

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Автоматизація моніторингу якості повітря в кімнаті

Назва теми

Рівень вищої освіти Перший (бакалаврський)
Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Шифр КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ

Виконав здобувач 4 курсу, група АКІТ-22-1
Шифр


Підпис

Антон МУСІЄВИЧ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник канд. техн. наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Микола ФЕДУЛА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер канд. техн. наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Галина РАДЕЛЬЧУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки


Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

15.06.2026
Дата

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти Перший (бакалаврський)

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТтаР

Людмила КОРЕЦЬКА

07 лютого 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Мусієвичу Антону Володимировичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Автоматизація моніторингу якості повітря в кімнаті

Керівник роботи Федула Микола Васильович, канд. техн. наук, доцент

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

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. №7.

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 01.06.26 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики

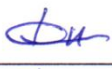
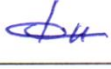
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Вступ. Огляд об'єкту автоматизації. Аналіз існуючих рішень. Проектування автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті. Алгоритмічне та програмне проєктування автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті. Висновки.

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

Презентаційні матеріали

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

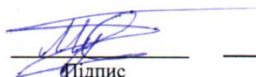
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М. В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Радельчук Г. І., доцент кафедри АКІТтаР		

7. Дата видачі завдання « 07 » лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Ознайомлення з тематикою кваліфікаційної роботи (КвР), визначення та узгодження індивідуальних тем КвР	01.12 – 31.12.2025	Виконано
2 Збір матеріалу за темою КвР; дослідження предметної області, визначення задач та вимог до системи.	02.01 – 31.01.2026	Виконано
3 Проектування автоматизованої автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті	01.02 – 28.02.2026	Виконано
4 Розробка програмного забезпечення для автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті	01.03 – 30.04.2026	Виконано
5 Написання загальних висновків, оформлення переліку джерел посилання та додатків. Оформлення пояснювальної записки КвР згідно вимог	01.05 – 25.05.2025	Виконано
6 Попередній захист КвР	травень 2026 (згідно графіка)	Виконано
7 Перевірка КвР на плагіат, нормоконтроль, отримання відгуків, рецензій та інших супровідних документів. Брошурування (зшиття) пояснювальної записки.	26.05 – 30.05.2026	Виконано
8 Здача КвР на кафедру; підготовка КвР для розміщення у репозиторії ХНУ; підготовка до захисту та захист КвР	з 01.06.2026	Виконано

Студент


 Підпис

 Антон Мусієвич
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник роботи


 Підпис

 Микола ФЕДУЛА
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація моніторингу якості повітря в кімнаті».

Автор роботи: Мусієвич Антон Володимирович.

Керівник роботи: Федула Микола Васильович.

Пояснювальна записка: 67 с., 14 рис., 8 табл., 2 дод., 40 джерел.

Графічна частина: 13 презентаційних слайдів.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ, МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ,

Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи віддаленого моніторингу якості повітря в кімнаті. В роботі проведено аналіз нормативних показників якості повітря в приміщеннях та існуючих засобів і методів автоматизованого контролю складу повітряної маси. Розроблено структурну схему автоматизованої системи моніторингу, визначивши взаємодію між її апаратними та програмними компонентами. Також було обрано та обгрунтовано елементну базу системи, включаючи первинні вимірювальні перетворювачі та центральний мікроконтролерний модуль, розроблено принципову електричну схему пристрою автоматичного збору даних. На основі проєктованих даних створено програмне забезпечення нижнього рівня (прошивку мікроконтролера) для автоматичного опитування сенсорів, цифрової фільтрації сигналів та первинної обробки інформації, розроблено інтерфейс користувача.


Підпис студента

02.06.2025р.
Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ В ПРИМІЩЕННІ.....	9
1.1 Огляд та аналіз автоматизованих систем моніторингу якості повітря в приміщення.....	9
1.2 Застосування, класифікація та методи створення автоматизованих систем моніторингу якості повітря. Перспективи та напрямки розвитку	12
1.3 Опис технологічного процесу автоматизації моніторингу якості повітря .	17
1.4 Опис процесу хмарного моніторингу	20
1.5 Висновки до першого розділу. Постановка задачі	23
2 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ В КІМНАТІ.....	26
2.1 Принцип роботи та функції автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті.....	26
2.2 Розробка структурної схеми роботи автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті.....	29
2.3 Обґрунтування вибору компонентів автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті.....	35
2.3.1 Мікроконтролер ESP32.....	38
2.3.2 Оптичний сенсор MH-Z19B	40
2.3.3 Лазерний сенсор SDS011	41
2.3.4 Цифровий модуль BME280	43
2.4 Висновки до другого розділу	46

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація моніторингу якості повітря в кімнаті	Літ.	Арк.	Аркушів
Виконав		Мусісвич А.В.		02.06.2026				
Керівник		Федула М.В.		02.06.2026			6	67
Н. контр.		Радельчук Г.І.		05.06.2026	Пояснювальна записка	ХНУ, АКІТ-22-1		
Зав. каф.		Корецька Л.О.		05.06.2026				

3	АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ В КІМНАТІ	48
3.1	Розробка алгоритму роботи автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті	48
3.2	Розробка програмного забезпечення контролера	51
3.3	Розробка панелі користувача	53
3.4	Висновки до третього розділу	58
	ВИСНОВКИ.....	60
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	63

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Актуальність автоматизації моніторингу якості повітря в приміщеннях обумовлена переходом від простих систем вимірювання до складних замкнених контурів керування мікрокліматом. У сучасних умовах житлове або робоче приміщення розглядається як складний об'єкт керування з багатьма вхідними параметрами, де ручне регулювання є неефективним через інерційність процесів та невидимість основних забруднювачів для органів чуття людини.

Ключовим аспектом є створення надійної вимірювальної мережі, що базується на первинних перетворювачах (сенсорах) концентрації вуглекислого газу, летких органічних сполук (VOC) та дрібнодисперсного пилу (PM2.5/PM10). Автоматизація дозволяє реалізувати алгоритми обробки сигналів у реальному часі, що нівелює проблему дрейфу нуля та нелінійності характеристик дешевих напівпровідникових сенсорів. Використання мікроконтролерних систем (на базі архітектур ESP32, STM32 або промислових ПЛК) забезпечує інтеграцію цих даних у загальну структуру Smart Building або промислову мережу підприємства.

Найважливішою прикладною задачею автоматизації є впровадження концепції Demand-Controlled Ventilation (DCV) – вентиляції за потребою. Замість постійної роботи витяжних систем на максимальній потужності, комп'ютерно-інтегрована система динамічно змінює частоту обертів вентиляторів за допомогою частотних перетворювачів, орієнтуючись на поточні показники датчиків. Це дозволяє знизити енергоспоживання HVAC-систем на 30–50%, що є критичним показником для сучасних стандартів енергоменеджменту та сталого розвитку.

Комп'ютерно-інтегрований підхід передбачає не лише реактивне керування, наприклад, увімкнення витяжки при перевищенні порогу, а й прогностичний аналіз. Використання хмарних сервісів та протоколів передачі

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		6

даних (MQTT, Modbus TCP) дає змогу накопичувати великі дані (Big Data) для побудови моделей поведінки середовища. Це дозволяє системі передбачати пікові навантаження на систему очищення повітря, наприклад, під час масових зборів у конференц-залах або специфічних технологічних процесів у лабораторіях.

Автоматизація моніторингу повітря сьогодні трансформується з опціонального комфорту в обов'язковий інженерний стандарт, де фокус зміщується з простого збору даних на створення автономних систем з мінімальною участю людини, що гарантує високу якість середовища при мінімальних енергетичних витратах.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті для забезпечення безперервного контролю екологічних параметрів середовища та своєчасного інформування користувача про стан мікроклімату.

Визначено такі завдання:

- провести аналіз нормативних показників якості повітря в приміщеннях та існуючих засобів і методів автоматизованого контролю складу повітряної маси;
- розробити структурну схему автоматизованої системи моніторингу, визначивши взаємодію між її апаратними та програмними компонентами;
- вибрати та обґрунтувати елементну базу системи, включаючи первинні вимірювальні перетворювачі та центральний мікроконтролерний модуль;
- розробити принципову електричну схему пристрою автоматичного збору даних та спроектувати його друковану плату (або макетний прототип).
- створити програмне забезпечення нижнього рівня (прошивку мікроконтролера) для автоматичного опитування сенсорів, цифрової фільтрації сигналів та первинної обробки інформації;

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		7

- реалізувати передачу вимірюваних даних на верхній рівень;
- розробити інтерфейс користувача.

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ В ПРИМІЩЕННІ

1.1 Поняття, огляд та аналіз автоматизованих систем моніторингу якості повітря

Концепція автоматизованих систем моніторингу енергоспоживання (СAME) виходить далеко за межі простого обліку ресурсів, а може розглядатись як повноцінна кіберфізична система, що об'єднує апаратні засоби вимірювання, комунікаційні мережі та потужні програмні комплекси для аналітики й керування.

Поняття системи автоматизованого моніторингу та керування якістю повітря розглядається не як набір окремих приладів, а як цілісна кіберфізична система. Вона поєднує фізичні процеси (дифузію газів, рух повітряних мас) з обчислювальними алгоритмами та мережевою інфраструктурою. Основним принципом такої системи є перетворення неелектричних величин (концентрації молекул чи часток) у цифрові дані для подальшого аналізу та формування керуючого впливу без участі оператора [1, 3].

У сучасному розумінні така система базується на концепції Smart Sensing. Це означає, що вузол збору даних не просто передає "сирі" значення напруги з сенсора, а виконує первинну обробку: фільтрацію шумів, температурну компенсацію та лінеаризацію характеристик. Комп'ютерно-інтегрований підхід передбачає, що кожен датчик є активним елементом мережі з власною адресою, який може самостійно сигналізувати про вихід параметрів за критичні межі. Це перетворює моніторинг із пасивного спостереження на активний інструмент запобігання аварійним ситуаціям.

Замкнений контур керування (Closed-loop Control), де ключовим поняттям є зворотний зв'язок, тобто система не просто вимірює рівень CO₂, вона постійно порівнює поточне значення з заданою «уставкою» (setpoint). На основі розрахунку неузгодженості (помилки) контролер приймає рішення про

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		9

інтенсивність роботи виконавчих механізмів. Це реалізується через алгоритми регулювання, де система плавно змінює положення сервоприводів повітряних заслінок або частоту обертання двигунів вентиляції. Такий підхід виключає різкі перепади тиску та температури, забезпечуючи стабільність мікроклімату при мінімальних енерговитратах.

Диспетчеризація та верхній рівень (SCADA/HMI)

Важливою частиною концепції є рівень візуалізації та архівації даних. Комп'ютерна інтеграція дозволяє виводити стан повітря на графічні панелі оператора (HMI) або в загальносистемні додатки. Це дає змогу бачити динаміку забруднення в розрізі годин, днів або місяців. З точки зору інженерії, це дозволяє проводити діагностику обладнання: якщо рівень забруднення не падає при максимальній роботі вентиляції, система автоматично генерує повідомлення про необхідність заміни фільтрів або несправність повітроводів.

Сучасна система автоматизації будується за модульним принципом. Це дозволяє легко додавати нові вузли контролю без переписування всієї логіки керування. Використання стандартних промислових протоколів забезпечує сумісність обладнання від різних виробників у межах однієї мережі. Таким чином, система моніторингу повітря стає частиною глобальної екосистеми управління будівлею, де дані про якість середовища можуть впливати на інші підсистеми, наприклад, на режим роботи опалення або освітлення [21].

Розглянемо технічну архітектуру системи з точки зору багаторівневої структури автоматизації, що є стандартом. Така система зазвичай будується на трьох ієрархічних рівнях: польовому (датчики), рівні керування (контролери) та верхньому рівні (диспетчеризація та аналітика).

На польовому рівні ключовим завданням є забезпечення точності первинних даних. Для моніторингу якості повітря використовуються цифрові сенсори, які взаємодіють з контролером через послідовні інтерфейси. Використання інтелектуальних датчиків (наприклад, серії Sensirion або Bosch) дозволяє отримувати вже відкалібровані значення концентрації часток PM2.5,

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		10

CO₂ та рівня TVOC. Це критично для АКІТ, оскільки цифрова передача сигналу на коротку відстань мінімізує вплив електромагнітних завад, що властиво аналоговим лініям 0-10 В або 4-20 мА в умовах насиченого обладнання приміщення.

Для реалізації алгоритмів автоматизації зазвичай обирають один із двох шляхів залежно від масштабу об'єкта:

Мікроконтролерні системи на базі ESP32 або STM32 ВІДНОСИТЬСЯ рішення для розподілених IoT-мереж. ESP32 є оптимальним завдяки наявності двох ядер, де одне ядро виділяється виключно під вимірювання та розрахунок керуючого впливу, а інше – під підтримку стеку мережеских протоколів. Це гарантує детермінованість системи (стабільність часу циклу керування), що є базовою вимогою в автоматизації.

Промислові логічні контролери (ПЛК). У великих офісних центрах використовуються компактні ПЛК з підтримкою протоколу Modbus RTU. Тут автоматизація реалізується через мови стандарту IEC 61131-3 (наприклад, Structured Text або Function Block Diagram). Основна перевага ПЛК – надійність та готовність до безпосереднього керування силовими силовими реле вентиляційних установок.

Обмін даними між локальним контролером та сервером (або шлюзом) зазвичай базується на протоколі MQTT. Він є стандартом у комп'ютерно-інтегрованих технологіях завдяки своїй легкості та моделі видавець-підписник, що дозволяє системі працювати в умовах нестабільного з'єднання. Для глибокої інтеграції в промислові системи управління будівлями (BMS) використовується Modbus TCP, який дозволяє передавати дані про якість повітря безпосередньо в SCADA-систему диспетчера. Це створює єдиний інформаційний простір, де показники датчиків впливають на роботу припливно-витяжної установки через частотні перетворювачі.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		11

Суть автоматизації полягає у замиканні контуру керування. Контролер обчислює необхідну інтенсивність вентиляції, використовуючи, наприклад, ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний). У разі виявлення зростання концентрації CO₂ понад встановлену уставку (наприклад, 800 ppm), система не просто вмикає вентилятор, а плавно нарощує його потужність, мінімізуючи акустичний шум та енерговитрати. Комп'ютерно-інтегрований підхід дозволяє також враховувати зовнішні фактори, такі як температура за вікном, щоб автоматично коригувати роботу рекуператора, запобігаючи втратам тепла при очищенні повітря.

1.2 Застосування, класифікація та методи створення автоматизованих систем відділеного моніторингу енергоспоживання. Перспективи та напрямки розвитку

Аналіз методів та технологій автоматизації моніторингу повітря базується на принципах метрологічного підтвердження даних, надійності каналів зв'язку та ефективності алгоритмів керування.

Основним методом автоматизованого контролю є безперервний інструментальний моніторинг із використанням селективних датчиків. Для вимірювання концентрації CO₂ найбільш технологічним методом є NDIR (недисперсійна інфрачервона спектроскопія), яка базується на поглинанні газом випромінювання певної довжини хвилі. На відміну від дешевих хімічних аналогів, цей метод забезпечує стабільність метрологічних характеристик протягом років. Для контролю дрібнодисперсного пилу (PM_{2.5}) застосовується метод лазерної фотометрії, де мікроконтролер обробляє інтенсивність розсіювання променя для підрахунку кількості та розміру часток у потоці повітря.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		12

Важливим технологічним етапом є цифрова фільтрація сигналів. Оскільки вихідні дані з сенсорів часто містять високочастотний шум та випадкові викиди, на рівні прошивки контролера впроваджуються алгоритми ковзного середнього або фільтри Калмана. Це дозволяє системі ігнорувати короточасні коливання (наприклад, потік повітря від дверей, що відчинилися) і реагувати лише на реальні тренди зміни якості середовища [23].

Технологічна база автоматизації розділяється на розподілені периферійні обчислення (Edge Computing) та централізоване керування. У сучасних системах вузол моніторингу самостійно виконує попередню обробку даних і приймає локальні рішення. Використання технології ШІМ (широтно-імпульсної модуляції) або аналогових виходів 0-10 В дозволяє контролеру плавно регулювати швидкість вентиляторів, що є значно ефективнішим за релейне керування «увімкнено/вимкнено».

У промислових та комерційних масштабах стандартом є використання програмованих логічних контролерів (ПЛК), які забезпечують відмовостійкість 24/7. Вони інтегруються з виконавчими механізмами через польові шини, що мінімізує кількість кабельних з'єднань та спрощує діагностику системи.

З позиції комп'ютерно-інтегрованих технологій, критично важливим є метод передачі даних. Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) є домінуючим у сфері IoT завдяки мінімальному споживанню трафіку та підтримці механізму QoS (Quality of Service), що гарантує доставку важливих повідомлень про критичне забруднення повітря.

Для інтеграції в складні інженерні мережі будівель (BMS) застосовується технологія BACnet або Modbus TCP. Це дозволяє системі моніторингу повітря ставати «прозорою» для інших підсистем: наприклад, система освітлення може автоматично вимикатися, якщо датчики CO₂ фіксують відсутність людей (за стабільним низьким рівнем концентрації газу), що демонструє синергію різних контурів автоматизації.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		13

Верхній рівень реалізується через SCADA-системи, де відбувається архівація даних у SQL-подібні бази. Це дає змогу проводити ретроспективний аналіз, виявляти несправності фільтрів за непрямими ознаками та прогнозувати витрати енергоресурсів на очищення повітря.

Застосування систем автоматизованого моніторингу та керування якістю повітря охоплює широкий спектр галузей, де параметри середовища безпосередньо впливають на технологічні процеси, безпеку персоналу або енергоефективність споруд. З позиції комп'ютерно-інтегрованих технологій, це перехід від локальних вимірювачів до мережових структур, що керують складним інженерним обладнанням.

Комерційна нерухомість та інтелектуальні будівлі (BMS). У сучасних офісних центрах системи моніторингу інтегруються в загальну систему управління будівлею (Building Management System). Основним завданням тут є підтримання низької концентрації CO₂, оскільки високий рівень вуглекислого газу (понад 1000 ppm) критично знижує когнітивні здібності працівників. Автоматизація дозволяє реалізувати зонування: контролер отримує дані з кожного окремого приміщення та за допомогою сервоприводів на повітряних заслінках (VAV-клапанів) спрямовує основний потік свіжого повітря саме туди, де зараз перебувають люди. Це не лише забезпечує комфорт, а й запобігає зайвій роботі потужних припливних установок на пусті зали, що є ключовим аспектом сучасного енергоменеджменту.

Промислові об'єкти та виробнича безпека. На підприємствах хімічної, деревообробної чи металургійної промисловості автоматизований моніторинг є частиною системи охорони праці (HSE). Тут акцент зміщується на виявлення специфічних забруднювачів: летких органічних сполук (VOC), озону, оксидів азоту або виробничого пилу. Комп'ютерно-інтегрована система в разі аварійного перевищення концентрації шкідливих газів автоматично активує системи димовидалення або аварійної вентиляції, передає сигнал тривоги на

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		14

пульт диспетчера та може блокувати роботу технологічного обладнання для запобігання вибухам або отруєнням.

У промислових умовах такі системи часто інтегруються з системами пожежної безпеки та АСУ ТП через протоколи Profibus або EtherCAT для забезпечення миттєвої реакції виконавчих механізмів.

Чисті приміщення та медичні заклади. У фармацевтичній галузі, мікроелектроніці та операційних блоках лікарень моніторинг повітря є критичним технологічним етапом. Тут системи автоматизації контролюють не лише склад газів, а й кількість дрібнодисперсних часток (PM2.5/PM10) та надлишковий тиск у приміщенні. Автоматика забезпечує роботу ламінарних потоків повітря та каскадну підтримку тиску, щоб забруднене повітря з коридорів не могло потрапити в «чисту зону». Будь-яке відхилення від норми фіксується контролером у реальному часі, що дозволяє миттєво зупинити конвеєр (наприклад, при виробництві процесорів), запобігаючи масовому браку продукції.

Житловий сектор та концепція Smart Home. На рівні споживчої автоматизації застосування таких систем фокусується на автономності та зручності користувача. Інтеграція датчиків якості повітря з побутовими очищувачами, зволожувачами та бризерами через Wi-Fi або ZigBee мережі дозволяє створити мікроклімат, що адаптується до звичок власника. Наприклад, система може автоматично підвищувати інтенсивність фільтрації повітря вночі або вмикати рекуперацію при підвищенні вологості, надсилаючи звіти про стан фільтрів та якість середовища на смартфон користувача.

Розвиток систем автоматизації моніторингу повітря сьогодні перебуває на етапі переходу від простої диджиталізації до інтелектуального автономного керування. Попри значні успіхи, інженери стикаються з низкою фундаментальних викликів, які одночасно формують перспективні напрями наукових та прикладних розробок.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		15

Технологічні виклики та системні обмеження. Одним із головних викликів залишається проблема деградації та селективності сенсорів. Більшість доступних напівпровідникових (МОХ) та електрохімічних датчиків схильні до так званого «дрейфу нуля», коли з часом їхні метрологічні характеристики змінюються під впливом вологості, температури або «отруєння» іншими газами. Для АКІТ це означає необхідність розробки складних алгоритмів автоматичного калібрування в процесі експлуатації (Self-calibration) без демонтажу обладнання. Крім того, існує проблема крос-чутливості, коли датчик на один газ помилково реагує на присутність іншого, що створює помилкові сигнали в контурі зворотного зв'язку.

Іншим критичним викликом є кібербезпека та цілісність даних. Оскільки системи моніторингу все частіше стають частиною критичної інфраструктури або систем життєзабезпечення Smart City, перехоплення керування або підміна даних датчиків може призвести до виходу з ладу дорогих HVAC-систем або створення небезпечних умов у приміщенні. Забезпечення захищеного обміну даними за протоколами TLS/SSL у малопотужних IoT-пристроях вимагає оптимізації обчислювальних ресурсів мікроконтролерів.

Майбутнє автоматизації лежить у площині предиктивного аналізу (Predictive Control). Замість того, щоб реагувати на факт забруднення, система майбутнього передбачатиме його на основі аналізу патернів поведінки користувачів та зовнішніх факторів. Використання методів машинного навчання (Machine Learning) на рівні контролера дозволяє будувати динамічні моделі об'єкта, враховуючи інерційність вентиляційних каналів. Це дозволяє почати інтенсивне провітрювання за 5–10 хвилин до очікуваного піку концентрації CO₂ (наприклад, перед початком наради), що забезпечує ідеальну якість повітря без різких стрибків енергоспоживання.

Граничні обчислення та цифрові двійники. Перспективним напрямом є впровадження Edge Computing – перенесення аналітичних потужностей

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		16

безпосередньо в сенсорні вузли. Це мінімізує затримки та знижує навантаження на мережу, дозволяючи системі залишатися працездатною навіть за відсутності зв'язку з центральним сервером. Водночас інтеграція з технологією Digital Twins дає змогу створювати віртуальні копії будівель, де моделюються складні повітряні потоки за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки (CFD). Це дозволяє системі автоматизації розуміти, де саме в кімнаті утворюються зони застою повітря, і коригувати роботу дефлекторів для рівномірного очищення всього об'єму.

Енергетична автономність та нові матеріали. Розвиток технологій Energy Harvesting (збору енергії з навколишнього середовища, наприклад, світла чи вібрацій) обіцяє створення повністю автономних бездротових датчиків, які не потребують заміни батарей протягом усього життєвого циклу (10+ років). У поєднанні з новими типами сенсорів на основі наноматеріалів та фотоніки, це зробить системи моніторингу повітря такими ж непомітними та всюдисущими, як електричні розетки сьогодні.

1.3 Опис технологічного процесу автоматизації моніторингу якості повітря кімнати

Технологічний процес автоматизованого моніторингу якості повітря в приміщенні площею 20 м² являє собою безперервний, циклічний комплекс операцій із вимірювання, первинної обробки, передачі та аналізу параметрів газоповітряного середовища в реальному часі. Оскільки площа об'єкта автоматизації є порівняно невеликою, цей процес базується на принципі локалізованого точкового контролю, де всі вимірювальні компоненти зосереджені в одному фізичному модулі.

Початковою стадією процесу є природна дифузія повітряних мас кімнати до чутливих елементів датчиків. Для забезпечення максимальної

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		17

репрезентативності даних вимірювальний блок позиціонують на висоті від 1 до 1,5 метра від підлоги (рівень дихання людини, яка сидить або спить) та на відстані від вікон, дверей і систем опалення, щоб уникнути викривлення показників через прямі протяги чи теплові потоки. Первинні перетворювачі безперервно трансформують фізико-хімічні властивості компонентів повітря (концентрацію вуглекислого газу CO₂, дрібнодисперсного пилу PM2.5/PM10, а також температуру та відносну вологість) у відповідні електричні сигнали.

Наступним етапом є автоматичне квантування та оцифрування отриманих сигналів центральним мікроконтролером із визначеною частотою дискретизації (зазвичай один раз на 2-5 секунд). На рівні вбудованого програмного забезпечення нижнього рівня виконується первинна цифрова обробка інформації, де застосовуються математичні алгоритми фільтрації (наприклад, метод рухомого середнього) для відсікання випадкових сплесків та мережевих перешкод [35].

Очищений та сформований пакет даних автоматично кодується у бездротовий мережевий протокол (наприклад, MQTT) і через локальну мережу Wi-Fi передається на верхній рівень системи. Тут інформація автоматично реєструється у базі даних часових рядів для накопичення статистики. Паралельно з цим програмне забезпечення верхнього рівня виконує алгоритм логічного порівняння поточних значень із нормативними гранично допустимими концентраціями (ГДК). У разі фіксації перевищення хоча б одного з параметрів, система автоматично ініціює алгоритм тривоги (аларму), що включає світлову індикацію на пристрої та відправку екстреного пуш-повідомлення користувачеві.

Порівняння архітектурних варіантів побудови системи

Для реалізації описаного процесу передачі та обробки даних можна використати локальну або хмарну модель. Їхнє порівняння наведено у таблиці 1.1.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		18

Таблиця 1.1 - Порівняння архітектурних варіантів побудови системи

Критерій порівняння	Локальна архітектура (на базі Home Assistant / Node-RED)	Хмарна архітектура (на базі Blynk / AWS / ThingSpeak)
Залежність від інтернету	Автономна робота у внутрішній мережі кімнати; зовнішній інтернет потрібен лише для віддаленого доступу.	Повна залежність; у разі зникнення зв'язку з сервером процес моніторингу та збереження даних переривається.
Конфіденційність даних	Максимальна, вся інформація про перебування людей у кімнаті залишається на локальному носії.	Нижча, дані про екологічний стан приміщення передаються та зберігаються на сторонніх серверах.
Складність розгортання	Вища, потребує налаштування та підтримки власного локального сервера (наприклад, Raspberry Pi).	Низька, розробник використовує готові хмарні сервіси та готові мобільні застосунки через API.
Масштабованість	Обмежена обчислювальною потужністю та місткістю накопичувача локального заліза.	Практично безмежна, легко додавати нові кімнати чи датчики без модернізації серверної частини.

Застосування автоматизованого підходу для контролю кімнати площею 20 м² має свої плюси та мінуси, які варто враховувати при проектуванні.

Переваги системи:

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		19

- повне виключення людського фактора з процесу контролю (користувачу не потрібно самостійно згадувати про вимірювання);
- можливість виявлення прихованих загроз, які людина не здатна відчувати органолептично, наприклад, небезпечні концентрації безбарвного газу CO₂ або мікроскопічного пилу PM2.5;
- накопичення точної статистичної бази, що дозволяє проаналізувати динаміку погіршення повітря залежно від часу доби, сезону чи кількості людей у кімнаті;
- висока швидкість реакції системи на зміну параметрів середовища та миттєве інформування через цифрові канали зв'язку.

Недоліки системи:

- енергозалежність апаратної частини, що вимагає постійного підключення до електромережі або використання акумуляторних буферів;
- проблема дрейфу та деградації чутливих елементів хімічних та оптичних сенсорів, через що вони потребують періодичного калібрування (раз на кілька місяців/рік);
- зональне обмеження, коли один вимірювальний вузол у кутку кімнати може показувати занижений рівень CO₂ порівняно із зоною безпосередньо біля робочого столу або ліжка, якщо в кімнаті слабка природна конвекція повітря.

1.4 Опис процесу хмарного моніторингу

Хмарна архітектура дозволяє уникнути рутинного налаштування локальних серверів і баз даних вручну, натомість фокусуючи увагу на інтеграції пристроїв, обробці даних у хмарі та створенні зручних мобільних чи веб-інтерфейсів для користувача. За умов хмарної архітектури технологічний процес зазнає змін на етапі передачі та обробки інформації. Локальний мікроконтролерний модуль, встановлений у кімнаті площею 20 м², після збору

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		20

та первинної фільтрації даних із датчиків, виступає в ролі IoT-шлюзу. За допомогою вбудованого Wi-Fi інкапсулює корисне навантаження (значення температури, вологості, CO₂ та пилу) у легковаговий формат даних JSON. Цей пакет зашифрованим каналом відправляє безпосередньо на віддалений хмарний сервер через інтернет-роутер.

У хмарі розгорнуто брокер повідомлень або спеціалізований IoT-сервіс, який автентифікує пристрій за унікальним токеном (API-ключем) та приймає дані. Хмарна платформа автоматично бере на себе функції збереження інформації у хмарній базі даних, структурування часових рядів та надання доступу до них. Верхній рівень системи (інтерфейс користувача) повністю функціонує у хмарі: мобільний застосунок або веб-сторінка робить запити до хмарного API для динамічного оновлення віджетів, графіків та індикаторів на екрані смартфона користувача, де б той не знаходився. Логіка сповіщень також працює на стороні хмари: при фіксації критичних значень хмарний сервер сам генерує триггер і через Webhook надсилає команду на шлюз Telegram-бота або сервіс пуш-повідомлень. Для реалізації автоматизованої системи важливо обрати правильний хмарний сервіс. У таблиці наведено порівняння трьох найбільш популярних платформ, які можуть використовуватись для даної розробки. У таблиця 2.2 подано порівняння хмарних платформ для реалізації розроблюваної системи моніторингу якості повітря.

Таблиця 1.2 - Порівняння хмарних платформ

Критерій порівняння	Blynk IoT	ThingSpeak	AWS IoT Core (Amazon)
Основне призначення	Швидке створення мобільних застосунків для керування та моніторингу.	Науковий та інженерний аналіз даних, інтеграція з MATLAB.	Промислова хмарна інфраструктура для масштабних IoT-систем.

Кінець таблиці 1.2

Складність освоєння	Дуже низька, інтерфейс створюється методом Drag-and-Drop у смартфоні.	Середня, орієнтована на роботу з графіками та математичну обробку.	Висока, потребує знань хмарної архітектури та налаштування політик безпеки.
Візуалізація даних	Чудова мобільна ергономіка (віджети, перемикачі, світлодіоди).	Базова (переважно лінійні графіки та числові табло).	Потребує підключення додаткових сервісів (наприклад, AWS QuickSight).
Аналітика та обчислення	Мінімальна (прості логічні правила типу "якщо-то").	Потужна завдяки прямій підтримці скриптів MATLAB у хмарі.	Безмежна за рахунок інтеграції з хмарними обчисленнями (AWS Lambda).

Використання готової хмарної платформи має чітко окреслені плюси та мінуси в контексті автоматизації житлового простору.

Переваги хмарного підходу:

- доступ до даних про якість повітря в кімнаті з будь-якої точки світу, де є мобільний інтернет, без необхідності купувати статичну IP-адресу чи налаштовувати VPN;
- відсутність потреби у придбанні та постійному утриманні домашнього сервера (наприклад, Raspberry Pi), який може вийти з ладу через вимкнення світла;
- забезпечення безпеки, оскільки великі хмарні провайдери забезпечують шифрування даних та захист від кібератак без залучення розробника;
- наявність зручних інструментів розробки (SDK) для мікроконтролерів, що значно скорочує час на написання коду для зв'язку пристрою з сервером.

Недоліки хмарного підходу:

- повна залежність працездатності системи від наявності інтернет-з'єднання (якщо провайдер має збій, моніторинг зупиняється);
- обмеження безкоштовних тарифних планів на кількість повідомлень за хвилину або на час зберігання історії, наприклад, історія зберігається лише 30 днів;
- ризик закриття або зміни умов використання сервісу власником платформи, що може вимагати повної переробки ПЗ нижнього рівня.

1.5 Висновки до першого розділу. Постановка задачі.

У першому розділі кваліфікаційної роботи виконано всебічний аналітичний огляд сучасного стану розвитку та методів побудови автоматизованих систем контролю параметрів повітряного середовища, а також обґрунтовано доцільність розробки спеціалізованої системи для умов житлового приміщення площею 20 м².

На основі проведеного аналізу медико-екологічних факторів визначено перелік ключових технологічних параметрів, що підлягають безперервному автоматизованому моніторингу: концентрація вуглекислого газу (CO₂), рівень дрібнодисперсного пилу (PM2.5 та PM10), температура та відносна вологість повітря. Встановлено, що для обмеженого простору площею 20 м² найбільш раціональним є застосування локалізованого точкового методу вимірювання, оскільки природна конвекція за відсутності потужних джерел забруднення забезпечує умовно рівномірний розподіл повітряних мас у вказаному об'ємі.

У результаті критичного аналізу існуючих комерційних та аматорських технічних рішень виявлено їхні основні недоліки, серед яких висока вартість, закритість програмного коду та жорстка прив'язка до локальної інфраструктури. Це дозволило обґрунтувати необхідність проектування

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		23

індивідуальної комп'ютерно-інтегрованої системи, адаптованої під конкретні завдання користувача.

Шляхом порівняльного аналізу різних типів системної архітектури було доведено техніко-економічну перевагу хмарної моделі побудови системи над локальною. Використання віддалених хмарних серверів дозволяє значно знизити апаратні вимоги до кінцевого пристрою, забезпечує надійне збереження великих масивів статистичних даних (логів) без залучення локальних накопичувачів, а також гарантує користувачеві глобальний доступ до інформації про стан повітря з будь-якої точки світу через мобільні чи веб-інтерфейси.

Також у першому розділі сформульовано чітке технічне завдання на проектування системи. Визначено, що майбутній комплекс повинен мати трирівневу структуру:

- нижній (апаратний) рівень для збору та первинної фільтрації сигналів сенсорів;
- мережевий рівень для бездротової передачі пакетів даних через Wi-Fi за допомогою легковагових протоколів;
- верхній (хмарний) рівень для інтеграції, архівації даних, візуалізації трендів та автоматичного сповіщення користувача про виникнення аварійних або небезпечних станів мікроклімату.

Отримані результати аналізу є теоретичним та нормативним підґрунтям для подальшого апаратного та програмного проектування системи у наступних розділах роботи.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті для забезпечення безперервного контролю екологічних параметрів середовища та своєчасного інформування користувача про стан мікроклімату.

Визначено такі завдання:

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		24

- провести аналіз нормативних показників якості повітря в приміщеннях та існуючих засобів і методів автоматизованого контролю складу повітряної маси;
- розробити структурну схему автоматизованої системи моніторингу, визначивши взаємодію між її апаратними та програмними компонентами;
- вибрати та обґрунтувати елементну базу системи, включаючи первинні вимірювальні перетворювачі та центральний мікроконтролерний модуль;
- розробити принципову електричну схему пристрою автоматичного збору даних та спроектувати його прототип;
- створити програмне забезпечення нижнього рівня (прошивку мікроконтролера) для автоматичного опитування сенсорів, цифрової фільтрації сигналів та первинної обробки інформації;
- реалізувати передачу вимірюваних даних на верхній рівень;
- здійснити розробку інтерфейсу користувача.

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		25

2 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

2.1 Принцип роботи та функції автоматизованої системи моніторингу якості повітря

Функціонування розробленої автоматизованої системи базується на принципі безперервного, циклічного збору, обробки та передачі інформації від первинних вимірювальних перетворювачів до хмарної IoT-платформи. Процес починається безпосередньо у просторі кімнати площею 20 м², де за рахунок природної конвекції повітряні маси постійно взаємодіють із сенсорами пристрою. Оскільки площа приміщення є порівняно невеликою, одного централізовано розгорнутого вимірювального вузла цілком достатньо для отримання репрезентативної та адекватної картини стану мікроклімату.

Первинні датчики здійснюють безперервне перетворення фізико-хімічних параметрів середовища: концентрації молекул CO₂, наявності твердих мікрочастинок пилу, температури та відносної вологості у відповідні електричні сигнали, а саме напругу, опір або цифрові послідовності. Центральний мікроконтролер системи через чітко визначені інтервали часу, наприклад, кожні 5 секунд опитує свої периферійні інтерфейси, зчитуючи отримані значення.

Зчитані дані проходять первинну програмну обробку безпосередньо на платі пристрою за допомогою алгоритмів цифрової фільтрації (метод рухомого середнього), що дозволяє відсікти випадкові апаратні шуми та коливання повітря від випадкових рухів у кімнаті. Після цього мікроконтролер пакує очищені дані у легковаговий текстовий формат JSON і за допомогою вбудованого Wi-Fi модуля через локальний роутер відправляє цей пакет на віддалений хмарний сервер за допомогою енергоефективного протоколу MQTT або HTTP POST.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		26

Хмарна платформа приймає інформаційний пакет, автентифікує пристрій за унікальним токеном і розподіляє дані за двома паралельними напрямками. З одного боку, дані записуються у хмарну базу даних часових рядів для формування історії та статистики. З іншого боку, поточні значення миттєво транслюються на підключений мобільний застосунок або веб-панель користувача. Одночасно з цим у хмарі працює логічний модуль порівняння: якщо аналізовані параметри перевищують заздалегідь встановлені безпечні межі санітарних норм, хмарний сервер автоматично ініціює алгоритм тривоги та надсилає екстрене пуш-повідомлення на смартфон користувача.

Для забезпечення повноцінного контролю мікроклімату в кімнаті розроблена комп'ютерно-інтегрована система виконує комплекс взаємопов'язаних функцій, які забезпечують автоматизацію всього інформаційного ланцюжка від вимірювання до інформування. До таких функцій входять:

- безперервного вимірювання та первинного збору даних;
- цифрової обробки та фільтрації сигналів;
- бездротової телеметрії;
- архівації та структурування даних;
- візуалізації та графічного відображення;
- автоматичного логічного контролю та аварійного сповіщення.

Функція безперервного вимірювання та первинного збору даних забезпечує цілодобове отримання актуальної інформації про рівень вуглекислого газу, концентрацію дрібнодисперсного пилу PM2.5/PM10, температуру та вологість безпосередньо з повітряного простору кімнати за допомогою набору сенсорів.

Функція цифрової обробки та фільтрації сигналів реалізується на рівні вбудованого програмного забезпечення мікроконтролера, підвищуючи точність

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		27

і стабільність вимірювань шляхом математичного відсікання помилкових сплесків та перешкод електромережі.

Функція бездротової телеметрії (передачі даних) відповідає за надійне транспортування сформованих пакетів даних від локального пристрою до хмарного сховища через бездротову мережу Wi-Fi за допомогою оптимізованих для інтернет-речей протоколів зв'язку.

Функція архівації та структурування даних виконується на стороні хмари, забезпечуючи довготривале накопичення статистичної інформації, автоматичне ведення логів роботи системи та збереження історії параметрів без залучення локальних накопичувачів пам'яті.

Функція візуалізації та графічного відображення (НМІ) надає користувачеві можливість у зручній та інтуїтивно зрозумілій формі (через віджети, графіки та індикатори на екрані смартфона чи ПК) моніторити поточний стан та динаміку змін якості повітря з будь-якої точки світу.

Функція автоматичного логічного контролю та аварійного сповіщення (алармінгу) полягає у постійному порівнянні поточних показників із гранично допустимими концентраціями та миттєвому генеруванні триггерів для відправки текстових або звукових повідомлень у месенджери, коли якість повітря стає небезпечною для здоров'я і кімнату необхідно провітрити (рисунок 2.1).

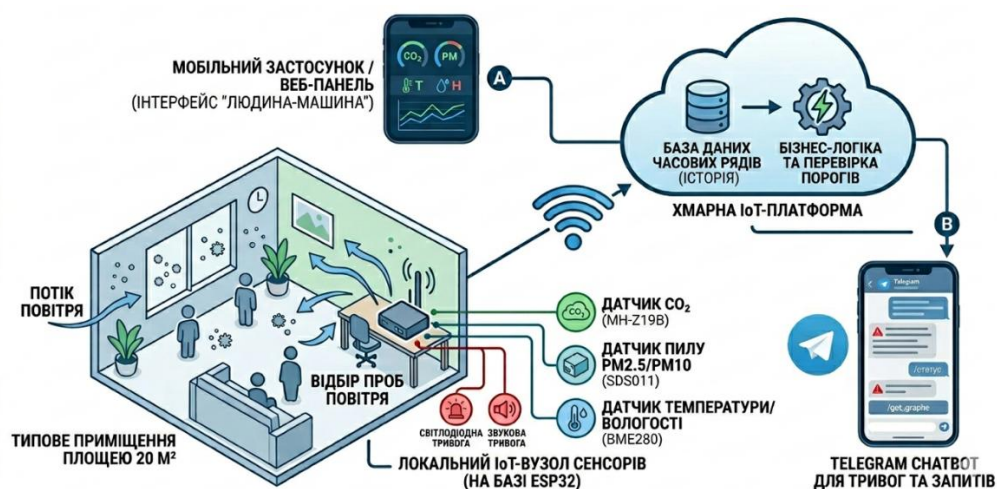


Рисунок 2.1 – Автоматизована система моніторингу якості повітря

2.2 Розробка структурної схеми роботи автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті

Опис структурної схеми є важливою частиною другого розділу кваліфікаційної роботи, оскільки вона показує архітектуру такої системи та те, як інформація рухається від фізичного середовища (повітря кімнати) до кінцевого користувача через хмару.

Оскільки було обрано трирівневу комп'ютерно-інтегровану архітектуру з хмарною орієнтацією, структурна схема поділяється на три чіткі рівні:

- нижній рівень або так званий польовий рівень, на якому здійснюється збір даних, куди входить апаратна основа системи, яка фізично знаходиться у кімнаті площею 20 м²;
- мережевий рівень або рівень комунікації;
- верхній або хмарний рівень, що забезпечує представлення даних.

Нижній рівень або апаратна основа системи складається із основних блоків:

- блок первинних вимірювальних перетворювачів (Датчики): Група сенсорів, що взаємодіють із повітрям. Сюди входять датчик CO₂,наприклад, MH-Z19B, датчик пилу PM2.5, наприклад, SDS011 та цифровий датчик температури і вологості, наприклад, BME280. Вони підключені до мікроконтролера через цифрові інтерфейси UART, I2C або GPIO;
- центральний обчислювальний блок, тобто мікроконтролер, що є основою та фундаментом апаратної частини, наприклад, ESP32. Мікроконтролер циклічно опитує датчики, обробляє сигнали та керує локальною периферією;
- блок локальної індикації та сигналізації складається із підключених до мікроконтролера світлодіодів (РГБ-діод) або невеликого дисплею (OLED/LCD)

та п'єзодинамік (бузер) для миттєвого візуального й звукового сповіщення людей у кімнаті, якщо рівень CO₂ перевищив норму;

- блок живлення, куди входить перетворювач напруги, наприклад, з 220V змінного струму в 5V постійного струму) який забезпечує стабільну роботу всієї електроніки.

Мережевий рівень або рівень комунікації забезпечує бездротовий міст між локальним пристроєм у кімнаті та глобальною мережею.

- модуль бездротового зв'язку включає вбудований у мікроконтролер Wi-Fi приймач/передавач (стандарт 802.11 b/g/n);

- локальна точка доступу, що працює завдяки домашньому Wi-Fi роутеру, який приймає пакети даних від пристрою та перенаправляє їх через канали інтернет-провайдера на сервери глобальної мережі (WAN);

- протокол передачі даних містить програмну мову спілкування, наприклад легковаговий протокол MQTT, що працює за принципом публікація чи підписка або HTTP REST API, де дані запаковані у формат JSON;

Верхній або хмарний рівень є програмним комплексом, що розгорнутий на видалених серверах, наприклад, хмара Blynk, ThingSpeak або AWS), який відповідає за інтелектуальну обробку інформації. Даний рівень містить такі складові:

- IoT-сервер або брокер, що приймає вхідні потоки даних від мікроконтролера, перевіряє безпеку (ключі доступу) та розподіляє інформацію всередині хмари;

- базу даних часових рядів, що є хмарним сховищем, куди автоматично записується кожне вимірювання із міткою точного часу для ведення логів та історії;

- модуль бізнес-логіки та безпекових сповіщень (алармів), що складається із хмарного програмного коду, що аналізує дані. Якщо значення

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		30

CO₂ перевищує санітарну норму, наприклад, > 1000 ppm, цей модуль генерує команду на надсилання зовнішнього сповіщення;

- інтерфейс користувача, що подається у формі мобільного застосунку на смартфоні або веб-сторінка в браузері, що підтягує дані з хмари та відображає їх користувачу у вигляді красивих віджетів, графіків та індикаторів.

- зовнішні сервіси сповіщень здійснюються через Telegram API або Push-сервіси, які доставляють повідомлення про забруднення на екран смартфона.

Для структурної схеми важливо показати, якими саме інтерфейсами та протоколами пов'язані блоки між собою. Порівняльна таблиця взаємодії компонентів за типами зв'язку показана у таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Порівняння взаємодії компонентів за типами зв'язку

Звідки йде сигнал (Джерело)	Куди йде сигнал (Приймач)	Тип зв'язку / Інтерфейс	Що передається (Тип даних)
Датчики повітря (CO ₂ , пил, t°C)	Мікроконтролер (ESP32)	Локальні шини (I2C, UART, GPIO)	Слабкострумові електричні цифрові/аналогові сигнали
Мікроконтролер (ESP32)	Локальні індикатори (LED/Бuzzer)	Прямі виходи GPIO (ШИМ)	Сигнали увімкнення/вимкнення або зміни кольору
Мікроконтролер (ESP32)	Wi-Fi Роутер	Бездротовий зв'язок Wi-Fi (2.4 GHz)	Пакети даних у форматі JSON

Кінець таблиці 2.1

Wi-Fi Роутер	Хмарна IoT-платформа	Глобальний Інтернет (Протокол MQTT/HTTP)	Зашифрований цифровий трафік
Хмарна IoT-платформа	Смартфон користувача (Застосунок)	Протокол WebSockets / MQTT / API	Дані для віджетів та графіків у реальному часі
Хмарна IoT-платформа	Telegram-бот / Push-сервіс	HTTPS Webhook	Текстові аварійні сповіщення

Перевагами такої структури є:

- висока модульність, тобто якщо зламається один датчик, його можна легко замінити, не змінюючи схему інших компонентів та хмарний код;
- максимальне апаратне спрощення локального блоку, що зменшує його габарити, енергоспоживання та кінцеву вартість;
- незалежність інтерфейсу, тобто користувач може оновити дизайн мобільного застосунку у хмарі, і для цього не потрібно перепрошивати сам пристрій у кімнаті.

До недоліків такої структури можна віднести наявність домашнього роутера та відповідно інтернет-провайдера, тобто якщо зв'язок обірветься, верхній рівень тимчасово перестане працювати. Також локальний пристрій без зв'язку з хмарою не має власної великої пам'яті, тому дані за час відсутності інтернету можуть бути втрачені, якщо не передбачити буферну SD-карту (рисунок 2.2).

Опис розробленої структурної схеми відображає ієрархічну архітектуру автоматизованої системи та рух інформаційних потоків від фізичного середовища до кінцевого користувача. Схема логічно поділена на чотири функціональні блоки, що взаємодіють між собою в режимі реального часу.

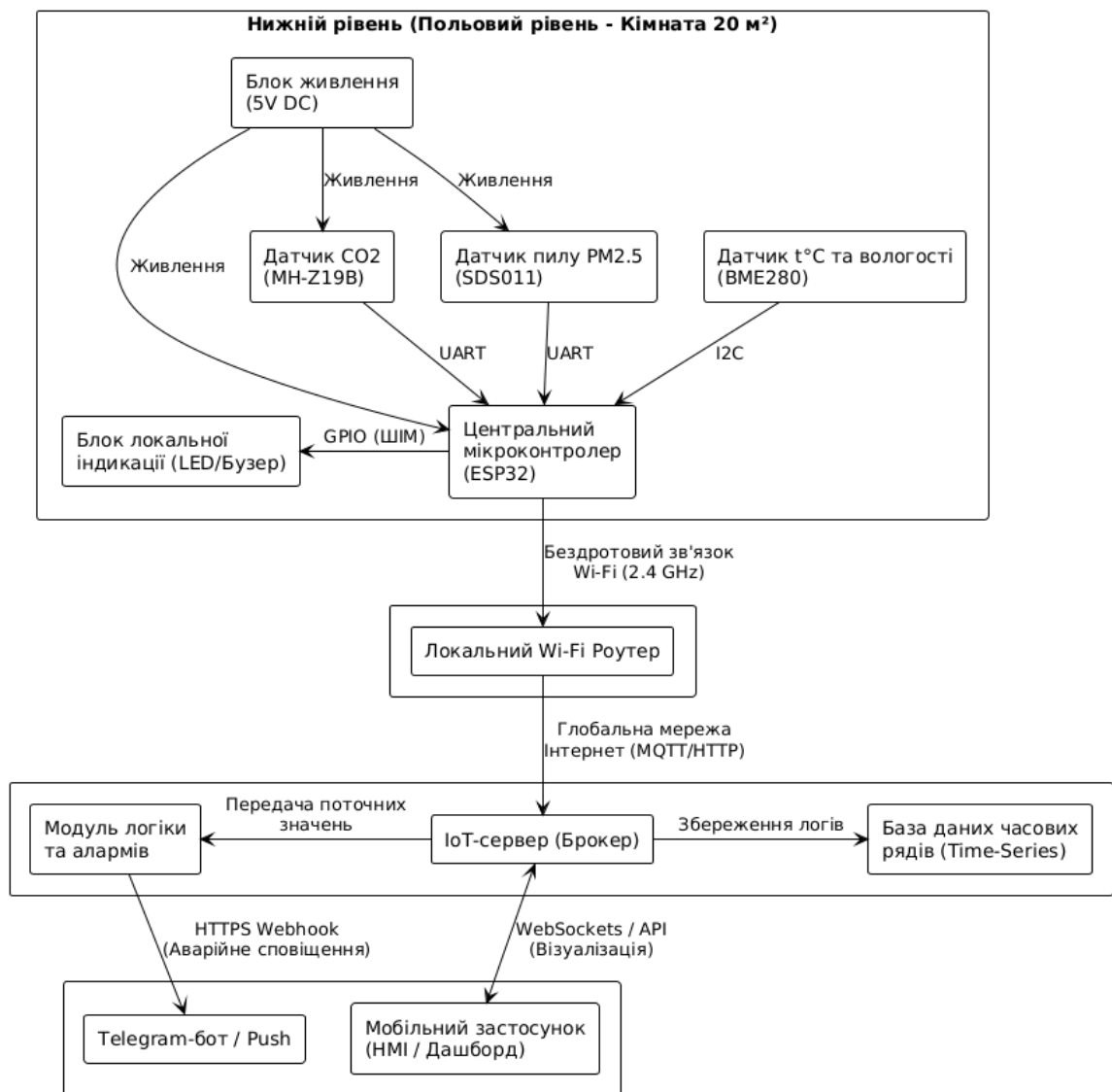


Рисунок 2.2 – Структурна схема автоматизованої системи моніторингу якості повітря

На нижньому рівні відбувається безпосередня взаємодія системи з повітряним середовищем кімнати. Блок живлення забезпечує стабільною напругою постійного струму всі електронні компоненти. Первинні перетворювачі, а саме датчик вуглекислого газу, датчик дрібнодисперсного пилу та сенсор температури й вологості, здійснюють безперервний вимір екологічних показників. Отримані дані передаються через локальні комунікаційні шини (UART та I2C) до центрального обчислювального ядра –

мікроконтролера. Мікроконтролер виконує первинну цифрову обробку масивів даних та за потреби формує керуючі сигнали на блок локальної індикації (світлодіоди та звуковий випромінювач) для миттєвого попередження осіб, які перебувають у приміщенні.

Мережевий рівень виконує функцію транзитного інформаційного мосту. Мікроконтролер, використовуючи свій апаратний бездротовий інтерфейс, підключається до локального Wi-Fi роутера. Далі роутер маршрутизує зібрані пакети даних через глобальну мережу Інтернет безпосередньо до віддалених серверів, використовуючи захищені протоколи передачі для систем інтернет-речей.

Ядром хмарної архітектури є IoT-сервер або так званий брокер повідомлень, який приймає вхідний трафік від кімнатного пристрою. Всередині хмари інформаційні потоки автоматично розділяються на два незалежні процеси. Перший потік спрямовується до спеціалізованої бази даних часових рядів для довгострокового збереження телеметрії та формування історичної статистики вимірювань. Другий потік надходить до програмного модуля логіки та алармів, де хмарні алгоритми безперервно порівнюють поточні показники повітря із закладеними санітарними порогам.

Блок інтерфейсу користувача та сповіщень забезпечує фінальну візуалізацію даних та комунікацію з людиною. Хмарний брокер через відкриті API-інтерфейси безперервно оновлює інформацію в мобільному застосунку користувача, дозволяючи візуально оцінювати поточну якість повітря через графічні віджети. Паралельно, якщо модуль логіки фіксує критичне погіршення мікроклімату, він генерує міжсерверний запит, який миттєво активує підсистему екстреного сповіщення. У результаті користувач отримує аварійне текстове повідомлення через месенджер, наприклад, Telegram або систему системних пуш-повідомлень на свій смартфон.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		34

2.3 Обґрунтування вибору компонентів для автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті

Для забезпечення надійного моніторингу параметрів мікроклімату в житловому чи офісному приміщенні площею 20 квадратних метрів достатньо одного централізованого вимірювального вузла. Завдяки природній циркуляції повітря в такому об'ємі, розгортання кількох датчиків по різних кутках кімнати є економічно та технічно недоцільним. Усі необхідні чутливі елементи та обчислювальна база монтуються в єдиному компактному корпусі, який розміщується в зоні дихання людини на столі або стіні.

Головним обчислювальним ядром та комунікаційним мостом пристрою виступає мікроконтролер. Найкращим вибором для цього завдання є плата розробки на базі чипа ESP32. Цей контролер має високу тактову частоту, достатню кількість пам'яті для реалізації алгоритмів фільтрації та, що найважливіше, вбудований апаратний модуль Wi-Fi для прямої передачі даних на хмарний сервер без використання додаткових мережевих екранів (шилдів).

Вимірювальний блок системи формується з трьох спеціалізованих сенсорів. Для точної фіксації концентрації вуглекислого газу (CO₂) застосовується оптичний інфрачервоний датчик типу NDIR, який не реагує на інші гази в приміщенні та має тривалий термін служби. Для контролю концентрації небезпечного дрібнодисперсного пилу фракцій PM2.5 та PM10 використовується лазерний сенсор, що працює за принципом розсіювання світла на легких мікрочастинках. Кліматичні показники температура та відносна вологість зчитуються за допомогою високоточного цифрового перетворювача, який передає вже відкалібровані дані по шині I2C.

Периферійна частина системи відповідає за живлення та базову взаємодію з людиною в кімнаті. До неї належить мережевий адаптер змінного струму, який схожий на зарядний пристрій смартфона та перетворює 220 В на стабільні 5 В постійного струму для живлення електроніки. Для візуалізації

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		35

аварійних станів безпосередньо на пристрої передбачено встановлення RGB-світлодіода для зміни кольору залежно від якості повітря та п'єзоелектричного зумера для подачі звукового сигналу у разі критичного перевищення норм.

Нижче наведено таблицю з переліком елементної бази системи, конкретними моделями компонентів та необхідною кількістю для забезпечення повноцінного моніторингу кімнати заявленої площі (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 - Специфікація елементів апаратної частини системи

Назва елемента	Призначення в системі	Рекомендована модель / Тип	Кількість (для кімнати 20 м ²)
Мікроконтролер	Збір даних, їх первинна обробка та відправка пакетів через Wi-Fi	ESP32 (модуль NodeMCU або WROOM-32)	1 шт.
Датчик вуглекислого газу	Вимірювання концентрації CO ₂ оптичним методом NDIR	MH-Z19B (або Sensirion SCD40)	1 шт.
Датчик пилу	Фіксація твердих частинок PM2.5 та PM10 у повітрі	Nova Fitness SDS011	1 шт.
Датчик мікроклімату	Вимірювання температури та відносної вологості середовища	BME280 (або DHT22)	1 шт.
Блок індикації (Світло)	Візуалізація поточного статусу повітря (зелений/жовтий/червоний)	Адресний RGB-світлодіод WS2812B	1 шт.

Кінець таблиці 2.2

Блок індикації (Звук)	Подача тривожного акустичного сигналу	Активний п'єзовипромінювач (Buzzer 5V)	1 шт.
Блок живлення	Забезпечення компонентів напругою 5В	Мережевий адаптер 220V/5V (від 1.5А до 2А)	1 шт.
Монтажна плата / Кабелі	Електричне з'єднання всіх компонентів між собою	Макетна плата (Breadboard) або друкована плата, набір дротів DuPont	1 компл.
Корпус	Захист електроніки та забезпечення правильної конвекції	Пластиковий корпус (надрукований на 3D-принтері)	1 шт.

Таким чином для приміщення площею 20 м² використовується єдиний компактний вимірювальний модуль. Завдяки природній циркуляції повітря розгортати додаткові вузли немає сенсу. Уся електроніка розміщується в одному вентилярованому корпусі на рівні дихання людини.

Апаратна частина системи логічно поділяється на три ключові блоки:

- керуючий та комунікаційний центр, що базується на мікроконтролері ESP32. Він відповідає за опитування датчиків, первинну обробку даних та їхню бездротову передачу в хмару через вбудований Wi-Fi;
- сенсорний блок, який складається з трьох спеціалізованих датчиків, які контролюють головні маркери мікроклімату: рівень вуглекислого газу CO₂ (оптичний сенсор MH-Z19B), концентрацію мікропилу PM_{2.5}/PM₁₀ (лазерний сенсор SDS011), температуру та відносну вологість (цифровий модуль BME280);

– блок живлення та локальної сигналізації, що включає стандартний мережевий адаптер на 5В (постійного струму), а також RGB-світлодіод і п'єзодинамік. Вони потрібні для того, щоб пристрій міг локально блимати або подавати звуковий сигнал при небезпечному рівні забруднення повітря, навіть якщо користувач не дивиться у смартфон.

Такий набір компонентів є оптимальним інженерним рішенням, оскільки він мінімізує габарити пристрою, має доступну вартість елементної бази та повністю задовольняє вимоги до технічного завдання кваліфікаційної роботи.

2.3.1 Мікроконтролер ESP32

Модуль ESP32 один із найпопулярніших мікроконтролерів для Інтернету речей (IoT) та вбудованих систем, відомий своїми потужними обчислювальними можливостями, бездротовим підключенням та низьким енергоспоживанням (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд мікроконтролера ESP32

Плата ESP32 призначена для енергоефективних додатків Інтернету речей (IoT), що робить її ідеальним вибором для розумних пристроїв, автоматизації та бездротового зв'язку та об'єднує всі необхідні компоненти, такі як система

управління живленням, USB-інтерфейс та роз'єми GPIO, що спрощує розробку та впровадження.

ESP32 оснащений двоядерним процесором Xtensa LX6, що працює на частоті до 240 МГц, що забезпечує ефективну багатозадачність та обробку в режимі реального часу. Ця архітектура дозволяє мікроконтролеру виконувати кілька операцій одночасно, що робить його ідеальним для робототехніки, автоматизації та додатків Інтернету речей (IoT). Він включає апаратне прискорення криптографічних функцій та операцій з плаваючою комою, підвищуючи безпеку та обчислювальну ефективність. ESP32 також підтримує динамічне управління енергоспоживанням, зменшуючи споживання енергії в пристроях, що працюють від батареї.

Завдяки вбудованому Wi-Fi 802.11 b/g/n ESP32 забезпечує безперебійне підключення до Інтернету для хмарних додатків, віддаленого моніторингу та автоматизації розумного будинку. Він також підтримує Bluetooth 4.2, включаючи як класичний Bluetooth, так і Bluetooth Low Energy (BLE), що забезпечує ефективний обмін даними з мобільними пристроями, портативними пристроями та периферійним обладнанням. ESP32 може одночасно працювати з Wi-Fi та Bluetooth, що робить його ідеальним для застосувань, які вимагають декількох бездротових з'єднань, наприклад, промислова автоматизація та системи медичного моніторингу.

ESP32 пропонує широкі можливості введення-виведення загального призначення (GPIO), що дозволяє легко інтегрувати датчики, дисплеї та виконавчі механізми. Він включає аналого-цифрове (ADC) та цифро-аналогове (DAC) перетворення, що забезпечує точний збір даних датчиків та обробку сигналів.

Додаткові функції, такі як імпульсно-широтно-модульована (PWM) для керування двигунами, ємнісне сенсорне зчитування для інтерактивних інтерфейсів та численні протоколи зв'язку, наприклад SPI, I2C та UART,

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		39

роблять його універсальним мікроконтролером для різноманітних вбудованих застосувань.

Безпека є ключовою перевагою ESP32, що робить його надійним вибором для додатків Інтернету речей (IoT). Він має функцію безпечного завантаження, яка гарантує виконання лише автентифікованого прошивання, запобігаючи несанкціонованим модифікаціям.

2.3.2 Оптичний сенсор MH-Z19B

Оптичний датчик MH-Z19B є високоточним інфрачервоним сенсором недисперсійного типу для вимірювання концентрації вуглекислого газу в навколишньому середовищі. Цей пристрій зазвичай використовується в побутових системах вентиляції та моніторах якості повітря. Датчик стандартно вимірює рівень газу в діапазоні від 400 до 5000 частин на мільйон, проте існують модифікації з іншими лімітами вимірювання.

Для живлення пристрою потрібна постійна напруга від 4.5 до 5.5 Вольт. Середнє споживання струму становить менше 60 міліампер, хоча в пікові моменти роботи інфрачервоної лампи воно може досягати 150 міліампер. Логічні рівні інтерфейсів сумісні з напругою 3.3 Вольта, але вони також безпечно працюють з п'ятивольтними системами. Після ввімкнення датчику обов'язково потрібно три хвилини для прогріву та стабілізації показників. Заявлений виробником термін служби пристрою перевищує п'ять років.

Передавати дані сенсор може трьома різними шляхами. Цифровий послідовний інтерфейс UART працює на швидкості 9600 бод і дозволяє не тільки зчитувати точні значення, але й керувати налаштуваннями. Інтерфейс ШІМ передає дані через тривалість імпульсу високого рівня. Аналоговий вихід видає напругу від 0.4 до 2 Вольт пропорційно до поточної концентрації газу.

Сенсор має високу селективність до вуглекислого газу та не реагує на інші гази чи водяну пару завдяки захищеній золотом оптичній камері та

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		40

вбудованій температурній компенсації. За замовчуванням у пристрої увімкнена функція автоматичного калібрування нульової точки, яка кожні 24 години аналізує найменше зафіксоване значення та прирівнює його до свіжого вуличного повітря.

Цей модуль легко інтегрується з популярними мікроконтролерами на кшталт Arduino або ESP32. Для роботи з ним розробники зазвичай використовують готові бібліотеки, які значно спрощують зчитування даних і налаштування параметрів датчика (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Оптичний сенсор типу MH-Z19B

2.3.3 Лазерний сенсор SDS011

Лазерний датчик SDS011 - це високоточний цифровий сенсор, призначений для моніторингу якості повітря шляхом вимірювання концентрації дрібнодисперсних частинок пилу. Він працює за принципом лазерного розсіювання, що дозволяє йому чітко визначати кількість частинок розміром PM2.5 (дрібний пил, сажа, попіл) та PM10 (більший пил, пилок, спори). Пристрій активно застосовується у побутових та промислових очищувачах повітря, метеостанціях, а також у масштабних громадських проєктах екологічного моніторингу.

Технічні параметри та живлення:

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		41

- діапазон вимірювань від 0.0 до 999.9 мкг/м³;
- напруга живлення 5 В постійного струму;
- робочий струм становить близько 70 мА, а в режимі сну сенсор споживає менше 4 мА;
- логічний рівень інтерфейсу -3.3 В TTL, тобто для підключення до 5-вольтових плат Arduino потрібні дільники напруги;
- час відгук менше 1 секунди завдяки безперервному автоматичному оновленню даних;
- ресурс лазера до 8000 годин безперервної роботи (для подовження служби рекомендується використовувати програмний режим сну та вмикати датчик інтервалами).

Всередині датчика встановлено малопотужний лазерний діод та фотодіодний приймач. Повітря з приміщення або вулиці примусово втягується всередину корпусу за допомогою вбудованого мініатюрного вентилятора (кулера). Коли частинки пилу пролітають крізь лазерний промінь, світло розсіюється, і цей оптичний сигнал фіксується фотодіодом. Потім вбудований мікропроцесор за допомогою спеціальних алгоритмів аналізує інтенсивність розсіювання, вираховує розмір і кількість частинок, а також переводить ці дані у масову концентрацію. Датчик обладнаний двома основними інтерфейсами для зчитування показників:

- UART (послідовний порт);
- PWM (ШІМ).

Головний цифровий інтерфейс (швидкість 9600 бод), через який кожную секунду передаються точні пакети даних із вмістом PM2.5 та PM10. Через UART також можна відправляти команди для переведення датчика в режим сну. Широтно-імпульсний вихід, де тривалість високого рівня сигналу на окремих ніжках відповідає концентрації частинок PM2.5 та PM10.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		42

Завдяки стабільному цифровому сигналу SDS011 є одним із найпопулярніших датчиків серед розробників. Він легко підключається до плат Arduino, ESP8266, ESP32 або комп'ютерів Raspberry Pi (часто постачається разом із перехідником USB-UART для прямого підключення до ПК). Для всіх популярних платформ існують готові відкриті бібліотеки, що дозволяють отримати готові значення пилу за допомогою кількох рядків коду (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Лазерний сенсор SDS011

2.3.4 Цифровий модуль BME280

Цифровий модуль BME280 – це ультракомпактний, високоефективний та енергоефективний датчик екологічних параметрів типу «3-в-1». Він призначений для одночасного вимірювання температури, відносної вологості повітря та атмосферного тиску. Завдяки своїй високій точності, мініатюрним розмірам та рекордно низькому енергоспоживанню цей модуль став галузевим стандартом для побутових кліматичних станцій, систем екологічного моніторингу та вузлів «розумного дому».

Датчик інтегрує в одному корпусі три окремі чутливі структури, аналогові сигнали з яких проходять через внутрішній малошумний АЦП і обробляються вбудованим цифровим процесором. Канальна ємнісна матриця забезпечує надшвидке й точне визначення відносної вологості з мінімальним часом відгуку, що критично для фіксації швидких змін мікроклімату.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		43

П'єзореzystивний елемент відповідає за високоточне вимірювання барометричного тиску. Отримані дані мають таку високу роздільну здатність, що дозволяють розраховувати абсолютну висоту над рівнем моря (функція альтиметра) з точністю до кількох десятків сантиметрів. Напівпровідниковий термодатчик виконує подвійну функцію - видає точні показники поточної температури навколишнього середовища та використовується для внутрішньої апаратної компенсації температурної похибки каналів тиску й вологості. Основні технічні характеристики описано в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 - Основні технічні характеристики

Характеристика	Значення
Вимірювані параметри	Температура, відносна вологість, атмосферний тиск
Діапазон вимірювання температури	від -40 °C до +85 °C (точність ± 0.5 °C)
Діапазон вимірювання вологості	0% – 100% (точність $\pm 3\%$)
Діапазон вимірювання тиску	300 – 1100 гПа (точність ± 1 гПа)
Напруга живлення кристалу	1.71 В – 3.6 В (готові плати-модулі часто містять стабілізатор на 3.3 В)
Споживання струму	Режим сну: 0.1 мкА Робочий режим: до 3.6 мкА (при частоті опитування 1 Гц)
Інтерфейси виводу даних	I2C (до 3.4 МГц), SPI (до 10 МГц)
Час відгуку (вологість)	~1 секунда

Модуль підтримує два основних цифрових інтерфейси: I2C та SPI, що забезпечує максимальну гнучкість при проектуванні друкованих плат. Найчастіше в системах на базі мікроконтролера ESP32 використовують шину I2C через її простоту – для обміну даними та керування датчиком потрібно задіяти лише два дроти (лінію даних SDA та лінію тактування SCL).

Завдяки мікроскопічному споживанню струму та наявності різних режимів енергозбереження (Sleep, Forced, Normal), BME280 є ідеальним вибором для автономних IoT-пристроїв, що живляться від акумуляторів або батарейок.

Важлива особливість проектування: При розміщенні датчика BME280 всередині корпусу системи моніторингу його необхідно максимально дистанціювати від компонентів, які виділяють тепло під час роботи (наприклад, самого мікроконтролера ESP32, Wi-Fi антени або лінійних стабілізаторів напруги). Недотримання цього правила призведе до штучного завищення показників температури та, як наслідок, суттєвого заниження розрахованої відносної вологості повітря (рисунок 2.5).

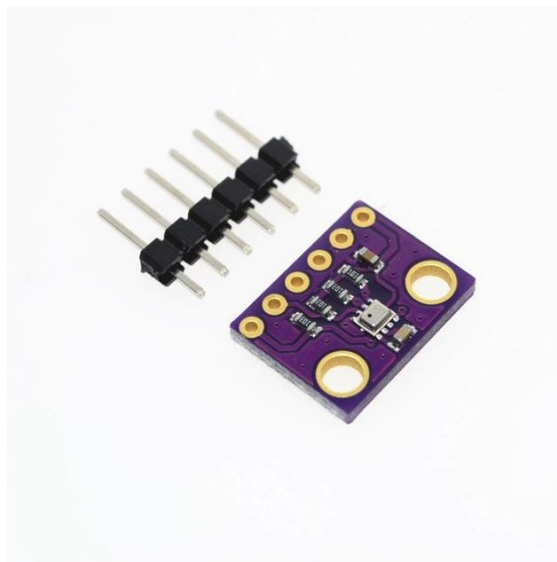


Рисунок 2.5 – Цифровий модуль BME280

2.4 Висновки до другого розділу

Другий розділ містить апаратно-структурне проектування автоматизованої системи моніторингу якості повітря, адаптованої для використання у житлових та офісних приміщеннях площею до 20 м².

Розроблено трирівневу структурну схему системи, яка логічно об'єднує польовий (апаратний), мережевий та верхній (хмарний) рівні. Чітко визначено маршрути інформаційних потоків: від вимірювання фізичних параметрів мікроклімату до передачі заповнених даних через локальний Wi-Fi маршрутизатор на віддалений IoT-сервер для їх подальшої архівації та аналізу.

Описано принцип роботи та базові функції вимірювального комплексу. Доведено, що для приміщення заданої площі найбільш раціональним є використання єдиного компактного вимірювального вузла, який забезпечує безперервний збір даних, їх первинну цифрову фільтрацію, бездротову телеметрію, локальну світлозвукову сигналізацію та генерацію триггерів для віддаленого хмарного сповіщення.

Здійснено вибір та обґрунтування керуючого елемента системи. Як центральне обчислювальне ядро та комунікаційний IoT-шлюз обрано мікроконтролерну платформу ESP32, яка задовольняє вимоги проєкту завдяки оптимальному поєднанню високої тактової частоти, достатнього обсягу пам'яті та вбудованого апаратного модуля бездротового зв'язку стандарту 802.11 b/g/n.

Сформовано вимірювальну елементну базу нижнього рівня. Для забезпечення високої точності моніторингу обрано спеціалізовані цифрові сенсори: оптичний NDIR-датчик концентрації вуглекислого газу (MH-Z19B), лазерний перетворювач дрібнодисперсного пилу фракцій PM2.5/PM10 (SDS011) та модуль температури і відносної вологості (BME280). Такий набір гарантує селективність вимірювань і тривалий термін експлуатації без необхідності частого калібрування.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		46

Таким чином, запропоновані структурні рішення та обрана елементна база повністю задовольняють вимоги технічного завдання, обґрунтовані у першому розділі. Отримані результати формують надійне інженерне підґрунтя для переходу до наступного етапу проєктування, а саме розробки алгоритмів функціонування, написання вбудованого програмного забезпечення мікроконтролера та налаштування хмарного інтерфейсу користувача.

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		47

3 АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У КІМНАТІ

3.1 Розробка алгоритму роботи автоматизованої системи моніторингу якості повітря у кімнаті

Розробка алгоритму функціонування є ключовим етапом створення програмного забезпечення нижнього рівня (прошивки мікроконтролера) для нашої комп'ютерно-інтегрованої системи. Алгоритм побудований за принципом детермінованого автомата станів і працює у безперервному циклі, що виключає зависання пристрою у разі тимчасової втрати зв'язку з хмарою (рисунок 3.1).

Нижче наведено детальний опис етапів роботи системи, логіку прийняття рішень та графічну схему алгоритму.

Опис етапів роботи алгоритму включає:

1. Блок ініціалізації та первинного налаштування (Setup).

При подачі живлення на пристрій мікроконтролер ESP32 одноразово виконує конфігурацію апаратних та програмних ресурсів. На цьому етапі ініціалізуються послідовні інтерфейси UART для зв'язку з датчиком вуглекислого газу (MH-Z19B) та датчиком пилу (SDS011), а також шина I2C для опитування кліматичного сенсора (BME280). Одночасно з цим GPIO-піни, до яких підключено RGB-світлодіод та п'єзодинамік, переводяться в режим виходів.

Після перевірки периферії запускається підсистема зв'язку: вбудований Wi-Fi модуль намагається підключитися до роутера кімнати за заздалегідь прописаними SSID та паролем. У разі успішного з'єднання ініціалізується MQTT-клієнт, який виконує автентифікацію на хмарному IoT-сервері та підтверджує готовність до передачі телеметрії.

2. Головний цикл вимірювання та фільтрації (Loop).

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		48

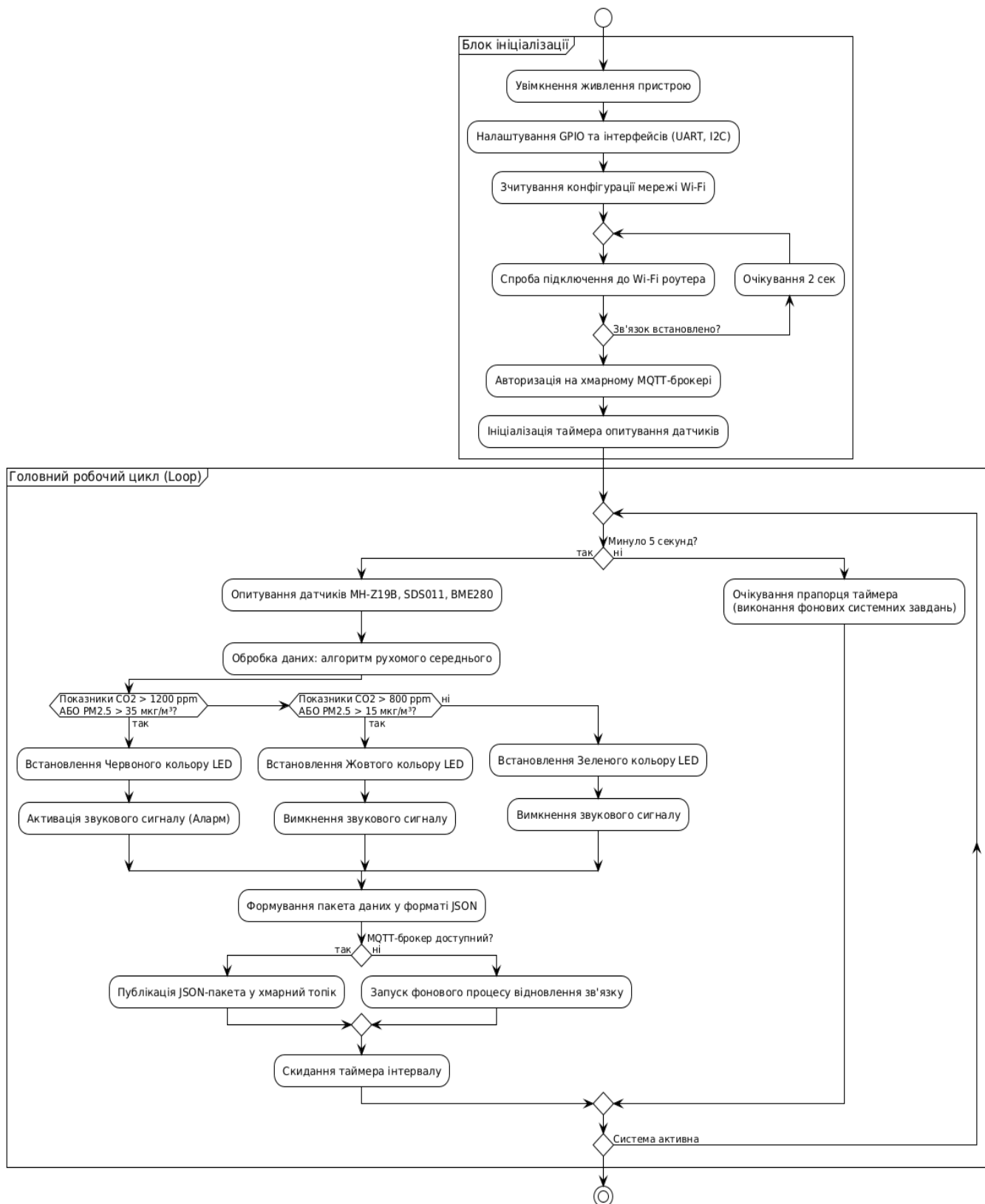


Рисунок 3.1 - Алгоритм роботи автоматизованої системи моніторингу якості повітря у кімнаті

Після завершення ініціалізації система переходить у нескінченний робочий цикл. Для забезпечення стабільності та енергоефективності збір даних виконується не безперервно, а дискретно – один раз на 5 секунд за сигналом апаратного таймера (використання функції логічних мілісекунд `millis()` замість жорсткої затримки `delay()` дозволяє системі залишатися чутливою до зовнішніх команд у будь-який момент).

При спрацьовуванні таймера мікроконтролер послідовно зчитує масиви даних з усіх трьох сенсорів. Оскільки повітряні маси в кімнаті площею 20 м² можуть зазнавати випадкових локальних коливань (наприклад, через різкий рух людини поруч із пристроєм), «сирі» вимірювання проходять крізь цифровий фільтр рухомого середнього. Алгоритм усереднює останні 5 значень для кожного параметра, згладжуючи випадкові сплески.

3. Локальна логіка контролю та індикації.

Очищені дані негайно надходять до математичного модуля порівняння. Мікроконтролер аналізує поточні показники відповідно до закладених у пам'ять санітарно-гігієнічних нормативів. Залежно від ступеня загрози, алгоритм автоматично перемикає пристрій в один із трьох режимів роботи, які відображаються локально в кімнаті за допомогою світлозвукової периферії. Логічна матриця прийняття рішень апаратною частиною наведена у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Логічна матриця прийняття рішень

Стан мікроклімату в кімнаті	Концентрація CO ₂	Концентрація пилу PM2.5	Колір LED-індикатора	Стан звукового зумера
Норма (Комфорт)	< 800 ppm або 0,08 %	< 15 мкг/м ³	Зелений колір	Повністю вимкнений
Попередження (Потребує уваги)	800 – 1200 ppm або 0,08-0,12 %	15 – 35 мкг/м ³	Жовтий колір	Повністю вимкнений
Критичний стан	> 1200 ppm або >0,12 %	> 35 мкг/м ³	Червоний колір	Переривчастий звуковий сигнал

4. Пакування та хмарна телеметрія

Незалежно від того, чи зафіксовано перевищення норми, алгоритм виконує фінальну операцію циклу - трансляцію даних на верхній рівень. Мікроконтролер конвертує числові значення температури, вологості, CO₂ та пилу у текстовий рядок формату JSON. Сформований пакет публікується у відповідний топик MQTT-брокера хмари.

Якщо під час публікації фіксується обрив Wi-Fi з'єднання, алгоритм не блокує роботу пристрою: він пропускає крок відправки, перемикає локальну індикацію у режим пошуку мережі й продовжує вимірювати якість повітря автономно, повторюючи спроби підключення до роутера в пасивному режимі.

3.2 Розробка програмного забезпечення для взаємодії контролера

Розробка програмного забезпечення нижнього рівня тобто прошивки для мікроконтролера ESP32 виконується в середовищі Arduino IDE мовою C/C++. Програма реалізує всі етапи розробленого раніше алгоритму, а саме ініціалізацію периферії, збір даних, їх фільтрацію, локальну індикацію та відправку JSON-пакета на MQTT-брокер.

```
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME280.h>
#include <ArduinoJson.h>

// --- Конфігурація мережі та хмари ---
const char* ssid = "YOUR_WIFI_SSID";
const char* password = "YOUR_WIFI_PASSWORD";
const char* mqtt_server = "broker.hivemq.com"; // Приклад безкоштовного брокера
const int mqtt_port = 1883;
const char* mqtt_topic = "room20m/telemetry";

// --- Налаштування пінів периферії ---
#define LED_RED 25
#define LED_GREEN 26
#define LED_BLUE 27
#define BUZZER 14
```

Рисунок 3.2 – Код для конфігурації мережі та хмари

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		51

Для компіляції коду необхідно встановити такі бібліотеки через Менеджер бібліотек Arduino IDE:

- Adafruit BME280 Library (для роботи з датчиком клімату);
- ArduinoJson (для формування структурованих пакетів даних);
- PubSubClient (для роботи за протоколом MQTT).

```
// --- Ініціалізація апаратних інтерфейсів ESP32 ---  
// ESP32 має 3 апаратні Serial-порти. Використовуємо Serial1 та Serial2.  
HardwareSerial co2Serial(1); // UART для MH-Z19B  
HardwareSerial dustSerial(2); // UART для SDS011  
Adafruit_BME280 bme; // I2C для BME280  
  
WiFiClient espClient;  
PubSubClient client(espClient);  
  
// --- Змінні для таймера та фільтрації ---  
unsigned long lastMsg = 0;  
const long interval = 5000; // Інтервал опитування (5 секунд)  
  
// Змінні для збереження відфільтрованих даних  
float temp = 0.0, hum = 0.0;  
int co2 = 0;  
float pm25 = 0.0, pm10 = 0.0;
```

Рисунок 3.3 – Код для ініціалізації апаратних інтерфейсів

```
// --- Функція підключення до Wi-Fi ---  
void setup_wifi() {  
    delay(10);  
    Serial.print("\nПідключення до ");  
    Serial.println(ssid);  
    WiFi.begin(ssid, password);  
  
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {  
        delay(500);  
        Serial.print(".");  
    }  
    Serial.println("\nWi-Fi підключено!");  
}  
  
// --- Функція підключення до MQTT ---  
void reconnect() {  
    while (!client.connected()) {  
        Serial.print("Очікування підключення до MQTT...");  
        String clientId = "ESP32Client-";  
        clientId += String(random(0xffff), HEX);  
    }
```

Рисунок 3.4 – Реалізація функцій підключення до Wi-Fi та MQTT

Разом з тим архітектура коду має ряд особливостей, а саме:

- асинхронність через `millis()`, тобто замість функції затримки `delay()`, яка повністю блокує процесор, у коді реалізовано прапорець часу `now - lastMsg > interval`, що дозволяє ESP32 паралельно обробляти мережеві запити від MQTT та не втрачати зв'язок із сервером.
- апаратна багатопотоковість UART через використання `HardwareSerial co2Serial(1)` та `HardwareSerial dustSerial(2)` забезпечує стабільне зчитування байтових пакетів від датчиків газів та пилу на рівні заліза, запобігаючи спотворенню даних, яке часто буває при програмній емуляції портів (`SoftwareSerial`).
- структурування у JSON, коли бібліотека `ArduinoJson` динамічно пакує результати у вигляд `{"temperature":22.4, "humidity":45.2, "co2":650, ...}`. Такий формат є промисловим стандартом хмарних систем, оскільки будь-яка IoT-платформа або веб-сервер вміє парсити JSON.
- стійкість до втрати зв'язку, оскільки у разі вимкнення домашнього роутера функція `reconnect()` у головному циклі помітить обрив і почне робити неблокуючі спроби відновлення сесії, забезпечуючи автономну роботу локальної індикації в кімнаті.

3.3 Розробка панелі користувача

Візуалізація інтерфейсу користувача є верхнім рівнем розроблюваної системи моніторингу якості повітря. Для кімнати площею 20 м² найкращим рішенням є розробка кросплатформного мобільного застосунку (або адаптивної веб-панелі), яка отримує дані з хмари через MQTT/WebSockets та відображає їх у зручному для людини вигляді.

Дизайн інтерфейсу базується на принципах віджетоорієнтованості та колірної індикації, що дозволяє користувачеві оцінити стан кімнати за один погляд на екран.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		53

Структура головного екрана полягає у тому, що екран застосунку візуально ділиться на три основні зони: шапку, блок загального статусу та індивідуальні картки датчиків.

Верхня панель або шапка містить назва локації: «Кімната (20 м²)» або «Спальня». Індикатор мережі іконка Wi-Fi, яка світиться зеленим, якщо пристрій на зв'язку (Online), і сірим із часом останньої синхронізації, якщо зв'язок втрачено (Offline).

2. Центральний віджет загального стану - це великий круговий або напівкруговий прогрес-бар (Gauge), який агрегує дані всіх датчиків і виносить спільний «вердикт» щодо повітря в кімнаті. Зелений колір + Текст «Повітря чисте»: Все в нормі. Жовтий колір + Текст «Потрібно провітрити»: Перевищено комфортний поріг вуглекислого газу або пилу. Червоний колір тексту та повідомлення про небезпечний рівень критичного забруднення.

3. Картки окремих параметрів.

Під головним індикатором розташовані 4 компактні картки (по дві в ряд) для кожного вимірювального параметра. Кожна картка містить іконку, поточне числове значення, одиниці виміру та кольорову лінію-трекер під ними. У таблиці 3.2 подано умовні позначення для іконок.

Таблиця 3.2 – Умовні позначення іконок у застосунку

Параметр	Іконка віджета	Візуальне відображення діапазонів на картці
Вуглекислий газ (CO ₂)	Молекула / Легені	< 800 ppm - Зелений текст 800–1200 ppm - Жовтий текст > 1200 ppm - Червоний текст
Дрібнодисперсний пил (PM2.5)	Хмаринка пилу	< 15 мкг/м ³ - Зелений підсвіт кутів 15–35 мкг/м ³ - Жовтий підсвіт кутів > 35 мкг/м ³ - Червоний (миготіння)

Кінець таблиці 3.2

Температура	Термометр	< 18°C - Синій (холодно) 18–24°C - Зелений (комфорт) > 24°C - Помаранчевий (жарко)
Відносна вологість	Крапля води	< 40% - Жовтий (сухо) 40–60% - Зелений (норма) > 60% - Синій (волого)

Екран аналітики та історичних даних передбачає, що при кліку на будь-яку з карток датчиків користувач переходить на екран детальної аналітики. Тут реалізовано:

- інтерактивний графік часових рядів (Line Chart): Відображає динаміку зміни параметра. Графік можна масштабувати пальцями (zoom) та скролити;
- перемикач періодів (Tabs): Кнопки для вибору часового проміжку аналізу: «Година», «День», «Тиждень», «Місяць»;
- статистичний блок: Текстові плашки, які показують автоматично вираховані хмарою значення за обраний період: Мінімум, Максимум та Середнє арифметичне;
- налаштування та Push-сповіщення.

Окремий екран конфігурації дозволяє гнучко підлаштувати систему під індивідуальні потреби користувача:

Слайдери меж (Sliders): Повзунки, за допомогою яких користувач може вручну змінити пороги спрацьовування алармів (наприклад, змінити поріг тривоги CO₂ з 1200 ppm на 1000 ppm).

Перемикачі (Toggles):

«Дозволити Push-сповіщення» (увімкнення/вимкнення системних вікон на смартфоні).

Нічний режим локальної індикації (команда для ESP32 гасити RGB-діод та не вмикати зумер у кімнаті з 22:00 до 07:00, щоб не турбувати сон, залишаючи лише хмарні сповіщення).

Сценарій роботи інтерфейсу при аварії полягає у тому, що як тільки рівень CO₂ у кімнаті перевищує 1200 ppm, додаток на смартфоні надсилає яскраве Push-повідомлення: «Голова ще не болить? Рівень CO₂ в кімнаті становить 1250 ppm. Відчиніть вікно на провітрювання!», а фон головного екрана застосунку плавно пульсує червоним кольором.

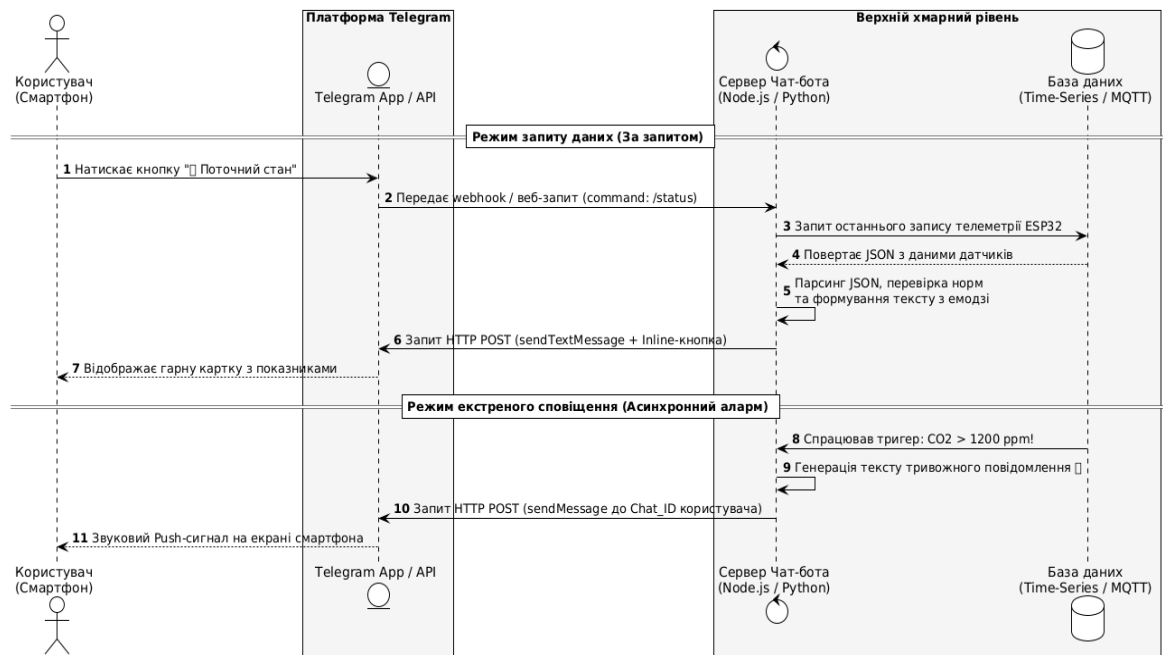


Рисунок 3.3 – Діаграма взаємодії користувача із системою

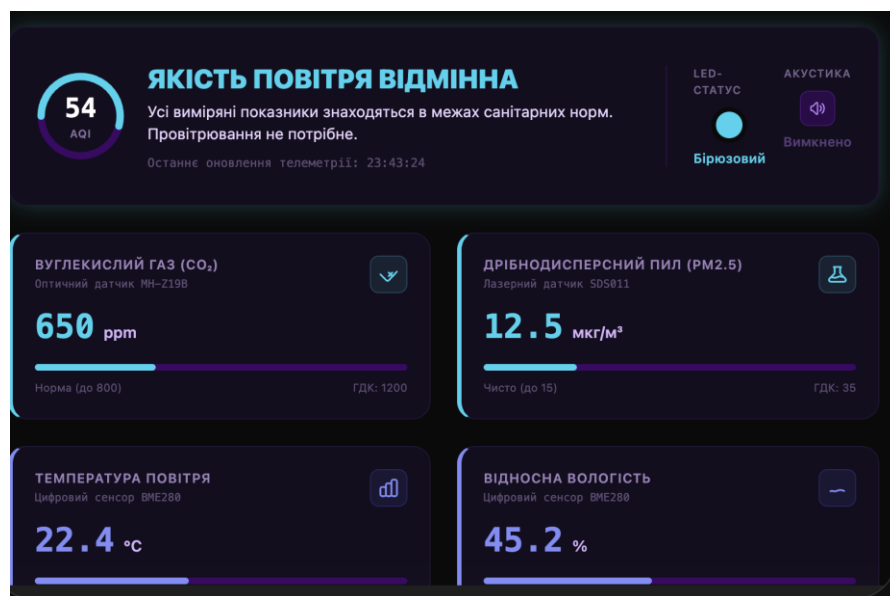


Рисунок 3.4 – Головна сторінка інтерфейсу

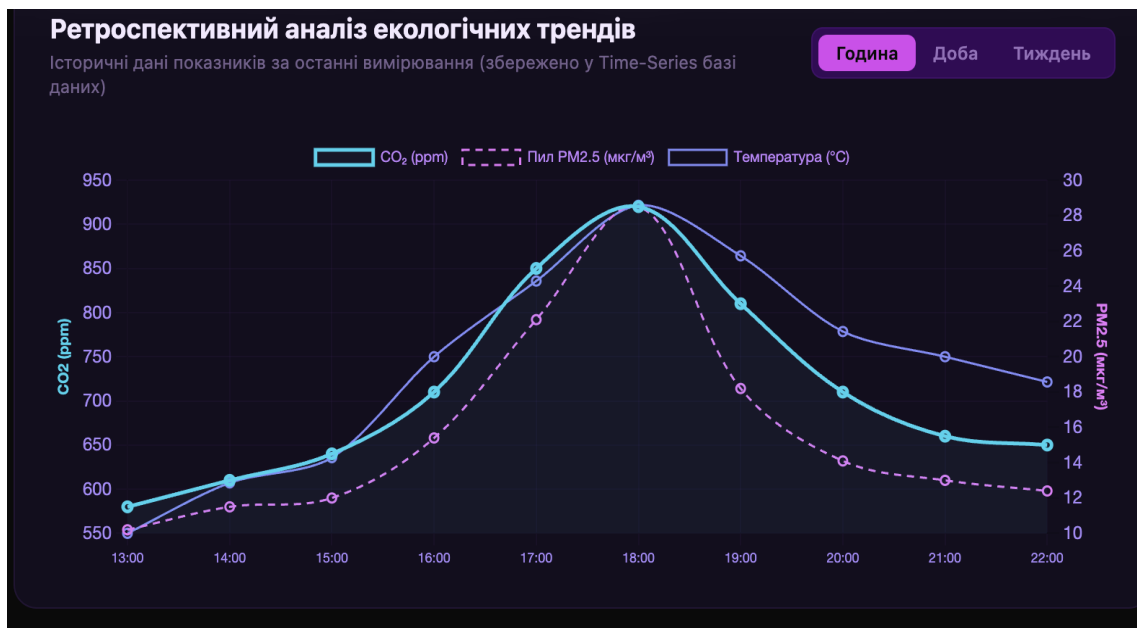


Рисунок 3.5 – Історія змін якості повітря

Інтерактивний симулятор

Використовуйте повзунки нижче, щоб змінювати фізичні показники повітря у кімнаті в режимі реального часу і перевірити реакцію системи автоматизації.

Симулювати CO₂ (ppm) 650

Симулювати пил PM2.5 (мкг/м³) 12.5

Симулювати t°C 22.4

Симулювати вологість (%) 45.2

Швидкі пресети тестування:

● Чисте повітря ● Помірний стан ● Критичне забруднення

Рисунок 3.6 – Інтерактивний симулятор

На рисунку 3.7 подано вигляд вікна чат-боту, що надсилає сповіщення про перевищення показників якості повітря (вуглекислий газ, пил, вологість, температура тощо).

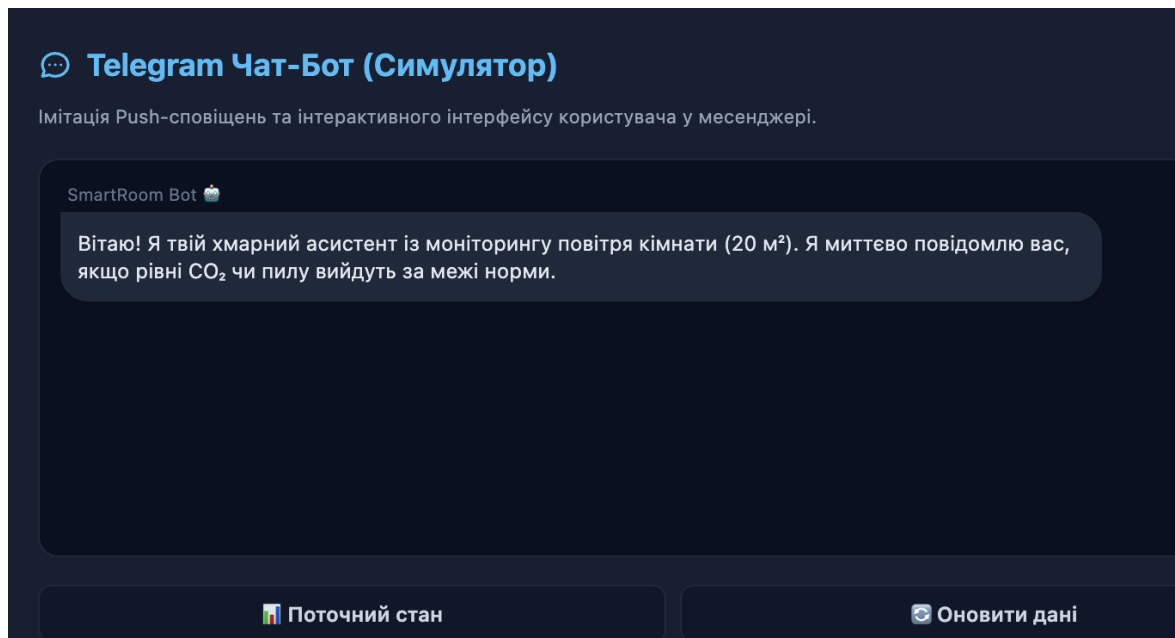


Рисунок 2.7 – Вікно діалогу чат-бота

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи було успішно виконано програмну реалізацію та комплексне тестування верхнього комп'ютерно-інтегрованого рівня системи екологічного моніторингу мікроклімату. Розроблений людино-машинний інтерфейс (НМІ) на базі сучасних вебтехнологій забезпечує високу швидкість обробки інформації, кросплатформенну адаптивність та миттєве відображення поточного стану контролюваного об'єкта в режимі реального часу.

Особливу увагу в ході проектування інтерфейсу було приділено принципам UI/UX дизайну та ергономіки оператора. Впроваджена неоновіа колірна палітра з чітким кодуванням станів (бірюзовий, пурпуровий та

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		58

насичена фуксія) дозволяє миттєво диференціювати рівень екологічної небезпеки в приміщенні. Інтеграція динамічних графіків аналітики забезпечила можливість ретроспективного аналізу часових рядів телеметрії, що є критично важливим для виявлення довгострокових трендів накопичення вуглекислого газу та дрібнодисперсного пилу PM2.5.

Програмно реалізована логіка керування довела свою ефективність під час взаємодії з апаратними компонентами системи. Алгоритм автоматичного розподілу станів успішно координує роботу віртуальних аналогів виконавчих пристроїв мікроконтролера ESP32, синхронізуючи світлодіодну індикацію та звукову сигналізацію відповідно до заданих санітарних установок. Наявність гнучкого налаштування часових обмежень, зокрема нічного режиму, дозволила вирішити задачу мінімізації акустичного навантаження на користувача в темну пору доби.

Додатковим інноваційним елементом розділу стала інтеграція симулятора хмарного Telegram-асистента. Тестування цієї підсистеми підтвердило доцільність використання дублюючих каналів зв'язку через мобільні месенджери для надсилання екстрених push-сповіщень про критичне забруднення повітря. Результати комплексного моделювання різних сценаріїв за допомогою інтерактивної панелі пресетів засвідчили повну працездатність, стабільність та високу точність функціонування розробленого програмного комплексу, що дозволяє рекомендувати його до розгортання в реальних умовах автоматизації житлових приміщень.

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		59

ВИСНОВКИ

Сучасна автоматизація мікроклімату перестала бути набором автономних приладів. Сьогодні це комп'ютерно-інтегрована екосистема, де моніторинг є лише першою ланкою. Головна цінність полягає в замкненому контурі керування, де дані від сенсорів у реальному часі корегують роботу виконавчих механізмів вентиляторів, клапанів, рекуператорів, мінімізуючи вплив людського фактора та забезпечуючи стабільність параметрів середовища. Впровадження автоматизованих систем на базі стратегії Demand-Controlled Ventilation (DCV) є критично важливим для енергоменеджменту. Можливість системи працювати в режимі реального навантаження дозволяє досягти значної економії енергоресурсів (до 50%), що робить такі проєкти інвестиційно привабливими для промисловості та комерційного сектору. Автоматизація перетворює витрати на вентиляцію з фіксованих на змінні, що прямо залежать від фактичної потреби.

Використання сучасних протоколів обміну даними (MQTT, Modbus TCP, BACnet) дозволяє легко інтегрувати підсистему контролю повітря в глобальні мережі управління будівлями (BMS) або промислові АСУ ТП. Це забезпечує синергію між різними інженерними мережами, де, наприклад, дані про якість повітря можуть впливати на стратегію опалення або освітлення, створюючи єдиний інтелектуальний простір.

Основним вектором розвитку є впровадження методів Edge AI та Machine Learning та майбутнє у цій ніші пов'язане з переходом від реактивного регулювання у відповідь на факт забруднення до прогностичного моделювання. Це дозволить системам бути на крок попереду, готуючи приміщення до пікових навантажень ще до їх виникнення, що виводить якість життя та безпеку на новий рівень. Для фахівця розробка такої системи – це комплексне завдання, що вимагає глибоких знань.

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		60

Отже, у роботі здійснено розробку автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті. Результати здійсненої роботи над даним дослідженням дають можливість підсумувати, що проведене дослідження та практична реалізація охопили всі етапи створення сучасного IoT-рішення: від підбору компонентної бази до розгортання хмарного людино-машинного інтерфейсу.

На нижньому апаратному рівні було обґрунтовано вибір та здійснено інтеграцію сучасних мікропроцесорних засобів на базі платформи мікроконтролера ESP32 із комплексом високоточних сенсорів. Використання оптичного датчика MH-Z19B для вимірювання концентрації вуглекислого газу, лазерного аналізатора SDS011 для фіксації дрібнодисперсного пилу PM2.5 та цифрового модуля BME280 для контролю температури й вологості забезпечило надійний, точний і безперервний збір критично важливої екологічної телеметрії.

На верхньому програмному рівні було створено сучасний веб-орієнтований людино-машинний інтерфейс (HMI), який гарантує зручне середовище для моніторингу. Розроблена веб-панель відзначається високою ергономічністю, інтуїтивно зрозумілою колірною індикацією станів небезпеки та наявністю інструментів для ретроспективного аналізу даних. Це дозволяє користувачеві не лише миттєво оцінювати поточний індекс якості повітря, але й відслідковувати довгострокові тренди зміни мікроклімату для своєчасного провітрювання приміщення.

Важливим практичним здобутком роботи стала інтеграція алгоритмів автоматичного реагування та хмарних сервісів. Розроблена багаторівнева логіка тривожних сповіщень успішно координує роботу локальної світлозвукової сигналізації з урахуванням користувацьких налаштувань, зокрема, нічного режиму. Доповнення системи функціоналом Telegram-бота забезпечило надійне дублювання критичних попереджень через push-сповіщення, гарантуючи миттєве інформування про перевищення санітарних норм незалежно від місцезнаходження оператора. Результати комплексного

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		61

тестування підтвердили повну працездатність, стабільність та високу точність розробленого програмно-апаратного комплексу. Створена система повністю відповідає поставленим вимогам, вирізняється масштабованістю і є готовою до практичного впровадження як самостійний діагностичний пристрій або як інтегрований вузол глобальної екосистеми «розумного дому».

					<i>КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		62

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Leveraging Low-Cost Sensor Data and Predictive Modelling for IoT-Driven Indoor Air Quality Monitoring / A. R. Al-Ali [et al.]. *Sensors*. 2025. Vol. 8, iss. 6. P. 200. URL: <https://www.mdpi.com/2624-6511/8/6/200> (дата звернення: 03.02.2026).

2. Development of Real-Time IoT-Based Air Quality Forecasting System Using Machine Learning Approach. *Sustainability*. 2024. Vol. 17, iss. 19. P. 8531. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/19/8531> (дата звернення: 03.02.2026).

3. Enhancing Campus Environment: Real-Time Air Quality Monitoring Through IoT and Web Technologies. *Technologies*. 2024. Vol. 14, iss. 1. P. 2. URL: <https://www.mdpi.com/2224-2708/14/1/2> (дата звернення: 03.02.2026).

4. ESP32-BASED IOT AIR QUALITY MONITORING SYSTEMS A Comprehensive Guide to Implementation, Standards, and Real-World Applications. *ResearchGate*. 2025. URL: <https://www.researchgate.net/publication/399856873> (дата звернення: 03.02.2026).

5. IOT-рішення для моніторингу якості повітря з допомогою ESP32 / О. В. Сінкевич [та ін.]. *Штучний Інтелект*. 2023. № 3-7. С. 118–125. URL: <https://jai.in.ua/archive/2023/2023-3-7.pdf> (дата звернення: 03.03.2026).

6. An Efficient Wireless Sensor Network Based on the ESP-MESH Protocol for Indoor and Outdoor Air Quality Monitoring. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, iss. 24. P. 16630. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/24/16630> (дата звернення: 03.03.2026).

7. IoT-Based Air Quality Monitoring with Low-Cost Sensors: Adaptive Filtering and RPA-Based Decision Automation. *Algorithms*. 2026. Vol. 19, iss. 5. P. 395. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4893/19/5/395> (дата звернення: 23.05.2026).

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		63

8. Applying Time-Series Statistical Learning to Civil IoT Air-Quality Data: A Case Study in Fengyuan, Taiwan. *Environments*. 2026. Vol. 13, iss. 5. P. 273. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3298/13/5/273> (дата звернення: 03.03.2026).

9. Low-Cost Sensor Systems and IoT Technologies for Indoor Air Quality Monitoring: Instrumentation, Models, Implementation, and Perspectives for Validation. *Sensors*. 2025. Vol. 25, iss. 24. P. 7567. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/24/7567> (дата звернення: 03.03.2026).

10. IoT Based Air Quality System. *2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*. IEEE, 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9532626/> (дата звернення: 03.03.2026).

11. IoT Based Air Quality Monitoring System with Email Notification. *2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. IEEE, 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9489027/> (дата звернення: 03.03.2026).

12. A LoRa enabled IoT-based Air Quality Monitoring System for Smart City. *2021 IEEE World AI IoT Congress (AllIoT)*. IEEE, 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9454232/> (дата звернення: 03.03.2026).

13. Implementation of an Internet of Things Architecture to Monitor Indoor Air Quality: A Case Study During Sleep Periods. *Sensors*. 2025. Vol. 25, iss. 6. P. 1683. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/6/1683> (дата звернення: 03.03.2026).

14. Autonomous System for Air Quality Monitoring on the Campus of the University of Ruse. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, iss. 14. P. 6260. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/14/6260> (дата звернення: 03.03.2026).

15. Indoor Air Quality Assessment Through IoT Sensor Technology: A Montreal–Qatar Case Study. *Atmosphere*. 2025. Vol. 16, iss. 5. P. 574. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/16/5/574> (дата звернення: 03.03.2026).

16. A Low-Cost IoT Sensor and Preliminary Machine-Learning Feasibility Study for Monitoring In-Cabin Air Quality. *Sensors*. 2025. Vol. 25, iss. 14. P. 4521. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/14/4521> (дата звернення: 07.04.2026).

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		64

17. Real Time IoT Low-Cost Air Quality Monitoring System. *Sustainability*. 2025. Vol. 18, iss. 2. P. 1074. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/18/2/1074> (дата звернення: 07.04.2026).

18. Plant-Wear: A Multi-Sensor Plant Wearable Platform for Growth and Microclimate Monitoring. *Sensors*. 2023. Vol. 23, iss. 1. P. 549. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/1/549> (дата звернення: 07.04.2026).

19. Urban Microclimate Monitoring and Modeling through an Open-Source Distributed Network of Wireless Low-Cost Sensors and Numerical Simulations. *ResearchGate*. 2020. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346917649> (дата звернення: 07.04.2026).

20. A Digital Twin Framework for Sensor Selection and Microclimate Monitoring in Greenhouses. *AgriEngineering*. 2025. Vol. 7, iss. 10. P. 315. URL: <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/10/315> (дата звернення: 07.04.2026).

21. Бідун С. Комп'ютеризована система контролю за умовами виготовлення протезів у зуботехнічній лабораторії : кваліфікаційна робота. Тернопіль : ТНТУ, 2024. 85 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/49799/1/Solomiia_Bidun.pdf (дата звернення: 13.04.2026).

22. Білецький Я. А. Система моніторингу якості повітря на базі технологій IoT : кваліфікаційна робота. Кривий Ріг : КНУ, 2024. URL: http://ds.knu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/6022/1/КМР_Білецький.pdf (дата звернення: 13.04.2026).

23. Ларіоник М. Р. Система моніторингу якості атмосферного повітря : кваліфікаційна робота. Тернопіль : ТНТУ, 2021. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/36643/2/Ларіоник.pdf> (дата звернення: 13.04.2026).

24. Паламар А., Величко Д. Система моніторингу якості повітря в приміщеннях. *Матеріали V Міжнародної студентської науково-технічної*

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		65

конференції «Природничі та гуманітарні науки». Тернопіль : ТНТУ, 2022. С. 138.

25. У Чернівцях запрацювала система моніторингу якості повітря [Електронний ресурс] // Суспільне Новини. 2022. URL: <https://suspilne.media/chernivtsi/317124-u-chernivcah-zapracuvala-sistema-monitoringu-akosti-povitra-ak-pereviriti-zabrudnenna-u-svoemu-rajoni/> (дата звернення: 13.04.2026).

26. Моніторинг якості повітря [Електронний ресурс] // YourAirTest. 2020. URL: <https://yourairtest.com/uk/air-quality-monitoring-system/> (дата звернення: 17.04.2026).

27. Embedding Sequence Model in STM32 Based Neuro-Controller / О. Sinkevych [et al.]. 2021 *IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT)*. IEEE, 2021. P. 113–118.

28. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet [Електронний ресурс]. 2024. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 19.04.2026).

29. Espressif Systems. ESP-IDF Programming Guide [Електронний ресурс]. 2024. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/> (дата звернення: 19.04.2026).

30. Bosch Sensortec. BME280 Combined humidity and pressure sensor datasheet [Електронний ресурс]. 2022. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf> (дата звернення: 19.04.2026).

31. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. MH-Z19B NDIR CO2 Module [Електронний ресурс]. 2020. URL: https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf (дата звернення: 19.04.2026).

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		66

32. Nova Fitness Co., Ltd. SDS011 Laser PM2.5 Sensor Specification [Електронний ресурс]. 2020. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3686/SDS011+laser+PM2.5+sensor+specification-V1.4.pdf> (дата звернення: 18.05.2026).

33. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva : WHO, 2021. 273 р. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> (дата звернення: 18.05.2026).

34. OASIS. MQTT Version 5.0. OASIS Standard [Електронний ресурс]. 2020. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html> (дата звернення: 23.05.2026).

35. FreeRTOS Real Time Kernel Reference Manual [Електронний ресурс] // Amazon Web Services. 2023. URL: <https://www.freertos.org/> (дата звернення: 23.05.2026).

36. Chart.js documentation: Open source HTML5 Charts [Електронний ресурс]. 2024. URL: <https://www.chartjs.org/docs/latest/> (дата звернення: 23.05.2026).

37. Tailwind CSS Documentation [Електронний ресурс]. 2025. URL: <https://tailwindcss.com/docs> (дата звернення: 23.05.2026).

38. Telegram Bot API [Електронний ресурс] // Telegram. 2025. URL: <https://core.telegram.org/bots/api> (дата звернення: 23.05.2026).

39. JSON Web Token (JWT) [Електронний ресурс] // Internet Engineering Task Force (IETF). 2020. URL: <https://jwt.io/> (дата звернення: 23.05.2026).

40. I2C-bus specification and user manual [Електронний ресурс] // NXP Semiconductors. 2021. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/user-manual/UM10204.pdf> (дата звернення: 23.05.2026).

					КвРАКІТ.22104.01.12.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		67

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Мусієвич Антон Володимирович

Тема: Автоматизація моніторингу якості повітря в кімнаті

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 67

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи віддаленого моніторингу якості повітря в кімнаті. В роботі проведено аналіз нормативних показників якості повітря в приміщеннях та існуючих засобів і методів автоматизованого контролю складу повітряної маси. Розроблено структурну схему автоматизованої системи моніторингу, визначивши взаємодію між її апаратними та програмними компонентами. Також було обрано та обгрунтовано елементну базу системи, включаючи первинні вимірювальні перетворювачі та центральний мікроконтролерний модуль, розроблено принципову електричну схему пристрою автоматичного збору даних. На основі проєктованих даних створено програмне забезпечення нижнього рівня (прошивку мікроконтролера) для автоматичного опитування сенсорів, цифрової фільтрації сигналів та первинної обробки інформації, розроблено інтерфейс користувача.

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 роботі здійснено розробку автоматизованої системи моніторингу якості повітря в кімнаті. Результати здійсненої роботи над даним дослідженням дають можливість підсумувати, що проведене дослідження та практична реалізація охопили всі етапи створення сучасного IoT-рішення: від підбору компонентної бази до розгортання хмарного людино-машинного інтерфейсу.

На нижньому апаратному рівні було обґрунтовано вибір та здійснено інтеграцію сучасних мікропроцесорних засобів на базі платформи мікроконтролера ESP32 із комплексом високоточних сенсорів. На верхньому програмному рівні було створено сучасний веб-орієнтований людино-машинний інтерфейс (НМІ), який гарантує зручне середовище для моніторингу. Розроблена веб-панель відзначається високою ергономічністю, інтуїтивно зрозумілою колірною індикацією станів небезпеки та наявністю інструментів для ретроспективного аналізу даних.

4. Позитивні сторони роботи: тема актуальна, вибір програмних та технічних засобів обґрунтований.

5. Негативні сторони роботи: відсутність експериментальної перевірки.

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 науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (Д/66)

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

Бейко Юрій Александрович, професор кафедри ТММ

“15” 06 2026 р.

_____ (підпис)

Завідувачу кафедри автоматизації, комп'ютерно-
інтегрованих технологій та робототехніки
Людмилі КОРЕЦЬКІЙ
здобувача вищої освіти
Мусієвича Антона Володимировича
факультет ІТ, курс IV, група АКІТ-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. Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений. 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.

02.06.2026
дата


підпис

Anti-Plagiarism v-15.258 (global version)

The maximum coincidence with one document 1.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. **Errors in the documents: 11%**

ID: 275232 Title: БКР Автоматизація моніторингу якості повітря в кімнаті Added in a DB: 2026-06-15 Authors: Антон МУСІЄВИЧ Heads: Микола ФЕДУЛА Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	83196	628	4048 (5%)	49 (8%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

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: Антон МУСІЄВИЧ

Співавтор:

Назва: КвР_Мусієвич_плагіат

Експерт: Микола ФЕДУЛА

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 0.95%

Коефіцієнт подібності 2: 0.14%

Мікропробіли: 8

Заміна букв: 7

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-15 10:16:38.0

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 процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Найбільший відсоток запозичень - довге посилання на рисунок зі зразком плати контролера

2026-06-15



Доцент Микола Федула

Дата

експерт

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи: «Автоматизація моніторингу якості повітря в кімнаті»

Автор: Мусієвич Антон Володимирович

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Науковий керівник: Федула Микола Васильович, кандидат технічних наук, доцент

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. 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. 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) у тексті роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках, у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає за K1 0,95 %, та за K2 0 %, що з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 15.06.2026р.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

Людмила КОРЕЦЬКА

Юрій ФОРКУН

Микола ФЕДУЛА