

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та СМАРТ–систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

AIR QUALITY MONITORING SYSTEM

спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Електроніка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕЛ–41

Мудрук Сергій Олександрович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент

Мороз Сергій Анатолійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

« ____ » _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Мороз Сергій Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 171 Електроніка

Освітня програма: «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ
« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мудрук Сергій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Система моніторингу якості повітря*

Керівник роботи *к.т.н., доцент Мороз Сергій Анатолійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 року № 559/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 04.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *технічні характеристики та архітектура 32-бітного*

мікроконтролера ESP32-WROOM-32;

документація на мультигазовий датчик ENS160 та сенсор мікроклімату АНТ21;

параметри протоколів бездротової передачі даних Wi-Fi та MQTT для IoT-систем.

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

Вступ

Розділ 1 Аналітичний огляд сучасних методів моніторингу якості повітря

Розділ 2 Апаратно-програмна реалізація системи

Розділ 3 Технічна діагностика та аналіз результатів випробуван

Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Демонстраційний матеріал у вигляді презентації Power Point.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1 Аналітичний огляд сучасних методів моніторингу якості повітря</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Розділ 2 Апаратно-програмна реалізація системи:</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Розділ 3 Технічна діагностика та аналіз результатів випробуван</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	<i>%</i>		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 31 грудня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1 Аналітичний огляд методів моніторингу якості повітря</i>	до 05.03.2026 р.	
2.	<i>Розділ 2 Апаратно-програмна реалізація системи:</i>	до 20.03.2026 р.	
3.	<i>Розділ 3 Технічна діагностика та аналіз результатів випробуван</i>	до 04.04.2026 р.	
4.	<i>Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	до 10.04.2026 р	
5.	<i>Висновки</i>	до 20.04.2026 р	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 25.04.2026 р	
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 10.05.2026 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 20.05.2026 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 25.05.2026 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Мудрук С. О.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Мороз С. А.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Мудрук С. О. Система моніторингу якості повітря. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Електроніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел.

У першому розділі розглянуто загальні відомості про показники якості повітря та основні забруднювачі, проаналізовано існуючі аналоги систем екологічного моніторингу та обґрунтовано вибір розподіленої сенсорної IoT-архітектури. У другому розділі описані структурні та електричні принципові схеми модуля моніторингу, обґрунтовано вибір елементної бази на основі мікроконтролера ESP32 та цифрових датчиків ENS160 і АНТ21, а також розглянуто розробку мікропрограмного забезпечення й налаштування протоколу MQTT. В третьому розділі описані методика проведення випробувань та калібрування сенсорів, діагностика апаратної частини на відмовостійкість, математичні розрахунки енергоспоживання і мережевого трафіку, а також результати дослідження екологічних показників у реальних умовах. У четвертому розділі розглянуто вимоги з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при розробці електронної апаратури. У висновку узагальнено та підсумовано інформацію з усіх попередніх розділів. Результат роботи можна застосовувати для створення надійних, автономних систем екологічного моніторингу та їх інтеграції в інфраструктуру розумного будинку.

Ключові слова: моніторинг повітря, IoT, ESP32, ENS160, АНТ21, MQTT, якість повітря.

ANNOTATION

Mudruk S. Air quality monitoring system based on Internet of Things technologies. Manuscript.

Bachelor's qualification paper, Educational Program «Electronics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's qualification paper consists of an introduction, four chapters, conclusions, and a list of references.

The first chapter considers general information about air quality indicators and main pollutants, analyzes existing analogues of environmental monitoring systems, and justifies the choice of a distributed sensor IoT architecture. The second chapter describes the structural and electrical schematic diagrams of the monitoring module, justifies the choice of components based on the ESP32 microcontroller and digital sensors ENS160 and AHT21, and considers the development of firmware and the configuration of the MQTT protocol. The third chapter describes the methodology for testing and calibrating the sensors, hardware fault tolerance diagnostics, mathematical calculations of energy consumption and network traffic, as well as the results of studying environmental indicators in real conditions. The fourth chapter discusses occupational health and safety requirements in emergency situations during the development of electronic equipment. The conclusions generalize and summarize the information from all previous chapters. The results of the work can be applied to create reliable, autonomous environmental monitoring systems and integrate them into smart home infrastructure.

Key words: Air Monitoring, IoT, ESP32, ENS160, AHT21, MQTT, Air Quality.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ.....	11
1.1 Показники якості повітря та нормативні вимоги	11
1.2 Методи та засоби вимірювання параметрів повітря	14
1.3 Архітектура систем моніторингу якості повітря	16
1.4 Аналіз існуючих реалізацій систем	18
РОЗДІЛ 2 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ НА БАЗІ ENS160 ТА АНТ21.....	21
2.1 Обґрунтування структурної схеми пристрою	21
2.2 Вибір та технічна характеристика елементної бази	24
2.3 Проєктування підсистеми живлення та комутації обладнання...	30
2.4 Розробка принципової електричної схеми та проєктування друкованої плати (РСВ)	32
2.5 Організація мікропрограмного забезпечення та передачі даних.....	35
РОЗДІЛ 3 ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ.....	39
3.1 Методика випробувань та калібрування вимірювальних каналів.....	39
3.2 Діагностика апаратно-програмної частини та перевірка відмовостійкості.....	40
3.3 Аналіз екологічних показників у реальних умовах.....	42
3.4 Інженерно-технічні та метрологічні розрахунки параметрів системи.....	43
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	47
4.1 Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих виробничих	47

факторів при експлуатації розробленого пристрою.....	
4.2 Вимоги безпеки перед початком та під час роботи з розробленим програмно–апаратним комплексом.....	48
4.3 Інженерні заходи пожежної безпеки та електробезпеки розробленого модуля керування.....	50
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54
ДОДАТКИ.....	55

ВСТУП

Стрімка урбанізація, ущільнення міської забудови та широке використання синтетичних матеріалів у будівництві й побуті призводять до суттєвого погіршення якості повітря у закритих приміщеннях. Історично для оцінки екологічної ситуації використовувалися переважно стаціонарні габаритні пости моніторингу або періодичний лабораторний забір проб повітря. Проте такі методи у сучасних умовах мають низку суттєвих обмежень. Вони є високовартісними, потребують складного обслуговування, не забезпечують достатньої просторової роздільної здатності і, найголовніше, не здатні інформувати користувача про небезпеку в режимі реального часу. Відсутність оперативного контролю за концентрацією діоксиду вуглецю та летких органічних сполук (VOC) у житлових і робочих зонах призводить до розвитку синдрому «хворої будівлі», зниження когнітивних функцій, швидкої втомлюваності та загострення респіраторних захворювань.

Технологічною альтернативою традиційним постам є створення компактних побутових аналізаторів якості повітря. Проте ефективність та достовірність роботи більшості існуючих бюджетних рішень безпосередньо обмежені їхньою апаратною базою. Аналогові напівпровідникові сенсори минулого покоління (наприклад, серії MQ) характеризуються низькою селективністю, швидкою деградацією чутливого шару та сильною залежністю від температури і вологості середовища. Крім того, побудова таких систем на базі застарілих 8-бітних мікроконтролерів унеможливорює складну математичну обробку сигналів на самому пристрої (Edge Computing). Також серйозним недоліком багатьох комерційних приладів є закритість їхніх екосистем: вони не підтримують універсальні протоколи передачі даних, що робить неможливою їх інтеграцію у власні системи «розумного будинку» чи науково-дослідні комплекси для збору історичної телеметрії.

Для подолання цих обмежень у сучасній технічній діагностиці спостерігається перехід до парадигми Інтернету речей (IoT) та

мікроелектромеханічних систем (MEMS). Особливий інтерес викликає використання 32-бітного мікроконтролера ESP32, який працює на частоті до 240 МГц та має вбудовану апаратну підтримку радіоінтерфейсу Wi-Fi. Це дозволяє пристрою функціонувати як незалежний мережевий вузол, безпосередньо відправляючи масиви даних на хмарні сервери. Водночас використання новітніх мультигазових цифрових сенсорів, таких як ENS160 із вбудованим математичним співпроцесором, вирішує проблему дрейфу показань. Однак розробка надійного пристрою на базі цих компонентів вимагає вирішення складних інженерних завдань, пов'язаних із забезпеченням стабільного живлення аналогових трактів, реалізацією резервного акумуляторного живлення та розробкою алгоритмів динамічної перехресної компенсації впливу мікроклімату на газові датчики.

Метою кваліфікаційної роботи є проєктування та розробка автономної системи моніторингу якості повітря на базі технологій Інтернету речей (IoT) з використанням мікроконтролера ESP32, яка забезпечує безперервний збір, апаратну компенсацію та бездротову передачу екологічних показників.

Завдання роботи:

1. Провести аналітичний огляд сучасних методів моніторингу якості повітря.
2. Здійснити апаратно-програмну реалізацію системи (вибір елементної бази, проєктування принципової схеми та розробка мікропрограмного забезпечення).
3. Виконати технічну діагностику та аналіз результатів випробувань розробленої системи.
4. Проаналізувати вимоги з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при розробці та експлуатації електронної апаратури.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого безперервного інструментального моніторингу екологічних параметрів мікроклімату.

Предмет дослідження – апаратні та програмні засоби побудови IoT-вузлів, алгоритми температурно-вологісної компенсації металооксидних

матриць та протоколи бездротової передачі телеметрії.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту, виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

1.1 Показники якості повітря та нормативні вимоги

Атмосферне повітря є складною багатокомпонентною системою, стан якої визначається концентрацією різноманітних газів та аерозолів. Для об'єктивної оцінки якості повітря використовується ряд ключових показників (полютантів), які мають найбільший вплив на здоров'я людини та навколишнє середовище.

Розглянемо основні забруднювачі.

Дрібнодисперсні частинки (PM2.5 та PM10): Тверді мікрочастинки та краплі рідини аеродинамічним діаметром менше 2,5 та 10 мікрометрів відповідно (рис. 1.1). Завдяки малим розмірам вони здатні проникати глибоко в дихальні шляхи та кровоносну систему, викликаючи респіраторні та серцево-судинні захворювання.



Рисунок 1.1 – Дрібнодисперсні частинки [1]

Діоксид вуглецю (CO_2): Хоча CO_2 є природним компонентом атмосфери, його підвищена концентрація (понад 1000 ppm) у закритих приміщеннях або

щільно забудованих урбанізованих зонах призводить до зниження когнітивних функцій та ефекту «задухи». В контексті глобальної екології виступає основним парниковим газом (рис. 1.2).

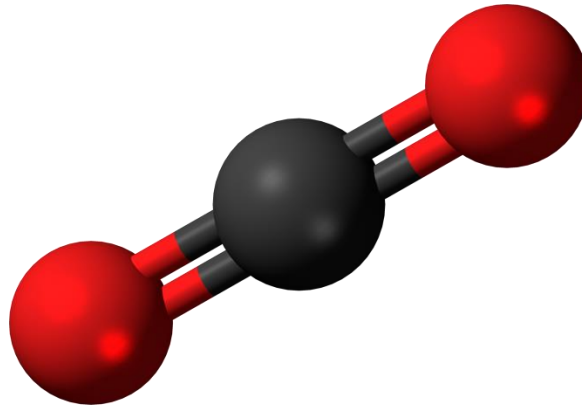


Рисунок 1.2 – Діоксид вуглецю (CO_2)[2]

Оксид вуглецю (CO): Високотоксичний газ без кольору та запаху, продукт неповного згоряння вуглеводневого палива (рис. 1.3).

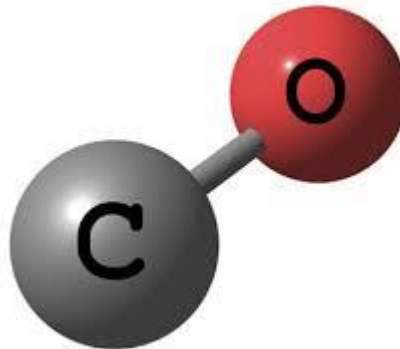


Рисунок 1.3 – Оксид вуглецю (CO) [2]

Діоксид азоту (NO_2): Утворюється переважно під час високотемпературного горіння (двигуни внутрішнього згоряння, ТЕС). Є прекурсором кислотних дощів та фотохімічного смогу (рис. 1.4).

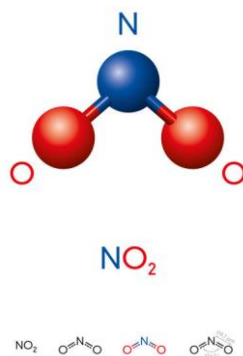


Рисунок 1.4 – Діоксид азоту (NO_2) [2]

Озон (O_3): Тропосферний (приземний) озон є вторинним забруднювачем, що утворюється внаслідок фотохімічних реакцій між оксидами азоту та леткими органічними сполуками під дією сонячного випромінювання (рис. 1.5).

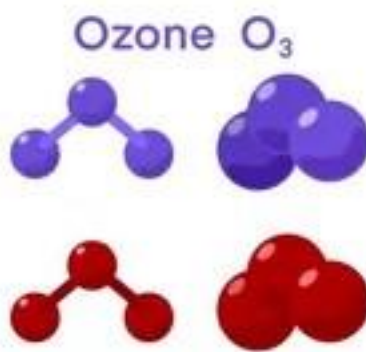


Рисунок 1.5 – Озон (O_3) [2]

Леткі органічні сполуки (VOC): велика група хімічних речовин, які легко випаровуються при кімнатній температурі. До найпоширеніших джерел їх виділення належать будівельні матеріали, фарби, лаки, мийні засоби, меблі з ДСП, а також різні аерозолі. У закритих приміщеннях їх концентрація може бути значно вищою, ніж на вулиці.

Розглянемо національні та міжнародні стандарти. Регулювання якості повітря базується на системі гранично допустимих концентрацій (ГДК). На міжнародному рівні ключовим орієнтиром є Глобальні керівні принципи ВООЗ

щодо якості повітря (оновлені у 2021 році), які встановлюють надзвичайно суворі нормативи (наприклад, середньорічна норма для $PM_{2.5}$ становить 5 мкг/м^3). В Європейському Союзі діє Директива 2008/50/ЕС. В Україні оцінка стану атмосферного повітря регламентується ДСП 201-97 (Державні санітарні правила), які визначають максимально разові та середньодобові ГДК для основних поліютантів.

1.2 Методи та засоби вимірювання параметрів повітря

Вибір методу вимірювання залежить від необхідної точності, цільового газу, умов експлуатації та допустимої вартості обладнання.

Газоаналізатори:

Традиційні стаціонарні газоаналізатори (хроматографічні, мас-спектрометричні) є еталонними засобами вимірювання (рис. 1.6). Вони забезпечують найвищу точність та селективність, однак характеризуються значними габаритами, високим енергоспоживанням, необхідністю регулярного калібрування з використанням еталонних газових сумішей та надзвичайно високою вартістю. Це робить їх непридатними для масового розгортання в мережах локального моніторингу.



Рисунок 1.6 – Газовий хроматограф [3]

Оптичні датчики:

Для детектування твердих частинок (PM) та діоксиду вуглецю (CO_2)

найефективнішими є оптичні методи:

Лазерне розсіювання (Laser Scattering): Використовується для вимірювання PM2.5/PM10 (рис. 1.7). Промінь лазера спрямовується в камеру, через яку прокачується повітря. Частинки пилу розсіюють світло, яке фіксується фотоприймачем. Аналіз інтенсивності розсіювання дозволяє розрахувати концентрацію та фракційний склад пилу.

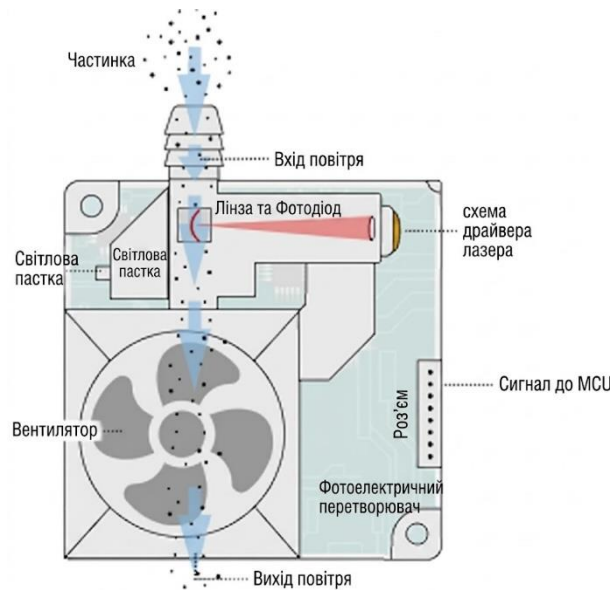


Рисунок 1.7 – лазерний PM сенсор [4]

Недисперсійне інфрачервоне випромінювання (NDIR): Золотий стандарт для вимірювання CO₂ (рис. 1.8). Метод базується на здатності молекул CO₂ поглинати інфрачервоне випромінювання на специфічній довжині хвилі (близько 4,26 мкм). Забезпечує високу довговічність та стабільність показників.

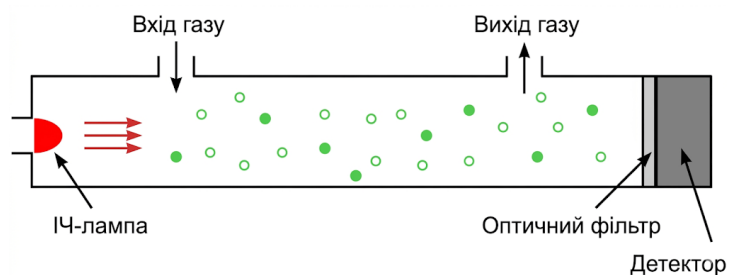


Рисунок 1.8 – NDIR-сенсор CO₂ [5]

Електрохімічні датчики:

Широко застосовуються для виявлення токсичних газів (CO , NO_2 , O_3). Принцип дії ґрунтується на хімічній реакції цільового газу з електролітом всередині сенсора, що генерує електричний струм, пропорційний концентрації газу. Вони компактні, енергоефективні та відносно недорогі, але мають обмежений термін служби (зазвичай 1-3 роки) через деградацію електроліту (рис. 1.9).

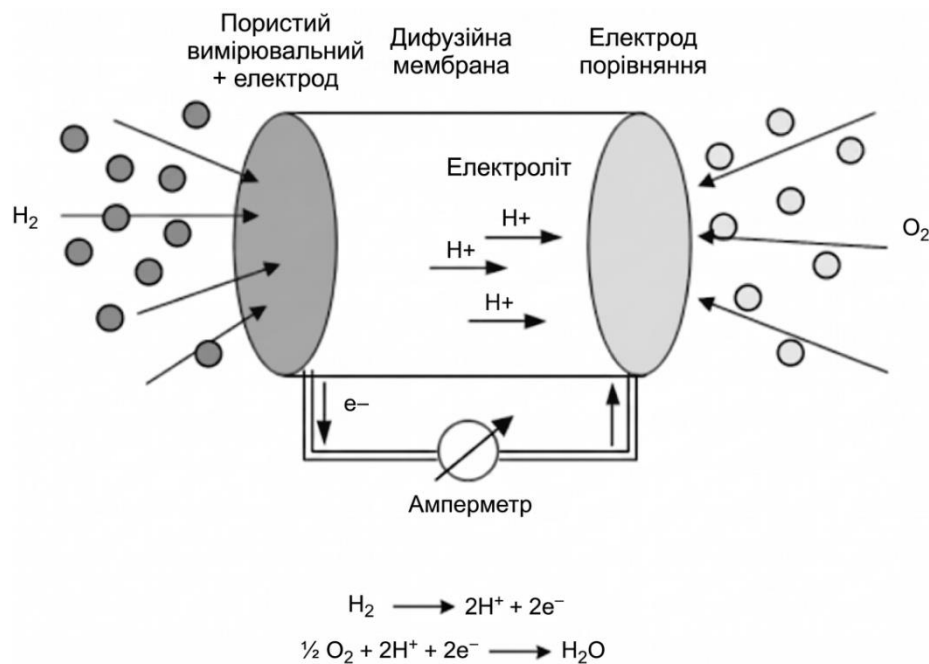


Рисунок 1.9 – Електрохімічний водневий сенсор [6]

Для сучасних систем масового моніторингу оптимальним є комбінований підхід: використання NDIR та лазерних сенсорів для базових показників (CO_2 , PM) завдяки їхній стабільності, та електрохімічних/напівпровідникових (MEMS) сенсорів для виявлення VOC та специфічних газів.

1.3 Архітектура систем моніторингу якості повітря

Розвиток електроніки та інформаційних технологій зумовив еволюцію архітектури екологічного моніторингу.

Стаціонарні та мобільні системи:

Класичні державні мережі базуються на стаціонарних постах. Їхня головна проблема – низька просторова роздільна здатність. Мобільні лабораторії дозволяють проводити епізодичні заміри, але не забезпечують безперервності.

IoT-рішення (Інтернет речей):

Сучасним трендом є розгортання розподілених мереж мікрокліматичного моніторингу на базі IoT-архітектури. Класична архітектура такої системи включає три рівні.

Візуальне представлення класичної трирівневої IoT-архітектури, яка застосовується у розробленій системі екологічного моніторингу, наведено на рисунку 1.10.



Рисунок 1.10 – Трирівнева архітектура IoT-системи моніторингу

1. Perception Layer (Рівень сприйняття): Апаратний вузол (сенсорний блок), що складається з мікроконтролера та набору датчиків. Його завдання – первинний збір та оцифрування фізичних величин.

2. Network Layer (Мережевий рівень): Відповідає за передачу даних від вузлів до центрального сервера. В урбанізованому середовищі найчастіше

використовуються протоколи Wi-Fi (для приміщень), LoRaWAN (для енергоефективної передачі на великі відстані) або GSM/NB-IoT.

3. Application Layer (Прикладний рівень): Хмарна платформа або локальний сервер (наприклад, на базі протоколу MQTT), де відбувається агрегація, зберігання (у базах даних), аналіз та візуалізація інформації для кінцевого користувача (веб-інтерфейс або мобільний додаток).

1.4 Аналіз існуючих реалізацій систем

На сучасному ринку представлено кілька успішних реалізацій систем моніторингу, які варто розглянути для порівняння технічних рішень.

ENS160: Модуль датчик якості повітря (рис. 1.11), температури та вологості. ENS160 мультигазовий датчик виявляє різні гази та леткі органічні сполуки (ЛОС), включаючи толуол, водень, етанол, NO₂ та озон. Інтегрований алгоритм попереднього калібрування датчика та автоматичної корекції базової лінії. Інтерфейси I2C і SPI. На виході можна отримати різні показники якості повітря (TVOC-Загальні леткі органічні сполуки), eCO₂-Еквівалент вуглекислого газу, AQL - Загальний індекс якості повітря, який узагальнює різні параметри). Діапазон умов навколишнього середовища: температура: від -40°C до +85°C, відносна вологість (RH): від 5% до 95%. Живлення: 3,3VDC. Габарити: 20x25,3mm

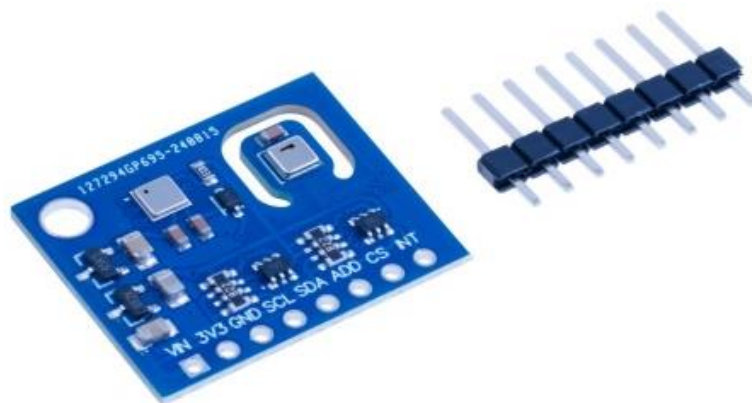


Рисунок 1.11 – Модуль ENS160 [7]

PurpleAir: Популярна краудсорсингова мережа, що використовує подвійні лазерні лічильники частинок (Plantower) для забезпечення перехресної перевірки даних (зниження хибних показників) (рис. 1.12). Система орієнтована переважно на вимірювання твердих частинок (PM2.5). Дані знаходяться у відкритому доступі. Недоліком є обмежений перелік вимірюваних газів (відсутність повноцінного газоаналізу CO, NO₂).



Рисунок 1.12 – PurpleAir [8]

EcoCity: Українська мережа громадського моніторингу. Вузли базуються на мікроконтролерах сімейства ESP (ESP8266/ESP32) з модульною архітектурою датчиків (Nova Fitness SDS011 для PM, різноманітні датчики VOC/газів) (рис. 1.13). Система є відкритою, економічно доступною та адаптованою під вітчизняні реалії комунікації.



Рисунок 1.13 – EcoCity: Українська мережа громадського моніторингу [9]

Порівняльний аналіз технічних характеристик наведений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз технічних характеристик

Параметр	Модуль ENS160	PurpleAir PA-II	EcoCity (Sapphire)
Тип датчиків	Цифровий MOX (металооксидний)	Подвійний лазерний (PMS5003)	Мультисенсорний (комбінований)
Об'єкт вимірювання	TVOC, eCO ₂ , AQI (гази)	Пил (PM1,0, PM2,5, PM10)	Пил, гази, радіація, шум
Передача даних	I2C/SPI (цифровий інтерфейс)	Wi-Fi	Wi-Fi, LoRa, GSM
Живлення	1,71V–1,98V (низьке споживання)	Мережа (5V через USB)	Мережа / Сонячна панель
Цільова аудиторія	Розробники електроніки / IoT	Громада / Науковці	Громада / Еко-активісти

РОЗДІЛ 2.

АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ НА БАЗІ ENS160 ТА АНТ21

2.1 Обґрунтування структурної схеми пристрою

Побудова будь-якої сучасної мікропроцесорної системи технічної діагностики та екологічного моніторингу розпочинається з розробки її структурної схеми. Вона визначає основні функціональні вузли пристрою, їхнє призначення та принципи інформаційної і електричної взаємодії між собою. Головним критерієм під час проектування апаратної частини розроблюваної системи є забезпечення високої точності вимірювань, надійності передачі даних, а також мінімізації апаратних витрат і габаритів кінцевого пристрою.

Враховуючи поставлені завдання, апаратний комплекс моніторингу якості повітря логічно поділяється на чотири базові підсистеми:

1. Обчислювальний блок (ядро системи).
2. Блок збору первинної інформації (сенсорна підсистема).
3. Підсистема живлення.
4. Блок бездротового зв'язку.

Основою запропонованої структурної схеми є високопродуктивний мікроконтролер (МК). З огляду на необхідність роботи з технологіями Інтернету речей (IoT), доцільним є використання системи на кристалі (SoC) ESP32. Даний мікроконтролер виконує роль головного керуючого пристрою (Master), який ініціює опитування периферійних модулів, здійснює первинну математичну обробку отриманих даних та формує пакети для їх подальшої передачі.

Сенсорна підсистема реалізована на базі двох високоточних цифрових датчиків: мультигазового сенсора ENS160 та датчика мікроклімату АНТ21. Вибір цифрових датчиків дозволяє уникнути використання зовнішніх аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП) та мінімізувати вплив

електромагнітних завад на лініях зв'язку, що є критично важливим для збереження точності вимірювань летких органічних сполук (VOCs).

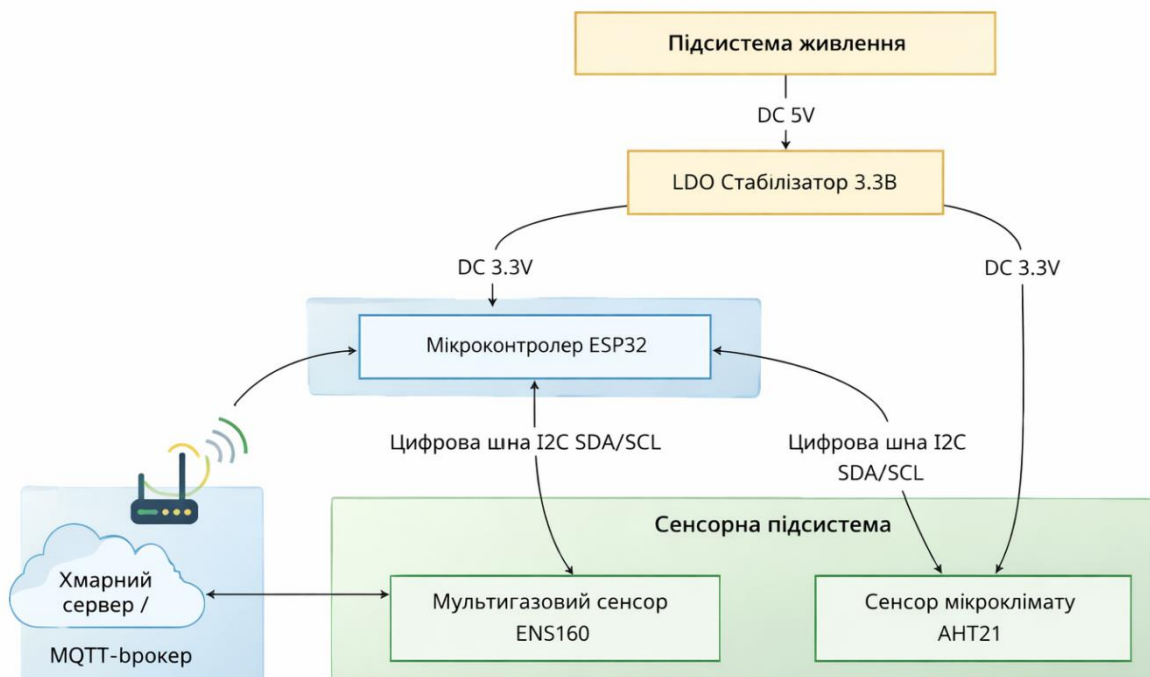


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи моніторингу якості повітря

Як видно з рисунка 2.1, комунікація між обчислювальним ядром та сенсорною підсистемою здійснюється за допомогою єдиної цифрової послідовної шини I2C (Inter-Integrated Circuit). Цей стандарт зв'язку є оптимальним для даного проєкту, оскільки він дозволяє підключати декілька підлеглих пристроїв (Slave) до одного ведучого (Master), використовуючи лише дві сигнальні лінії: лінію даних (SDA–Serial Data) та лінію тактування (SCL – Serial Clock).

Оскільки датчики ENS160 та АНТ21 мають різні та жорстко задані апаратні адреси (за замовчуванням 0–53 для ENS160 та 0–38 для АНТ21), вони безконфліктно функціонують на спільній шині. Це суттєво заощаджує кількість виводів загального призначення (GPIO) мікроконтролера та спрощує подальше розведення друкованої плати.

Важливим аспектом структурної взаємодії є перехресна компенсація даних. Алгоритм роботи системи, закладений у структурній схемі, передбачає таку послідовність:

Мікроконтролер спочатку звертається до датчика мікроклімату АНТ21 і зчитує поточні значення температури (T) та відносної вологості (RH).

Отримані параметри середовища по шині I2C передаються у внутрішні регістри мультигазового датчика ENS160.

Апаратний процесор датчика ENS160 використовує ці дані для температурної компенсації показників металооксидних елементів, після чого мікроконтролер зчитує скориговані та максимально точні значення TVOC, eCO₂ та індексу якості повітря (AQI).

Для забезпечення безперебійної та стабільної роботи вимірювальних елементів особливу увагу в структурі приділено підсистемі живлення. Усі ключові компоненти (ESP32, ENS160, АНТ21) працюють від напруги постійного струму 3,3 В. Отже, система не потребує складних перетворювачів логічних рівнів на лініях даних. Живлення пристрою може здійснюватися від стандартного порту USB (5 В) через вхідний інтерфейс, після чого напруга понижується та стабілізується за допомогою лінійного стабілізатора з низьким падінням напруги (LDO). Використання LDO замість імпульсних DC-DC перетворювачів зумовлене необхідністю мінімізації пульсацій та високочастотних шумів у колах живлення, які можуть негативно вплинути на чутливість металооксидних датчиків.

Передача зібраної та обробленої інформації реалізується за допомогою вбудованого в ESP32 радіомодуля стандарту IEEE 802,11 (Wi-Fi). Дані форматуються у вигляді JSON-структури і передаються на зовнішній хмарний сервер за протоколом MQTT, що замикає загальну архітектуру пристрою рівня «периферія-хмара».

Таким чином, розроблена структурна схема повністю задовольняє вимоги до систем IoT-моніторингу, забезпечуючи оптимальний баланс між

продуктивністю обчислювального ядра, точністю вимірювань апаратно-компенсованих цифрових сенсорів та енергоефективністю.

2.2 Вибір та технічна характеристика елементної бази

Вибір елементної бази є критичним етапом проектування апаратно-програмного комплексу, оскільки від точності, стабільності та надійності первинних перетворювачів залежить достовірність усієї системи екологічного моніторингу. Враховуючи сучасні вимоги до технічної діагностики електронних пристроїв та необхідність забезпечення високої відмовостійкості системи під час тривалої експлуатації, для реалізації проєкту було обрано сучасні інтегровані цифрові рішення. Такий підхід мінімізує вплив електромагнітних завад на вимірювальні тракти та оптимізує енергоспоживання пристрою.

Обчислювальне ядро та комунікаційний модуль Як центральний мікропроцесорний пристрій (MCU) обрано систему на кристалі (SoC) ESP32 від компанії Espressif Systems. Вибір зумовлений її високою обчислювальною потужністю та вбудованою підтримкою протоколів бездротової передачі даних, що є базовою вимогою для побудови рішень у парадигмі Інтернету речей (IoT).

Основні технічні характеристики ESP32:

Архітектура: 32-бітний двоядерний процесор Tensilica Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц.

Пам'ять: 520 КБ внутрішньої SRAM, підтримка зовнішньої флеш-пам'яті (зазвичай 4 МБ у складі стандартних модулів серії WROOM).

Бездротові інтерфейси: Wi-Fi та Bluetooth.

Апаратні інтерфейси: багата периферія з підтримкою шин I2C, SPI, UART, I2S, а також наявність вбудованих АЦП та ЦАП.

Важливою перевагою ESP32 для побудови систем безперервного моніторингу є наявність апаратного сторожового таймера (Watchdog Timer). Це дозволяє реалізувати механізми глибокої технічної діагностики: у разі

зависання програми або втрати зв’язку із сервером, контролер ініціює автоматичне перезавантаження, гарантуючи автономність та стабільність роботи системи без втручання оператора. Для керування периферійними пристроями та обміну даними в системі використано модуль ESP32-WROOM-32. На в таблиці 2.1 та рисунку 2.2 представлено візуальна розпіновка (Pinout) модуля, що дозволяє чітко ідентифікувати призначення кожного виводу при проектуванні друкованої плати

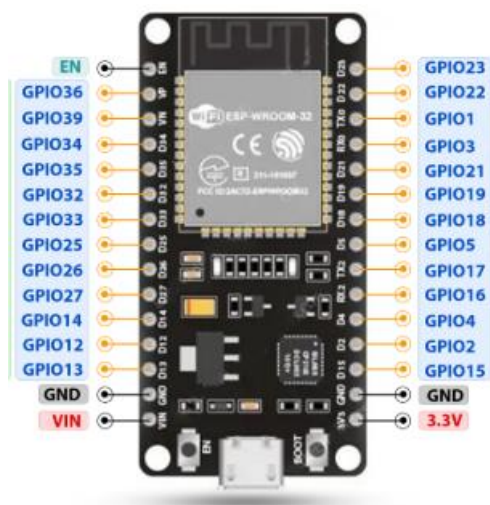


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд та призначення виводів (Pinout) модуля ESP32

Таблиця 2.1 – Призначення виводів модуля ESP32

Назва виводу	Функціональне призначення
VIN	Вхід живлення (5В від USB)
3,3V	Вихід стабілізованої напруги 3,3В
GND	Заземлення (земля)
EN	Вивід скидання (Enable/Reset)
GPIO21 (SDA)	Лінія даних шини I2C
GPIO22 (SCL)	Лінія тактування шини I2C
GPIO36 / 39	Аналогові входи (ADC)
TX / RX	UART інтерфейс для налагодження та прошивки
BOOT	Кнопка входу в режим завантаження програмного забезпечення

Мультигазовий сенсор летких органічних сполук (ENS160) Для детектування ключових забруднювачів повітря використано мультигазовий

датчик нового покоління ENS160 виробництва компанії ScioSense. Цей сенсор побудований за технологією мікроелектромеханічних систем (MEMS) і містить чотири незалежні високоінтегровані металооксидні (MOX) чутливі елементи з функцією індивідуального терморегулювання (технологія TrueVOC™).

Внутрішню архітектуру сенсора, яка демонструє взаємодію чотирьох незалежних вимірювальних елементів, їхніх драйверів нагрівання та інтегрованого мікроконтролера (ASIC) для апаратної обробки даних, наведено на рисунку 2.3. Технічні параметри ENS160:

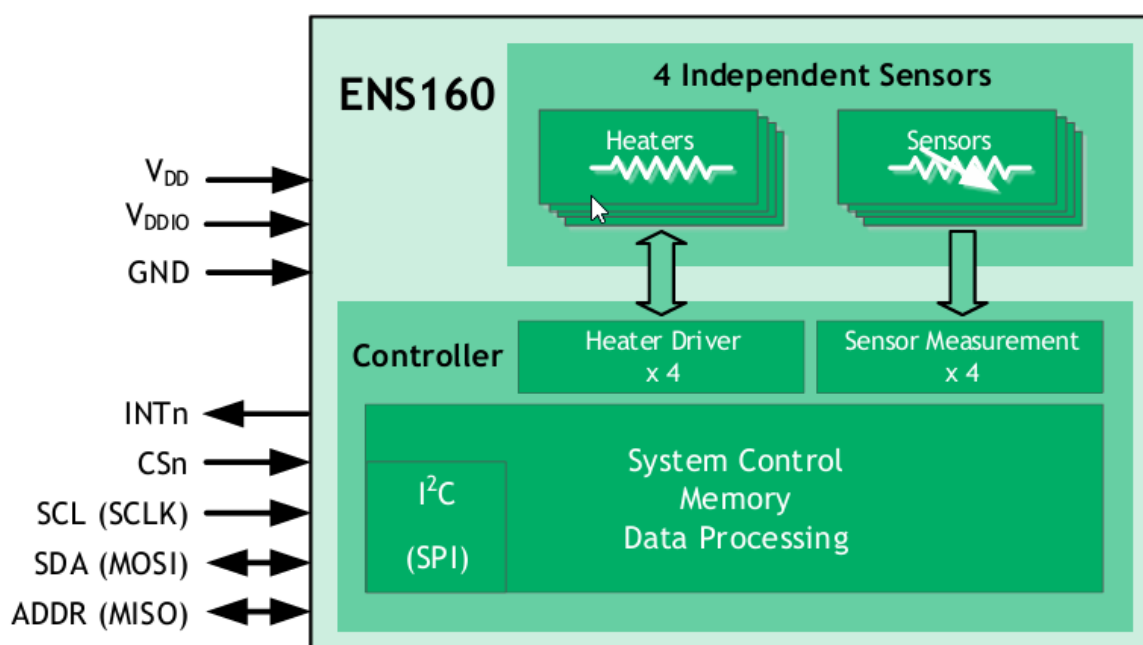


Рисунок 2.3 – Функціональна блок-схема мультигазового датчика ENS160

Напруга живлення: 1,71 В – 3,6 В (оптимально 3,3 В).

Вимірювані параметри: Загальний вміст летких органічних сполук (TVOC) у діапазоні 0–65000 ppb.

Еквівалент діоксиду вуглецю (eCO_2) у діапазоні 400–65000 ppm.

Індекс якості повітря (AQI) за стандартом UBA (від 1 до 5).

Інтерфейс зв'язку: I2C (з підтримкою швидкостей Standard-mode 100 кГц та Fast-mode 400 кГц).

Струм споживання: близько 29 мА в активному режимі під час нагрівання МОХ-елементів.

Для правильного проєктування топології друкованої плати та інтеграції мікросхеми ENS160 необхідно суворо дотримуватися специфікацій виробника щодо розташування контактних майданчиків. Габаритне креслення та конфігурацію виводів (Pinout) датчика наведено на рисунку 2.4.

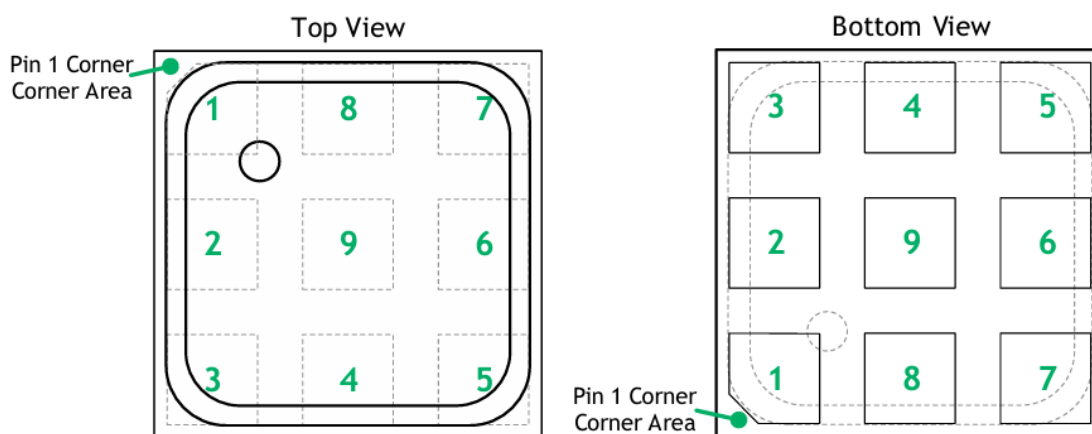


Рисунок 2.4 – Конфігурація контактних майданчиків (Pinout) мультигазового датчика ENS160

Головною інженерною перевагою ENS160 є наявність вбудованого спеціалізованого співпроцесора (ASIC). Він самостійно виконує складні алгоритми перерахунку зміни електричного опору МОХ-матриці у готові стандартизовані показники якості повітря. Це знімає обчислювальне навантаження з основного мікроконтролера та усуває необхідність розробки складних математичних моделей на рівні прикладного програмного забезпечення.

Для забезпечення стабільної роботи чутливої металооксидної матриці та цифрового ядра сенсора ENS160 потрібна специфічна апаратна обв'язка. Типову принципову електричну схему модуля наведено на рисунку 2.5. Вона демонструє використання інтегрованого LDO-стабілізатора для забезпечення внутрішньої робочої напруги 1,8 В (VDD), а також конфігурацію

струмообмежувальних підтягуючих резисторів на лініях цифрової шини I2C та вибір I2C-адреси пристрою.

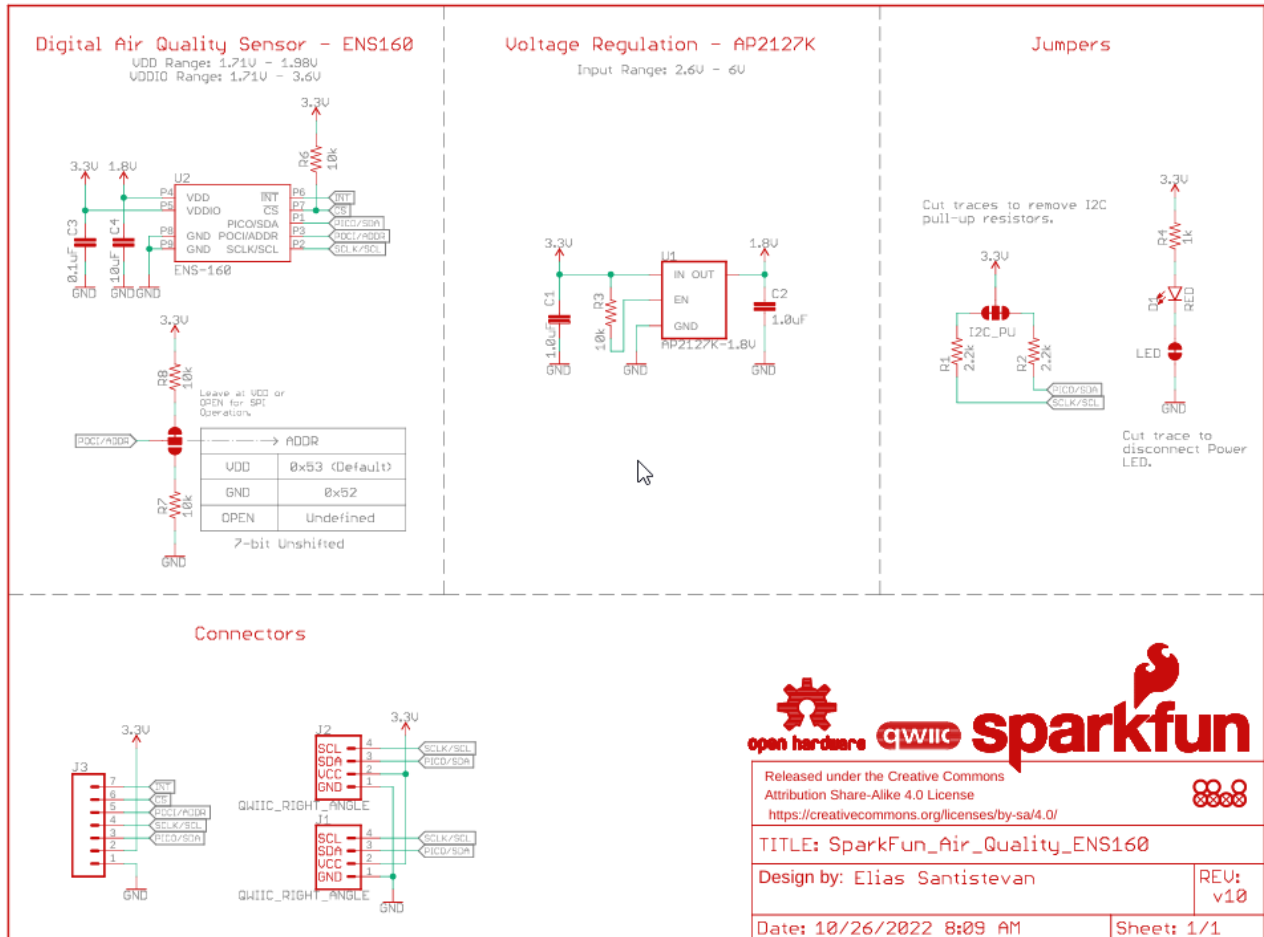


Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема модуля мультигазового датчика ENS160

Датчик параметрів мікроклімату (АНТ21) Оскільки хімічна реакція адсорбції на поверхні металооксидних структур сильно залежить від абсолютної вологості та температури навколишнього середовища, для забезпечення апаратної компенсації показань ENS160 у систему інтегровано прецизійний датчик АНТ21 (виробництва ASAIR).

Технічні характеристики АНТ21:

Діапазон вимірювання температури: від -40 °C до +85 °C (з типовою похибкою $\pm 0,3$ °C).

Діапазон вимірювання відносної вологості: від 0 до 100 % (з типовою похибкою ± 2 %).

Напруга живлення: 2,2 В – 5,5 В.

Вихідний сигнал: цифровий (стандарт I2C).

Датчик АНТ21 виконаний у мініатюрному корпусі SMD. Призначення контактних майданчиків (Pinout) сенсора для його коректного підключення до мікроконтролера та цифрової шини I2C наведено на рисунку 2.6.

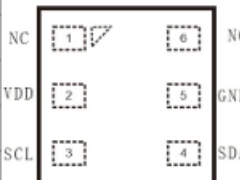
Pin	Name	Definition	 Top view	
1	NC	Remain suspended		
2	VDD	Power supply voltage		
3	SCL	Serial clock		
4	SDA	Serial data, bidirectional		
5	GND	Power ground		
6	NC	Remain suspended		

Рисунок 2.6 – Призначення виводів (Pinout) цифрового датчика АНТ21

Датчик АНТ21 оснащений новим поколінням ASIC-чіпів та покращеним ємнісним напівпровідниковим елементом для вимірювання вологості MEMS-типу. Це гарантує високу швидкість реакції на зміну мікроклімату, довгострокову стабільність характеристик і стійкість до деградації в умовах агресивного середовища. Отримані з нього дані безперервно передаються до регістрів ENS160 для динамічного коригування базової лінії газового сенсора.

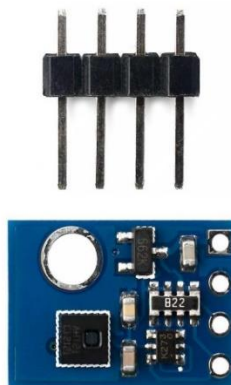


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд датчика температури та вологості АНТ21

2.3 Проектування підсистеми живлення та комутації обладнання

Стабільність та якість напруги живлення є критичними факторами для коректного функціонування будь-якої мікропроцесорної системи, особливо тієї, що містить чутливі аналого-цифрові перетворювачі та металооксидні (МОХ) датчики. Нестабільне живлення або наявність високочастотних пульсацій можуть призвести до похибок у вимірюванні індексу якості повітря (AQI) сенсором ENS160, а також викликати перезавантаження мікроконтролера ESP32 під час пікових навантажень (наприклад, у моменти передачі даних по Wi-Fi).

Розробка модуля стабілізації напруги. Усі ключові компоненти розроблюваної системи (SoC ESP32, ENS160, АНТ21) розраховані на роботу від номінальної напруги постійного струму 3,3 В. Враховуючи, що основним джерелом живлення для пристрою передбачається стандартний USB-інтерфейс або зовнішній мережевий адаптер з вихідною напругою 5 В, виникає необхідність застосування понижуючого перетворювача напруги.

Для реалізації цієї задачі обрано лінійний стабілізатор напруги з низьким падінням (Low Dropout Regulator – LDO), наприклад, серії AMS1117-3,3 або AP2112K-3,3. Використання LDO-стабілізатора, на відміну від імпульсних DC-DC перетворювачів, є свідомим інженерним рішенням. Незважаючи на дещо нижчий коефіцієнт корисної дії (ККД), лінійний стабілізатор не генерує високочастотних електромагнітних завад (шумів перемикання), які є критично небажаними для прецизійної роботи нагрівальних елементів мікроелектромеханічної системи (MEMS) всередині датчика ENS160.

Для фільтрації низькочастотних і високочастотних завад, а також для компенсації різких перепадів струму споживання (ESP32 може споживати до 250–500 мА під час сеансів радіозв'язку), схема живлення доповнюється паралельно підключеними конденсаторами. На вході та виході стабілізатора

встановлюються танталові або електролітичні конденсатори ємністю 10–100 мкФ (для згладжування низькочастотних пульсацій) та керамічні SMD-конденсатори ємністю 0,1 мкФ (для придушення високочастотного шуму).

Резервування живлення (ДБЖ) з метою забезпечення безперервності екологічного моніторингу (робота в режимі 24/7) та уникнення втрати даних під час аварійних відключень електроенергії, у підсистемі живлення передбачена інтеграція компактного джерела безперебійного живлення (ДБЖ). Апаратна реалізація ДБЖ базується на використанні літій-іонного акумулятора (форм-фактор 18650), спеціалізованого контролера заряду-розряду (наприклад, на базі мікросхеми TP4056 з модулем захисту DW01A) та підвищуючого перетворювача напруги (Boost Converter) до 5 В. Під час наявності мережевої напруги система працює від блоку живлення, паралельно заряджаючи акумулятор; при зникненні напруги відбувається безшовна комутація на резервне джерело.

Комутація цифрової шини (рис. 2.8). I2C Інтерфейс I2C, за яким відбувається обмін даними між мікроконтролером ESP32 та датчиками ENS160 і АНТ21, реалізований за топологією відкритий колектор. Це означає, що жоден з пристроїв на шині не може примусово встановити високий логічний рівень на лініях даних (SDA) та тактування (SCL); вони можуть лише «притягувати» лінію до землі (GND).

Для коректного формування сигналів високого логічного рівня застосовуються підтягні резистори (Pull-up resistors). У даній розробці лінії SDA та SCL підключені до шини живлення 3,3 В через резистори номіналом 4,7 кОм. Це забезпечує оптимальний час наростання фронту сигналу (Rise Time) і дозволяє системі стабільно працювати на частоті шини I2C як у стандартному (100 кГц), так і у швидкому (Fast Mode, 400 кГц) режимах.

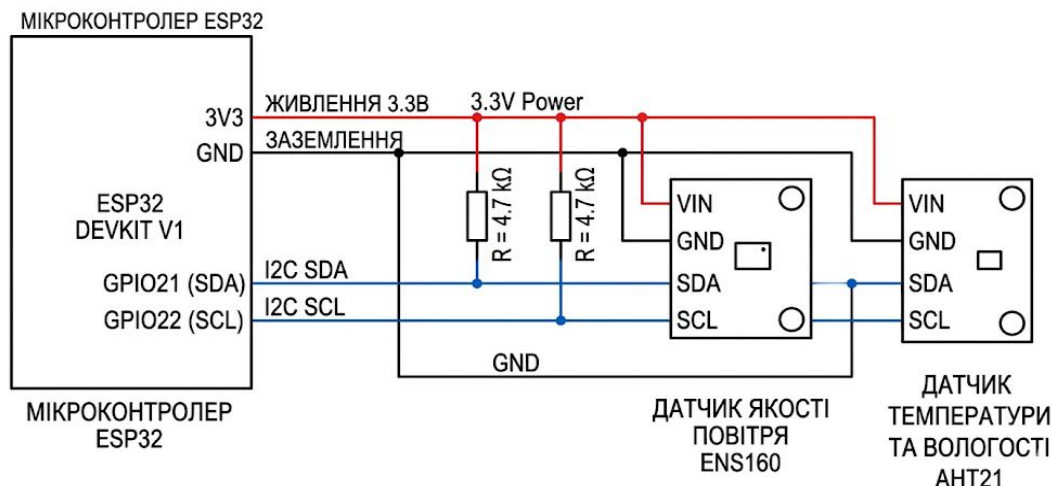


Рисунок 2.8 – Схема комутації датчиків ENS160 та АНТ21 з мікроконтролером по шині I2C

2.4 Розробка принципової електричної схеми та проєктування друкованої плати (PCB)

На основі розробленої структурної схеми та обраної елементної бази (ESP32, ENS160, АНТ21) у середовищі автоматизованого проєктування електроніки (EDA) було створено принципову електричну схему пристрою екологічного моніторингу. Процес проєктування передбачав генерацію списку з'єднань (Netlist), що забезпечило логічну відповідність між принциповою схемою та топологією друкованої плати.

Принципова схема (рис. 2.9) об'єднує наступні логічні вузли:

1. Вузол мікроконтролера: Включає модуль ESP32-WROOM-32, обв'язку для автоматичного переходу в режим програмування (транзистори на лініях EN та IO0, підключені до перетворювача USB-UART на базі CP2102) та блокувальні конденсатори по колу живлення 3,3 В.

2. Вузол датчиків (I2C-шина): Сенсори ENS160 та АНТ21 підключені до портів GPIO21 (SDA) та GPIO22 (SCL) мікроконтролера. На цих лініях встановлені підтягуючі резистори номіналом 4,7 кОм.

3. Вузол живлення: Схема заряду літій-іонного акумулятора на базі TP4056 з модулем захисту DW01A, що виконує функцію ДБЖ. Напруга батареї або USB через LDO-стабілізатор AP2112K-3,3 перетворюється у стабільні 3,3 В.

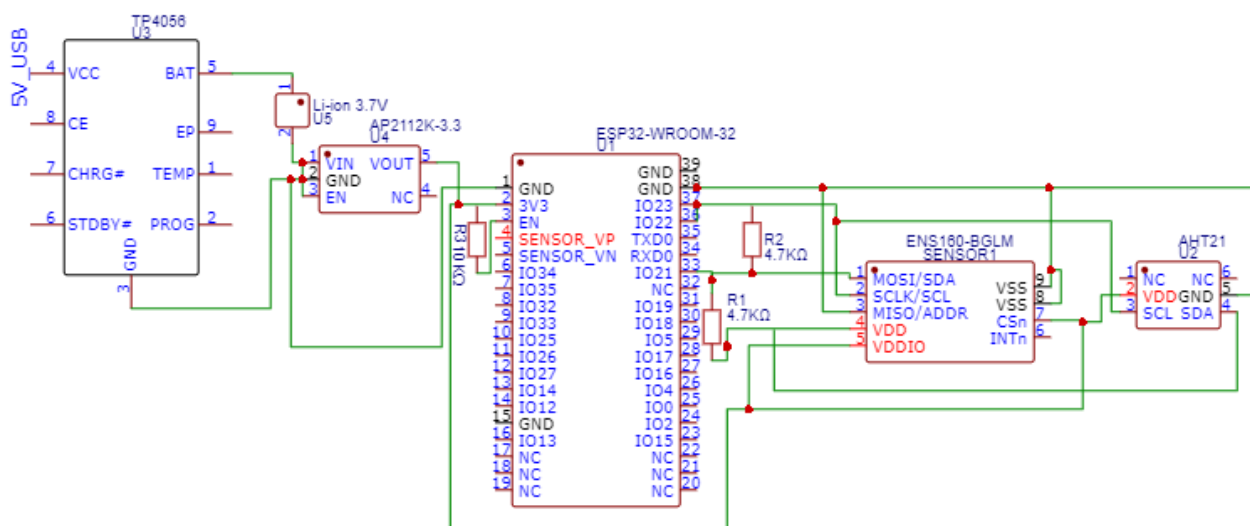


Рисунок 2.9 – Принципова електрична схема системи моніторингу якості повітря

Наступним етапом стало трасування (розведення) друкованої плати (PCB). Для забезпечення стабільної роботи високочастотного радіомодуля (Wi-Fi) та чутливих аналогово-цифрових трактів MOX-сенсора ENS160, під час розведення було дотримано таких правил технічного дизайну:

Оптимізація силових кіл: Лінії живлення, що забезпечують споживачів струмом, розведено провідниками збільшеної ширини (не менше 0,5 мм). Це технічне рішення дозволило мінімізувати омичний опір провідників та, як наслідок, суттєво зменшити падіння напруги при пікових навантаженнях (під час ініціалізації радіотракту). Для забезпечення стабільної опорної напруги на загальному шарі GND (земляний полігон) було застосовано принцип «зіркового» заземлення, що запобігає появі «земляних петель».

Локальна фільтрація та decoupling: Для кожного активного компонента передбачено індивідуальні блоки фільтрації. Керамічні SMD-конденсатори номіналом 100 нФ розміщено безпосередньо біля виводів живлення

(VCC/GND) відповідних мікросхем. Це дозволило мінімізувати паразитну індуктивність доріжок і забезпечити ефективне придушення високочастотних шумів безпосередньо в місці їх виникнення.

Забезпечення цілісності цифрових сигналів: Лінії цифрової шини I2C, що з'єднують ESP32, ENS160 та АНТ21, розведено максимально короткими паралельними провідниками з мінімальною кількістю перехідних отворів (Vias). Для запобігання виникненню перехресних завад (Crosstalk) ці лінії було ізолювано від контурів проходження імпульсних струмів силових ліній. Ширина провідників та відстані між ними розраховані таким чином, щоб забезпечити узгодження імпедансу шини та стабільність фронтів цифрового сигналу.

Проектування радіочастотного контуру (RF-Design): Особливу увагу приділено зоні антени модуля ESP32-WROOM-32. Згідно з рекомендаціями виробника, під антеною та в радіусі дії електромагнітного поля передбачено зону вільного простору (Keep-out zone) - ділянку, повністю вільну від мідних полігонів, шарів живлення та землі на всіх рівнях плати. Це критично важливо для запобігання екрануванню радіосигналу мідними поверхнями, що дозволяє уникнути відбиття хвилі назад у пристрій та забезпечує максимальний радіус стабільного Wi-Fi зв'язку.

Термічний менеджмент: Оскільки робота металооксидних датчиків супроводжується нагріванням, під корпусом сенсора ENS160 та стабілізатором напруги сформовано додаткові теплопровідні майданчики, з'єднані з основним мідним полігоном за допомогою масиву термальних перехідних отворів (Thermal Vias) (рис. 2.10.). Це забезпечує ефективне відведення тепла та запобігає локальному перегріву, який міг би призвести до деградації чутливого шару сенсора.

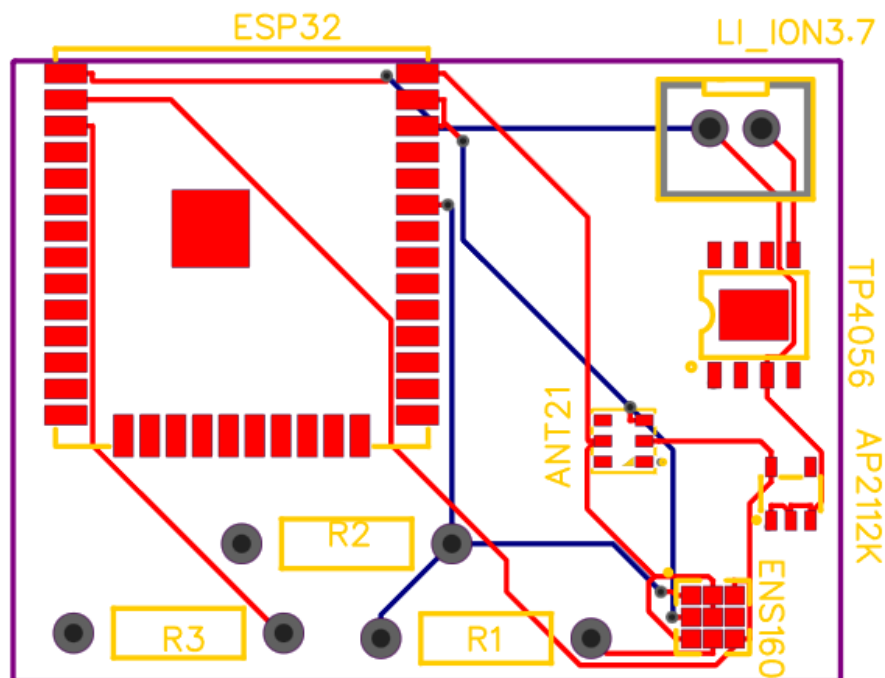


Рисунок 2.10 – Топологія розробленої друкованої плати системи моніторингу якості повітря

2.5 Організація мікропрограмного забезпечення та передачі даних

Мікропрограмне забезпечення для мікроконтролера ESP32 базується на мові C/C++ із застосуванням фреймворку Arduino Core. Програмна архітектура побудована за принципом асинхронного виконання задач із використанням програмних таймерів (на основі функції `millis`), що дозволяє уникати застосування блокуючих затримок (`delay`). Такий підхід забезпечує ефективне паралельне виконання критично важливих завдань: опитування сенсорної підсистеми, підтримку стабільного Wi-Fi з'єднання для телеметрії та обробку діагностичних переривань у реальному часі.

Ключовим компонентом програмної частини є алгоритм вимірювального циклу, який реалізує метод апаратно-програмної перехресної компенсації. У системі виконується така послідовність дій:

Ініціалізація та збір даних: Мікроконтролер ініціює запит до датчика мікроклімату АНТ21 через цифрову шину I2C. Після завершення циклу конвертації, МК зчитує сирі значення температури (T) та відносної вологості (RH).

Температурно-вологісна компенсація: Отримані значення T та RH передаються до конфігураційних регістрів мультигазового сенсора ENS160 (регістри ENS160_ENV_TEMP та ENS160_ENV_HUM). Це дозволяє вбудованому спеціалізованому співпроцесору (ASIC) датчика ENS160 динамічно коригувати базову лінію металооксидної матриці відповідно до умов середовища.

Фінальна обробка показників: Після внутрішньої корекції, мікроконтролер зчитує з ENS160 вже оброблені та стабілізовані значення: загальну концентрацію летких органічних сполук (TVOC, ppb), еквівалент діоксиду вуглецю (eCO_2 , ppm) та розрахований індекс якості повітря (AQI, 1–5).

Для забезпечення високої технічної надійності та відмовостійкості апаратного комплексу задіяно апаратний сторожовий таймер (Watchdog Timer). Код здійснює безперервний моніторинг статусу I2C-шини. У разі відсутності підтвердження (ACK) від датчиків протягом заданого тайм-ауту, фіксується апаратна помилка, виконується процедура програмного скидання шини I2C (Bus Clear) та, у критичних ситуаціях, ініціюється повне перезавантаження модуля з виходом із режиму глибокого сну (Deep Sleep Wake-up).

Оскільки досліджуваний пристрій є повноцінним вузлом інфраструктури Інтернету речей (IoT), фінальним етапом роботи алгоритму є інтеграція надійного каналу зв'язку для накопичення, аналітики та візуалізації телеметрії. Для передачі даних налаштовано використання протоколу прикладного рівня MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Вибір зумовлений його «легковажністю», низькими вимогами до пропускної здатності каналу та роботою за шаблоном «видавець-підписник» (Publish-Subscribe). Це робить протокол ідеальним для роботи в умовах нестабільного бездротового з'єднання Wi-Fi.

Для уніфікації обміну інформацією мікроконтролер ESP32 попередньо упаковує зібрані сенсорні дані у структурований текстовий формат JSON (JavaScript Object Notation). Використання цього формату забезпечує високу сумісність системи з хмарними платформами та брокерами повідомлень.

Приклад структури інформаційного пакета, що генерується пристроєм:

```
«device_id»: ESP32_AQ_01,  
«temperature»: 23,5,  
«humidity»: 45,2,  
«tvo»: 135,  
«eco2»: 450,  
«aqi»: 1,  
«status»: OK.
```

У розглянутій архітектурі модуль ESP32 виконує роль «видавця» (Publisher), публікуючи сформований пакет у визначений топик MQTT-брокера (наприклад, `telemetry/air_quality`). Серверна частина системи працює за таким алгоритмом:

Агрегація: Брокер приймає дані від вузла ESP32 та передає їх до бази даних часових рядів (наприклад, InfluxDB), що забезпечує швидкий доступ до історичних значень показників.

Візуалізація: Для кінцевого користувача налаштовується інформаційна панель (Dashboard), яка у режимі реального часу відображає динамічні графіки зміни концентрації газів, температури та вологості.

Моніторинг та оповіщення: На серверному рівні задається логіка автоматизованого контролю: у разі перевищення гранично допустимих концентрацій (наприклад, якщо $eCO_2 > 1000$ ppm або $AQI > 3$), хмарна платформа генерує тривожне сповіщення (Alert).

Застосування такої архітектури забезпечує високу масштабованість системи та дозволяє в майбутньому легко інтегрувати пристрій у складніші

екосистеми розумного будинку (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Блок-схема алгоритму роботи мікропрограмного забезпечення та взаємодії з хмарним сервером

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ

3.1 Методика випробувань та калібрування вимірювальних каналів

Комплексне тестування розробленого IoT-пристрою базується на верифікації точності та стабільності роботи інтегрованих мікроелектромеханічних (MEMS) сенсорів. Оскільки мультигазовий датчик ENS160 функціонує на основі металооксидної (MOX) технології, критичним етапом підготовки до експлуатації є процедура термічного тренування (Burn-in). Випробування проводилися у контрольованому лабораторному середовищі, де пристрій працював у безперервному режимі протягом 48 годин на відкритому повітрі. Ця процедура необхідна для стабілізації нульового рівня (базової лінії) eCO_2 , яка за допомогою вбудованого алгоритму Automatic Baseline Correction (ABC) була зафіксована на еталонній позначці 400 ppm.

Паралельно здійснювалася верифікація вимірювального тракту датчика мікроклімату АНТ21. Для забезпечення достовірності даних проводилося порівняння значень абсолютної температури та відносної вологості з показаннями сертифікованого лабораторного термогігрометра (клас точності 0,5). Методика калібрування передбачала поетапне перенесення пристрою у зони з різними температурними режимами (діапазон 15–35 °C) та рівнями вологості. Результати серії вимірювань підтвердили відповідність похибок датчика АНТ21 паспортним даним ($\pm 0,3$ °C та ± 2 % R_H).

Для оцінки динамічних характеристик газового сенсора ENS160 було розроблено методику випробувань у тестовій камері об'ємом 10 дм³. Як джерело летких органічних сполук (VOC) використовувалися пари ізопропілового спирту фіксованої концентрації. Методика включала:

1. Ініціалізацію системи у чистому повітрі до встановлення стаціонарного значення TVOC.
2. Дозоване введення одоранту за допомогою мікрошприца.

3. Фіксацію часу відгуку (Response Time, t_{90}) - проміжку часу від моменту введення до досягнення 90 % кінцевого значення.

4. Оцінку часу відновлення (Recovery Time) після видалення джерела випарів.

Проведені експерименти засвідчили, що час реакції матриці сенсора не перевищує 3 секунд, що повністю задовольняє вимоги до систем оперативного екологічного контролю. Крім того, перевірялася робота функції апаратної перехресної компенсації: при штучному зволоженні повітря (використання ультразвукового зволожувача) було доведено, що вбудований алгоритм компенсації ефективно нівелює похибки газових показань, викликані зміною вологості. Отримана таким чином методика гарантує метрологічну простежуваність результатів та високу відтворюваність вимірювань у реальних умовах експлуатації дані наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати верифікації вимірювальних каналів та порівняння з еталонними значеннями

Параметр	Одиниці виміру	Еталонне значення	Значення системи	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %
Температура (T)	°C	25	25,2	+0,2	0,8%
Вологість (RH)	%	45	44,1	-0,9	2%
eCO ₂	ppm	400	415	+15	3,7%
TVOC	ppb	0	12	+12	-

3.2 Діагностика апаратно-програмної частини та перевірка відмовостійкості

Технічна діагностика апаратного забезпечення була зосереджена на дослідженні стабільності та надійності підсистеми живлення в умовах динамічних навантажень. Відомо, що під час роботи радіотракту Wi-Fi мікроконтролер ESP32 генерує короточасні піки струмоспоживання, що сягають 500 мА. За допомогою цифрового осцилографа з високою частотою

дискретизації проводився моніторинг вихідної напруги LDO-стабілізатора AP2112K-3.3. Аналіз отриманих осцилограм підтвердив, що навіть при максимальній інтенсивності радіообміну амплітуда пульсацій на шині 3,3 В не перевищує 50 мВ, що є цілком допустимим показником, який не викликає дестабілізації аналогових трактів чутливих датчиків ENS160 та АНТ21.

Програмна діагностика системи включала етап імітації критичних збоїв для перевірки відмовостійкості алгоритмів. Враховуючи критичну важливість цифрової шини I2C, було проведено тестування поведінки системи при фізичному розриві сигнальних ліній. Мікропрограма, завдяки впровадженню обробників виключень у функції запиту до датчиків, коректно ідентифікувала відсутність біта підтвердження (ACK). Алгоритм діагностики автоматично ініціював відновлення шини шляхом генерації серії примусових тактових імпульсів (I2C Bus Clear), що дозволило уникнути «зависання» системи в очікуванні відповіді від периферії.

Для забезпечення надійності роботи в автономному режимі (без втручання оператора) було активовано апаратний сторожовий таймер (Watchdog Timer). Під час імітації програмного циклічного зависання (наприклад, через переповнення стека або нескінченний цикл у бібліотеці зв'язку) таймер успішно ініціював примусове перезавантаження мікроконтролера, після чого система автоматично відновлювала збір даних.

Окремим етапом стала перевірка стабільності мережевого стека. Тестування при втраті Wi-Fi з'єднання продемонструвало ефективність розробленої логіки автопідключення: пристрій стабільно переходить у режим циклічного пошуку точки доступу, при цьому основне вимірювальне ядро продовжує виконувати збір телеметрії у внутрішній буфер, не втрачаючи стійкості. Таким чином, розроблений комплекс продемонстрував високий рівень відмовостійкості, необхідний для систем безперервного екологічного моніторингу.

3.3 Аналіз екологічних показників у реальних умовах

Дослідна експлуатація розробленого програмно-апаратного комплексу здійснювалася шляхом безперервного моніторингу в умовах реального житлового приміщення протягом 72-годинного циклу. Зібрані масиви емпіричних даних, що накопичувалися на хмарному сервері з періодичністю опитування 60 секунд, дозволили виявити чіткі добові патерни зміни мікроклімату та ідентифікувати джерела забруднення повітря.

Аналіз результатів продемонстрував виражену кореляцію між антропогенним фактором (присутністю людей) та динамікою концентрації еквівалента вуглекислого газу (eCO_2). Було зафіксовано циклічне експоненційне зростання концентрації eCO_2 до рівня 1200–1400 ppm у вечірні години при зачинених вікнах. Ефективність системи вентиляції підтверджувалася миттєвим падінням рівня CO_2 до 450–500 ppm після проведення процедури залпового провітрювання.

Динаміка загальної концентрації летких органічних сполук (TVOC) демонструвала гострі пікові стрибки, які за часовими мітками чітко корелювали з використанням засобів побутової хімії, приготуванням їжі або застосуванням аерозольних освіжувачів повітря.

Важливим результатом проведеного дослідження стало підтвердження високої ефективності алгоритму перехресної апаратної компенсації. Зокрема, у моменти активізації побутового ультразвукового зволожувача повітря датчик АНТ21 реєстрував стрибкоподібне зростання відносної вологості (R_H) від 35 % до 65 %. Завдяки інтеграції даних T та R_H у внутрішні контури обробки сенсора ENS160, ці вологісні коливання не викликали хибних девіацій («шумових» піків) у розрахунках газових концентрацій. Це свідчить про те, що реалізована апаратна компенсація успішно нівелює вплив мікроклімату на МОХ-матрицю датчика, забезпечуючи високу метрологічну достовірність системи.

Отримані результати підтверджують, що розроблений комплекс здатний не лише фіксувати поточні показники, але й бути надійним інструментом для

технічної діагностики якості екологічного середовища в режимі реального часу дані наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Класифікація якості повітря за AQI та граничними концентраціями eCO_2

Індекс якості (AQI)	Концентрація eCO_2 , ppm	Рівень якості повітря	Вплив на здоров'я / Рекомендації
1	< 800	Відмінний	Сприятливе середовище
2	800–1000	Добрий	Допустимий рівень
3	1000–1500	Помірний	Рекомендовано провітрювання
4	1500–2000	Поганий	Можлива втома, зниження уваги
5	> 2000	Небезпечний	Необхідна негайна вентиляція

3.4 Інженерно-технічні та метрологічні розрахунки параметрів системи

Для проведення розрахунків автономності роботи пристрою, параметрів узгодження шини I2C та оцінки метрологічної точності вимірювальних каналів було використано вхідні дані, наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані та параметри, використані в інженерних розрахунках

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру	Джерело / Призначення
Тривалість активного стану	T_{act}	5	с	Опитування сенсорів та передача даних Wi-Fi
Струм у активному стані	I_{act}	280	мА	Пікове споживання ESP32 та датчиків
Тривалість режиму сну	T_{sleep}	55	с	Проміжок між циклами вимірювань

Продовження таблиці 3.3

Струм у режимі сну	I_{sleep}	30	мА	Споживання МОХ-нагрівача ENS160
Ємність акумулятора	C	2500	мА·год	Номінальна ємність Li-ion батареї
ККД перетворювача	η	0,85	—	Коефіцієнт корисної дії системи живлення
Напруга шини	V_{CC}	3,3	В	Напруга живлення логічних рівнів I2C
Напруга логічного нуля	V_{ol}	0,4	В	Максимальна напруга низького рівня
Струм логічного нуля	I_{ol}	0,003	А	Струм, що стікає через шину I2C
Час наростання фронту	T_r	1000	нс	Час наростання сигналу I2C
Паразитна ємність шини	C_b	50	пФ	Розрахункова ємність на лініях I2C
Абсолютна похибка	ΔT	0,3	°C	Похибка датчика АНТ21
Референсна температура	X	25	°C	Базовий рівень для розрахунку похибки

Розрахунок автономності роботи:

Робота пристрою базується на циклічному алгоритмі. Тривалість активного стану (опитування і передача Wi-Fi) становить $t_{\text{act}} = 5$ с при струмі споживання $I_{\text{act}} = 280$ мА. У режимі сну (Deep Sleep) тривалістю $t_{\text{sleep}} = 55$ с струм споживання визначається нагрівачем ENS160 і становить $I_{\text{sleep}} = 30$ мА.

Середнє значення струму споживання розраховується як:

$$I_{\text{aug}} = \frac{I_{\text{act}} \cdot t_{\text{act}} + I_{\text{sleep}} \cdot t_{\text{sleep}}}{t_{\text{act}} + t_{\text{sleep}}}. \quad (3.1)$$

$$I_{\text{aug}} = \frac{280 \cdot 5 + 30 \cdot 55}{5 + 55} \approx 50.8 \text{ мА.}$$

Час автономної роботи (\$T\$) від літій-іонного акумулятора ємністю \$C = 2500\$ мА·год з урахуванням ККД перетворювача \$\eta = 0,85\$ становить:

$$T = \frac{C \cdot \eta + I_{\text{sleep}} \cdot t_{\text{sleep}}}{I_{\text{aug}}} = \frac{2500 \cdot 0.85}{50.8} \approx 41.8 \text{ год.} \quad (3.2)$$

Розрахунок підтягуючих резисторів цифрової шини I2C:

Мінімальне значення опору (\$R_{\text{min}}\$) обмежується струмом логічного нуля (\$t_r = 3\$ мА) при живленні \$V_{\text{cc}} = 3,3\$ В:

$$R_{\text{min}} = \frac{V_{\text{cc}} - V_{\text{ol}}}{I_{\text{ol}}} = \frac{3.3 - 0.4}{0.003} \approx 966 \text{ Ом.} \quad (3.3)$$

Максимальний опір (\$R_{\text{max}}\$) залежить від часу наростання фронту (\$t_r = 1000\$ нс) та ємності шини (\$C_b = 50\$ пФ):

$$R_{\text{max}} = \frac{t_r}{0.8473 \cdot C_b} = \frac{1000 \cdot 10^{-9}}{0.8473 \cdot 50 \cdot 10^{-12}} \approx 23604 \text{ Ом.} \quad (3.4)$$

Обраний номінал резистора 4,7 кОм забезпечує оптимальний баланс між крутістю імпульсів та енергоспоживанням.

Розрахунок мережевого навантаження:

Розмір сформованого MQTT-пакета з урахуванням заголовків протоколу TCP/IP становить близько \$P = 200\$ байт. При частоті відправки раз на хвилину, добова кількість пакетів \$N = 1440\$. Обсяг переданих даних за добу (\$V_{\text{day}}\$) становить:

$$V_{\text{day}} = P \cdot N = 200 \cdot 1440 \approx 288000 \text{ байт.} \quad (3.5)$$

Це дорівнює близько 281 КБ телеметрії на добу, що свідчить про високу мережеву економність системи.

Метрологічний розрахунок:

Відносна похибка каналу температури розраховується на основі абсолютної похибки сенсора АНТ21 ($\Delta T = 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$). При вимірюванні номінальної температури середовища $X = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ відносна похибка (δ) становить:

$$\delta = \frac{\Delta T}{X} \cdot 100\% = \frac{0,3}{25} \cdot 100\% = 1,2\%. \quad (3.6)$$

Значення 1,2% повністю задовольняє нормативи для приладів екологічного моніторингу. Апаратна компенсація ENS160 забезпечує утримання похибки вимірювання газових домішок у межах 5%.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів при експлуатації розробленого пристрою

Практичне застосування та налагодження створеного IoT-пристрою для аналізу стану повітря пов'язане з імовірністю дії низки шкідливих і небезпечних виробничих факторів. Їх ідентифікацію проведено з урахуванням актуальної нормативної бази, зокрема стандарту безпеки машин та механізмів ДСТУ EN ISO 12100:2016. Ключову загрозу фізичного характеру становить ризик ураження електрострумом. Оскільки апаратне ядро (мікроконтролер ESP32) поєднує обробку низьковольтних сигналів цифрової шини I2C із живленням від літій-іонних елементів та мережевих перетворювачів напруги (220/5 В), недотримання приписів ДСТУ EN 60204-1:2019 загрожує серйозними наслідками. Прямий дотик до струмопровідних ділянок у разі руйнування ізоляції мережевих кабелів або відсутності заземлення допоміжної вимірювальної апаратури (осцилографів, паяльних станцій) здатний викликати електролітичний, біологічний та термічний вплив на організм, провокуючи опіки або дисфункцію серцево-судинної системи.

Пожежна безпека визначається високою щільністю розміщення SMD - компонентів на друкованій платі та використанням акумуляторів типу Li-ion. Згідно з положеннями ДСТУ EN ISO 19353:2019, імовірність займання підвищується у випадках перевантаження кіл живлення або короткого замикання, що може бути спричинено відмовою мікросхем захисту. Недостатня конвекція всередині корпусу здатна викликати критичний перегрів лінійних LDO-стабілізаторів напруги, що веде до деградації діелектричних шарів і теплового розгону батареї. Накопичення дрібнодисперсного побутового пилу біля вентиляційних отворів датчиків АНТ21 та ENS160 також погіршує тепловідведення, створюючи передумови для локального займання.

На етапі монтажу виникають додаткові термічні загрози: нагріте понад 300 °С жало паяльника та можливі бризки розплавленого припою чи активного флюсу вимагають використання засобів індивідуального захисту зору. Окрім цього, радіомодуль Wi-Fi (2,4 ГГц) є джерелом неіонізуючого електромагнітного випромінювання. Безперервний вплив цього фактора під час тривалого дебагінгу пристрою на робочому столі здатний викликати швидку втомлюваність та зниження концентрації уваги оператора.

Хімічний вплив проявляється під час паяльних робіт (через виділення аерозолів важких металів та випарів каніфолі) та на етапі калібрування газового сенсора. Застосування парів ізопропанолу як джерела летких органічних сполук (VOC) для тестування ENS160 зобов'язує дослідника дотримуватися регламентів ДСТУ EN 689:2019 щодо моніторингу повітряного середовища. Додатковим стрес-фактором є психофізіологічне навантаження: тривале написання мікропрограмного забезпечення та високе зорове напруження при інспекції мікродоріжок плати виснажують центральну нервову систему. Отже, створення безпечних умов праці потребує комплексного підходу та впровадження як інженерних, так і організаційних методів захисту.

4.2 Вимоги безпеки перед початком та під час роботи з розробленим програмно-апаратним комплексом

Забезпечення безпечних умов під час збірки та тестування екологічного монітора на базі ESP32 передбачає суворе дотримання технологічних інструкцій на кожному етапі. Робочий процес чітко розмежовується на підготовчу стадію та фазу проведення безпосередніх вимірювань. Перед стартом робіт дослідник має впорядкувати робочий простір: прибрати сторонні інструменти, залишки монтажних матеріалів та забезпечити достатнє, рівномірне освітлення. Відсутність відблисків та різких тіней є критично важливою умовою для безпечної візуальної взаємодії з мініатюрними електронними компонентами.

Наступним обов'язковим кроком до моменту подачі напруги є ревізія апаратної частини. Задля електробезпеки виконується ретельний візуальний огляд цілісності USB-кабелів, дротів акумулятора та ізоляції мережевих блоків живлення. Розроблений модуль повинен бути стабільно закріплений, а вентиляційні щілини для доступу атмосферного повітря до сенсорної підсистеми – очищені від забруднень. За вимогами ДСТУ EN 60204-1:2019 перевіряється наявність надійного захисного заземлення в розетках лабораторії. Також за допомогою мультиметра контролюється відсутність коротких замикань на лініях живлення та правильність полярності підключення літій-іонної батареї.

Після успішного огляду та активації живлення здійснюється перевірка базових функцій пристрою через MQTT-зв'язок без використання калібрувальних газів. Зчитування первинної інформації з датчика мікроклімату АНТ21 підтверджує коректність функціонування апаратних ліній I2C та програмних алгоритмів мікроконтролера. Повноцінні калібрувальні тести з використанням джерел летких органічних сполук дозволяється розпочинати виключно за умови функціонування місцевої витяжної вентиляції.

Процес тривалого тестування вимагає дистанційного нагляду за системою через хмарний інтерфейс (дашборд). Будь-які маніпуляції з платою, перепаювання елементів чи торкання струмопровідних ліній вологими руками під напругою категорично заборонені. Дослідник має оперативно реагувати на нештатні ознаки: поява запаху горілого текстоліту, аномальне нагрівання мікросхем або деформація корпусу акумулятора свідчать про аварію. У разі їх виникнення пристрій негайно знеструмлюється фізичним від'єднанням батареї та USB-живлення, що гарантує швидке розривання електричних кіл.

Після успішного закінчення вимірювального сеансу варто дочекатися відправки останніх пакетів телеметрії та переходу мікроконтролера у режим сну. Демонтаж пристрою та прибирання робочого місця дозволяється виконувати лише при повністю знеструмленому обладнанні та після повного

охолодження жала паяльника. Неухильне виконання цих правил мінімізує виробничий травматизм та зберігає здоров'я розробника.

4.3 Інженерні заходи пожежної безпеки та електробезпеки розробленого модуля керування

Фундамент електробезпеки та відмовостійкості розробленого пристрою було закладено ще на стадії схемотехнічного і топологічного проєктування. Відповідно до базових вимог стандарту ДСТУ EN 60204-1:2019, організація захисту від уражень електричним струмом передбачає використання надійного заземлення для усіх зовнішніх лабораторних джерел живлення, що використовуються під час тестування.

Для забезпечення працездатності низьковольтного сегмента та запобігання пошкодженню літій-іонного акумулятора впроваджено спеціалізований апаратний вузол захисту на основі інтегральної мікросхеми DW01A. Дане рішення забезпечує автоматичне відсікання навантаження у випадках глибокого розряду або короткого замикання в колах живлення, ефективно запобігаючи генерації небезпечних надструмів. Паралельно з цим, цифрові магістралі інтерфейсу I2C обладнано струмообмежувальними підтягуючими резисторами, що стабілізує обмін даними та підвищує захищеність портів мікроконтролера ESP32 від зовнішніх електромагнітних перешкод.

Конструктивні заходи охоплюють продуманий термоменеджмент, що дозволяє кардинально знизити пожежні ризики. Враховуючи, що основне тепловиділення припадає на лінійний LDO-стабілізатор напруги та радіотракт Wi-Fi, на друкованій платі було сформовано розвинені мідні полігони з масивом перехідних отворів (Vias), які виконують роль пасивних радіаторів для розсіювання теплової енергії. Відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 19353:2019, розроблений електронний вузол розміщується у діелектричному корпусі з оптимізованою геометрією конвекційних отворів. Це забезпечує як безперешкодну дифузію аналізованого повітря до чутливих елементів газового

сенсора ENS160, так і ефективне природне охолодження електронних компонентів. На програмному рівні задіяно режим енергозбереження Deep Sleep, який вимикає активні модулі ESP32 у проміжках між сеансами вимірювань, мінімізуючи статичне нагрівання кристала та споживання енергії. Корпус пристрою виготовлено з вогнестійких матеріалів (ABS-пластику з антипіренами), що унеможливорює поширення відкритого полум'я у разі локального іскріння.

У критичних ситуаціях, пов'язаних із потенційним займанням акумулятора чи ізоляції, першочерговим заходом є негайне знеструмлення апаратури шляхом відключення живлення та вилучення штепсельної вилки з розетки. Використання пінних вогнегасників або води для гасіння електрообладнання, що перебуває під напругою, категорично заборонено через ризик поширення струму пробією. Згідно з чинними правилами пожежної безпеки, робоче місце інженера оснащено первинними засобами пожежогасіння, сертифікованими для електроустановок - зокрема, вуглекислотними вогнегасниками (типу ОУ). Перевага надається саме вуглекислотним засобам, оскільки діоксид вуглецю миттєво знижує температуру в осередку полум'я, витісняє кисень та, на відміну від порошкових сумішей, не залишає агресивного хімічного нальоту на SMD-компонентах, що залишає високі шанси на відновлення працездатності вимірювального комплексу після ліквідації наслідків аварійної ситуації.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексний аналіз сучасних методів моніторингу якості повітря, досліджено вплив концентрації летких органічних сполук (VOC) та діоксиду вуглецю (eCO_2) на мікроклімат закритих приміщень, а також обґрунтовано вибір засобів для побудови високоефективної IoT-системи.

Проаналізовано існуючі архітектури систем екологічного моніторингу. Встановлено, що для реалізації поставлених завдань найбільш доцільним є використання трирівневої моделі (рівень сприйняття, мережевий рівень та прикладний рівень), що забезпечує високу точність вимірювань, надійність передачі даних та масштабованість.

На основі проведеного аналізу спроектовано апаратно-програмний комплекс на базі мікроконтролера ESP32, мультигазового датчика ENS160 та прецизійного сенсора мікроклімату АНТ21. Розроблено метод апаратно-програмної перехресної компенсації, який забезпечує динамічне коригування базової лінії металооксидної матриці відповідно до змін температури та вологості навколишнього середовища.

Виконано проєктування друкованої плати пристрою з дотриманням правил термічного менеджменту та електромагнітної сумісності, що дозволило сформувати компактну та заводостійку конструкцію, адаптовану для безперервної роботи в умовах житлових приміщень.

Розроблено програмне забезпечення мовою C++ у середовищі Arduino Core, яке реалізує асинхронний алгоритм збору даних без застосування блокуючих затримок, організовує надійний канал передачі телеметрії за протоколом MQTT у форматі JSON та впроваджує механізми апаратного сторожового таймера (Watchdog) для підвищення відмовостійкості системи.

У результаті виконання роботи спроектовано IoT-вузол моніторингу якості повітря, який характеризується високою точністю, енергоефективністю та можливістю інтеграції в екосистеми «розумного будинку». Розроблений

комплекс забезпечує автоматизований збір даних, аналітику в режимі реального часу та систему оповіщення про перевищення гранично допустимих концентрацій забруднювачів, що робить його перспективним інструментом для технічної діагностики екологічного стану мікроклімату.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A Comprehensive Review of Advanced Sensor Technologies for Fire Detection with a Focus on Gasistor-Based Sensors URL <https://www.mdpi.com> (дата звернення: 13.04.2026).
2. Purpleair URL <https://www2.purpleair.com/products/classic-plus-air-quality-monitor> (дата звернення 12.04.2026).
3. Prana air URL <https://www.pranaair.com/in/air-quality-sensor/outdoor-pm-sensor/> (дата звернення 7.05.2026).
4. Particulate matter in the air: what's the harm? URL www.pogodairadar.com.ua (дата звернення 6.03.2026).
5. Istockphoto URL <https://www.istockphoto.com/uk> (дата звернення 1.03.2026).
6. EasyEDA Official Documentation. URL: <https://docs.easyeda.com/> (дата звернення 2.02.2026)
7. FluidNC – системне програмне забезпечення для архітектури ESP32. URL: <https://github.com/bdring/FluidNC> (дата звернення 1.03.2026).
8. Мас-спектрометр Exactiv GC Orbitra GC MS. URL: <https://alt.ua/ru/products/sistema> (дата звернення 1.03.2026).
9. Міночкін Д. А., Гетьман О. В. Основи підтримки мобільності в інфокомунікаційних системах. Моделювання пакетного самоподібного трафіку. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 116 с.
10. Ільченко М. Ю., Наритник Т. М. Планування та електромагнітна сумісність в безпроводових. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 275 с.
11. Матвійків М. В., Коваль Ю. О. Проектування та технологія друкованих плат: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 244 с.
12. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0146-18> (дата звернення 19 .03.2026).

ДОДАТОК Б

Специфікація компонентів електронного модуля

Таблиця Б.1 - Перелік елементної бази системи моніторингу якості повітря

Поз.	Найменування (компонент)	Тип / Номінал	Кількість
U1	Мікроконтролер	ESP32-WROOM-32	1
U2	Датчик температури/вологості	АHT21	1
U3	Мультигазовий сенсор (VOC)	ENS160	1
U4	LDO-стабілізатор	AP2112K-3.3	1
R1, R2	Резистори підтяжки	4.7 кОм	2