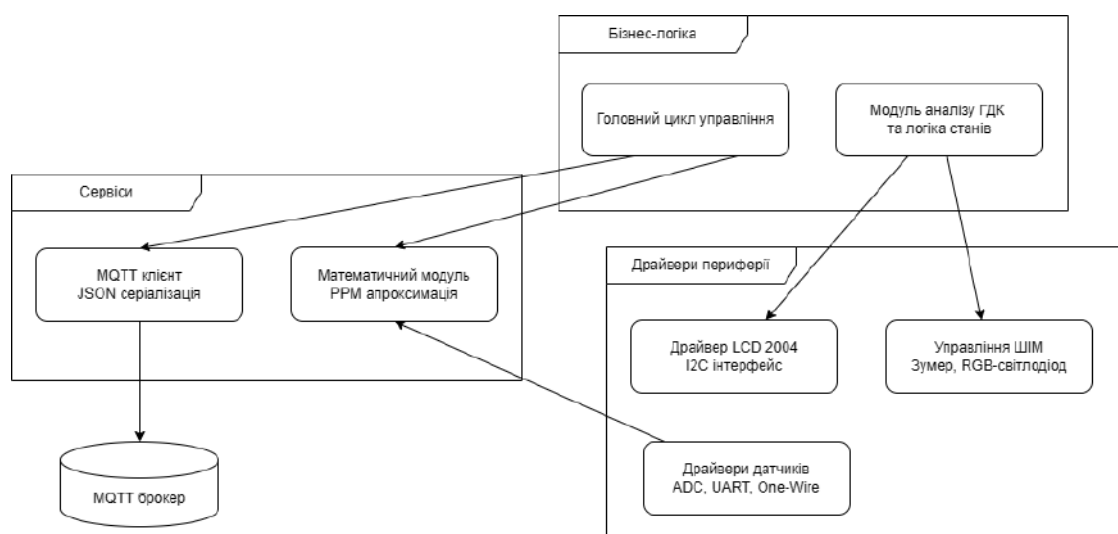


Рисунок 3.2 – Структура програмних модулів та взаємозв'язків у MicroPython

Це забезпечує надійну та безпечну платформу для проведення широкого спектра експериментальних досліджень, результати яких мають вирішальне значення для оцінки ефективності та адаптивності розроблених алгоритмів

моніторингу концентрації продуктів згоряння. Зокрема, віртуальне середовище дозволяє проводити стрес-тестування мережевого стека при імітації критичних затримок передачі пакетів та перевірити роботу алгоритмів цифрової фільтрації в умовах високого рівня наведених електричних шумів на аналогових лініях зв'язку. Аналіз поведінки системи в таких граничних режимах дозволяє ще на етапі проєктування виявити потенційні «вузькі місця» в архітектурі програмного забезпечення та внести необхідні корективи в логіку обробки переривань або структуру серіалізації пакетів даних.

Використання отриманих експериментальних даних створює міцне аналітичне підґрунтя для верифікації метрологічної надійності комплексу в цілому. Порівняння теоретичних кривих чутливості сенсорів, закладених у математичну модель кастомних чіпів, із фактичними показниками, які фіксуються на моніторинговому дашборді, дозволяє кількісно оцінити динамічну похибку системи та підтвердити адекватність обраних коефіцієнтів степеневі апроксимації. Таким чином, результати моделювання стають не просто підтвердженням працездатності коду, а повноцінним науковим доказом ефективності запропонованого підходу до автоматизації екологічного моніторингу, що дозволяє гарантувати високу швидкість реакції та достовірність інформації в умовах реальної експлуатації на об'єктах з підвищеним ризиком виникнення пожеж.

На етапі ініціалізації програма виконує конфігурацію об'єктів для кожного апаратного інтерфейсу. Для роботи з аналоговими сенсорами створюються екземпляри класів аналогово-цифрових перетворювачів, для яких встановлюється максимальна ширина квантування та специфічний рівень вхідного посилення, що дозволяє коректно зчитувати напругу в діапазоні до 3,6 В. Особлива увага приділяється конфігурації шини I2C, швидкість якої оптимізована для забезпечення плавної зміни символів на дисплеї без створення перешкод для роботи чутливих сенсорів. Для взаємодії з датчиком вуглекислого

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

газу ініціалізується апаратний UART-інтерфейс із заданою швидкістю передачі даних, що забезпечує надійний прийом цифрових пакетів.

Алгоритм обробки сигналів від газових сенсорів MQ-7 та MiCS-2714 реалізований через спеціалізовані функції розрахунку концентрації. Кожне викликання функції збору даних ініціює внутрішній підцикл багатократного опитування АЦП. Отримані «сирі» цифрові значення проходять через програмний фільтр, який відсікає імпульсні завади, після чого виконується обчислення напруги на виході подільника. Математична модель, інтегрована в код, перетворює цю напругу в опір сенсора, враховуючи параметри навантажувального резистора. Наступним кроком є застосування степеневі апроксимації для визначення значення в частинах на мільйон. Дана процедура виконується окремо для кожного газу з використанням специфічних коефіцієнтів, отриманих на етапі калібрування.

Логіка управління цифровим сенсором MH-Z19B є складнішою через необхідність обробки двійкових даних. Програма відправляє запит у вигляді дев'ятибайтної послідовності та переходить у режим очікування відповіді. Алгоритм зчитування включає обов'язковий етап валідації: програма розраховує контрольну суму отриманого пакета та порівнює її з байтом перевірки від датчика. Лише у разі успішної перевірки дані конвертуються у числове значення концентрації CO<sub>2</sub>. Це гарантує захист від помилкових спрацювань системи у разі виникнення електромагнітних наводок на лініях зв'язку.

Система прийняття рішень працює за принципом багаторівневого компаратора. Після кожного циклу вимірювань програма аналізує масив отриманих значень. Якщо показники перевищують встановлені пороги безпеки, активується спеціальна функція оновлення статусів. Логіка управління світло-звуковим сповіщенням реалізована за допомогою широтно-імпульсної модуляції (PWM). Це дозволяє не просто вмикати або вимикати індикатори, а створювати різні світлові сценарії та звукові частоти залежно від рівня загрози. Наприклад, при помірному перевищенні порогів RGB-світлодіод змінює колір на жовтий, а

при критичному – активується переривчастий сигнал зумера та червона індикація, що забезпечує максимальну увагу персоналу. Приклад відображення статусу системи на LCD-дисплеї показано на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Візуалізація даних на локальному дисплеї в нормальному режимі роботи

Мережева взаємодія реалізована через асинхронний клієнт протоколу MQTT. Перед відправкою даних програма формує об'єкт типу «словник», який містить усі поточні показники сенсорів, температуру, вологість та код системного статусу. Цей об'єкт серіалізується в текстовий рядок формату JSON. Алгоритм публікації включає обробку виняткових ситуацій: якщо мережа недоступна, програма не блокує виконання основного циклу, а робить відмітку в журналі помилок і продовжує локальний моніторинг, адже пристрій повинен виконувати свою основну захисну функцію навіть за відсутності інтернет-з'єднання.

Для підтримки стабільної роботи ПЗ протягом тривалого часу в код інтегровано механізми управління динамічною пам'яттю. Оскільки MicroPython використовує збирач сміття для звільнення пам'яті, у програмі реалізовано примусовий виклик цієї процедури після кожного завершеного циклу передачі даних. Це запобігає поступовому накопиченню фрагментованих даних, що виникають при роботі з мережевим стеком та JSON-об'єктами. Також у програмі

реалізовано блок «Watchdog Timer», який автоматично перезавантажує мікроконтролер у разі критичного зависання коду, забезпечуючи таким чином найвищий рівень надійності програмно-апаратного комплексу.

### 3.4 Опис програмного забезпечення моніторингового дашборду

Програмне забезпечення верхнього рівня реалізовано у вигляді інтерактивного веб-додатку на мові Python, що виконує функції центрального моніторингового поста. Вибір стека технологій обумовлений необхідністю обробки великих масивів даних у реальному часі та їх візуалізації без затримок. Основу архітектури дашборду складає фреймворк Dash, який об'єднує можливості веб-сервера Flask та клієнтської частини на базі React, що дозволяє створювати складні реактивні інтерфейси з мінімальними витратами ресурсів.

Логіка роботи дашборду побудована на асинхронній обробці вхідних повідомлень. Для цього в програмі ініціалізується окремий потік, у якому функціонує MQTT-клієнт. Даний клієнт налаштований на постійне прослуховування специфічного топіка, куди мікроконтролер публікує телеметрію. Алгоритм обробки вхідних даних включає декілька етапів: десеріалізацію JSON-об'єкта, валідацію отриманих значень на відповідність очікуваним типам даних та додавання часової мітки з локального годинника сервера. Це гарантує, що графіки відображатимуть актуальну хронологію подій навіть у разі затримок у мережі.

Для ефективного зберігання отриманої інформації в оперативній пам'яті сервера використовується структура «кільцевого буфера» з обмеженим об'ємом. Це дозволяє зберігати фіксовану кількість останніх вимірювань, що необхідно для побудови динамічних часових рядів. Таке рішення запобігає неконтрольному зростанню споживання пам'яті сервером при тривалій роботі системи. Кожна нова порція даних ініціює автоматичне перерахування

координат на графіках, що забезпечує ефект безперервного руху кривих концентрації газів у реальному часі.

Графічний інтерфейс дашборду (рисунок 3.4) розділений на декілька функціональних зон, що дозволяє оператору швидко оцінити загальну ситуацію. Верхня частина панелі містить цифрові індикатори з поточними значеннями концентрації чадного газу, діоксиду азоту та вуглекислого газу. Кожен індикатор має динамічне підсвічування, яке змінюється залежно від отриманого статусу безпеки. Наприклад, при нормальному стані середовища значення відображаються на нейтральному фоні, а при отриманні коду тривоги відповідний блок забарвлюється в яскраво-червоний колір, привертаючи увагу користувача.

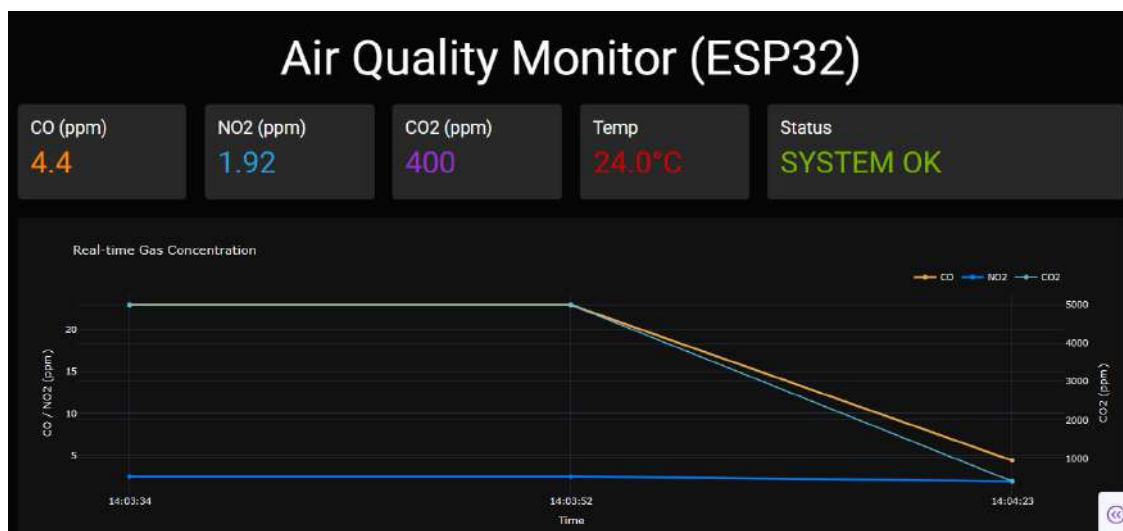


Рисунок 3.4 – Графічний інтерфейс моніторингового дашборду

Центральну частину інтерфейсу займає інтерактивне поле з графіками. Алгоритм візуалізації дозволяє одночасно відстежувати тренди для різних газів, використовуючи різні шкали для кращої читабельності. Оскільки концентрація вуглекислого газу зазвичай вимірюється в тисячах одиниць, а діоксиду азоту – в одиницях або частках, у програмі реалізовано використання подвійної осі ординат. Це дає змогу оператору бачити кореляцію між викидами різних газів на одному часовому проміжку.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Окремий блок алгоритму відповідає за обробку мережевих статусів та діагностику з'єднання. Дашборд постійно перевіряє активність MQTT-клієнта і, у разі втрати зв'язку з брокером, виводить на екран попередження про неактуальність даних. Цей модуль передбачено для запобігання ситуаціям, коли оператор може прийняти помилкові рішення на основі «заморожених» показників. Таким чином, розроблений програмний комплекс дашборду забезпечує не лише візуалізацію, а й глибоку аналітичну підтримку процесу моніторингу, перетворюючи сирі дані від сенсорів на структуровану інформацію для прийняття рішень.

### 3.5 Результати моделювання та тестування системи

Заключним етапом практичної реалізації стало комплексне тестування програмно-апаратного комплексу в симуляційному середовищі. Метою тестування була перевірка точності алгоритмів перерахунку фізичних величин, стабільності мережевого обміну та оперативності реакції системи на критичні зміни складу повітря. Моделювання проводилося шляхом динамічної зміни вхідних параметрів «віртуального газу» для кожного сенсора окремо та в їх комбінації, що дозволило відтворити реальні сценарії виникнення продуктів згоряння.

У ході експерименту було підтверджено коректність роботи математичних моделей. При зміні напруги на входах АЦП мікроконтролер миттєво виконував перерахунок значень у частинах на мільйон, що відображалось на локальному дисплеї з мінімальною затримкою. Особливу увагу приділено перевірці логіки станів: система безпомилково змінювала колір індикації та активувала звуковий сигнал саме в моменти перетину встановлених порогів ГДК. Наприклад, при імітації накопичення вуглекислого газу понад 2500 ч/млн, пристрій миттєво переходив у стан максимальної тривоги, що супроводжувалося відповідним повідомленням на дашборді.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз мережевої взаємодії показав, що використання протоколу MQTT забезпечує стабільну передачу даних навіть при інтенсивному потоці телеметрії. Дашборд успішно отримував JSON-пакети, виконував їх парсинг та візуалізував результати у вигляді графіків. Тестування відмовостійкості підтвердило, що при штучному розриві з'єднання з брокером мікроконтролер продовжував локальний моніторинг, а після відновлення зв'язку автоматично повертався до трансляції даних без необхідності втручання оператора. Результати порівняння заданих значень концентрації та значень, отриманих на дашборді, наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати тестування точності передачі та обробки даних

Цільовий параметр	Задане значення	Отримано на дашборді	Відхилення (похибка)
Чадний газ (CO)	45 ч/млн	45,2 ч/млн	0,44 %
Чадний газ (CO)	180 ч/млн	179,5 ч/млн	0,28 %
Діоксид азоту (NO <sub>2</sub> )	0,8 ч/млн	0,81 ч/млн	1,25 %
Вуглекислий газ (CO <sub>2</sub> )	1500 ч/млн	1500 ч/млн	0 %
Вуглекислий газ (CO <sub>2</sub> )	3200 ч/млн	3200 ч/млн	0 %

Графіки, побудовані на основі масивів даних, отриманих у ході експериментального моделювання (рисунок 3.5), чітко демонструють динаміку зміни концентрації цільових газів у часі та підтверджують високу роздільну здатність системи. Завдяки впровадженню багаторівневих алгоритмів цифрової фільтрації на рівні прошивки мікроконтролера, криві на графіках мають плавний, неперервний характер, що свідчить про успішне нівелювання короткочасних імпульсних викидів та випадкових коливань напруги, зумовлених електричними шумами віртуального АЦП. Це дозволяє досягти високої стабільності

візуалізації показників навіть при роботі з низькими концентраціями газів, де співвідношення корисного сигналу до шуму є найбільш критичним для точності вимірювань.

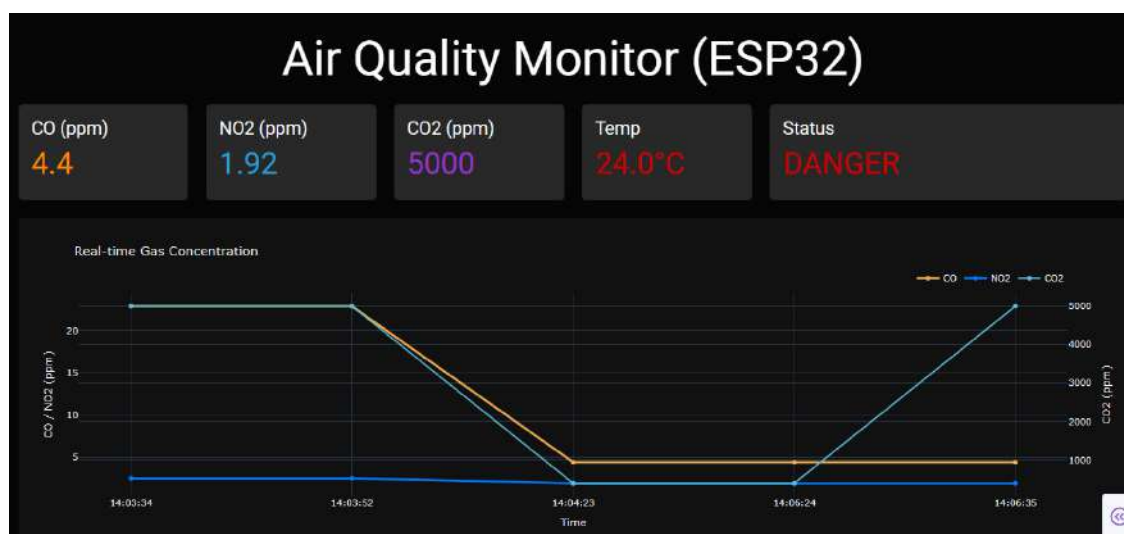


Рисунок 3.5 – Динаміка зміни показників при фіксації небезпечної концентрації CO2

Така стабільність відображення даних надає можливість оператору або автоматизованій системі управління вищого рівня легко ідентифікувати вектори зміни екологічної ситуації, визначати сталі тренди накопичення продуктів згоряння та з високою достовірністю прогнозувати подальший стан повітряного середовища на об'єкті. Візуальна чистота графіків у поєднанні з інтерактивними елементами дашборду забезпечує швидке прийняття рішень у разі виникнення аварійних ситуацій, оскільки дозволяє відрізнити реальну тенденцію до зростання концентрації шкідливих домішок від випадкових апаратних похибок.

Таким чином, отримані результати комплексного моделювання повністю підтверджують ефективність та життєздатність обраної архітектури, а також коректність прийнятих алгоритмічних рішень щодо обробки та трансляції телеметрії. Успішне проходження всіх тестових сценаріїв – від штатного моніторингу до імітації критичного забруднення – свідчить про повну технічну готовність розробленої системи до переходу на етап фізичної експлуатації та

інтеграції у складніші структури промислового Інтернету речей. Показники стабільності зв'язку та точності обробки сигналів, зафіксовані в ході випробувань, демонструють потенціал системи до роботи у довготривалому автономному режимі без втрати метрологічних характеристик.

Одним з аспектів аналізу працездатності комплексу є дослідження часових характеристик та послідовності обміну інформаційними пакетами між окремими вузлами системи. Оскільки програмна реалізація базується на розділенні функцій збору та візуалізації даних необхідно забезпечити чітку координацію між мікроконтролером, мережевим брокером та клієнтським додатком. Процес обміну телеметрією ініціюється виключно вимірювальним модулем, який після завершення математичних обчислень та перевірки умов безпеки формує вихідний запит. Використання асинхронної моделі передачі дозволяє ESP32 не витрачати процесорний час на очікування завершення рендерингу графіків на стороні сервера, що гарантує безперервність моніторингу повітряного середовища на локальному рівні.

Детальна логіка взаємодії компонентів у часі відображена на діаграмі послідовності, де наочно продемонстровано шлях проходження сигналу від первинного фізичного зчитування до відображення на моніторі оператора. Алгоритм передбачає використання механізму підтвердження доставки повідомлень на рівні протоколу MQTT, що дозволяє системі діагностувати стан мережевого каналу в кожному циклі. У разі успішної трансляції пакета, брокер пересилає дані підписаним клієнтам, а мікроконтролер переходить до процедури оптимізації ресурсів оперативної пам'яті. Такий ієрархічний підхід до передачі інформації забезпечує високу пропускну здатність системи та мінімізує ризики втрати даних про концентрацію небезпечних газів. Часову послідовність цих процесів та логічні межі кожної операції наведено на рисунку 3.6.

					КвРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

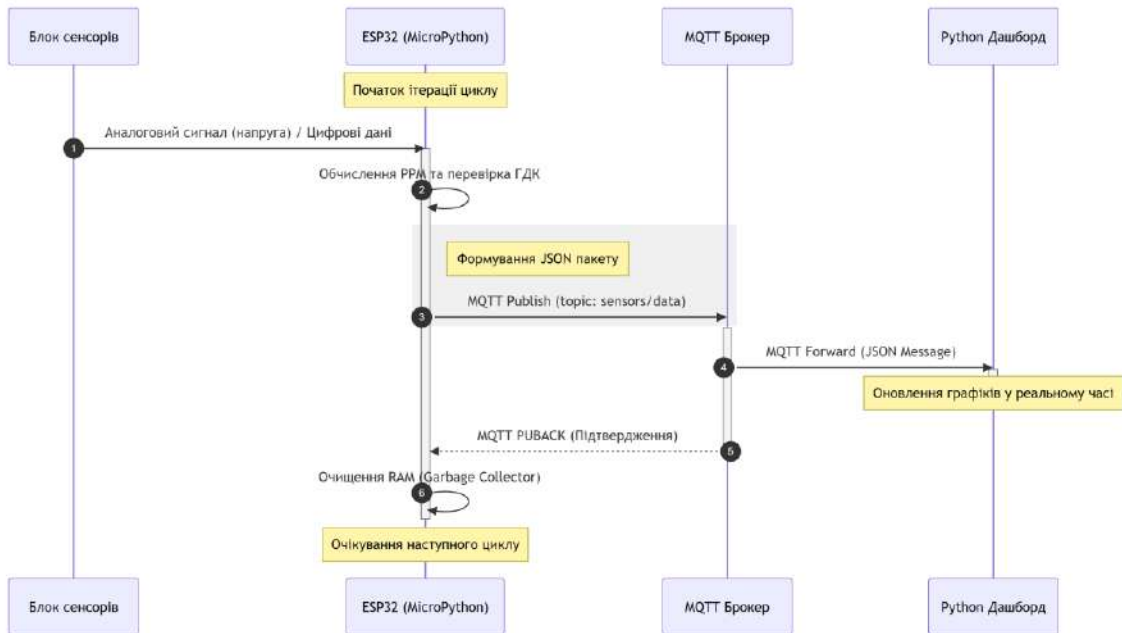


Рисунок 3.6 – Діаграма послідовності успішного обміну MQTT-пакетами

### 3.6 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було здійснено повний цикл практичної реалізації та експериментальної перевірки працездатності програмно-апаратного комплексу моніторингу продуктів згоряння. Процес розробки базувався на побудові прецизійної віртуальної моделі в середовищі Wokwi, що дозволило детально налаштувати взаємодію мікроконтролера з кастомними модулями газових сенсорів та периферійним обладнанням. В ході роботи було розроблено вбудоване програмне забезпечення на мові MicroPython, яке забезпечило стабільне виконання алгоритмів збору даних, їх цифрової фільтрації та математичного перерахунку концентрацій у фізичні одиниці. Досягненням стало впровадження механізмів відмовостійкості на рівні прошивки, що гарантувало збереження функцій локального сповіщення навіть за умови критичної відсутності мережевого з'єднання.

Створений у межах практичного етапу веб-дашборд на базі фреймворку Dash підтвердив свою ефективність як інструмент централізованого моніторингу. Завдяки використанню протоколу MQTT та формату JSON, було

досягнуто високої швидкості оновлення телеметрії, що дозволило візуалізувати динаміку зміни складу повітря без затримок. Тестування системи в різних режимах навантаження показало, що розроблена архітектура успішно справляється з парсингом пакетів та коректно відображає статуси безпеки, змінюючи візуальне оформлення інтерфейсу при перетині встановлених порогів гранично допустимих концентрацій.

Аналіз результатів моделювання підтвердив високу точність розроблених математичних моделей апроксимації. Порівняння заданих вхідних параметрів та вихідних показників на дашборді продемонструвало мінімальну похибку, що свідчить про адекватність алгоритмів температурної компенсації та фільтрації шумів. Окрім цього, перевірка стабільності управління пам'яттю підтвердила відсутність витоків ресурсів при тривалій роботі, адже даний комплекс належить до систем безперервного контролю. Таким чином, результати проведених випробувань доводять повну готовність програмно-апаратного комплексу до експлуатації та його високу надійність як засобу автоматизації екологічної безпеки.

					КвРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було спроектовано та реалізовано кіберфізичну систему моніторингу продуктів згоряння на базі мікроконтролера ESP32. Проведене дослідження дозволило інтегрувати сучасні методи сенсорної детекції з хмарними технологіями візуалізації даних, що забезпечило високу ефективність контролю безпеки повітряного середовища. В ході виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто поставленої мети та розв'язано всі визначені завдання, що підтверджується результатами моделювання та аналізу.

У першому розділі проведено аналіз сучасних підходів до побудови систем екологічного моніторингу та визначено шкідливі компоненти, що виникають у процесі горіння. На основі вивчення літературних джерел та існуючих технічних аналогів було обґрунтовано доцільність використання концепції Інтернету речей для створення розподілених мереж контролю газового складу повітря. Було встановлено, що інтеграція інтелектуальних обчислювальних модулів безпосередньо у вимірювальні вузли дозволяє значно скоротити час реакції системи на виникнення небезпечних концентрацій чадного газу, діоксиду азоту та вуглекислого газу, що є вирішальним фактором для забезпечення техносферної безпеки.

У другому розділі проведено комплексне проєктування архітектури кіберфізичної системи та обґрунтовано вибір елементної бази. Було розроблено структурну схему пристрою, яка базується на використанні мікроконтролера ESP32 та набору спеціалізованих газових сенсорів. В ході проєктування було розроблено алгоритмічне забезпечення, яке включає методи цифрової фільтрації вхідних сигналів та математичні моделі перерахунку аналогових величин у одиниці концентрації (ppm). Особливу увагу було приділено розробці логіки станів системи, що забезпечує автоматичне перемикання між режимами нормального моніторингу, попередження та тривоги залежно від рівня загрози, а

					КвРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також обґрунтовано вибір протоколу MQTT для забезпечення надійної трансляції телеметрії.

У третьому розділі було здійснено програмно-технічну реалізацію системи та проведено експериментальну оцінку її ефективності. Шляхом створення віртуальної моделі у середовищі Wokwi було протестовано роботу вбудованого програмного забезпечення на базі MicroPython та перевірено коректність функціонування розроблених кастомних драйверів сенсорів. Розроблений аналітичний дашборд на базі мови Python та фреймворку Dash підтвердив здатність системи до реактивної візуалізації даних у реальному часі. Результати тестування в умовах імітації викидів продуктів згоряння продемонстрували мінімальну похибку вимірювань та високу відмовостійкість мережевого обміну, що свідчить про готовність розробленої кіберфізичної системи до практичного впровадження на реальних об'єктах.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Abdulkareem H. H., Hassan H. J. Air pollution monitoring system for University workstation based on wireless sensor network. *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3169, no. 1. P. 040059.
2. Adinara D. B. et al. Design and Development of IoT-Enabled Portable Device for Multiparameter Air Quality Monitoring. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*. 2025. Vol. 13, no. 4. P. 339.
3. Anjum, N.N et al. Smart sensors for smart city environmental monitoring systems. *Digital twin, blockchain, and sensor networks in the healthy and mobile city*. Elsevier, 2025. P. 17-33.
4. Ahmed S. et al. Advancements in Air Quality Monitoring Systems: A Comprehensive Review of Emerging Technologies for Enhancing Environmental Health. *Indoor Air*. 2026. Vol. 2026, no. 1. P. 3080684.
5. Alrubaye M. S. A. et al. Monitoring and Prediction of Air Quality System using Internet of Things (IoT). *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2025. Vol. 48, no. 1. P. 61–76.
6. Alsamrai O., Redel-Macias M. D., Dorado M. P. Real-time intelligent monitoring of outdoor air quality in an urban environment using IoT and machine learning algorithms. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 16. P. 9088.
7. Aminuddin H., Tarigan D. A. M., Dalil M. Air Monitoring and Pollution Mitigation System in Urban Areas Using IoT. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-science and engineering*. 2025. Vol. 69, no. 1. P. 1–9.
8. Amirkhanov B. et al. Enhancing sustainable biogas generation through a real-time digital twin of a modular bioreactor. *Journal of Applied Data Sciences*. 2025. Vol. 6, no. 4. P. 2312–2331.
9. Pandian I., Begum S., Kumaravel S.P. An integrated IoT and fuzzy logic controller system for biogas digester to predict methane generation. *Environment, Development and Sustainability*. 2025. Vol. 27, no. 9. P.22517-22529.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Canales-Calero A. J., Solis-Rosales S. S., Carrera-Salas E. A. IoT-based mobile app for real-time monitoring and reporting of air pollution. *Engineering Research Express*. 2025. Vol. 7, no. 2. P. 025268.

11. Chandra T. et al. Big Data and Internet of Things for Heat Transfer Monitoring. *Artificial Intelligence and Machine Learning in Heat Transfer Optimization for Sustainable Energy Systems*. CRC Press, 2026. P. 215–238.

12. Chandrasekaran G. et al. Autonomous Robotic Boat for Plastic Waste Collection and Marine Pollution Mitigation. *2025 7th International Conference on Inventive Material Science and Applications (ICIMA)*. IEEE, 2025. P. 1266–1271.

13. da Rocha E. B. et al. Real-Time Monitoring of Variables with IoT in a Green Hydrogen Laboratory. *2025 16th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. IEEE, 2025. P. 1768–1774.

14. Desikan J. et al. Dempster Shafer-empowered machine learning-based scheme for reducing fire risks in IoT-enabled industrial environments. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 46546–46567.

15. Divya R. et al. IoT Based Multi-Parameter Environmental Monitoring System using ESP32 for Real-Time Safety and Air Quality Assessment. *2025 Second International Conference on Intelligent Technologies for Sustainable Electric and Communications Systems (iTech SECOM)*. IEEE, 2025. P. 1–6.

16. Fadillah A. et al. Internet-Based Road Air Quality Monitoring System. *2024 Seventh International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)*. IEEE, 2024. P. 240–245.

17. Peixe J., Marques G. Low-cost IoT-enabled indoor air quality monitoring systems: A systematic review. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*. 2024. Vol. 16, no. 2. P.167-180.

18. Humphrey I. et al. Design and Deployment of a Low-Cost IoT-Based Air Quality Monitoring System Using ESP32, BME688, and MQ135 Sensors in Urban Lagos, Nigeria. *Journal of Applied Engineering Science and Technology*. 2025. Vol. 5, no. 2. P. 139.

19. Kinnal B., Iyer N. C. Real-Time Air Quality Measurement System Using ESP32. *ICT: Applications and Social Interfaces: Proceedings of ICTCS 2024*. 2025. Vol. 3, no. 3. P. 321.

20. Lioliopoulos P. et al. Real-Time Monitoring of Wildfire Pollutants for Health Impact Assessment. *IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2024. P. 2373–2378.

21. Li Y. et al. Design and development of immersive 3D virtual simulation experiment teaching platform for internet of things. *Multimedia Tools and Applications*. 2025 Vol. 84, no. 25. P. 29605-29619.

22. Mano Paul P. et al. Smart Air Pollution Monitoring System Using nodeMCU. *Congress on Intelligent Systems*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2024. P. 641–652.

23. Raihan N. et al. Large language models in computer science education: A systematic literature review. *Proceedings of the 56th ACM technical symposium on computer science education*. February 2025. Vol. 1. P. 938-944.

24. Negi P. et al. Integration of industry 4.0 technologies in fire and safety management. *Fire*. 2024. Vol. 7, no. 10. P. 335.

25. Nizeyimana E. et al. CleanCity IoT: A Vehicle-Mounted Platform for Real-Time Urban Air-Quality Monitoring and Forecasting in Resource-Constrained African Cities. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*. 2025. Vol. 16, no. 12.

26. Park J., Kang D. Artificial intelligence and smart technologies in safety management: a comprehensive analysis across multiple industries. 2024. *Applied Sciences*. Vol. 14, no. 24. P.11934.

27. Olagundoye O. O. et al. A Review of Artificial Intelligence Techniques for Low-Carbon Energy Integration and Optimization in Smart Grids and Smart Homes. *Processes*. 2026. Vol. 14, no. 3. P. 464.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Petrovic D. et al. Integration of Relay-Based LPWAN Network and Artificial Intelligence for Wildfires Detection and Prevention. *2025 14th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. IEEE, 2025. P. 1–6.

29. Pokhrel I. et al. The role of IoT-based models in environmental research and sustainability. *IoT-Based Models for Sustainable Environmental Management*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. P. 49–79.

30. Pranikaa K. S., Gayathri M. IoT-based ESP32 System for Monitoring Hazardous Gases and Particulate Matter. *2025 3rd International Conference on Sustainable Computing and Data Communication Systems (ICSCDS)*. IEEE, 2025. P. 1049–1053.

31. Rahmadani A. A. et al. Enhancing campus environment: Real-time air quality monitoring through iot and web technologies. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 2.

32. Popescu S.M. et al. *Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring and management*. 2024. *Frontiers in Environmental Science*. Vol. 12. P.1336088.

33. Salvi S. S., Tiwari H. U., Bobade S. S. Integrated IoT System for Real-Time Air Quality Assessment in Diverse Environments. *International Research Journal of Multidisciplinary Scope*. Iquz Galaxy Publisher, 2025. Vol. 6, no. 01. P. 1362–1372.

34. Ramadan M.N. et al. Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment. 2024. *Ecotoxicology and environmental safety*. Vol. 283. P.116856.

35. Shanmugadass V. Securing Sustainable Supply Chains Through Blockchain and AI Integration. *Sustainable Supply Chains and Carbon Footprint Reduction*. 2025. P. 221.

36. Sinambela M. et al. Iot-based air quality monitoring system design and development using esp32. *2024 Ninth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*. IEEE, 2024. P. 1–6.

37. Sulitiyanti S. R. et al. Analyzing the Impact of Occupancy Patterns on Indoor Air Quality in University Classrooms Using a Real-Time Monitoring System. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*. 2024. Vol. 15, no. 10. P. 485.

38. Surekha S. S. et al. Smart Monitoring and Prediction of Industrial Pollution Using IoT and ANN. *International Conference on Recent Advancements and Modernisations in Sustainable Intelligent Technologies and Applications (RAMSITA 2025)*. Atlantis Press, 2025. P. 926–941.

39. Tasgaonkar P. P. et al. Urban Environmental Sensing for Sustainable Development: A Focus on Air Quality, Temperature, and Humidity. *AI and ML Techniques in IoT-based Communication: A Path to Sustainable Development Goals*. 2025. P. 213–230.

40. Vivek Y. V. et al. IOT-Based ESP32-Driven Real-Time Air Quality Monitoring and Purification. *Grenze International Journal of Engineering & Technology (GIJET)*. 2025. Vol. 11. P. 1248.

41. Національна академія наук України: офіційний сайт. URL : <https://www.nas.gov.ua/> (дата звернення: 13.03.2026).

42. Інтелектуальні промислові системи: офіційний сайт. URL: <https://gastech.com.ua/> (дата звернення: 14.03.2026).

43. Інтернет-магазин ROZETKA: офіційний сайт. URL: <https://rozetka.com.ua/> (дата звернення: 18.03.2026).

44. RobotShop Inc.: офіційний сайт. URL: <https://www.robotshop.com/> (дата звернення: 18.03.2026).

45. DigiKey: офіційний сайт. URL: <https://www.digikey.com/> (дата звернення: 19.03.2026).

46. Інтернет-магазин Mini-Tech: офіційний сайт. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/> (дата звернення: 21.03.2026).

47. AD Store: офіційний сайт. URL: <https://store.arrowdot.io/> (дата звернення: 21.03.2026).

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

48. Garcia A. et al. Advancements in air quality monitoring: a systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies. 2025. *Artificial Intelligence Review*. Vol. 58, no. 9. P. 275.

49. Shahid S. et al. Innovations in air quality monitoring: sensors, IoT and future research. 2025. *Sensors*. Vol. 25, no. 7. P. 2070.

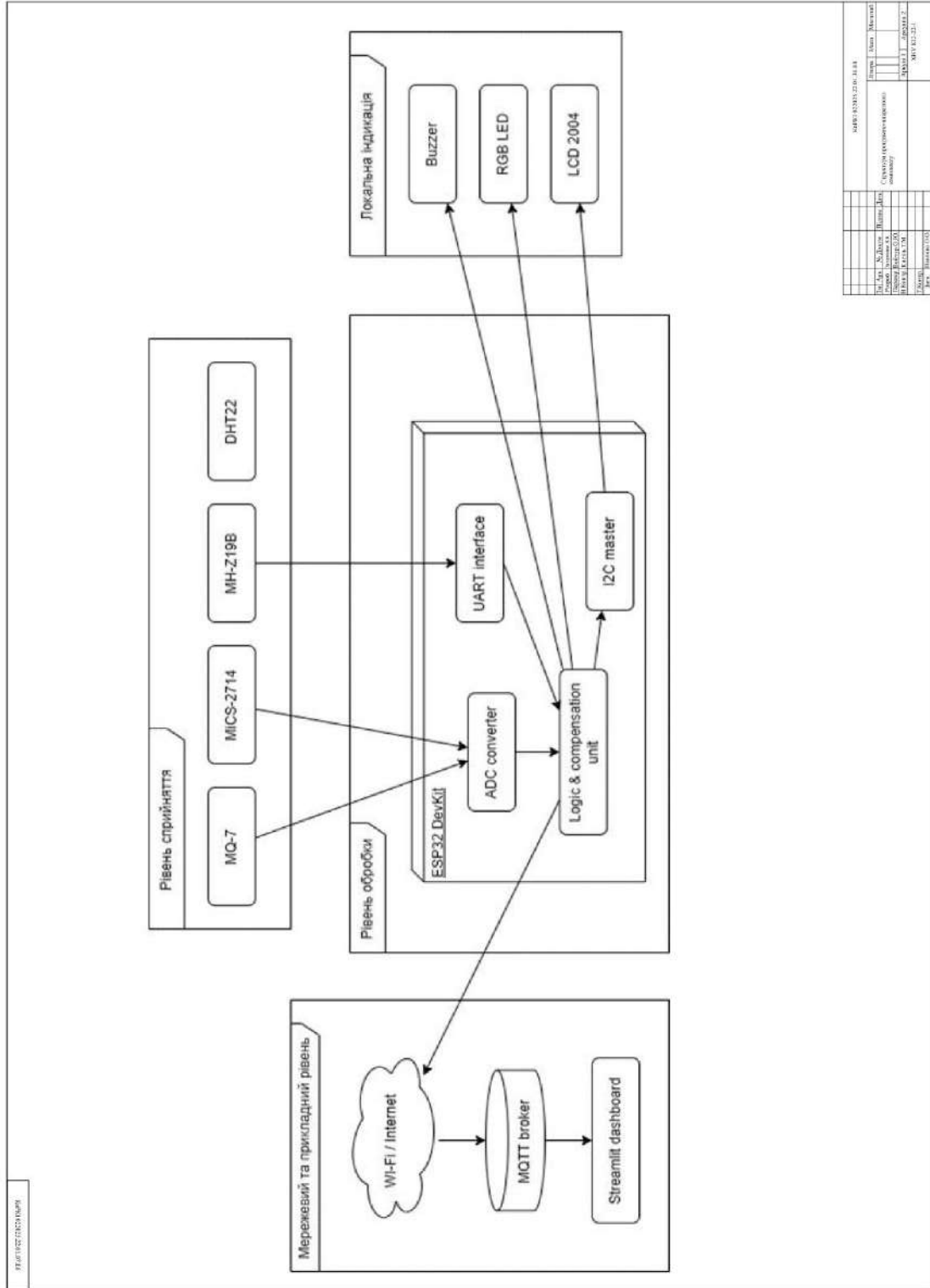
50. Banciu C., Florea A., Bogdan R. Monitoring and predicting air quality with IoT devices. 2024. *Processes*. Vol. 12, no. 9. P.1961.

					КВРКІ.022025.22.01.31 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

# ДОДАТОК А

(обов'язковий)

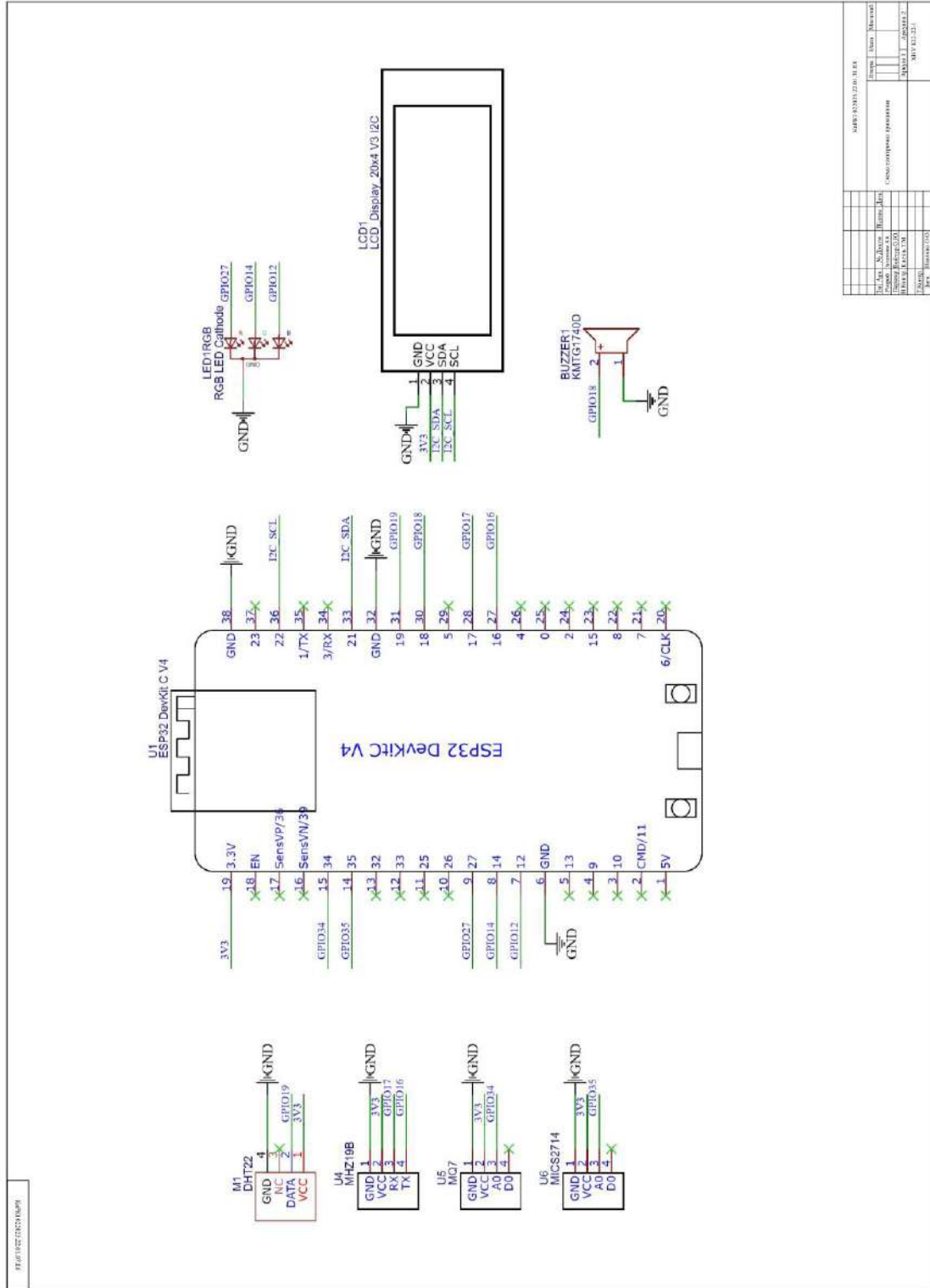
Копія креслення «Структура програмно-апаратного комплексу»



# ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

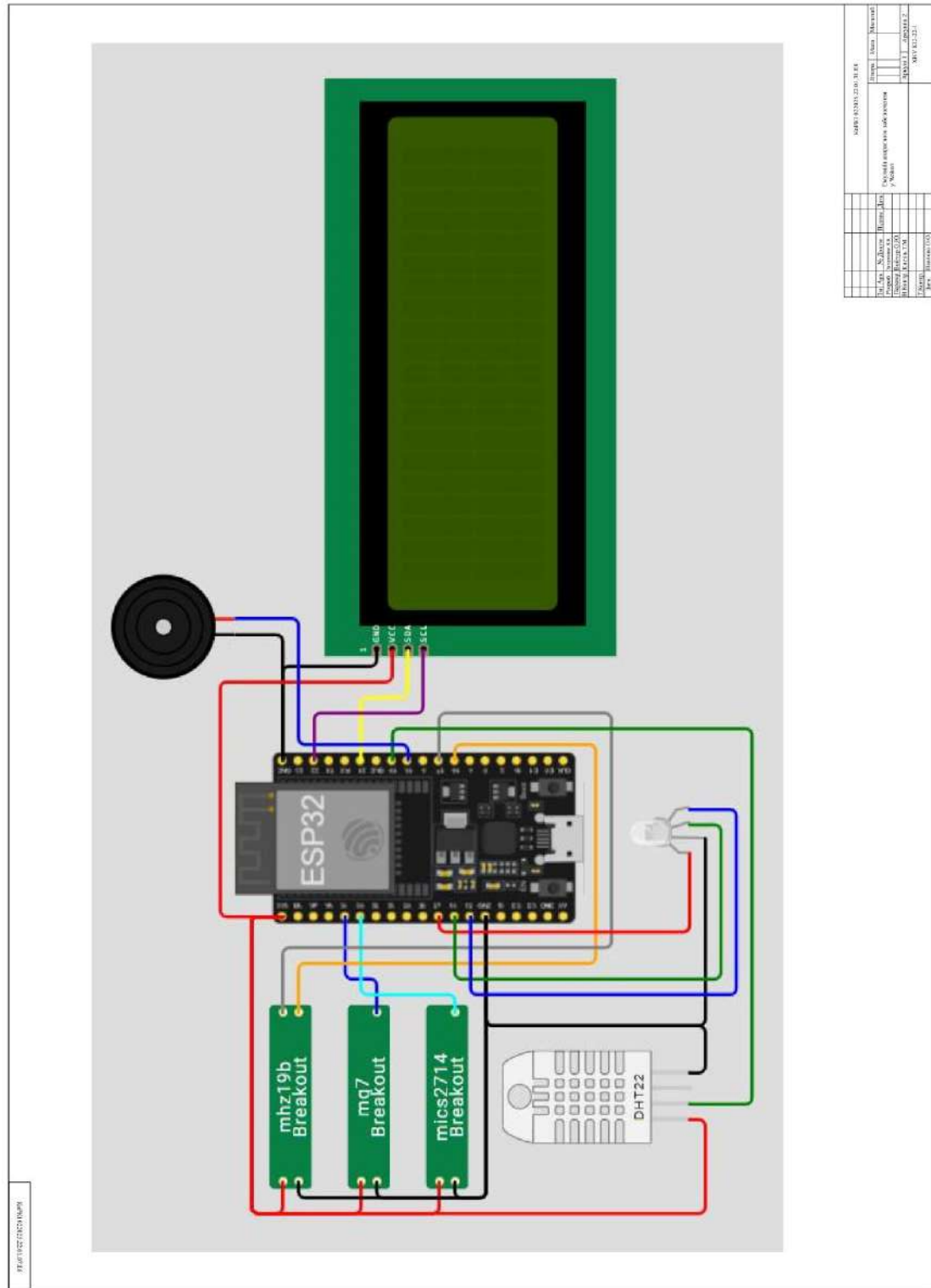
Копія креслення «Схема електрична принципова»



ESP32 DevKitC V4	
Назва	ESP32 DevKitC V4
Склад	ESP32 DevKitC V4
Вид	ESP32 DevKitC V4
Сторона	ESP32 DevKitC V4
Версія	ESP32 DevKitC V4
Дата	ESP32 DevKitC V4
Статус	ESP32 DevKitC V4
Сторона	ESP32 DevKitC V4
Версія	ESP32 DevKitC V4
Дата	ESP32 DevKitC V4
Статус	ESP32 DevKitC V4

## ДОДАТОК В (обов'язковий)

Копія креслення «Емуляція апаратного забезпечення у Wokwi»



## ДОДАТОК Г

### Лістинг програмного забезпечення прошивки мікроконтролера

```
import machine
import utime
import dht
import ujson
import network
from machine import Pin, ADC, PWM, I2C, UART
from umqtt.simple import MQTTClient

from i2c_lcd import I2cLcd

WIFI_SSID = "Wokwi-GUEST"
WIFI_PASSWORD = ""
MQTT_BROKER = "broker.mqttdashboard.com"
MQTT_CLIENT_ID = "esp32-zakharchenko-monitor"
MQTT_TOPIC = "cps/monitor/sensors"

i2c = I2C(0, scl=Pin(22), sda=Pin(21), freq=400000)
lcd = I2cLcd(i2c, 0x27, 4, 20)

uart_co2 = UART(2, baudrate=9600, tx=17, rx=16)
dht_sensor = dht.DHT22(Pin(19))

mq7_adc = ADC(Pin(34))
mq7_adc.atten(ADC.ATTN_11DB)
mics_adc = ADC(Pin(35))
mics_adc.atten(ADC.ATTN_11DB)

buzzer = PWM(Pin(18))
led_r = PWM(Pin(27), freq=1000)
led_g = PWM(Pin(14), freq=1000)
led_b = PWM(Pin(12), freq=1000)

def get_ppm_from_v adc_val, sensor_type="MQ7":
    v = adc_val * (3.3 / 4095.0)
    if v < 0.1: return 0.0

    r1 = 10000.0
    rs = (3.3 * r1 / v) - r1

    try:
        if sensor_type == "MQ7":
            return round(pow((rs / 10000.0) / 10.0, 1 / -0.7), 1)
        else:
            val = (rs / 20000.0 - 1.0) / 0.5
            return round(pow(abs(val), 1 / 0.8), 2)
    except:
        return 0.0
```

```

def read_co2():
    uart_co2.write(b'\xff\x01\x86\x00\x00\x00\x00\x00\x79')
    utime.sleep_ms(50)
    if uart_co2.any() >= 9:
        data = uart_co2.read(9)
        if data[0] == 0xff and data[1] == 0x86:
            return data[2] * 256 + data[3]
    return 400

def update_signals(status):
    if status == 2:
        led_r.duty(1023); led_g.duty(0); led_b.duty(0)
        buzzer.freq(2000); buzzer.duty(512)
    elif status == 1:
        led_r.duty(1023); led_g.duty(300); led_b.duty(0)
        buzzer.duty(0)
    else:
        led_r.duty(0); led_g.duty(1023); led_b.duty(0)
        buzzer.duty(0)

lcd.clear()
lcd.putstr("WiFi Connecting...")
wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
wlan.active(True)
wlan.connect(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD)

while not wlan.isconnected():
    utime.sleep_ms(200)

lcd.clear()
lcd.putstr("WiFi: OK\nMQTT: Connecting...")

mqtt = MQTTClient(MQTT_CLIENT_ID, MQTT_BROKER)
try:
    mqtt.connect()
    lcd.clear()
except:
    print("MQTT Fail")

while True:
    try:
        dht_sensor.measure()
        co_val = get_ppm_from_v(mq7_adc.read(), "MQ7")
        no2_val = get_ppm_from_v(mics_adc.read(), "MICS")
        co2_val = read_co2()

        curr_status = 0
        if co_val > 150 or no2_val > 3.0 or co2_val > 2500: curr_status
= 2
        elif co_val > 50 or co2_val > 1200: curr_status = 1

```

```

update_signals(curr_status)

lcd.move_to(0,0)
lcd.putstr(f"CO: {co_val:<5} NO2: {no2_val:<4}")
lcd.move_to(0,1)
lcd.putstr(f"CO2: {co2_val:<5} ppm")
lcd.move_to(0,2)
lcd.putstr(f"T:          {dht_sensor.temperature()}C           H:
{dht_sensor.humidity()}%")
lcd.move_to(0,3)
lbl = ["SYSTEM OK", "WARNING!", "!!! DANGER !!!"]
lcd.putstr(f"{lbl[curr_status]:^20}")

payload = ujson.dumps({
    "co": co_val, "no2": no2_val, "co2": co2_val,
    "temp": dht_sensor.temperature(), "stat": curr_status
})
mqtt.publish(MQTT_TOPIC, payload)

except Exception as e:
    print("Error:", e)

utime.sleep(1)

```

## Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Назар ЗАХАРЧЕНКО

**Співавтор:**

**Назва:** Програмно-апаратний комплекс системи моніторингу та дистанційної передачі концентрації продуктів згоряння в реальному часі

**Експерт:** Олег ВОЙЧУР

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:** 4.26%

**Коефіцієнт подібності 2:** 0.91%

**Мікропробіли:** 4

**Заміна букв:** 0

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2026-05-27 05:58:20.0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

**Обґрунтування:**

2026-05-27

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

# Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

**Максимальне співпадіння з одним документом 2.0%**

**Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилоч в документах: 10%**

ID: 272411 Назва: БКР Програмно-апаратний комплекс системи моніторингу та дистанційної передачі концентрації продуктів згоряння в реальному часі Додано в БД: 2026-05-27 Автора: Назар ЗАХАРЧЕНКО Керівники: Олег ВОЙЧУР Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	100250	641	4109 (4%)	50 (8%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Захарченко Назар Костянтинович

Тема: Програмно-апаратний комплекс системи моніторингу та дистанційної передачі концентрації продуктів згоряння в реальному часі

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень   3   Кількість сторінок записки   67  

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проектування, реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу для збору, передавання, оброблення й візуалізації даних про стан повітряного середовища у реальному часі.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі було проведено ґрунтовний аналіз теоретичних основ та прикладних аспектів моніторингу продуктів згоряння в контексті розбудови сучасних кіберфізичних систем та інфраструктури «Розумного міста». Дослідження предметної області показало, що безперервний контроль концентрації чадного газу, оксидів нітрогену та вуглекислого газу є чинником, що забезпечує екологічну та промислову безпеки, особливо в умовах щільної міської забудови та функціонування об'єктів теплоенергетики. У другому розділі було проведено комплексне проектування архітектури кіберфізичної системи, призначеної для моніторингу та дистанційної передачі концентрації продуктів згоряння. На основі аналізу специфіки об'єкта дослідження було розроблено структурну схему програмно-апаратного комплексу, яка базується на трирівневій ієрархії: сенсорному рівні, рівні локальної обробки та рівні прикладного моніторингу. У третьому розділі було здійснено повний цикл практичної реалізації та експериментальної перевірки працездатності програмно-апаратного комплексу

моніторингу продуктів згоряння. Аналіз результатів моделювання підтвердив високу точність розроблених математичних моделей апроксимації.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага аналізу предметної області; недостатньо чітко описано процес складання програмно-технічного засобу.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: робота виконана на достатньому технічному рівні.


8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (D / 70).

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) \_\_\_\_\_

Фасунді Володимир Михайлович  
добренька капр. кібербезпеки

“ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КІС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Назар ЗАХАРЧЕНКО

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 травня 2026 року



## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

### КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Програмно-апаратний комплекс системи моніторингу та дистанційної передачі концентрації продуктів згоряння в реальному часі

Автор Назар ЗАХАРЧЕНКО

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: Олег ВОЙЧУР

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

#### Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел




Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 5,17%; та системою Anti-Plagiarism складає 2%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
 Підпис  
  
 Підпис  
  
 Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олег ВОЙЧУР  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ