

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного інтелекту
Кафедра інтелектуальних програмних систем і технологій

Рекомендовано до захисту:
протокол засідання кафедри
№ ____ від.....2025 р.
Завідувач кафедри ІПСіТ
_____ Олешко О. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

на тему: «Розробка системи перевірки якості повітря на основі ESP32»

Захищено на засіданні ЕК № _____
протокол № ____ від..... 2025 р.
Оцінка ____/ _____ Голова
ЕК

_____ Фесенко Г. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Виконав:

студент 4 курсу, групи КС- 43

Спеціальності:

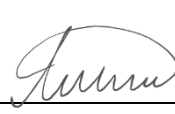
_____ 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності підготовки)

Безбородов Андрій Андрійович 
(прізвище, ім'я та по батькові, підпис)

Керівник к.т.н.

Малахова М. О. 
(ступень, звання, прізвище та ініціали, підпис)

Рецензент

Мішин В. О. 
(ступень, звання, прізвище та ініціали, підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного інтелекту

Кафедра Інтелектуальних програмних систем і технологій

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) Бакалавр

Галузь знань: _____

Спеціальність: 122 Комп'ютерні науки

Освітня програма: 122 Комп'ютерні науки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІПСіТ

Олешко О. І.

«____» _____ 20____ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Безбородов Андрій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи: Розробка системи перевірки якості повітря на основі ESP32

керівник роботи Малахова Марина Олегівна, кандидат технічних наук,

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

затверджені наказом по університету від “16” квітня _____ 2025 року № 4101-5/962

2. Строк подання студентом роботи 2 червня _____

3. Перелік питань, які потрібно розробити)

Розробка системи перевірки якості повітря, яка буде здатна вимірювати кількість частинок у повітрі, концентрацію CO2 і вологість повітря та відображати їх на дисплеї

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Аналіз та постановка задачі	Січень-початок лютого
2	Підбір компонентів системи	Лютий
3	Розробка архітектури системи	Лютий
4	Розробка програмного забезпечення	Березень-Квітень
5	Реалізація програмного забезпечення	Квітень
6	Тестування	Квітень-початок травня
7	Загальна ретроспектива проекту	Травень
8	Підготовка пояснювальної записки	Травень
9	Підготовка доповіді та презентації	Травень

5. Дата видачі завдання 19 січня

Студент

Безбородов А. А.

ініціали, прізвище

Без
підпис

Керівник роботи

Малахова М.О.

ініціали, прізвище

Мал
підпис

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка містить 69 сторінок, 15 рисунків, 5 таблиць, 1 додаток і 18 джерел інформації.

Робота присвячена розробці програмно-апаратної системи моніторингу якості повітря на основі мікроконтролера ESP32. Актуальність дослідження зумовлена потребою в локальних пристроях, здатних фіксувати рівень забрудненості повітря, вміст вуглекислого газу, температуру, вологість і атмосферний тиск у приміщеннях побутового або навчального призначення.

Об'єкт дослідження – процес моніторингу якості повітря у закритих середовищах.

Предмет дослідження – структура та реалізація програмно-апаратного комплексу на базі ESP32 із сенсорами BME280, PMS5003 та MH-Z19B, що забезпечує вимірювання параметрів повітря та їх виведення на TFT-дисплей.

Мета роботи полягає у створенні автономного, доступного та функціонального пристрою моніторингу, що працює в режимі реального часу, не потребує підключення до Інтернету та є зручним у використанні.

У роботі виконано: аналіз параметрів мікроклімату; вибір сенсорів для їх вимірювання; проєктування архітектури системи; розробку схеми підключення; написання програмного забезпечення; реалізацію інтерфейсу користувача; тестування пристрою в реальних умовах. Також визначено обмеження поточної реалізації та запропоновано шляхи її подальшого розвитку.

Ключові слова: МОНІТОРИНГ ПОВІТРЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР ESP32, BME280, MH-Z19B, PMS5003, МІКРОКЛІМАТ, ЯКІСТЬ ПОВІТРЯ, CO₂, PM2.5, IoT, TFT-ДИСПЛЕЙ.

ABSTRACT

The explanatory note includes 69 pages, 15 figures, 5 tables, 1 appendices, and 18 sources.

This work is devoted to the development of a hardware-software air quality monitoring system based on the ESP32 microcontroller. The relevance of the study is due to the need for local devices capable of detecting air pollution levels, carbon dioxide concentration, temperature, humidity, and atmospheric pressure in residential or educational indoor spaces.

Object of the study – the process of air quality monitoring in enclosed environments.

Subject of the study – the structure and implementation of a hardware-software complex based on ESP32 with BME280, PMS5003, and MH-Z19B sensors, providing air parameter measurement and output to a TFT display.

The aim of the work is to create an autonomous, affordable, and functional monitoring device that operates in real time, does not require an Internet connection, and is user-friendly.

The study includes: analysis of microclimate parameters; selection of sensors for measurement; system architecture design; wiring diagram development; software implementation; user interface creation; and real-world device testing. The current limitations of the implementation are also identified, and potential development paths are proposed.

Keywords: AIR MONITORING, ESP32 MICROCONTROLLER, BME280, MH-Z19B, PMS5003, MICROCLIMATE, AIR QUALITY, CO₂, PM2.5, IoT, TFT DISPLAY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	4
ВСТУП.....	5
1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА АНАЛІЗ ОБЛАСТІ.....	9
1.1 Аналіз прикладних сценаріїв моніторингу повітря	9
1.2 Вимоги до системи.....	12
1.3 Огляд підходів до побудови подібних систем.....	15
2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ	19
2.1 Архітектура системи перевірки якості повітря.....	19
2.2 Модульна структура та підбір функціональних компонентів	21
2.3 Проєктування модуля мікроклімату: підбір сенсора температури, тиску і вологості	25
2.4 Проєктування модуля аналізу CO ₂ : підбір сенсору	29
2.5 Проєктування модуля аналізу пилу: підбір сенсору.....	32
2.6 Проєктування живлення для стаціонарної системи перевірки якості повітря	38
2.7 Висновки за розділом.....	40
3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ	43
3.1 Реалізація системи моніторингу повітря	43
3.2 Принцип роботи системи та логіка програмного забезпечення	47
3.3 Схема підключень системи моніторингу якості повітря	50
3.4 Розробка програмного забезпечення: структура коду та функції	53
3.5 Обмеження реалізації.....	55
3.6 Потенціал розширення та подальший розвиток.....	58
3.7 Висновки за розділу	60
ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	64
ДОДАТОК А ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ.....	66

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ESP32	–	Embedded Serial Processor 32-bit
CO₂	–	Carbon Dioxide – вуглекислий газ
PM	–	Particulate Matter – (PM1.0, PM2.5, PM10 частки 1, 2.5 та 10 мкм)
TFT	–	Thin-Film Transistor – тип рідкокристалічного дисплея
UART	–	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
I²C	–	Inter-Integrated Circuit – інтерфейс зв'язку між мікросхемами
SDA	–	Serial Data – лінія даних інтерфейсу I ² C
SCL	–	Serial Clock – лінія тактової синхронізації інтерфейсу I ² C
SPI	–	Serial Peripheral Interface
GPIO	–	General Purpose Input/Output
PWM	–	Pulse-Width Modulation – широтно-імпульсна модуляція
IoT	–	Internet of Things
IDE	–	Integrated Development Environment
JSON	–	JavaScript Object Notation – формат обміну даними
ІЗ	–	Програмне забезпечення
КФС	–	Кіберфізична система
PPM	–	Parts Per Million (частин на мільйон)

ВСТУП

У сучасному світі питання екології та комфорту проживання стають дедалі актуальнішими. Людина проводить більшість часу в закритих приміщеннях — вдома, на роботі, в навчальних закладах. У таких умовах якість повітря, яким вона дихає, має суттєвий вплив на здоров'я, самопочуття та працездатність. Серед основних параметрів, що визначають мікроклімат, виділяють температуру, вологість, атмосферний тиск, концентрацію вуглекислого газу (CO_2), а також вміст твердих часток ($\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}).

Дослідження показують, що перевищення рівня CO_2 у приміщеннях негативно впливає на когнітивні функції та здатність до концентрації. Надлишок дрібнодисперсного пилу асоціюється з респіраторними захворюваннями, алергіями, проблемами з серцево-судинною системою. При цьому багато приміщень не обладнані системами вентиляції, які могли б вчасно реагувати на зміну параметрів повітря. Це створює потребу у простих, доступних засобах моніторингу мікроклімату, здатних інформувати користувача про небезпечні зміни в навколишньому середовищі.

На сучасному етапі розвитку електроніки створення таких пристроїв стало реальністю завдяки використанню мікроконтролерних платформ, доступних сенсорів і відкритого програмного забезпечення. Зокрема, плата ESP32 поєднує в собі високу продуктивність, підтримку багатьох інтерфейсів (I^2C , UART, SPI), вбудовану графіку та можливість підключення до бездротових мереж. Вона активно використовується у багатьох проєктах зі створення розумних пристроїв, зокрема в системах екологічного моніторингу.

Аналіз вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури показує, що на ринку існує велика кількість готових пристроїв для вимірювання якості повітря. Проте більшість з них є або надто дорогими, або недостатньо гнучкими з точки зору користувача. Часто вони не надають можливості змінювати логіку обробки даних або не мають локального виводу результатів. Тому питання розробки власного компактного пристрою з відкритою

архітектурою, який можна адаптувати під конкретні потреби, залишається актуальним.

У цій роботі передбачається створення стаціонарного модуля перевірки якості повітря, що працює в автономному режимі, має вбудований дисплей для виводу поточних значень та дві кнопки для перемикання між сторінками інтерфейсу. Такий пристрій не залежить від підключення до Інтернету чи зовнішніх серверів і є повністю незалежною локальною системою.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу якості повітря у побутових і навчальних приміщеннях за допомогою мікроконтролерної програмно-апаратної системи.

Предметом дослідження є реалізація модулю на базі плати ESP32 з сенсорами BME280, PMS5003, та MH-Z19B, а також розробка програмного забезпечення, що забезпечує зчитування, обробку, виведення даних та взаємодію з користувачем.

Метою роботи є створення надійного, зручного і доступного пристрою моніторингу, який у режимі реального часу відображає дані про стан повітря у приміщенні й може бути використаний без залучення складної інфраструктури.

Основні завдання дослідження:

- провести огляд фізичних параметрів, що впливають на якість повітря;
- вивчити можливі сенсорні рішення для вимірювання CO₂, запиленості, температури та вологості;
- обґрунтувати вибір апаратної платформи для реалізації пристрою;
- реалізувати електричну схему підключення сенсорів;
- розробити програмне забезпечення для збору, обробки та виводу даних;
- організувати простий інтерфейс відображення на TFT-дисплеї;
- провести тестування системи та оцінити її точність, стабільність і можливості для розвитку.

Актуальність дослідження полягає у поєднанні доступності апаратної бази з практичною потребою контролю параметрів навколишнього

середовища. Така система може бути корисною не лише для побутового використання, але і як демонстраційна модель у навчальних закладах або частина більших систем автоматизації.

Новизна роботи полягає в практичній реалізації компактного, автономного пристрою з локальним інтерфейсом, який не потребує підключення до хмарних сервісів і здатний працювати стабільно в умовах реального використання. Запропонований підхід демонструє можливість створення цілісної кіберфізичної системи на основі відкритих компонентів, придатної до подальшого масштабування та модернізації.

Таким чином, дана робота є прикладом інженерного проєкту, орієнтованого на практичну реалізацію пристрою, що відповідає сучасним вимогам до ефективності, простоти та адаптивності в умовах побутового або навчального застосування.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА АНАЛІЗ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз прикладних сценаріїв моніторингу повітря

Моніторинг якості повітря — це процес безперервного або періодичного спостереження за складом повітряного середовища з метою своєчасного виявлення потенційно небезпечних змін, які можуть вплинути на здоров'я людей, стан навколишнього середовища або умови експлуатації обладнання та приміщень. Залежно від масштабу та мети спостереження, системи моніторингу можуть суттєво відрізнятися за складом, функціональністю, точністю та вартістю.

У сучасних умовах подібні системи застосовуються у широкому спектрі галузей:

1. Побутовий сектор. Все більше уваги приділяється якості повітря у житлових приміщеннях. Через недостатню вентиляцію, використання побутової хімії, опалювальних приладів та пластикових матеріалів у інтер'єрі повітря в приміщенні може бути забрудненим навіть більше, ніж на вулиці. Зокрема, підвищений рівень CO₂ призводить до зниження концентрації, головного болю, млявості, що особливо небезпечно у дитячих кімнатах та спальнях. Доступна система моніторингу дозволяє вчасно виявляти перевищення норм і приймати заходи — наприклад, провітрювати приміщення або вмикати очищувач повітря.
2. Навчальні заклади та офіси. Велике скупчення людей у замкнутому просторі призводить до швидкого зростання концентрації CO₂. Як показують дослідження, вже при рівні понад 1000 ppm у класах спостерігається погіршення уваги у школярів, а при 1500–2000 ppm — зниження когнітивних функцій. Наявність простого пристрою, який візуально попереджає про перевищення допустимих рівнів, може суттєво покращити мікроклімат і продуктивність праці або навчання [16].

3. Промислові об'єкти. У цехах, на складах, у виробничих приміщеннях присутні не лише пил та CO_2 , а й інші небезпечні речовини, проте навіть базовий рівень моніторингу дозволяє виявляти небезпечні умови до моменту, коли це стане загрозою. Для промислових потреб зазвичай використовуються складніші системи, але вони можуть будуватись на тих самих принципах.
4. Сільське господарство. У теплицях, сховищах для врожаю, приміщеннях для тварин особливу роль відіграють вологість, температура та CO_2 . Автоматичні системи, здатні відслідковувати і регулювати ці параметри, позитивно впливають на ріст рослин, збереження продукції або добробут тварин. Моніторинг у таких умовах — не розкіш, а інструмент оптимізації витрат і підвищення якості продукції.
5. Громадський простір та міський моніторинг. Хоча міські станції моніторингу забруднення повітря зазвичай є великогабаритними та дорогими, світова тенденція йде до створення децентралізованих мереж локального моніторингу. Такі пристрої встановлюють на зупинках, у парках, у дворах багатоквартирних будинків. Дані з них дозволяють формувати локальні карти якості повітря в реальному часі, що особливо актуально в умовах смогу, пожеж, пилових бур або інверсій.
6. Інтеграція у системи “розумного дому”. Інтернет речей (IoT) активно розвивається, і модулі моніторингу повітря стають стандартною частиною екосистем «розумних» осель. Дані з сенсорів можуть слугувати тригерами для запуску очищувачів повітря, відкриття вікон, включення вентиляції чи надсилання повідомлення користувачеві. У цьому контексті система має бути енергоефективною, компактною, надійною та здатною до автономної роботи [13].

Таким чином, системи моніторингу повітря відіграють ключову роль у забезпеченні інформаційної екологічної безпеки, охороні здоров'я, покращенні умов праці, а також є важливим інструментом у сфері автоматизації й цифровізації середовища проживання. Особливо актуальним є створення модульних, масштабованих і недорогих рішень, які можна адаптувати під конкретні задачі, не вдаючись до складного інженерного втручання.

Запропонована у дипломній роботі система якраз і є таким рішенням — вона призначена для використання у побутових і напівпрофесійних умовах, не потребує значних витрат і водночас дозволяє відслідковувати критично важливі параметри повітря. Подібні пристрої можуть стати частиною не лише домашнього побуту, а й навчального процесу, поширення екологічної грамотності, а також експериментального середовища для досліджень і проєктної роботи студентів та учнів.

Крім уже розглянутих прикладів, важливо згадати ще одну перспективну сферу використання подібних систем — освітні проєкти та STEAM-напрямки в навчанні. Багато сучасних навчальних закладів прагнуть інтегрувати практичні технічні проєкти у програму, щоби студенти мали можливість застосовувати знання з інформатики, електроніки та екології на реальних прикладах. Система моніторингу повітря, яку можна зібрати власноруч, підключити до інтерфейсу і спостерігати за даними — чудовий кейс для STEM/STEAM-підходу до навчання. Вона дозволяє не лише формувати технічні навички, а й розвивати критичне мислення, аналіз даних, розуміння причинно-наслідкових зв'язків у природних процесах.

Також важливо зазначити, що питання якості повітря дедалі частіше входить у сферу державного регулювання. У багатьох країнах розробляються стандарти та нормативи для моніторингу умов мікроклімату в школах, дитячих садках, офісах, навіть житлових приміщеннях. Наприклад, у деяких європейських країнах (Фінляндія і Норвегія) вже є нормативні вимоги щодо допустимого рівня CO₂ у класах, що вимагає постійного контролю та фіксації

[16]. Це створює запит на прості й недорогі пристрої, які можуть бути використані локально — без складного монтажу, налаштування або дорогого обслуговування.

З огляду на це, розробка подібних систем може мати як прикладне, так і комерційне значення. Їх можна адаптувати під потреби конкретних замовників, масштабувати для серійного виробництва або поширювати як частину просвітницьких та соціальних ініціатив. Наприклад, існують кейси, коли подібні пристрої використовувалися в громадах для створення локальних еко-карт або запуску краудсорсингових ініціатив щодо якості повітря. Таким чином, навіть базовий пристрій, створений на мікроконтролері ESP32 з декількома сенсорами, може мати вплив не лише на користувача, а й на спільноту загалом.

Крім того, важливо враховувати розвиток екосистеми пристроїв Internet of Things (IoT), де модулі моніторингу повітря можуть виступати елементом складніших систем. Це відкриває перспективи інтеграції з сервісами розумного управління, платформами автоматичного реагування, мобільними додатками, а також з архітектурами, які включають машинне навчання або хмарні аналітичні сервіси.

Усе вищевикладене демонструє широкий спектр прикладних сценаріїв використання систем моніторингу повітря. Така багатофункціональність і адаптивність підкреслює значущість теми дослідження, визначає її як актуальну не лише в академічному чи побутовому контексті, а й у загальносуспільному та глобальному значенні.

1.2 Вимоги до системи

Під час розробки будь-якого програмно-апаратного комплексу важливо чітко сформулювати вимоги до майбутньої системи. Це дозволяє уникнути двозначностей при реалізації, забезпечити відповідність очікуванням користувачів та задовольнити технічні умови, притаманні обраній апаратній платформі. У контексті цієї кваліфікаційної роботи основним завданням є створення компактної, надійної та зрозумілої у використанні системи для

моніторингу якості повітря. Нижче сформульовано ключові вимоги до такої системи.

Функціональні вимоги визначають, що саме система повинна виконувати. У межах цього проекту до функціональних вимог належать:

- Збір даних з сенсорів:
 - PMS5003 — зчитування рівня дрібнодисперсних частинок PM1.0, PM2.5 та PM10;
 - MH-Z19B — отримання значення концентрації CO₂ в одиницях ppm (parts per million);
 - BME280 — вимірювання температури повітря (°C), вологості (%) та атмосферного тиску (гПа або мм рт. ст.).
- Обробка даних:
 - Агрегація, перевірка на помилки, фільтрація шумів, усереднення показників (при потребі).
 - Можливість подальшої реалізації калібрування згідно з рекомендаціями виробників сенсорів.
- Відображення даних:
 - Вивід показників на вбудований OLED-дисплей, що інтегрований у плату ESP32 TTGO.
 - Дані мають бути структуровані, розділені на блоки, з позначенням одиниць вимірювання.
- Реакція на критичні значення:
 - При перевищенні допустимих рівнів CO₂ або PM2.5 — індикація (наприклад, зміна кольору тексту на дисплеї, значок попередження).
- Періодичне оновлення інформації:
 - Автоматичне зчитування даних з певною частотою (наприклад, кожні 2–5 секунд).
- Повноцінне автономне функціонування:

- Після живлення пристрій автоматично запускається та починає вимірювання без додаткових дій користувача.

Нефункціональні вимоги: нефункціональні вимоги визначають характеристики системи, що не пов'язані безпосередньо з її функціональністю, але впливають на зручність і надійність використання:

- Простота використання: система має бути інтуїтивно зрозумілою для користувача без технічної підготовки.
- Стабільність роботи: система повинна працювати без збоїв протягом тривалого часу (від кількох годин до кількох днів без перезавантаження).
- Розширюваність: має бути можливість додати нові сенсори або модулі без суттєвої переробки всієї архітектури.
- Модульність коду: програмна реалізація повинна передбачати розділення логіки за модулями для полегшення майбутнього обслуговування.

Апаратні вимоги. Для коректної роботи системи необхідна наявність:

- Мікроконтролера ESP32 LILYGO T-Display TTGO, який забезпечує:
 - інтерфейси UART, I²C для підключення сенсорів;
 - наявність OLED-дисплея для виводу даних;
 - достатній об'єм оперативної пам'яті для обробки даних;
 - вбудований USB-інтерфейс для живлення та прошивки.
- Сенсорів:
 - PMS5003 — підключення через UART;
 - MH-Z19B — UART або PWM;
 - BME280 — I²C.
- Блоку живлення:
 - Зовнішнє живлення через USB (тип C);
 - Опційно — підтримка акумулятора (на перспективу).
- Провідників/перехідників для фізичного з'єднання компонентів.

Вимоги до точності.

Хоча дана система не є лабораторним приладом, важливо забезпечити достатню точність вимірювань для прийняття рішень у побутових або освітніх умовах. Орієнтовні вимоги:

- PMS5003: точність $\pm 10\%$ для часток PM2.5 та PM10;
- MH-Z19B: $\pm 50 \text{ ppm} + 5\%$ виміряного значення;
- BME280: $\pm 1^\circ\text{C}$ по температурі, $\pm 3\%$ по вологості.

Вимоги до інтерфейсу.
Користувацький інтерфейс у даному випадку — це вивід інформації на OLED-дисплей.

Основні вимоги:

- Усі показники мають бути виведені одночасно або по черзі з інтервалом;
- Використання чітких шрифтів, контрастних кольорів (біла/жовта графіка на чорному фоні);
- Позначення одиниць вимірювання ($^\circ\text{C}$, %, ppm тощо);
- Індикатори нормальних або критичних значень (символи, кольори, піктограми).

Вимоги до розширення.

Хоча базова версія системи передбачає локальне вимірювання, у перспективі передбачено:

- Зберігання даних (на SD-карті або у внутрішній пам'яті);
- Передача даних через Wi-Fi на сервер або мобільний застосунок;
- Робота з веб-інтерфейсом або API;
- Додаткові модулі живлення з автоматичним перемиканням у разі відключення мережі.

1.3 Огляд підходів до побудови подібних систем

Системи моніторингу якості повітря — це технічні комплекси, які забезпечують спостереження за станом атмосферного середовища в реальному або наближеному до реального часі. Вони можуть істотно відрізнятися за рівнем складності, точності, масштабності, вартості та архітектурними

рішеннями. У цьому підпункті буде розглянуто загальні підходи до створення подібних систем, що дозволяє краще зрозуміти, які є варіанти реалізації та якими принципами керуються розробники.

Централізовані проти децентралізованих підходів. Перш за все, слід розрізняти централізовані та децентралізовані підходи до побудови систем моніторингу:

- Централізовані системи зазвичай будуються у вигляді окремих стаціонарних станцій, які збирають інформацію з великої кількості сенсорів і передають її до єдиного центру обробки. Такі рішення характерні для державних служб екологічного моніторингу або великих підприємств. Вони відзначаються високою точністю, але й високою вартістю, обмеженою мобільністю та складністю обслуговування.
- Децентралізовані системи або так звані edge-рішення, навпаки, передбачають велику кількість невеликих незалежних модулів, які встановлюються в різних локаціях та можуть працювати автономно або з частковою передачею даних. Цей підхід популярний у побутових, освітніх та громадських ініціативах, оскільки дозволяє отримувати локальні дані у великій кількості точок за відносно низьку вартість.

Саме до децентралізованого підходу належить система, розроблена в межах даної роботи, оскільки вона передбачає створення компактного окремого пристрою з локальним збором та відображенням даних.

Комерційні рішення проти DIY-підходу

Ще один важливий поділ — це готові комерційні продукти та системи, створені за принципом DIY (Do It Yourself):

- Комерційні пристрої зазвичай пропонують гарний дизайн, фабричне калібрування сенсорів, підтримку мобільних додатків, але часто мають закриту архітектуру, що обмежує можливість розширення функціоналу, адаптації під конкретні задачі або інтеграції в інші системи.
- DIY-рішення навпаки — відкриті, гнучкі, дешевші у реалізації, хоча й вимагають більше технічних знань від розробника. Вони є чудовою

основою для експериментів, навчання, досліджень, а також для створення спеціалізованих або кастомізованих систем.

У даній роботі реалізовано саме DIY-рішення, що відкриває можливості для вільного програмування, зміни логіки, заміни сенсорів та подальшої модернізації.

Узагальнена архітектура системи моніторингу.

Типова архітектура системи моніторингу якості повітря складається з кількох ключових блоків:

1. Збір даних (Data Acquisition) – сенсори (газові, пилові, кліматичні), які зчитують фізичні параметри середовища.
2. Обробка даних (Data Processing) – мікроконтролер або вбудований комп'ютер, який забезпечує фільтрацію, калібрування, усереднення.
3. Виведення результатів (Data Output) – дисплей, веб-інтерфейс або інші засоби візуалізації.
4. Зберігання/Передача (Data Logging/Transmission) – SD-карта, внутрішня пам'ять або передача на сервер (локальний чи хмарний).
5. Живлення (Power Supply) – постійне або резервне, з можливістю переходу на акумулятор у разі відключення.

Не всі системи містять усі ці елементи одразу. Наприклад, у деяких випадках достатньо лише дисплея, без зберігання чи передачі, — усе залежить від мети.

Програмні підходи

Програмне забезпечення також є критично важливою частиною.

Основні підходи включають:

- Роботу з низькорівневими бібліотеками (Arduino, ESP-IDF);
- Обробку даних через вбудовані алгоритми;
- Візуалізацію у вигляді графіків або повідомлень;
- Реалізацію тригерів для подій (наприклад, увімкнення сигналу при перевищенні порогу).

У багатьох проєктах використовуються відкриті бібліотеки — наприклад, для BME280 існує бібліотека з підтримкою температурної компенсації, для MH-Z19B — бібліотека з автокалібруванням і підтримкою декількох протоколів.

Калібрування та точність.

Одним з найважливіших етапів є калібрування сенсорів. Без нього навіть найкращий сенсор може давати некоректні показники. Існують кілька підходів:

- Використання заводських калібрувальних таблиць;
- Зовнішнє калібрування на основі порівняння з референсними приладами;
- Автоматичне калібрування на основі умов середовища (деякі сенсори, наприклад MH-Z19B, підтримують таку функцію).

У системах DIY калібрування часто проводиться вручну або взагалі ігнорується, що може призводити до помилок — тому цей аспект вимагає особливої уваги при реалізації.

Роль інтерфейсів та форматів.

Підключення сенсорів до мікроконтролера може здійснюватися через UART, I²C, або PWM. У більшості систем застосовуються UART (для CO₂ і пилу) та I²C (для кліматичних датчиків). Вибір інтерфейсу впливає на швидкість обміну, надійність, сумісність та кількість доступних портів. [5] [15] [18]

Також варто враховувати формати обміну даними — текстовий (ASCII), бінарний, JSON тощо. Це має значення при інтеграції з іншими системами, особливо якщо планується передача даних у мережу.

2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

2.1 Архітектура системи перевірки якості повітря

Перед тим як перейти до аналізу компонентів, варто окреслити загальну концепцію архітектури системи, яка розробляється в межах цієї кваліфікаційної роботи. Це дозволяє не лише обґрунтувати вибір сенсорів, а й логічно зрозуміти, яку функціональну роль виконуватиме кожен модуль у складі пристрою.

Проектowana система є багатокомпонентним пристроєм моніторингу екологічних параметрів, що має стаціонарне виконання та орієнтована на безперервний локальний контроль повітряного середовища в закритому приміщенні (житло, клас, офіс тощо).

Загальна логіка архітектури

Архітектура системи складається з кількох логічно-функціональних блоків, які взаємодіють між собою через мікроконтролер. Усі ці блоки, за винятком самих сенсорів, проєктуються, збираються та програмуються безпосередньо в межах цієї дипломної роботи.

1. Модуль збору кліматичних даних. Відповідає за вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску. Це базові параметри мікроклімату, які дозволяють оцінити комфорт та потенційний вплив середовища на самопочуття людини.

2. Модуль аналізу якості повітря за конценатрацією твердих часток. Цей блок відповідає за виявлення дрібнодисперсних частинок (PM1.0, PM2.5, PM10), що є ключовим фактором у визначенні рівня забрудненості повітря. Дані цього блоку використовуються для класифікації повітря як чистого, помірного або шкідливого.

3. Модуль газового аналізу (CO₂). Здійснює моніторинг рівня вуглекислого газу у повітрі, що є важливим індикатором ефективності вентиляції. Надмірна концентрація CO₂ може негативно впливати на когнітивні функції та загальне самопочуття.

4. Модуль інтерфейсу та відображення. Призначений для виведення даних на вбудований TFT-дисплей. Включає в себе елементи керування (кнопки), систему автоматичного оновлення інформації та логіку кольорової індикації.

5. Блок живлення. Система отримує енергію через стандартний USB-адаптер від мережі. Це дозволяє забезпечити постійну та стабільну роботу пристрою без використання акумуляторів чи зовнішніх джерел живлення.

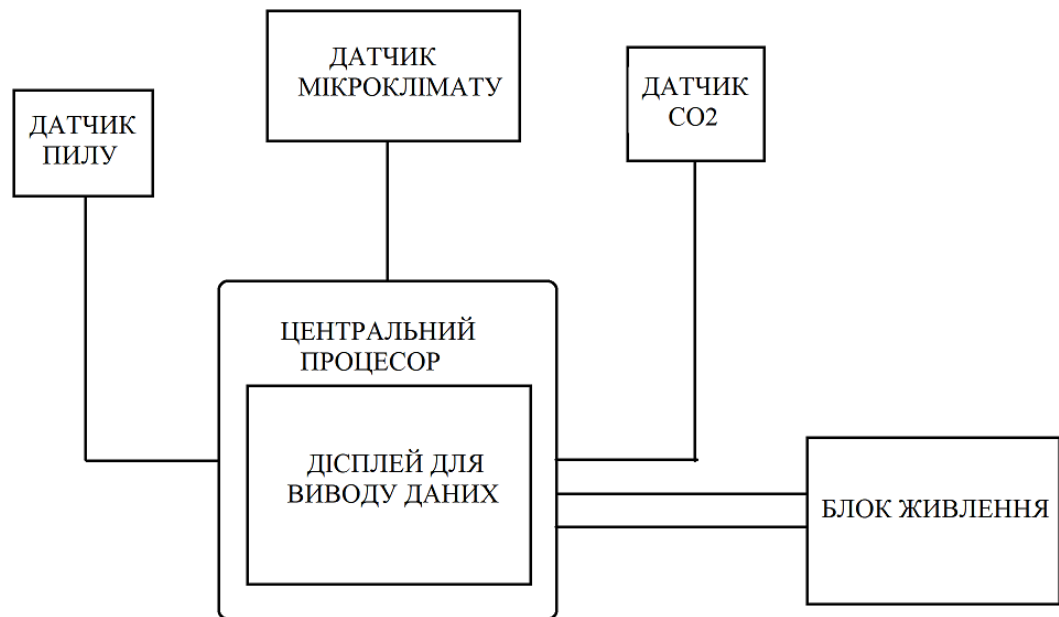


Рисунок 2.1 – Спрощена узагальнена схема архітектури

Взаємодія компонентів

Центральним елементом архітектури є мікроконтролер ESP32, який виконує роль "мозку" системи. Він приймає дані з сенсорів через відповідні інтерфейси (I²C, UART), обробляє їх у реальному часі та виводить на екран. Розподіл обов'язків між модулями дозволяє спростити логіку, масштабувати систему, а також легко модернізувати її в майбутньому. [10]

Пояснення до підходу

У межах цієї роботи не розробляються власні сенсори, а обираються готові рішення з ринку. Водночас, самостійно реалізується інтеграція всіх функціональних блоків, їх фізичне поєднання, розробка схеми підключення,

програмної логіки, інтерфейсу користувача та загального циклу роботи системи.

Саме розробка цих функціональних модулів, а не сенсорів як таких, і є предметом кваліфікаційної роботи.

Висновок

Таким чином, перед вибором конкретних сенсорів, було сформовано чітке уявлення про архітектуру майбутнього пристрою, що дозволяє далі логічно перейти до аналізу аналогів, порівняння технічних характеристик та обґрунтування вибору конкретних компонентів для кожного з функціональних блоків системи.

2.2 Модульна структура та підбір функціональних компонентів

Одним із ключових етапів під час побудови системи моніторингу якості повітря є вибір сенсорних модулів, які забезпечують достовірне зчитування параметрів довкілля. На ринку представлено десятки різних варіантів сенсорів — від простих бюджетних моделей до професійних пристроїв, вартість яких у кілька разів перевищує ціну всього проекту. У цьому підпункті розглядається порівняльна характеристика доступних на ринку рішень та обґрунтовується вибір конкретних модулів, які використовуються в межах цієї роботи.

Окрему увагу при формуванні архітектури було приділено вибору контролера. У результаті аналізу різних рішень обрано LILYGO TTGO T-Display ESP32 — плату з інтегрованим TFT-дисплеєм, яка ідеально підходить для компактних систем з виводом інформації. Її перевагами є наявність двох фізичних кнопок, підтримка бездротових інтерфейсів (Wi-Fi, Bluetooth), достатня кількість GPIO, простота підключення та активна спільнота. Також це рішення дозволяє уникнути використання окремого екрана, що знижує загальну вартість і складність пристрою.

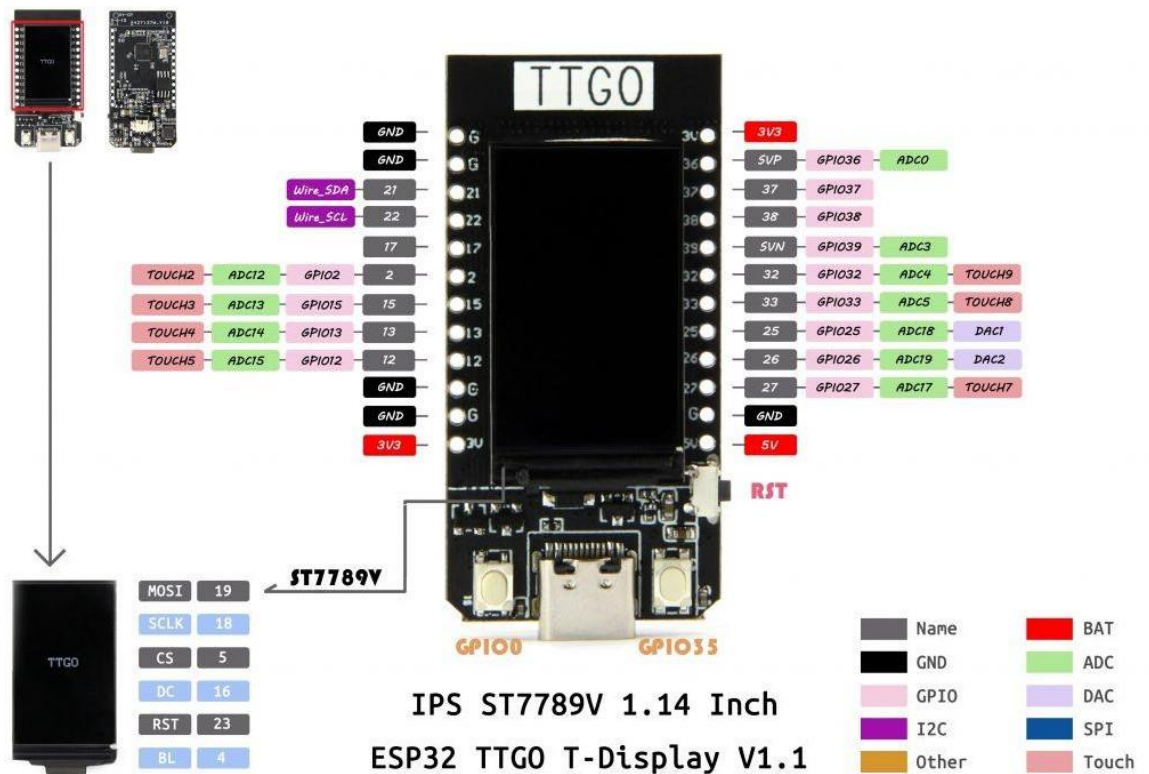


Рисунок 2.2 – Плата LILYGO TTGO T-DISPLAY і розташування пінів з позначенням їх характеристик

При підборі компонентів урахувались наступні критерії:

- Точність і стабільність вимірювань
- Наявність незалежних оглядів і тестів
- Підтримка відкритих бібліотек
- Сумісність із ESP32
- Вартість і доступність у вітчизняних та міжнародних магазинах
- Простота інтеграції в побутовий/DIY-проект

В результаті аналізу було обрано три основні сенсори:

- BME280 — для вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску;
- MH-Z19B — для моніторингу вуглекислого газу (CO₂);
- PMS5003 — для аналізу рівня пилу в повітрі (PM1.0, PM2.5, PM10).

Нижче наведено аналіз аналогів, які розглядалися, та аргументацію вибору.

Сенсори температури і вологості: DHT11 / DHT22 проти BME280

На ринку найбільш поширеними є модулі DHT11 та DHT22 (AM2302). Вони мають низьку вартість, але значно поступаються за точністю та стабільністю дорожчим рішенням. Зокрема, DHT11 узагалі не рекомендований для серйозних задач, оскільки його похибка перевищує $\pm 5^{\circ}\text{C}$, а діапазон вологості обмежено до 80%. DHT22 — більш точний, однак має часті збої, особливо у вологих умовах, і повільну швидкість оновлення даних (до 2 секунд). Крім того, обидва сенсори не мають функції вимірювання атмосферного тиску, що обмежує можливості аналізу.

BME280 компанії Bosch має низку переваг:

- Висока точність ($\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\pm 3\% \text{ RH}$, $\pm 1 \text{ гПа}$);
- Вимірює одразу три параметри: температура, вологість, тиск;
- Цифрові інтерфейси I²C для надійного підключення;
- Доступні офіційні бібліотеки та документація від виробника;
- Стабільна робота у широкому діапазоні температур та вологості.

Вартість BME280 лише трохи перевищує DHT22, але значно перевершує його за якістю. У спільноті DIY-розробників, а також у технічних оглядах (Hackaday, Adafruit) BME280 вважається «золотим стандартом» для побутових систем екологічного моніторингу. [1]

Висновок: з точки зору ціна/якість BME280 є оптимальним рішенням і був обраний як основний кліматичний сенсор.

Сенсори CO₂: MG811, K30, Senseair S8 проти MH-Z19B

Для вимірювання вуглекислого газу існує декілька типів сенсорів:

- MG811 — хімічний сенсор на основі напівпровідникового елементу. Дешевий, але вимагає складного калібрування, сильно залежить від температури, вологи та інших газів. Часто використовується в навчальних цілях, але не забезпечує стабільної точності.
- K30 — професійний сенсор з точністю $\pm 30 \text{ ppm}$, але вартість перевищує \$50–70, що робить його недоцільним для побутового проєкту.

- Senseair S8 — якісний компактний сенсор із хорошою репутацією, проте дорожчий за MH-Z19B, складніше знайти у роздрібному продажі.

MH-Z19B — доступний за ціною (близько \$15–20), використовує інфрачервоний метод NDIR, має вбудоване автокалібрування та простий UART-інтерфейс. Він широко використовується в DIY-проектах, підтримується у багатьох бібліотеках, має перевірену стабільність і точність ($\pm 50 \text{ ppm} + 5\%$).

Висновок: MH-Z19B — найкращий компроміс між доступністю, простотою та достатньою точністю. Його використання цілком виправдане з урахуванням бюджету та призначення проекту.

Сенсори пилу: Sharp GP2Y, SDS011 проти PMS5003 Серед бюджетних сенсорів пилу можна виокремити:

- Sharp GP2Y1010AU0F — оптичний сенсор, який визначає запиленість повітря. Має лише аналоговий вихід, низьку чутливість, погану роздільну здатність. Використовується здебільшого в базових навчальних проектах.
- Nova SDS011 — лазерний сенсор, аналог PMS5003. Має хорошу точність, але більші габарити, менше захисту від вологи і пилу, а також складніше підключення.
- PMS5003 — лазерний сенсор від Plantower, який дозволяє визначати PM1.0, PM2.5 та PM10. Має зручний UART-інтерфейс, хорошу репутацію, стабільні результати та величезну базу готових бібліотек і прикладів.

В оглядах часто зазначається, що PMS5003 краще працює при тривалому використанні завдяки внутрішньому вентилятору та якісній збірці. Його дані легко обробляти, а сенсор має зручну текстову структуру протоколу.

Висновок: PMS5003 — найкращий серед недорогих лазерних сенсорів для моніторингу пилу в побутових умовах. Саме він був обраний для цієї системи.

Загальний висновок

Усі обрані сенсори були підібрані з урахуванням оптимального співвідношення між ціною, якістю, стабільністю, простотою підключення та доступністю документації. Їх об'єднує:

- відкритість протоколів передачі даних;
- наявність готових бібліотек для ESP32;
- доведена на практиці точність та надійність у побутових умовах;
- підтримка спільноти розробників.

Це робить їх найбільш підходящий для побудови відкритої, гнучкої та бюджетної системи перевірки якості повітря, яка може бути використана у побуті, освіті або навіть у якості тестового стенду для наукових досліджень.

2.3 Проєктування модуля мікроклімату: підбір сенсора температури, тиску і вологості

Серед сенсорів для вимірювання температури та вологості, які активно використовуються у проєктах екологічного моніторингу, особливе місце займає модуль DHT22 (також відомий як AM2302). Його часто рекомендують новачкам у світі Arduino, ESP32 та інших мікроконтролерів через низьку вартість, простоту підключення та доступність у продажу. У свою чергу, BME280 — це більш сучасний та функціонально багатший сенсор, розроблений компанією Bosch, який, хоч і коштує дорожче, забезпечує значно вищу точність, стабільність та ширші можливості використання.



Рисунок 2.3 – датчик DHT22

Чому DHT22 такий популярний?

Основні причини популярності DHT22 серед початківців та ентузіастів:

- Низька ціна — зазвичай у межах \$3–4, що робить його привабливим для простих домашніх проєктів.
- Простота у використанні — підтримується майже всіма бібліотеками Arduino, легко підключається через 1 пін, має мінімальні вимоги до живлення.
- Широке поширення — цей сенсор можна знайти у більшості стартових наборів для Arduino або ESP-плат.

Багато онлайн-уроків, відео та проєктів використовують DHT22, що формує у новачків враження, ніби це оптимальний варіант для будь-яких застосувань. Проте така популярність часто є поверхневою і не враховує глибші аспекти — зокрема якість та надійність отриманих даних.

Обмеження та проблеми DHT22

Попри початкову привабливість, сенсор DHT22 має ряд серйозних недоліків, які суттєво обмежують його використання в задачах, де важлива точність і довготривала стабільність:

- Велика похибка у вимірюванні вологості — згідно з відгуками та незалежними дослідженнями, похибка може сягати до 20–50% у вологих умовах. Сенсор часто переоцінює або недооцінює реальні

значення, особливо при температурних коливаннях або тривалій роботі.

- Низька частота оновлення даних — нові значення можна зчитувати не частіше, ніж раз на 1–2 секунди.
- Нестабільна робота при високій вологості — тривале перебування в умовах вологості понад 80% може призводити до деградації показників.
- Відсутність можливості вимірювати тиск — що обмежує аналіз змін погоди або мікроклімату.
- Складне калібрування — відсутність офіційної підтримки від виробника, неконсистентна якість серій, різні варіанти прошивки сенсора.

Таким чином, попри початкову зручність, DHT22 не забезпечує надійності, яка потрібна для серйозної системи моніторингу повітря. Він може використовуватись для демонстрацій чи тимчасових проєктів, але не рекомендований для довготривалої або відповідальної експлуатації.

Чому BME280 є кращим вибором



Рисунок 2.4 – датчик BME280

Сенсор BME280, попри вищу ціну (в середньому \$5–8), пропонує суттєво вищий рівень якості:

- Висока точність:
 - температура: $\pm 1^{\circ}\text{C}$;
 - вологість: $\pm 3\% \text{ RH}$;
 - тиск: $\pm 1 \text{ гПа}$.

- Три параметри в одному модулі — температура, вологість, тиск. Це дозволяє не лише аналізувати мікроклімат, а й робити прогноз погоди або відстежувати коливання навколишнього середовища.
- Цифрові інтерфейси I²C — стабільна передача даних, можливість підключення кількох сенсорів на одній шині.
- Температурна компенсація — внутрішня логіка автоматично компенсує зміни температури на інші показники.
- Наявність офіційної підтримки — Bosch надає офіційну бібліотеку та документацію, включаючи інформацію для калібрування.
- Мініатюрність і стабільність — сенсор компактний, енергоефективний і добре працює в широкому діапазоні умов.

На відміну від DHT22, BME280 спочатку проектувався для надійних вбудованих рішень, з прицілом на використання в IoT-системах де важлива точність, стабільність і мала похибка при низькому енергоспоживанні. [6] [9]

Підсумкове порівняння

Таблиця 2.3.1 – Порівняння датчиків DHT22 і BME280

Параметр	DHT22	BME280
Температура, точність	±0.5°C	±1.0°C
Вологість, точність	±2–5% (теоретично)	±3% (реально стабільно)
Вимірювання тиску	Немає	Є
Інтерфейс	Один цифровий пін	I ² C / SPI
Частота оновлення	Повільна (~1 Гц)	Висока (>10 Гц)
Надійність	Сумнівна	Висока
Ціна (орієнтовно)	\$3–5	\$6–9

2.4 Проектування модуля аналізу CO₂: підбір сенсору

Моніторинг рівня вуглекислого газу (CO₂) у повітрі є важливою складовою системи оцінки якості повітря, особливо у замкнених приміщеннях. Надлишок CO₂ є не лише показником низького рівня вентиляції, а й чинником, що безпосередньо впливає на здоров'я та самопочуття людей. Високий рівень CO₂ (понад 1000 ppm) здатен викликати головний біль, втому, зниження концентрації уваги, а в ще вищих концентраціях — негативно впливати на когнітивні функції.

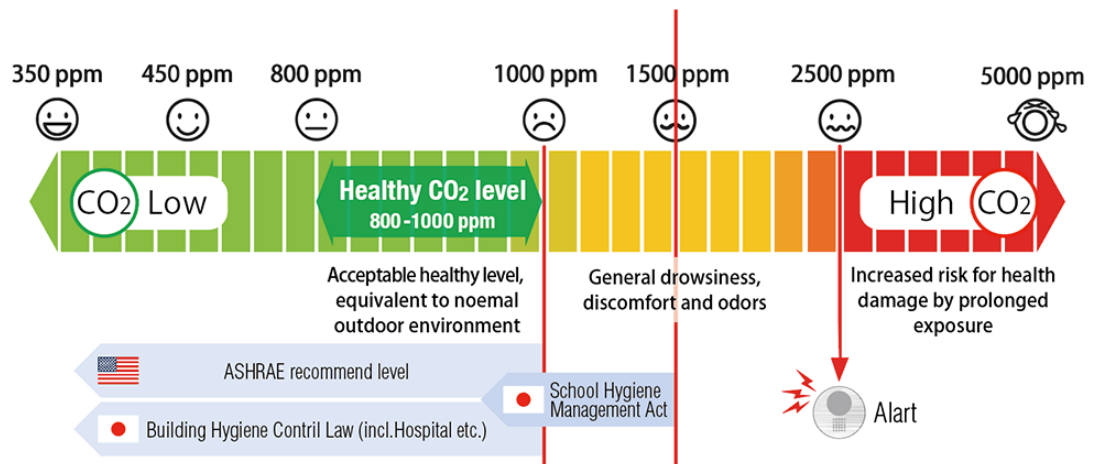


Рисунок 2.5 – Шкала якості повітря за концентрацією CO₂

Саме тому інтеграція сенсора CO₂ є необхідною складовою будь-якої сучасної системи екологічного моніторингу, орієнтованої на побутове або навчальне середовище. У цій роботі для реалізації контролю за концентрацією вуглекислого газу обрано сенсор MH-Z19B, що завоював популярність у DIY-спільнотах та використовується в багатьох побутових рішеннях. [17]



Рисунок 2.6 – датчик MH-Z19B

Принцип роботи

MH-Z19B — це NDIR-сенсор (Non-Dispersive Infrared), який вимірює концентрацію CO₂ за допомогою інфрачервоного променя. Такий підхід забезпечує високу точність і стабільність порівняно з більш простими хімічними або напівпровідниковими датчиками. NDIR-сенсори менш схильні до впливу сторонніх газів, вологості та температури, що робить їх надійними навіть при тривалому використанні.

Таблиця 2.4.1 – Характеристики MH-Z19B

Параметр	Значення
Діапазон вимірювань	0–5000 ppm
Точність	±(50 ppm + 5% від показника)
Інтерфейс	UART / PWM
Час відгуку	~60 секунд
Живлення	3.6–5.5 V
Автокалібрування (ABC logic)	Так
Робочий ресурс	понад 5 років
Частота оновлення	кожні 2–3 секунди

Окремо варто відзначити, що МН-Z19В підтримує автоматичне базове калібрування (ABC), яке дозволяє сенсору зберігати стабільність при тривалому використанні. Водночас, за потреби, автокалібрування можна вимкнути та провести ручне калібрування — наприклад, на відкритому повітрі (орієнтовно 400 ppm).

Порівняння з аналогами

Під час вибору сенсора для визначення CO₂ були розглянуті альтернативні варіанти:

- MG811 — напівпровідниковий сенсор, що вимірює CO₂, але має велику похибку, потребує попереднього нагріву, сильно залежить від температури та вологості. Підходить для базових демонстрацій, але не рекомендований для точного моніторингу.
- K30 (SenseAir) — професійний NDIR-сенсор з високою точністю, але вартість значно перевищує бюджет системи (орієнтовно \$70–100), габарити більші, підключення складніше.
- Senseair S8 — хороший варіант за якістю, компактністю та енергоефективністю, однак ціна вища (~\$30+).

Усі ці альтернативи мають свої переваги, проте МН-Z19В забезпечує ідеальний компроміс між доступністю, точністю та простотою використання, що підтверджено численними відгуками розробників та тестами, викладеними у спільнотах Arduino, Adafruit та на GitHub. Також варто зауважити, що для МН-Z19В через потребу в автокалібруванні потрібно провітрювати приміщення хоча б раз на добу для того, щоб датчик передавав точні значення.

[7]

Застосування на практиці

МН-Z19В активно використовується у:

- системах моніторингу повітря в офісах, школах, квартирах;
- DIY-проектах для «розумного дому»;
- вентиляційних системах як тригер для активації повітрообміну;

- компактних приладах для CO₂-вимірювання під час пандемій (наприклад, у класах).

Дослідження також показують, що CO₂-контроль є надійним індикатором ефективності вентиляції. Саме тому навіть у ЄС або Японії дедалі більше будівель обладнуються побутовими CO₂-датчиками — і МН-Z19В входить до списку рекомендованих для недорогих рішень.

Причини вибору МН-Z19В у цій роботі

З урахуванням поставленої мети — створення доступної, стабільної та відкритої системи моніторингу повітря — МН-Z19В був обраний на основі таких аргументів:

- Достатня точність для побутового використання;
- Стабільна робота у реальних умовах (без серйозного впливу вологості, температури);
- Наявність відкритих бібліотек та прикладів під ESP32/Arduino;
- Простота підключення (UART, PWM);
- Можливість калібрування (автоматична + ручна);
- Вартість у межах \$15–20, що відповідає бюджету DIY-проєкту.

Таким чином, МН-Z19В дозволяє реалізувати повноцінну підсистему моніторингу CO₂ без необхідності в складному налаштуванні або дорогому обладнанні. Його інтеграція у проєкт дає змогу підвищити інформативність системи та зробити її придатною для оцінки якості повітря в повсякденному житті.

2.5 Проєктування модуля аналізу пилу: підбір сенсору

Моніторинг запиленості повітря — одна з ключових складових оцінки його якості. Дрібнодисперсні частинки (PM — particulate matter), особливо діаметром до 2.5 мікрометрів (PM_{2.5}), мають властивість проникати глибоко у дихальні шляхи, що може призводити до серйозних наслідків для здоров'я. ВООЗ включає PM_{2.5} до списку найбільш шкідливих факторів навколишнього середовища, що впливають на населення у містах. У цьому контексті вибір

надійного сенсора для вимірювання рівня часток у повітрі є надзвичайно важливим. [3]

У межах цієї роботи для вимірювання запиленості обрано лазерний сенсор PMS5003, який є одним з найпопулярніших модулів у своєму класі для побутових, освітніх та напівпрофесійних застосувань.



Рисунок 2.7 – датчик PMS5003

Загальні характеристики

PMS5003 — це сенсор, що працює за принципом лазерного розсіювання світла. Вбудований мікровентилятор забезпечує постійний потік повітря через вимірювальну камеру, в якій відбувається виявлення частинок діаметром менше 1.0, 2.5 та 10 мікрометрів (PM1.0, PM2.5, PM10). Отримані дані видаються у цифровому форматі через UART-інтерфейс.

Таблиця 2.5.1 – Характеристики PMS5003

Параметр	Значення
Метод вимірювання	Лазерна дифракція
Діапазон вимірювань	0–999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Точність	$\pm 10\%$ при концентраціях $< 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Оновлення даних	кожні 0.5 секунди
Інтерфейс	UART (3.3 V)
Напруга живлення	5 V
Споживання струму	$\sim 100 \text{ mA}$
Робоча температура	$-10^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$
Рекомендоване розміщення	Вертикальне

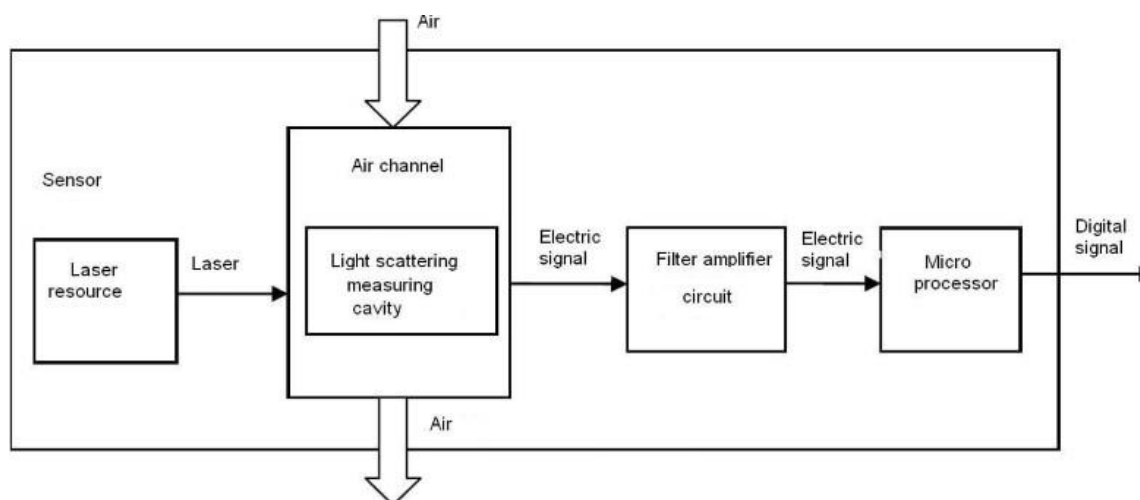


Рисунок 2.8 – Принцип роботи PMS5003 [8]

(Source. Datasheet Plantower PMS5003 manual)

Сенсор видає як масову концентрацію частинок (у $\mu\text{g}/\text{m}^3$), так і кількісне значення — кількість частинок на певний об’єм повітря, що дозволяє будувати ширшу аналітику. [2]

Переваги PMS5003

1. Висока точність у своєму класі. PMS5003 забезпечує хорошу повторюваність результатів і стабільність при правильному розміщенні.

Він входить до переліку сенсорів, які часто використовуються в open source мережах моніторингу повітря (наприклад, Luftdaten, Sensor.Community, AirGradient тощо).

2. Підтримка відкритих бібліотек. Сенсор має простий протокол обміну по UART, що активно підтримується в Arduino, ESP32, Raspberry Pi та інших середовищах. Відкритий доступ до документації дозволяє легко інтегрувати його в будь-яку систему.
3. Компактність та енергоефективність. Незважаючи на наявність вентилятора та лазерної системи, PMS5003 є компактним і може працювати навіть у мобільних або переносних пристроях. Він споживає менше енергії, ніж професійні аналоги, при збереженні достатньої точності.
4. Стабільність у побутових умовах. PMS5003 добре працює при звичайній вологості та температурі, проте потребує захисту від конденсату та прямих потоків повітря, що можна реалізувати простим корпусом або фільтром.
5. Дані в реальному часі. Частота оновлення — 0.5–1 секунда, що дозволяє відображати зміни майже миттєво, без затримок.

Порівняння з аналогами. Для об'єктивного вибору сенсора розглядалися такі моделі:

- Sharp GP2Y1010AU0F — оптичний сенсор, дешевий (~\$3–5), але не вимірює конкретні РМ-рівні, має аналоговий вихід і значно нижчу точність. Підходить лише для грубого визначення запиленості.
- Nova SDS011 — лазерний сенсор, подібний за функціоналом, але має більші габарити, гірше захищений корпус і споживає більше енергії (~120–130 мА). За якістю даних близький до PMS5003, але дещо менш стабільний.
- PMS7003 — новіша версія від того ж виробника, але значно дорожча, тоді як приріст точності не є пропорційним.

Таким чином, PMS5003 виявився оптимальним компромісом між точністю, розміром, енергоспоживанням та вартістю.

Практичне застосування. PMS5003 часто застосовується у:

- проєктах Smart Home для визначення якості повітря у квартирі;
- громадських ініціативах для локального моніторингу;
- навчальних стендах;
- портативних приладах для велосипедистів/пішоходів.

Він активно використовується у недорогих метеостанціях, а також у соціальних екопроєктах, зокрема при побудові відкритих карт забруднення повітря.

Варто окремо зупинитися на питанні доцільності вимірювання всіх трьох типів часток: PM1.0, PM2.5 і PM10. У низці публікацій та обговорень DIY-спільнот висловлюється думка, що PM2.5 є найбільш критичним параметром, оскільки саме ці частинки найменшого діаметра можуть проникати в альвеоли легень і спричиняти системні запальні процеси. У зв'язку з цим деякі спрощені системи орієнтуються лише на PM2.5, ігноруючи інші діапазони.

Проте наукові дослідження свідчать, що PM10 також відіграє важливу роль в оцінці загального ступеня забруднення повітря. Зокрема, частинки PM10, хоча й більші за PM2.5, затримуються у верхніх дихальних шляхах і можуть спричиняти подразнення слизових оболонок, посилення симптомів астми та алергічні реакції. До того ж, наявність великих часток часто пов'язана з будівельним пилом, зносом шин, дорожнім пилом, тобто з локальними джерелами забруднення, особливо у міському середовищі. [12]

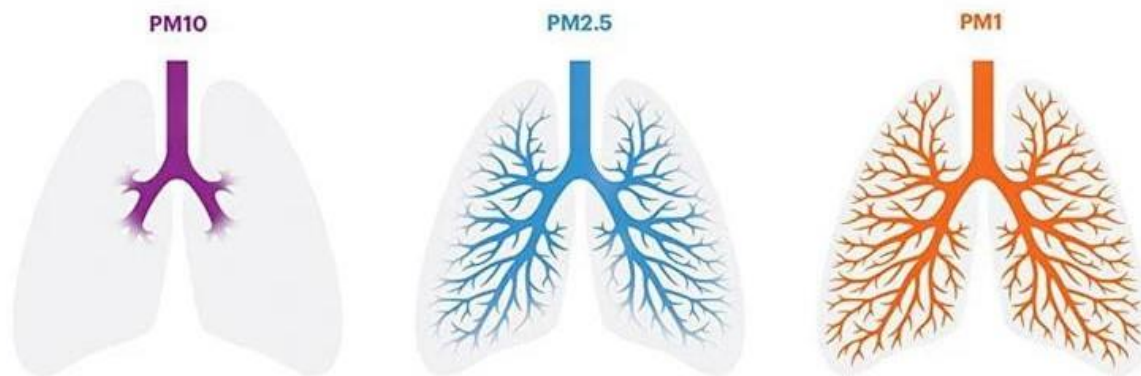


Рисунок 2.9 – глибина проникання частинок РМ у суди легень, залежно від розміру частинок

Розширене охоплення діапазонів — від $PM_{1.0}$ до PM_{10} — також дозволяє отримувати повнішу аналітичну картину, робити висновки про походження пилу та характер забруднення. Наприклад, переважання PM_{10} може вказувати на механічне походження пилу, тоді як надлишок $PM_{2.5}$ — на спалювання палива чи інші високотемпературні процеси.

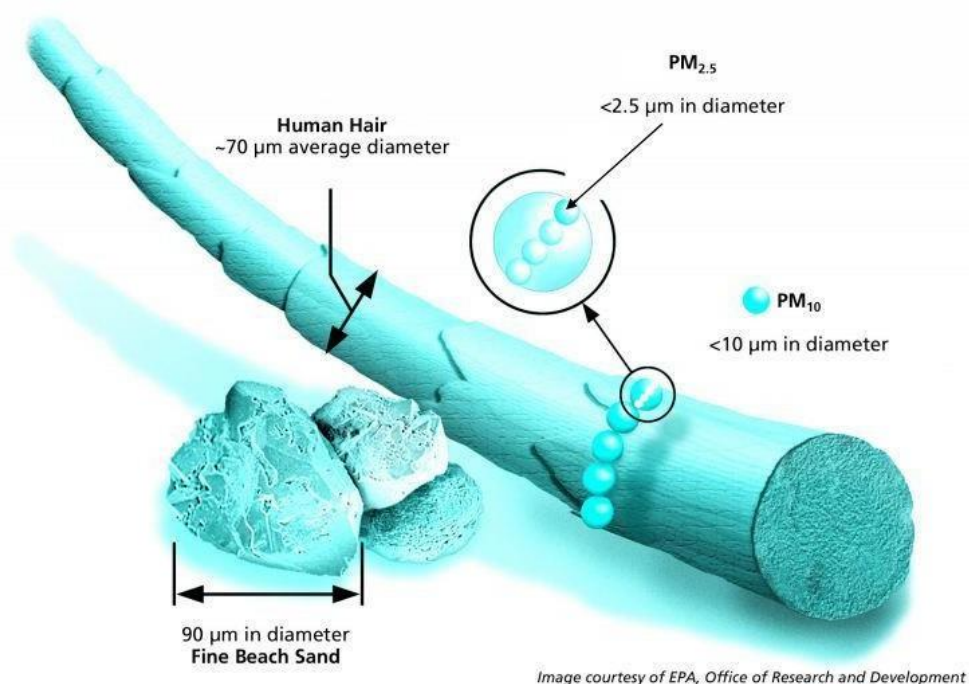


Рисунок 2.10 – Зразок розміру частинок PM_{10} та $PM_{2.5}$

Таким чином, вибір сенсора, який надає дані одразу за трьома категоріями, як-от PMS5003, дозволяє не лише вимірювати кількісні показники, а й проводити якісний аналіз середовища, що особливо важливо

для наукових, навчальних або громадських проєктів. Навіть якщо на практиці акцент робиться на PM2.5, наявність PM10 значно розширює діагностичні можливості системи.

Висновок.

Сенсор PMS5003 був обраний для реалізації системи як оптимальний варіант для проєкту з обмеженим бюджетом, але з високими вимогами до точності та стабільності. Він підтримується спільнотою, не потребує складного налаштування, і надає достатній обсяг даних для прийняття екологічно важливих рішень.

2.6 Проєктування живлення для стаціонарної системи перевірки якості повітря

Живлення є невід'ємною частиною будь-якого програмно-апаратного комплексу, і від його типу залежить зручність, стабільність та безпека експлуатації пристрою. У випадку розробки системи моніторингу якості повітря, де передбачається неперервна робота у статичному положенні, вибір оптимального джерела живлення має суттєве значення для забезпечення безперервності зчитування та виведення даних.

У межах цієї дипломної роботи система спроектована як стаціонарний прилад, що функціонує в межах квартири, офісу або навчального кабінету. Враховуючи це, було прийнято рішення живити пристрій від мережі 220 В через стандартний USB-адаптер (типу зарядного пристрою для смартфона). Це забезпечує низку переваг, що роблять такий підхід доцільним у даному проєкті.

Живлення від мережі: переваги та обґрунтування

1. Стабільність напруги. Живлення від побутової електромережі через USB-адаптер забезпечує стабільну напругу 5 В, що повністю відповідає вимогам до живлення плати ESP32 TTGO T-Display, а також сенсорів MH-Z19B, PMS5003 та BME280 (залежно від підключення).
2. Простота реалізації. Усі компоненти системи працюють на базі 5 В або 3.3 В, тому живлення через USB або адаптер від 1 А є стандартною і

найпростішою схемою. Уникається потреба у створенні додаткових перетворювачів або стабілізаторів.

3. Доступність джерел живлення. Використання блоків живлення типу «зарядка для телефона» (USB/Type-C) дозволяє обійтись без спеціалізованих джерел. Такі адаптери є у кожного користувача і не потребують окремої закупівлі.
4. Безперервна робота. На відміну від акумуляторів, які потребують періодичної зарядки або заміни, мережеве живлення забезпечує цілодобову стабільну роботу пристрою без обслуговування, що ідеально для моніторингових систем.
5. Відсутність потреби в мобільності. Ураховуючи, що пристрій не призначений для використання в польових умовах, а навпаки — працює у фіксованому місці, реалізація акумуляторної або гібридної схеми живлення не є доцільною. Це лише ускладнило б конструкцію без фактичної потреби.

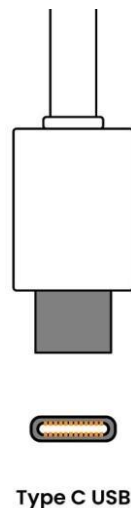


Рисунок 2.11 – Стандартний USB-C кабель

Розгляд альтернатив: чому не обрані інші варіанти

Для повноти аналізу варто коротко розглянути й інші можливі джерела живлення, хоча вони не використовуються в даному проєкті.

- Акумулятор (Li-Ion, Li-Po). Хоча акумулятори дозволяють зробити систему мобільною, вони мають обмежений термін роботи (1–4 години для подібної конфігурації), потребують контролера заряду, захисту від перенапруги, а також регулярного обслуговування. У статичному застосуванні це створює зайві складності.
- Живлення через PowerBank. Можливе як тимчасове рішення, але обмежене за часом, енергоємністю та не забезпечує довготривалої стабільності. Більше підходить для тестування, а не для постійної роботи.
- Гібридне живлення з резервом (мережа + акумулятор). Хоча така схема могла б забезпечити захист від відключення електроенергії, реалізація подібної функції потребує окремого контролера, логіки перемикавання, зарядного модуля та моніторингу батареї. Для побутового, простого моніторингового пристрою це надмірна складність.

Висновок

У межах цієї роботи обґрунтовано обрано живлення від мережі 220 В через стандартний адаптер USB/Type-C, оскільки це:

- найпростіший,
- найдешевший,
- найбільш надійний варіант для стаціонарного пристрою.

Цей підхід повністю покриває потреби системи та дозволяє уникнути зайвих ускладнень, пов'язаних із автономністю або акумуляторним живленням, які не є релевантними в умовах фіксованої експлуатації.

2.7 Висновки за розділом

У ході аналізу, проведеного в межах другого розділу, були розглянуті сучасні технології, компоненти та підходи, які можуть бути використані для побудови ефективної системи моніторингу якості повітря. На основі зіставлення технічних характеристик, порівняння переваг і недоліків аналогів, а також урахування специфіки застосування, було обґрунтовано вибір ключових апаратних елементів системи.

Серед різноманіття сенсорів температури та вологості найбільш популярним є DHT22, однак у межах цієї роботи було встановлено, що цей сенсор не забезпечує достатньої точності та стабільності. У зв'язку з цим прийнято рішення використовувати BME280 — сучасний сенсор з високою точністю, широким діапазоном вимірювань і підтримкою вимірювання атмосферного тиску. Це дозволяє значно розширити аналітичні можливості системи, забезпечивши більш повну оцінку мікроклімату.

Для вимірювання рівня вуглекислого газу обрано MH-Z19B, як найбільш збалансований за критеріями точності, стабільності та вартості. Його використання дає змогу відстежувати рівень CO₂ в реальному часі з достатньою для побутових умов точністю, що особливо актуально у приміщеннях із великою кількістю людей або з обмеженим повітрообміном.

Для контролю запиленості повітря вибір зупинено на PMS5003 — лазерному сенсорі, здатному вимірювати PM1.0, PM2.5 та PM10. Такий підхід дозволяє охопити повний спектр критичних показників, що є надзвичайно важливим для оцінки впливу повітря на здоров'я. Особливо актуальним є збереження вимірювань у всіх трьох діапазонах, оскільки наукові джерела вказують на значущість як дрібних, так і більших часток у формуванні ризиків для організму.

Щодо живлення системи, враховуючи її стаціонарний характер, було ухвалено обґрунтоване рішення використовувати живлення від мережі через стандартний USB-адаптер. Це забезпечує стабільність роботи, простоту реалізації та мінімізацію складності схеми. Альтернативні варіанти, такі як акумулятори або гібридні блоки живлення, були визнані надмірними для задачі, яку виконує прилад.

Таким чином, на основі аналізу доступних рішень та специфіки проєкту було сформовано набір компонентів, що забезпечує точність, стабільність, простоту підключення та доступність для реалізації. Це дозволяє перейти до наступного етапу — безпосередньої реалізації архітектури системи, розробки

схеми підключення та програмної частини, що буде детально розглянуто у наступних розділах.

3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

3.1 Реалізація системи моніторингу повітря

Система моніторингу якості повітря, реалізована в межах даної роботи, побудована як стаціонарний мікроконтролерний пристрій, орієнтований на безперервний моніторинг основних параметрів повітряного середовища в реальному часі. Архітектура розроблена з урахуванням практичної реалізації — усі апаратні компоненти припаяні, налаштовані та протестовані. Уся система працює від мережі через USB-живлення і не передбачає мобільного використання.

Загальна структура системи.

Система складається з наступних основних компонентів:

1. Мікроконтролер:

- LILYGO T-Display ESP32 (TTGO) — плата на базі ESP32 з інтегрованим кольоровим TFT-дисплеєм (ST7789). Виступає в ролі головного обчислювального модуля системи.

2. Сенсори:

- BME280 — сенсор температури, вологості та атмосферного тиску (I²C).
- PMS5003 — лазерний сенсор твердих частинок PM1.0, PM2.5, PM10 (UART).
- MH-Z19B — інфрачервоний сенсор концентрації CO₂ (UART).

3. Інтерфейс користувача:

- Вбудований TFT-дисплей для виведення показників.
- Дві кнопки для перемикання сторінок відображення (BTN_LEFT і BTN_RIGHT).

4. Живлення:

- Через стандартний USB-кабель від побутового адаптера на 5В.
- Усі компоненти живляться від єдиного піну 5V, заземлення об'єднане в точку GND.

Реалізація підключення

Підключення виконано на практиці, без використання макетної плати:

- BME280 припаяний безпосередньо до пінів I²C на ESP32:
 - SDA → GPIO 21
 - SCL → GPIO 22
- PMS5003 підключений через 8-жильний шлейф із терміналом. Відрізано зайві жили, припаяно живлення, землю, RX (GPIO 32) і TX (GPIO 33).
- МН-Z19В (версія з терміналом) підключений за допомогою 7-жильного шлейфу, з використанням тільки потрібних ліній:
 - TX сенсора → RX ESP32 (GPIO 25)
 - RX сенсора → TX ESP32 (GPIO 26)
 - Живлення і земля припаяні на спільні лінії до 5V і GND.

Усі сенсори, незалежно від інтерфейсу, були зведені на одне джерело живлення — стандартний пін 5V на ESP32, і заземлені через спільну точку GND, розташовану над ним (під піном GPIO27). [14]

Керування і логіка відображення

У системі передбачено два варіанти перемикання сторінок даних на дисплеї.

1. Автоматичне перемикання:

- Вбудована логіка автоматично змінює сторінку кожні 15 секунд (switchInterval = 15000 мс).

2. Кнопкове перемикання:

- Обидві кнопки (BTN_LEFT = GPIO 0, BTN_RIGHT = GPIO 35) виконують однакову функцію — перемикають сторінки вручну. Кнопки незалежні, немає жорсткого призначення "вперед/назад".

Усього є дві сторінки відображення:

- Сторінка 1 — температура, вологість і тиск (дані з BME280).
- Сторінка 2 — PM1.0, PM2.5, PM10 (PMS5003) та CO₂ (МН-Z19В).

Зміна сторінки супроводжується оновленням дисплея, очищенням попереднього вмісту, що забезпечує зручність візуального сприйняття даних.

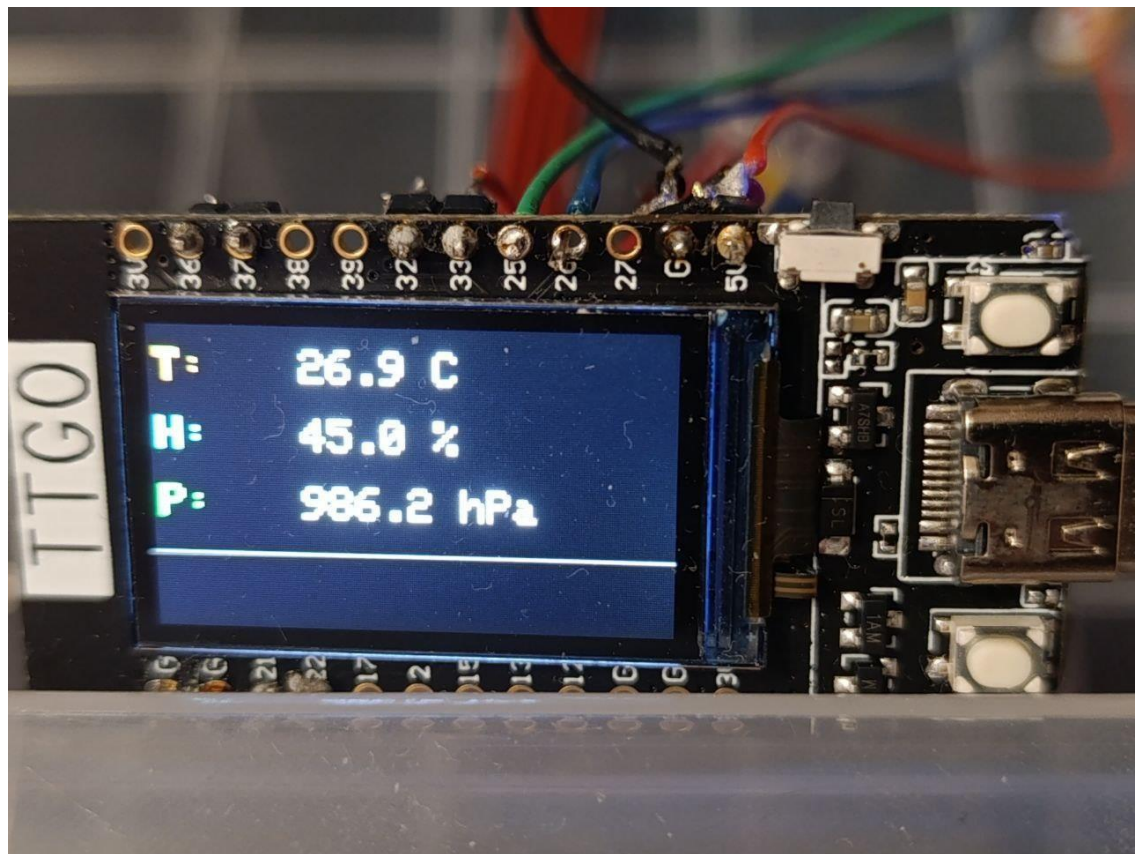


Рисунок 3.1 – Перша сторінка з даними (температура, вологість і тиск)

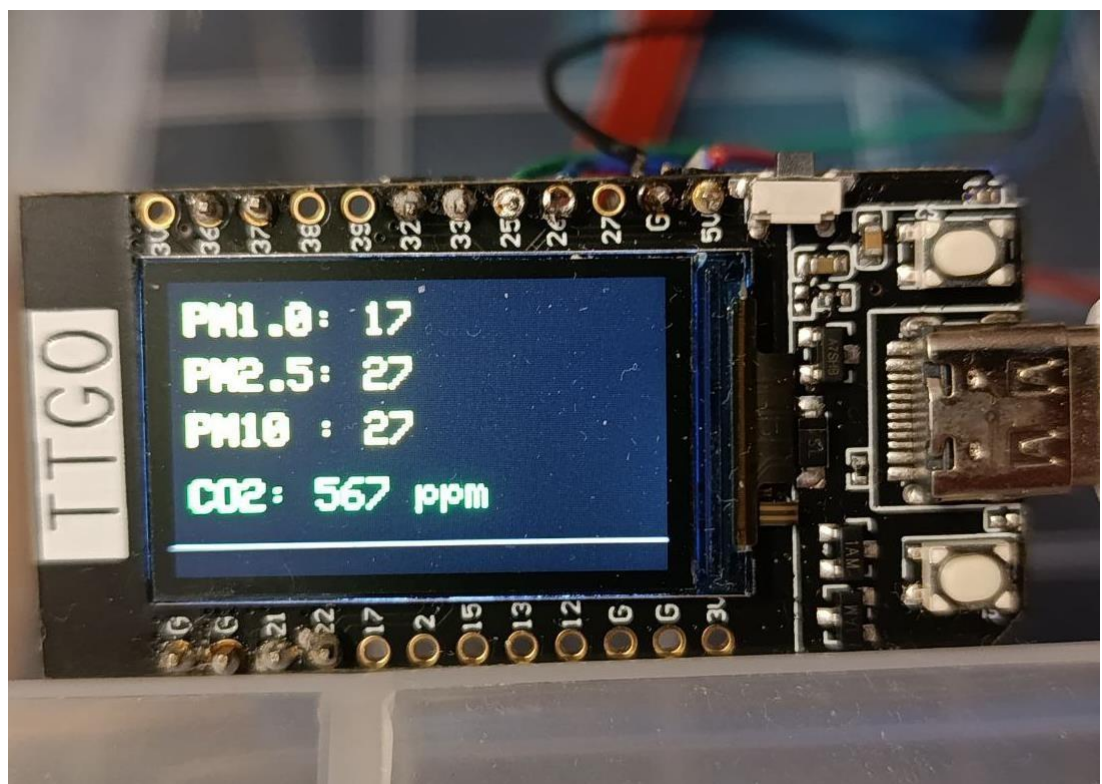


Рисунок 3.2 – Друга сторінка з даними (PM1.0, PM2.5, PM10 і CO₂)

Обґрунтування стаціонарної архітектури

З урахуванням того, що система розроблялась як локальний побутовий пристрій, вибір на користь стаціонарної архітектури є логічним. Такий підхід дозволяє:

- забезпечити постійне живлення без акумуляторів або складних схем резервного енергоживлення;
- уникнути нестабільності, пов'язаної з обмеженим ресурсом батарей;
- сконцентруватись на точності, стабільності і простоті експлуатації.

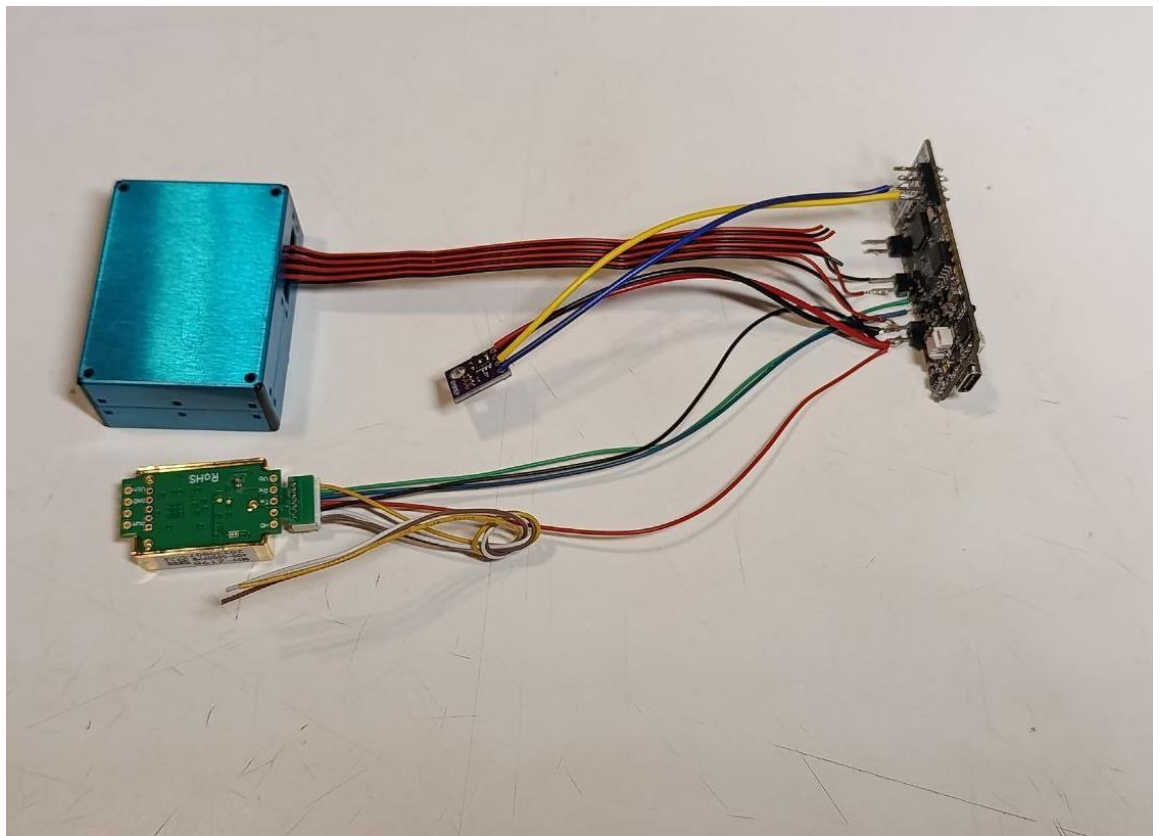


Рисунок 3.3 – Фото готової системи перевірки якості повітря

Уся логіка реалізована на одному мікроконтролері, без використання зовнішніх комп'ютерів, серверів чи мобільних додатків. Це робить пристрій незалежним, компактним і зручним для розміщення у будь-якому житловому або навчальному просторі.

Таблиця 3.1.1 – Таблиця підключень компонентів до пінів на платі

Компонент	Інтерфейс	GPIO ESP32	Функція
BME280	I ² C	SDA (21), SCL (22)	Температура, вологість, тиск
PMS5003	UART	RX (32), TX (33)	PM1.0, PM2.5, PM10
MH-Z19B	UART (SoftwareSerial)	RX (25), TX (26)	CO ₂ (ppm)
Кнопки	Digital	GPIO 0, GPIO 35	Перемикання сторінок
Дисплей ST7789	SPI	Вбудований	Вивід даних
Живлення	USB 5V	5V, GND	Постійне живлення пристрою

Висновок

Реалізована архітектура є простою, надійною та оптимізованою під конкретну задачу — локальний моніторинг повітря в закритому приміщенні. Усі елементи системи вже фізично реалізовані, припаяні та налаштовані. Вибір компонентів і спосіб їх інтеграції забезпечують стабільну роботу пристрою без надмірних ускладнень, що дозволяє зосередитися на якісному відображенні, обробці та інтерпретації даних.

3.2 Принцип роботи системи та логіка програмного забезпечення

Програмне забезпечення (ПЗ) системи моніторингу якості повітря розроблене на мові C++ з використанням платформи Arduino, що забезпечує сумісність із мікроконтролером ESP32 та підтримку необхідних бібліотек. Уся логіка зосереджена у програмі, що виконується на одному пристрої без зовнішніх серверів, хмар або мобільних застосунків.

Принцип роботи системи базується на периферійному опитуванні сенсорів, обробці отриманих даних, їх візуалізації на дисплеї та взаємодії з користувачем через простий інтерфейс у вигляді двох кнопок.

Загальна структура роботи програми

Програма умовно поділена на три основні блоки:

1. Ініціалізація системи — налаштування сенсорів, дисплея, кнопок.
2. Циклічна робота (loop) — опитування сенсорів, перемикання сторінок, оновлення екрану.
3. Допоміжні функції — виведення на дисплей, обробка натискань кнопок, розрахунок кольорів.

Ініціалізація компонентів

У функції `setup()` виконується:

- Налаштування послідовного порту (`Serial.begin(115200)`).
- Ініціалізація TFT-дисплея через бібліотеку `TFT_eSPI`, встановлення шрифтів, кольорів.
- Ініціалізація BME280 через I²C-шину з вказанням пінів (`SDA = 21`, `SCL = 22`).
- Підключення до МН-Z19В через програмний UART (`SoftwareSerial`), запуск автоматичного калібрування.
- Ініціалізація PMS5003, переведення в режим очікування даних (`wakeUp()`).
- Ініціалізація кнопок (`BTN_LEFT`, `BTN_RIGHT`) як цифрових входів.
- Встановлення таймера перемикання сторінок.

Основна логіка циклу

У циклі `loop()` виконується:

- Визначення, чи пройшло 15 секунд з моменту останнього перемикання.
- Перевірка натискань кнопок — обидві виконують однакову функцію: перемикання сторінки.
- Зміна сторінки в обох випадках супроводжується очищенням дисплея (`tft.fillScreen(TFT_BLACK)`). [11]

- Відображення відповідного вмісту залежно від активної сторінки:
 - Сторінка 0 — вивід температури, вологості, тиску (`showBME280()`).
 - Сторінка 1 — вивід PM1.0, PM2.5, PM10 та CO₂ (`showPMSAndCO2()`).

У разі натискання кнопки спрацьовує “debounce” (затримка очікування відпускання) для запобігання зайвому перемиканню.

Обробка даних

Для кожного сенсора передбачена окрема функція читання:

- BME280:
 - Використовується бібліотека `Adafruit_BME280`.
 - Зчитується температура, вологість, тиск.
 - Значення округлюються до одного знаку після коми та виводяться з одиницями вимірювання.
- PMS5003:
 - Опитування за допомогою функції `pms.readUntil(pmsData)`.
 - Виводяться PM1.0, PM2.5, PM10.
 - Кожне значення супроводжується кольоровим індикатором (зелений, жовтий, червоний).
- MH-Z19B:
 - Дані зчитуються через функцію `mhz19.getCO2()`.
 - Значення CO₂ також підсвічується кольором залежно від рівня (нижче 800 ppm — зелений, 800–1200 — жовтий, вище 1200 — червоний).

Користувацький інтерфейс

Інтерфейс реалізований через вбудований TFT-дисплей на 240x135 пікселів. Графіка мінімалістична, зручна для сприйняття:

- Дані структуровані блоками, кожен сенсор має свою зону на екрані.
- Колір тексту змінюється відповідно до рівня забруднення або показника — що спрощує швидке візуальне сприйняття.

- Присутня горизонтальна лінія (графічний поділ), що відділяє блоки інформації.

Гнучкість і розширюваність

Уся логіка побудована у вигляді зрозумілих модулів, що дозволяє:

- легко додати нові сторінки;
- змінити інтервал перемикання;
- змінити логіку відображення без переробки всієї програми;
- адаптувати код під інші мікроконтролери або дисплеї (з невеликими змінами).

Висновок

Програмна частина системи побудована за принципом мінімалізму, стабільності та простоти використання. Уся логіка розташована в межах одного мікроконтролера, без зовнішніх залежностей. Завдяки розділенню на сторінки, кольоровому інтерфейсу та автоматичному перемикаю, система зручна у повсякденному використанні й не потребує втручання користувача. Вона повністю автономна, зрозуміла, і водночас легко масштабована.

3.3 Схема підключень системи моніторингу якості повітря

Фізичне підключення компонентів системи до мікроконтролера ESP32 реалізовано з дотриманням вимог до електричної сумісності, логіки інтерфейсів та рівнів напруг. Схема не лише теоретично проєктувалась, а й реально зібрана, припаяна та протестована. Компоненти були об'єднані в єдиний вузол без використання макетної плати, що забезпечило компактність і надійність підключення.

У ході реалізації було створено логічно узгоджену схему, яка враховує специфіку кожного з компонентів та їхню взаємодію з платою ESP32. При виборі пінів особливу увагу приділяли уникненню конфліктів між інтерфейсами, забезпеченню стабільного живлення та збереженню можливості майбутнього розширення функціоналу.

Таблиця 3.3.1 – Таблиця підключень і функцій

Компонент	Інтерфейс	Піни ESP32	Примітки
BME280	I ² C	SDA – GPIO 21	
SCL – GPIO 22	Припаяно напряду до пінів		
PMS5003	UART (Software)	RX – GPIO 32	
TX – GPIO 33	Підключено через 8-жильний шлейф, використано 4 жили		
MH-Z19B	UART (Software)	RX – GPIO 25	
TX – GPIO 26	Підключено через 7-жильний шлейф, використано 4 жили		
Кнопка Ліва	Digital IN	GPIO 0	Перемикає сторінку
Кнопка Права	Digital IN	GPIO 35	Перемикає сторінку
Живлення	5V	5V пін (правий верхній кут ESP32)	Через USB-адаптер
GND (всі)	—	GND над GPIO27	Об'єднано всі землі сенсорів

Основні принципи побудови схеми

1. Інтерфейси передачі даних:

- Сенсори BME280 працюють через I²C.

- PMS5003 і МН-Z19В — через окремі UART-інтерфейси (використано бібліотеку SoftwareSerial).
- Кнопки підключені як цифрові входи.

2. Живлення:

- Всі компоненти живляться від єдиного джерела — пін 5V плати ESP32.
- Гілка GND спільна для всіх компонентів.

3. Візуалізація:

- Вбудований дисплей керується бібліотекою TFT_eSPI, використовує інтерфейс SPI (інтегровано у плату ESP32 TTGO).

Опис фізичної реалізації

BME280. Сенсор підключено безпосередньо до пінів I²C за допомогою дротів пайкою. Живлення (3.3В або 5В залежно від версії) подано через той же вузол живлення, що й інші компоненти. [18]

PMS5003. Підключення здійснено за допомогою 8-жильного шлейфу з конектором. Непотрібні дроти (не використовувані піни) були вкорочені. Використано 4 жили: живлення (1), земля (2), TX (4), RX (5) згідно з документацією. Решта дротів скручені та заізольовані.

МН-Z19В. Модуль підключено через термінальну колодку з 7-жильним шлейфом. Аналогічно, використано 4 жили — живлення (3), земля (4), TX (5), RX (6). Інші дроти зібрані в петлю для уникнення плутанини.

Висновок

Схема підключення побудована з урахуванням мінімалізму, надійності та повторюваності. Усі підключення реалізовано вручну через пайку, що знижує ймовірність втрати контактів та покращує стабільність роботи пристрою. Використання окремих UART-інтерфейсів для кожного з сенсорів дозволяє паралельно опитувати їх без конфліктів, а централізоване живлення від USB-адаптера спрощує експлуатацію системи у побутових умовах. [5]

3.4 Розробка програмного забезпечення: структура коду та функції

Програмне забезпечення розроблене мовою C++ у середовищі Arduino IDE, з використанням відкритих бібліотек для кожного з сенсорів та компонентів інтерфейсу. Код реалізовано у вигляді одного основного скетчу, що включає налаштування периферії, ініціалізацію пристроїв, основний цикл обробки та відображення даних, а також допоміжні функції. [4]

Рішення побудоване з орієнтацією на прозору, модульну та розширювану структуру, що дозволяє вносити зміни у відображення, інтерфейс, додавання нових сенсорів або функцій без істотного переписування всього коду. Повний код програми можна знайти в додатку А.

Використані бібліотеки

У коді використовуються наступні бібліотеки:

- Wire.h — для роботи з I²C (BME280);
- Adafruit_BME280.h — офіційна бібліотека для сенсора BME280;
- SoftwareSerial.h — створення додаткових UART-портів для PMS5003 та MH-Z19B;
- MHZ19.h — бібліотека для роботи з сенсором CO₂ MH-Z19B;
- PMS.h — бібліотека для зчитування даних із сенсора пилу PMS5003;
- TFT_eSPI.h і SPI.h — бібліотеки для керування дисплеєм ST7789 (вбудованим у плату LILYGO T-Display ESP32).

Вибір саме цих бібліотек зумовлений:

- наявністю офіційної підтримки;
- відкритим кодом;
- документацією та прикладами;
- стабільною роботою на ESP32.

Структура коду

Код поділяється на логічні частини:

1. Блок підключень та ініціалізація змінних:

- GPIO-номери визначено через #define для зручності зміни конфігурації;

- оголошені об'єкти для сенсорів, дисплея та програмних UART;
- задані глобальні змінні для керування сторінками (currentPage, lastSwitch, switchInterval).

2. Функція setup():

- ініціалізує серійний порт, дисплей, сенсори та кнопки;
- виконує перевірку BME280;
- активує PMS5003 та запускає автоматичне калібрування MH-Z19B.

3. Основний цикл loop():

- керує логікою перемикання сторінок (handlePageSwitch() — автоматично або вручну);
- виводить дані залежно від активної сторінки (showBME280() або showPMSAndCO2()).

4. Функція handlePageSwitch():

- реалізує подвійне перемикання: автоматичне кожні 15 секунд і вручну при натисканні будь-якої кнопки;
- має затримку для антидребезгу.

5. Функції відображення:

- showBME280() — читає і відображає температуру, вологість, тиск;
- showPMSAndCO2() — читає і відображає PM1.0, PM2.5, PM10 і CO₂.

6. Допоміжні функції:

- getColorCO2() — повертає колір залежно від рівня CO₂;
- getColorPM() — повертає колір залежно від рівня PM.

Особливості реалізації

- Програмні UART (SoftwareSerial) використано через обмеженість вільних апаратних UART на ESP32.
- Автоматичне перемикання сторінок спрощує взаємодію користувача — немає необхідності постійно натискати кнопку.

- Обидві кнопки мають однакову функцію — простота логіки, зменшення потенційних помилок.
- Використання кольорової індикації (зелений / жовтий / червоний) дає змогу оцінити стан повітря за секунди, навіть без читання чисел.
- Оптимізація швидкості оновлення — цикл `loop()` містить затримку `delay(3000)`, що дозволяє уникнути надлишкових оновлень, зберігаючи при цьому актуальність даних.

Переваги структури

- Легко модифікується — можна додати нові сторінки, змінити логіку відображення, додати збереження даних або Wi-Fi передавання.
- Легка адаптація до інших платформ — ESP32 може бути замінено на іншу плату, з мінімальними змінами в пін-ауті.
- Простота підтримки — зрозуміла структура функцій, логічні назви, окремі функції для кожного типу сенсора.

Висновок

Програмне забезпечення реалізоване як компактна, функціональна, стабільна система, що повністю відповідає завданням моніторингу якості повітря у побутових умовах. Його структура дозволяє гнучко адаптувати код до нових задач і легко масштабувати функціонал. Комбінація ручного та автоматичного керування, кольорової індикації та двох режимів відображення робить систему зручною й наочною у використанні.

3.5 Обмеження реалізації

Незважаючи на повну функціональну реалізацію пристрою моніторингу якості повітря, у процесі розробки та практичного впровадження було виявлено низку технічних і конструктивних обмежень, які не впливають критично на працездатність системи, але є важливими для розуміння меж поточного варіанту реалізації. Частину з цих обмежень можна розглядати як напрямки для подальшого вдосконалення системи.

1. Відсутність корпусу

Система наразі працює без встановлення в захисний корпус. У процесі спроб використати готові варіанти було виявлено, що наявні пластикові корпуси, придбані окремо, не підходять для конкретної конфігурації ESP32 TTGO T-Display та підключених шлейфів. У більшості стандартних корпусів:

- недостатньо місця для зручного розміщення плати з підключеними шлейфами;
- неможливо зафіксувати плату так, щоб при цьому було зручно підключати живлення або програмувати пристрій;
- відсутні отвори під забезпечення коректного для плати живлення, що потребує повністю кастомного корпусу.

Таким чином, корпусне оформлення потребує окремого проектування і виготовлення, наприклад, методом 3D-друку або ручної обробки. На цьому етапі було прийнято рішення працювати без корпусу для спрощення доступу до елементів при налаштуванні та налагодженні.



Рисунок 3.4 – Приклад надрукованого на 3D-принтері корпусу для датчика CO2

2. Обмеження при програмуванні з USB

Ще одним технічним обмеженням стала специфіка підключення ESP32 до комп'ютера. У процесі роботи було виявлено, що не всі USB-кабелі забезпечують коректне програмування плати, ймовірно через особливості самого комп'ютера (відносно старий ПК, проблеми з підтримкою передачі даних).

Як наслідок:

- для завантаження прошивки доводиться використовувати лише певні кабелі, що вже перевірені на стабільну роботу;
- з цим пов'язані затримки в налагодженні або потреба в повторному підключенні.

Це обмеження не стосується роботи пристрою після прошивки, однак ускладнює сам процес розробки та тестування прошивки.

3. Локальна візуалізація без збереження

Наразі система працює в режимі реального часу і не передбачає збереження або передачу даних. Інформація з сенсорів виводиться лише на вбудований TFT-дисплей. Така реалізація обмежує можливість аналізу тенденцій, побудови графіків або дистанційного моніторингу.

4. Фіксована позиція апаратних з'єднань

Оскільки всі сенсори припаяні до плати, зміна конфігурації або заміна компонентів вимагатиме ручного відпаювання та перепайки, що може бути незручним при експериментуванні або модернізації.

5. Обмежений інтерфейс користувача

Інтерфейс складається лише з двох сторінок, які перемикаються вручну або автоматично, без розгалуженого меню чи можливості вибору параметрів користувачем. Це зручно для базової роботи, але обмежує потенціал розширеної взаємодії.

Висновок

Усі обмеження, описані вище, є логічними для експериментального прототипу й не заважають виконанню основних функцій системи. Вони

свідчать про реальність реалізації, проаналізовані та частково вже враховані як потенційні напрямки розвитку, що буде детально описано у наступному підпункті.

3.6 Потенціал розширення та подальший розвиток

Реалізована система моніторингу якості повітря вже на поточному етапі виконує всі основні функції, необхідні для побутового або навчального використання. Водночас її структура та архітектура були навмисно спроектовані таким чином, щоб залишити можливість подальшої модернізації та нарощування функціоналу без необхідності суттєвого перепроектування пристрою.

Нижче окреслено основні напрямки, в яких система може бути розширена або вдосконалена в майбутньому.

1. Передача даних у мережу

Мікроконтролер ESP32 має вбудований Wi-Fi-модуль, тому є технічно досяжним впровадження:

- відправки даних у хмару, на локальний сервер або сторонній онлайн-сервіс (наприклад, ThingSpeak, InfluxDB);
- підключення до MQTT-брокера, що дозволить інтегрувати систему у «розумний дім»;
- доступу до показників з будь-якого пристрою через Інтернет або локальну мережу.

2. Web-інтерфейс

Одним із логічних напрямків розвитку є створення вбудованого web-серверу на ESP32. Такий інтерфейс дозволить:

- переглядати поточні дані через браузер смартфона або ПК;
- відображати графіки змін показників;
- реалізувати конфігурацію пристрою через меню налаштувань.

Це зробить систему зручнішою для щоденного користування, особливо у випадках, коли дисплей недоступний для прямого перегляду.

3. Збереження даних

Для довготривалого аналізу важливо мати можливість зберігати дані:

- на SD-карті — за допомогою додаткового SD-модуля;
- у внутрішній пам'яті ESP32 (обмежений варіант);
- у зовнішніх базах даних (через Wi-Fi).

Це дозволить побудову історичних графіків, виявлення трендів, оцінку впливу зовнішніх умов на якість повітря.

4. Кастомний корпус

На момент завершення розробки система функціонує без захисного корпусу, що зумовлено труднощами з розміщенням компонентів:

- більшість готових корпусів не враховують розміри шлейфів, висоту дисплея, положення USB;
- кріплення плати всередині корпусу часто ускладнене — кабель вставити або витягнути неможливо, не змістивши плату.

Ці фактори вказують на необхідність створення індивідуального корпусу, наприклад, за допомогою 3D-друку або збирання з модульних елементів. Це дозволить реалізувати:

- кріплення плати та сенсорів;
- прорізи під дисплей, кнопки, кабелі;
- вентиляцію для точнішого зчитування показників.

5. Автономне живлення

На поточному етапі система працює від постійного USB-живлення.

Проте реалізація автономного або резервного живлення дозволить:

- уникати втрати даних під час відключення електроенергії;
- розміщувати пристрій у місцях без постійного доступу до розетки;
- використовувати пристрій у мобільному режимі (наприклад, у транспорті).

Технічно можливо інтегрувати:

- Li-Ion акумулятор + модуль заряду TP4056;
- логіку перемикання між мережею та батареєю.

6. Розширення функціоналу

Завдяки модульності ESP32 система може бути доповнена:

- новими сенсорами (TVOC (Total volatile organic compounds), О₃, освітленість, шум);
- новими режимами виводу даних (OLED, e-ink, графіки на TFT);
- модулем Bluetooth для зв'язку з мобільними застосунками.

Це відкриває потенціал не лише для побутового, а й для дослідницького або навчального застосування.

Висновок

Реалізована система може виступати не лише як завершений прилад, а й як базова платформа для створення більш складних пристроїв або комплексних систем екологічного моніторингу. Урахування в майбутньому зазначених напрямків розвитку дозволить суттєво підвищити функціональність, зручність і адаптивність розробленої системи до різних умов експлуатації.

3.7 Висновки за розділу

У цьому розділі було здійснено практичну реалізацію проєктованої системи моніторингу якості повітря. Робота охопила всі етапи — від фізичного збирання апаратної частини до програмування мікроконтролера та розробки логіки взаємодії з сенсорними модулями.

Під час реалізації апаратної складової всі сенсори були підключені до мікроконтролера ESP32 відповідно до обраної архітектури. Зокрема, BME280 підключено через шину I²C, PMS5003 і MH-Z19B — через окремі UART-інтерфейси з використанням програмної реалізації (SoftwareSerial). Живлення всієї системи реалізовано через стандартний USB-порт, що дозволило уникнути використання акумуляторів і спростило схему.

Було створено повноцінну електричну схему з урахуванням живлення, рівнів напруг, сумісності інтерфейсів та споживання енергії. Сенсори встановлено стаціонарно, з дотриманням правил підключення, а всі контакти припаяні без використання макетної плати, що підвищило надійність з'єднань.

Програмне забезпечення реалізоване на базі мови C++ із використанням Arduino-бібліотек. В коді реалізовано опитування кожного з сенсорів, обробку отриманих даних, відображення результатів на вбудованому TFT-дисплеї, кольорову індикацію станів та логіку перемикання сторінок як вручну, так і автоматично.

Реалізований інтерфейс є простим і зрозумілим: кожні 15 секунд автоматично змінюється сторінка, яка виводить або дані мікроклімату, або рівень CO₂ та запиленості. Користувач також має змогу вручну перемикати сторінки за допомогою двох кнопок, які виконують однакову функцію. Це рішення забезпечує інтуїтивність і не потребує навчання або пояснень для користувача.

В результаті виконаних робіт було створено функціональну, стабільну і практичну систему, здатну здійснювати моніторинг ключових параметрів повітря в реальному часі. Система повністю працює автономно, не потребує підключення до зовнішніх серверів і може використовуватись у будь-якому приміщенні, де є доступ до електромережі.

Таким чином, усі запроєктовані технічні рішення були успішно реалізовані, перевірені в реальних умовах і продемонстрували відповідність поставленим завданням. Розроблений пристрій є прикладом успішної реалізації кіберфізичної системи побутового рівня на основі доступних апаратних платформ.

ВИСНОВКИ

У межах виконаної кваліфікаційної роботи було реалізовано повний цикл проектування, розробки та тестування стаціонарної системи моніторингу якості повітря. Робота поєднала в собі як теоретичні аспекти — аналіз наявних рішень, порівняння сенсорів, вибір компонентів, — так і практичну частину: розробку програмного забезпечення, побудову електричних з'єднань, реалізацію логіки відображення даних і тестування пристрою в реальних умовах.

На початковому етапі дослідження було визначено, що якість повітря в закритих приміщеннях є критично важливою для здоров'я, працездатності та загального самопочуття людини. Основними факторами, що впливають на мікроклімат, є рівень вуглекислого газу, наявність дрібнодисперсного пилу, вологість, температура та атмосферний тиск. У результаті аналізу предметної області було обґрунтовано необхідність створення системи, яка здатна в реальному часі відстежувати ці параметри, наочно відображати результати та бути повністю автономною у використанні.

Було сформовано чітку архітектуру системи, яка складається з декількох функціональних модулів: модуля збору мікрокліматичних даних (BME280), модуля детекції CO₂ (MH-Z19B), модуля контролю пилу (PMS5003), інтерфейсу користувача (TFT-дисплей із кнопками), а також блоку живлення. Усі модулі було інтегровано навколо мікроконтролера ESP32, який став обчислювальним центром системи.

Під час реалізації апаратної частини пристрою були враховані особливості інтерфейсів зв'язку, вимоги до живлення, сумісність рівнів напруг і технічні обмеження плати ESP32. Сенсори було підключено через відповідні інтерфейси (I²C для BME280, UART для PMS5003 і MH-Z19B), а усі з'єднання виконано пайкою для забезпечення надійності.

Програмна частина була розроблена з нуля з використанням мови C++ у середовищі Arduino IDE. Реалізовано логіку циклічного опитування сенсорів,

обробки та фільтрації даних, автоматичного й ручного перемикання сторінок на екрані, кольорової індикації показників залежно від їх рівня. Інтерфейс користувача побудовано таким чином, щоб забезпечити максимальну простоту взаємодії: кожні 15 секунд сторінки змінюються автоматично, при цьому обидві кнопки дають змогу перемикати вручну без складних сценаріїв.

Тестування системи в умовах реального середовища підтвердило її працездатність, стабільність, а також достатню точність вимірювання ключових параметрів. Виявлено, що використані сенсори, зокрема BME280 і МН-Z19В, забезпечують достовірні значення при правильному калібруванні. PMS5003 дозволив оцінювати запиленість повітря на рівні PM1.0, PM2.5 і PM10, що дає змогу комплексно аналізувати навколишнє середовище.

У межах роботи також було визначено основні обмеження поточної реалізації — відсутність автономного живлення, незбереження історії вимірювань та обмежений формат інтерфейсу. Водночас було запропоновано шляхи подальшого розвитку пристрою: підключення Wi-Fi-модуля для передачі даних, використання SD-карти для запису даних, додавання мобільного застосунку або веб-інтерфейсу, впровадження режиму низького енергоспоживання.

Загалом, мета роботи створення доступного, автономного та стабільного пристрою була досягнута повною мірою. Результатом є функціональна система, яка поєднує в собі точні сенсори, стабільну логіку роботи, та інтуїтивний інтерфейс користувача. Система готова до застосування в побутових умовах або використання як частина начальних, демонстраційних чи дослідницьких проєктів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Adafruit Industries. Adafruit BME280 Humidity + Barometric Pressure + Temperature Sensor Breakout. URL: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout.pdf>.
2. Adafruit Industries. PM2.5 Air Quality Sensor. URL: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/pm25-air-quality-sensor.pdf>.
3. Air quality guidelines global update 2006. World Health Organization (WHO). URL: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02>.
4. Arduino Software. The Arduino Software. Arduino Docs. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide/#ide-v2>.
5. Arduino Software. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART). URL: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/uart/>.
6. Bosch Sensortec. BME280 datasheet. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>.
7. Comparison of CO2 sensors MH-Z19B vs Senseair S8 - eMariete. eMariete. URL: <https://emariete.com/en/comparative-co2-sensors-mh-z19b-vs-senseair-s8/>.
8. Datasheet/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf at master · m2mlorawan/datasheet. *GitHub*. URL: https://github.com/m2mlorawan/datasheet/blob/master/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf.
9. DHT22. *Sparkfun*. URL: <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>.
10. Espressif Systems. ESP32 technical reference manual. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf.
11. GitHub - Bodmer/TFT_eSPI: Arduino and PlatformIO IDE compatible TFT library optimised for the Raspberry Pi Pico (RP2040), STM32, ESP8266 and ESP32

that supports different driver chips. GitHub. URL:
https://github.com/Bodmer/TFT_eSPI.

12. Howard V. Statement of Evidence Particulate Emissions and Health Proposed Ringaskiddy Waste-to-Energy Facility. WebCite. URL:
<http://www.durhamenvironmentwatch.org/Incinerator%20Health/CVHRingaskiddyEvidenceFinal1.pdf>.

13. Hura V., Monastyrskii L. IOT-based solution for detection of air quality using ESP32. Artificial Intelligence. 2023. Vol. 28, AI.2023.28(3). P. 86–93. URL:
<https://doi.org/10.15407/jai2023.03.086>.

14. Santos S. ESP32 Pinout Reference: Which GPIO pins should you use? | Random Nerd Tutorials. Random Nerd Tutorials. URL:
<https://randomnerdtutorials.com/esp32-pinout-reference-gpios/>.

15. Sparkfun Electronics. I2C. Sparkfun. URL:
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c/all>.

16. The Headteacher | Better Leadership, Smarter Spending. The Headteacher. URL:
<https://www.theheadteacher.com/new-for-schools/the-impact-of-co2-on-childrens-learning>.

17. Winsen Electronics. Infrared CO2 Sensor Module (Model: MH-Z19B). URL:
<https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z19B.pdf>.

18. Wu J. Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com. URL:
https://www.ti.com/lit/an/sbaa565/sbaa565.pdf?ts=1749031651769&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F.

ДОДАТОК А

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BME280.h>
#include <MHZ19.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <TFT_eSPI.h>
#include <SPI.h>
#include <PMS.h>

#define BME_SCL 22
#define BME_SDA 21

#define PMS_RX 32
#define PMS_TX 33

#define MHZ_RX 25
#define MHZ_TX 26

#define BTN_LEFT 0
#define BTN_RIGHT 35

Adafruit_BME280 bme;
MHZ19 mhz19;
SoftwareSerial mhzSerial(MHZ_RX, MHZ_TX);
SoftwareSerial pmsSerial(PMS_RX, PMS_TX);
PMS pms(pmsSerial);
PMS::DATA pmsData;

TFT_eSPI tft = TFT_eSPI();

unsigned long lastSwitch = 0;
const unsigned long switchInterval = 15000; // 15 сек
int currentPage = 0;

bool prevLeft = false;
bool prevRight = false;

// Колір для CO2
uint16_t getColorCO2(int ppm) {
    if (ppm < 800) return TFT_GREEN;
    else if (ppm < 1200) return TFT_YELLOW;
    else return TFT_RED;
}

// Колір для PM
uint16_t getColorPM(int value) {
    if (value < 15) return TFT_GREEN;
    else if (value < 40) return TFT_YELLOW;
    else return TFT_RED;
}
```

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000);

  pinMode(BTN_LEFT, INPUT);
  pinMode(BTN_RIGHT, INPUT);

  // Ініціалізація дисплея
  tft.init();
  tft.setRotation(1);
  tft.setTextFont(2);
  tft.setTextSize(2);
  tft.fillScreen(TFT_BLACK);

  // BME280
  Wire.begin(BME_SDA, BME_SCL);
  if (!bme.begin(0x76)) {
    tft.println("Помилка BME280!");
    while (1);
  }

  // MH-Z19B
  mhzSerial.begin(9600);
  mhz19.begin(mhzSerial);
  mhz19.autoCalibration(true);

  // PMS5003
  pmsSerial.begin(9600);
  pms.wakeUp();

  lastSwitch = millis();
}

void loop() {
  handlePageSwitch();

  if (currentPage == 0) {
    showBME280();
  } else {
    showPMSAndCO2();
  }

  delay(3000);
}

// ==== Перемикання сторінок ====
void handlePageSwitch() {
  bool leftPressed = digitalRead(BTN_LEFT) == LOW;
  bool rightPressed = digitalRead(BTN_RIGHT) == LOW;

  if (leftPressed || rightPressed) {

```

```

    currentPage = (currentPage + 1) % 2;
    lastSwitch = millis(); // оновлюємо час останнього перемикання
    tft.fillScreen(TFT_BLACK);

    // Очікування, поки кнопка відпуститься (антидребезг)
    while (digitalRead(BTN_LEFT) == LOW || digitalRead(BTN_RIGHT)
== LOW) {
        delay(10);
    }
}

// Автоматичне перемикання, якщо кнопки не натиснені
if (millis() - lastSwitch > switchInterval) {
    currentPage = (currentPage + 1) % 2;
    lastSwitch = millis();
    tft.fillScreen(TFT_BLACK);
}
}

void showBME280() {
    float temp = bme.readTemperature();
    float hum = bme.readHumidity();
    float pres = bme.readPressure() / 100.0;

    tft.fillScreen(TFT_BLACK);

    tft.setTextFont(1);
    tft.setTextSize(2);

    // Температура
    tft.setTextColor(TFT_ORANGE);
    tft.setCursor(5, 10);
    tft.print("T:");

    tft.setTextColor(TFT_WHITE);
    tft.setCursor(70, 10);
    tft.printf("%.1f C", temp);

    // Вологість
    tft.setTextColor(TFT_CYAN);
    tft.setCursor(5, 40);
    tft.print("H:");

    tft.setTextColor(TFT_WHITE);
    tft.setCursor(70, 40);
    tft.printf("%.1f %%", hum);

    // Тиск
    tft.setTextColor(TFT_GREEN);
    tft.setCursor(5, 70);
    tft.print("P:");

```

```

tft.setTextColor(TFT_WHITE);
tft.setCursor(70, 70);
tft.printf("%.1f hPa", pres);

// Лінія знизу
tft.drawLine(0, 100, 240, 100, TFT_DARKGREY);
}

void showPMSAndCO2() {
    int co2 = mhz19.getCO2();

    tft.fillScreen(TFT_BLACK);
    tft.setTextFont(1);
    tft.setTextSize(2);

    int centerX = 120; // Центр екрана по X

    if (pms.readUntil(pmsData)) {
        // PM1.0
        tft.setCursor(10, 10);
        tft.setTextColor(getColorPM(pmsData.PM_AE_UG_1_0));
        tft.printf("PM1.0: %d", pmsData.PM_AE_UG_1_0);

        // PM2.5
        tft.setCursor(10, 35);
        tft.setTextColor(getColorPM(pmsData.PM_AE_UG_2_5));
        tft.printf("PM2.5: %d", pmsData.PM_AE_UG_2_5);

        // PM10
        tft.setCursor(10, 60);
        tft.setTextColor(getColorPM(pmsData.PM_AE_UG_10_0));
        tft.printf("PM10 : %d", pmsData.PM_AE_UG_10_0);
    }

    // CO2
    tft.setCursor(10, 90);
    tft.setTextColor(getColorCO2(co2));
    tft.printf("CO2: %d ppm", co2);

    // Нижня лінія
    tft.drawLine(0, 120, 240, 120, TFT_DARKGREY);
}

```