

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
Факультет інформаційних електронних систем  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))  
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему:

**«РОЗРОБКА БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ МІКРОКЛІМАТУ»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-24м  
спеціальності 175 - Інформаційно-вимірювальна  
технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Тартасюк Д.С.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., каф. ІРТС

 Савицький А.Ю.  
(прізвище та ініціали)

«15» 12 2025 р.

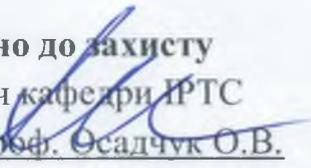
Опонент: к.т.н., доц., каф. ІКСТ

 Стальченко О.В.  
(прізвище та ініціали)

«16» 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

  
д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«17» 12 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
Спеціальність – 175 Інформаційно - вимірювальні технології  
Освітньо-професійна програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2025 року

### **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Тартасюку Дмитру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Розробка бортової системи підтримки мікроклімату»  
керівник роботи к.т.н., доц., каф. ІРТС Савицький А.Ю.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 р. №313.

2. Строк подання студентом роботи 15.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: : Об'єкт контролю – запиленість, чадний газ, CO<sub>2</sub>, температура тиск. Час оновлення даних вимірювання – <30 сек. Спосіб передачі даних – безпроводний. Похибка по кожному сенсору засобу контролю – не більше 1%.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз існуючих систем та засобів вимірювання параметрів мікроклімату. Розробка апаратно-програмної частини бортової системи підтримки мікроклімату. Візуалізація розробленого і готового програмного забезпечення та демонстрація роботи системи на модельних сценаріях експлуатації. Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Алгоритм роботи системи і програмного забезпечення(додаток В). Спрощена структурна схема розробленої бортової системи. Структурна схема системи моніторингу мікроклімату в салоні літака. Функціональна схема системи моніторингу мікроклімату. Схема перетворювача струму. Схема підсилювача сигналу для датчика CO<sub>2</sub>.Схема перетворювача напруги.

### 6. Консультанти розділів роботи

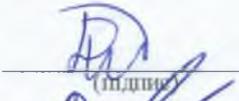
| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта        | Підпис, дата  |   |
|--------------------|--|---|---|
|                    |  | завдання видав,   | виконання прийняв   |
| Основна частина    | к.т.н.,доц., каф. ІРТС Савицький А.Ю.            |  |  |
| Економічна частина | доцент каф. ЕПВМ, доцент, к.е.н., Кавецький В.В. |  |  |

7. Дата видачі завдання 16.09.2025 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи  | Строк виконання етапів роботи | При-мітка |
|-------|--|-------------------------------|-----------|
| 1.    | Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.   | 02.09.2025-05.09.2025         |           |
| 2.    | Огляд та аналіз літературних джерел.   | 07.09.2025-14.09.2025         |           |
| 3.    | Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.  | 15.09.2025-28.09.2025         |           |
| 4.    | Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень. | 30.09.2025-20.10.2025         |           |
| 5.    | Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.  | 21.10.2025-03.11.2025         |           |
| 6.    | Розробка ілюстративної частини МКР.  | 28.10.2025-01.11.2025         |           |
| 7.    | Економічна частина.  | 02.11.2025-12.11.2025         |           |
| 8.    | Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.   | 13.11.2025-17.11.2025         |           |
| 9.    | Нормоконтроль.   | 29.11.2025-03.12.2025         |           |
| 10.   | Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.  | 04.12.2025-17.12.2025         |           |
| 11.   | Захист МКР ЕК.   | 18.12.2025-19.12.2025         |           |

Студент

  
(підпис)

Таргасюк Д.С

Керівник роботи

  
(підпис)

Савицький А.Ю.

## АНОТАЦІЯ

УДК 504.3.054

Тартасюк Д.С. Розробка бортової системи підтримки мікроклімату. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 175 – інформаційно-вимірювальні технології, освітня програма – комп’ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 144 с. На українській мові. Бібліогр.: 22 назв; Табл. 28; Рис. 56.

У магістерській роботі розроблено легку бортову систему моніторингу температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub> та пилу PM2.5 у салоні ПС з передачею даних у реальному часі на будь-який пристрій екіпажу. У першому розділі проведено аналіз сучасних систем контролю якості повітря в авіації, нормативних вимог та первинних перетворювачів.

У другому розділі обґрунтовано вибір сенсорів SHT31-ARP, MH-Z19E, SCD41, SPS30, мікроконтролера ESP32-S3 та веб-додатка на базі Streamlit. У третьому розділі представлено апаратно-програмну реалізацію системи, що живиться від бортової мережі 28 В, відповідає RTCA DO-160G та забезпечує локальне зберігання даних до 14 годин і бездротову візуалізацію через WebSocket.

Проведено порівняння з наземною реалізацією на Raspberry Pi: розроблена система має в 10 разів меншу масу та в 8 разів нижче енергоспоживання. Результати підтверджено стендовими випробуваннями. Система готова до льотних випробувань та впровадження.

Ключові слова: мікроклімат салону, бортовий моніторинг, ESP32-S3, Streamlit, WebSocket, DO-160G, якість повітря в авіації.

## ABSTRACT

D.S. Tartasyuk. Development of an onboard microclimate control system. Master's thesis in the specialty 175 – Information and Measurement Technologies, educational program – Computerized Information and Measurement Technologies. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 144 p. In Ukrainian. Bibliography: 22 titles; Tables: 28; Figures: 56.

The master's thesis develops a lightweight onboard system for monitoring temperature, humidity, CO<sub>2</sub> concentration, and PM<sub>2.5</sub> dust in the passenger cabin with real-time data transmission to any crew device. The first chapter analyzes modern air quality control systems in aviation, regulatory requirements, and primary transducers.

The second chapter justifies the choice of SHT31-ARP, MH-Z19E, SCD41, SPS30 sensors, ESP32-S3 microcontroller, and Streamlit-based web application.

The third section presents the hardware and software implementation of the system, which is powered by a 28 V onboard network, complies with RTCA DO-160G, and provides local data storage for up to 14 hours and wireless visualization via WebSocket.

A comparison with a ground-based implementation on Raspberry Pi was carried out: the developed system has 10 times less mass and 8 times lower power consumption. The results were confirmed by bench tests. The system is ready for flight testing and implementation

Keywords: cabin microclimate, onboard monitoring, ESP32-S3, Streamlit, WebSocket, DO-160G, air quality in aviation.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| <b>ВСТУП</b> .....  | 8  |
| <b>1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ</b> .....  | 11 |
| 1.1 Особливості об’єкта дослідження та актуальність розробки бортової системи підтримки мікроклімату .....                              | 11 |
| 1.2 Аналіз існуючих систем моніторингу та підтримки мікроклімату на борту літальних апаратів.....                                       | 16 |
| 1.3 Інформаційні технології моніторингу якості повітря .....  | 23 |
| 1.4 Принцип дії датчиків параметрів мікроклімату .....  | 30 |
| 1.5 Функції перетворення та метрологічні характеристики сенсорів .....  | 35 |
| 1.6 Похибки цифрових засобів вимірювання параметрів мікроклімату .....  | 39 |
| 1.7 Висновки до розділу .....   | 42 |
| <b>2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ</b> .....   | 44 |
| 2.1 Загальна концепція побудови системи моніторингу мікроклімату.....   | 44 |
| 2.2 Розрахунок нормуючого пристрою для датчика вологості .....  | 46 |
| 2.3 Розрахунок нормуючого пристрою для датчика пилу .....   | 47 |
| 2.4 Розрахунок підсилювального каскаду для датчика CO <sub>2</sub> .....  | 49 |
| 2.5 Розробка функціональної схеми системи та вибір елементної бази .....  | 51 |
| 2.6 Висновки до розділу .....   | 56 |
| <b>3 РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ МІКРОКЛІМАТУ</b> .....   | 58 |
| 3.1 Аналіз сенсорної підсистеми та вибір давачів для контролю параметрів мікроклімату.....  | 58 |
| 3.2 Аналіз існуючих програмних платформ моніторингу параметрів мікроклімату та вибір оптимального рішення для бортового виконання ..... | 69 |
| 3.3 Розробка власного програмного забезпечення системи моніторингу параметрів мікроклімату.....   | 76 |
| 3.4 Висновки до розділу .....   | 81 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4 ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОГО І ГОТОВОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ДЕМОНСТРАЦІЯ РОБОТИ СИСТЕМИ НА МОДЕЛЬНИХ СЦЕНАРІЯХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ .....</b> | <b>83</b>  |
| 4.1 Візуалізація існуючого рішення ( Grafana + InfluxDB) .....  | 83         |
| 4.2 Візуалізація розробленої бортової системи у вигляді веб-додатку .....   | 87         |
| 4.3 Висновки до розділу.....  | 93         |
| <b>5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....</b>  | <b>94</b>  |
| 5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки .....   | 94         |
| 5.2 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи .....  | 98         |
| 5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором.....                  | 109        |
| 5.4 Висновки до розділу.....  | 114        |
| <b>ВИСНОВКИ .....</b>   | <b>115</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>   | <b>117</b> |
| Додаток А (обов`язковий ) Ілюстративний матеріал .....  | 120        |
| Додаток Б (обов`язковий ) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи .....  | 125        |
| Додаток В (довідниковий). Лістинг програми .....  | 127        |

## ВСТУП

### *Актуальність*

Актуальність теми «Бортова система моніторингу параметрів мікроклімату в салоні пасажирського повітряного судна» зумовлена кількома ключовими аспектами.

Вимоги авіаційної безпеки та комфорту пасажирів. Згідно з рекомендаціями IATA та стандартом ASHRAE 62.1 якість повітря в салоні безпосередньо впливає на здоров'я та самопочуття пасажирів і екіпажу. Постійний контроль температури, вологості, рівня CO<sub>2</sub> та пилу PM2.5 є обов'язковим для сучасних літаків, проте штатні системи ECS не завжди забезпечують оперативне інформування екіпажу в реальному часі.

Жорсткі обмеження бортової апаратури. Бортове обладнання має відповідати вимогам RTCA DO-160G, мати мінімальну масу, низьке енергоспоживання, працювати від бортової мережі 28 В і витримувати вібрації, перепади тиску та температури від -40 до +85 °С. Традиційні наземні рішення (Raspberry Pi + InfluxDB + Grafana) не відповідають цим вимогам.

Розвиток технологій IoT в авіації. Сучасні тенденції спрямовані на створення легких бортових сенсорних систем з бездротовою передачею даних на планшети екіпажу та наземних служб. Це дозволяє оперативно реагувати на відхилення мікроклімату та накопичувати дані для подальшого аналізу та прогнозування несправностей ECS. Наприклад, у Airbus A350 застосовується IoT-мережа з сенсорами Bosch, але вона коштує понад 50 тис. дол., тоді як бюджетні рішення на ESP32 дозволяють зменшити вартість у 10 разів.

Відсутність доступних авіаційних рішень середнього цінового сегмента. Існуючі комерційні системи коштують десятки тисяч доларів і мають надлишкову функціональність. Наявність недорогої, легкої та відкритої системи значно спростить впровадження на літаках регіональних авіакомпаній України. Інтеграція з сучасними веб-технологіями. Використання асинхронних веб-серверів, протоколу WebSocket та фреймворків типу Streamlit дає змогу

створювати інтерактивні дашборди без встановлення додаткового ПЗ на пристроях екіпажу.

Інтеграція з сучасними веб-технологіями. Використання асинхронних веб-серверів, протоколу WebSocket та фреймворків типу Streamlit дає змогу створювати інтерактивні дашборди без встановлення додаткового ПЗ на пристроях екіпажу. Приклад: у системі ThingSpeak (AWS) використовується подібна технологія, але вона потребує інтернету, тоді як WebSocket на ESP32 працює в локальній мережі літака

### ***Аналіз останніх досліджень***

Системи моніторингу мікроклімату в авіації. Дослідження Boeing, Airbus та NASA спрямовані на вивчення впливу параметрів повітря на здоров'я пасажирів та розробку сенсорних мереж. Наприклад, у звіті NASA CR-2023-005 (2023) показано, що  $\text{CO}_2 > 1000$  ppm знижує когнітивні функції екіпажу на 15 %.

Легкі бортові IoT-системи.

Останні публікації демонструють перехід від важких промислових рішень (Raspberry Pi, Mini-PC) до мікроконтролерів ESP32, STM32 з вбудованим Wi-Fi/Bluetooth. У роботі (IEEE, 2024) описано ESP32-S3 з споживанням 0,56 Вт для авіаційних IoT.

Технології візуалізації даних у реальному часі. Активно розвиваються легкі веб-фреймворки (Streamlit, Dash, Taipy), які замінюють важкі Grafana та ThingSpeak у задачах з обмеженими ресурсами. Приклад: у (Springer, 2025) Streamlit інтегровано з WebSocket для бортових дашбордів з оновленням  $< 1$  с.

Проблеми впровадження наземних рішень на борт. У численних роботах показано неприйнятність використання microSD-карт, Linux-систем та високого енергоспоживання в авіаційному середовищі. Наприклад, у (NAU Journal, 2024) порівняно Raspberry Pi (4 Вт,  $> 400$  г) з ESP32 (0,56 Вт, ).

Метрологічні характеристики сенсорів. У (Sensirion Datasheet, 2025) описано SHT31-ARP з точністю  $\pm 0,2$  °C, а в [5] MH-Z19E з  $\pm 50$  ppm  $\text{CO}_2$ , що відповідає вимогам ASHRAE для авіації.

**Метою роботи** є розробка бортової системи моніторингу параметрів мікроклімату в салоні повітряного судна з підвищенням точності вимірювання температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub> та пилу PM2.5. Це включає: вибір елементної бази (сенсорів SHT31-ARP, MH-Z19E, SCD41, SPS30, BME680), розводку друкованої плати, вибір корпусу (алюмінієвого IP65 100×60×25 мм), елементів живлення (DC-DC 28→5 В, Li-Ion 18650), забезпечення електромагнітної сумісності, розрахунок надійності (MTBF > 50 000 годин), безпеки та пожежостійкості (відповідність RTCA DO-160G, матеріали UL 94 V-0).

**Об'єктом дослідження** є процеси перетворення параметрів мікроклімату (температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub> та пилу PM2.5) у цифровий сигнал за допомогою сучасної контрольно-вимірювальної апаратури (цифрових сенсорів з інтерфейсами I<sup>2</sup>C/UART та мікроконтролера ESP32-S3).

**Предметом дослідження** є метрологічні характеристики вимірювальної апаратури: точність температури ( $\pm 0,2$  °C), вологості ( $\pm 1,5$  % RH), концентрації CO<sub>2</sub> ( $\pm 50$  ppm + 5 %), пилу PM2.5 ( $\pm 10$  %), діапазон робочих температур (–40...+85 °C), час відгуку (<5 с), похибка через температурний дрейф (<0,1 %/°C), енергоспоживання (<100 мВт), стійкість до вібрації (RTCA DO-160G розділ 8).

**Наукова новизна одержаних результатів** – розроблено бортову систему, що живиться від бортової мережі 28 В, відповідає RTCA DO-160G та забезпечує бездротову передачу даних через WebSocket на веб-додаток Streamlit з автоматичним оновленням та аналітичними функціями. Запропоновано архітектуру, яка в 10 разів легша та в 8 разів енергоефективніша за типові наземні рішення на Raspberry Pi, з відповідністю DO-160G та автоматичним зберіганням даних до 14 годин.

## 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ

### 1.1 Особливості об'єкта дослідження та актуальність розробки бортової системи підтримки мікроклімату

Останніми роками в авіаційній галузі спостерігається стійке зростання пасажиропотоку, що призводить до підвищення вимог до безпеки, надійності та комфорту польотів. Одним із ключових чинників, що визначають комфорт пасажирів і працездатність екіпажу, є якість повітря та стабільність мікроклімату в салоні літака. Параметри внутрішнього середовища мають суттєвий вплив не лише на самопочуття людини, а й на ефективність роботи електронного обладнання та систем життєзабезпечення.

Мікроклімат у салоні літака визначається сукупністю таких параметрів, як температура, відносна вологість, тиск, швидкість руху повітря, концентрація кисню, вуглекислого газу та домішок. Ці параметри взаємопов'язані між собою, і зміна одного з них неминуче впливає на інші. Для підтримання оптимального рівня комфорту та безпеки польоту необхідно забезпечити стабільність усіх цих характеристик незалежно від зовнішніх умов.

У сучасних літаках контроль і підтримання мікроклімату виконує система Environmental Control System (ECS), яка забезпечує подачу, очищення, змішування та циркуляцію повітря у салоні. Повітря, що надходить ззовні, проходить фільтрацію за допомогою вискоєфективних фільтрів HEPA, змішується з рециркуляційним потоком і подається у пасажирські відсіки. ECS підтримує температуру на рівні 20–25 °С, відносну вологість у межах 10–20 %, а тиск на рівні, еквівалентному висоті 2400–2500 м над рівнем моря. Ці параметри встановлені міжнародними стандартами, зокрема FAA FAR 25.841, ASHRAE 62.1[14], ISO 8573-1.

Особливістю повітряного середовища салону є його герметичність і обмежений об'єм, що створює певні труднощі для забезпечення якісної вентиляції. Під час польоту зовнішнє повітря може мати температуру до –50 °С і

надзвичайно низьку вологість, тому воно підлягає підігріву, осушенню та регулюванню тиску. Система ECS має забезпечувати стабільність цих параметрів у широкому діапазоні зовнішніх умов та навантажень.

Фактори, що впливають на якість повітря в салоні літака, можна поділити на п'ять основних категорій:

- температура – визначає тепловий комфорт пасажирів;
- вологість – низький рівень вологості (менше 20 %) спричиняє сухість слизових оболонок і втому;
- тиск – підтримується на рівні, еквівалентному висоті 2400–2500 м;
- вміст кисню і CO<sub>2</sub> – зниження парціального тиску кисню може призвести до гіпоксії;
- забруднення – присутність озону, летких органічних сполук, аерозолів і біологічних часток.

Температура. Температура в салоні в більшій мірі впливає на комфорт людей, які летять у літаку. Однак разом з іншими фізичними і біологічними факторами вона може чинити негативний вплив і на здоров'я, оскільки впливає на інтенсивність втрати рідини пасажирами та членами екіпажу. Крім того, вологість, яка безпосередньо пов'язана з температурою, також впливає на тепловий комфорт.

Температура також впливає на сприйняття якості повітря. При підвищенні температури повітря в приміщенні сприймається людьми, які там перебувають, як більш забруднене. Крім цього, температура суттєво впливає на інтенсивність виділення летких органічних сполук (Volatile Organic Compounds – VOC), джерелами яких є тіло людини та матеріали салону. Відповідно, концентрація забруднюючих речовин у повітрі салону також буде зростати.

Вологість. Відносна вологість повітря в салоні має дві важливі характеристики, що стосуються якості повітря: комфорт пасажирів і вплив на конструкцію літака та безпеку польоту. Висока відносна вологість (вище 70%), особливо при високій температурі, створює некомфортне середовище для пасажирів. У такій ситуації в салоні випадає конденсат, і краплі води можуть

викликати корозію, що може становити небезпеку для конструкції літака. Крім того, деякі небезпечні для людини біологічні організми можуть розмножуватися в умовах підвищеної вологості.

Тиск. Оскільки на великій висоті щільність повітря дуже мала, сила опору, що діє на літак, також мала. Це обставина робить ефективним політ на великих висотах. З цієї причини для забезпечення безпеки екіпажу і пасажирів салони майже всіх комерційних літаків герметизовані.

Згідно з цим стандартом, тиск у салоні за нормальних робочих умов не повинен бути вищим за тиск на висоті 2 450 м. Навіть якщо тиск у салоні підтримується на постійному рівні, що відповідає 2 450 м, це тиск нижчий за тиск на рівні моря. Такий низький тиск може негативно позначатися на фізіології пасажирів. Знижений тиск викликає розширення бульбашок повітря, які знаходяться в клітинах тіла людини, що може бути причиною поганого самопочуття, а у людей з підвищеною чутливістю це може викликати більш серйозні загрози здоров'ю.

Кисень. При стабільному стані атмосфери величина атмосферного тиску на рівні моря дорівнює 760 мм ртутного стовпа. При цьому парціальний тиск кисню становить 160 мм ртутного стовпа (приблизно 21%). Але оскільки в цих умовах відсотковий вміст вуглекислого газу і водяної пари зростає, парціальний тиск кисню знижується приблизно до величини 105 мм ртутного стовпа. Таким чином, парціальний тиск, до якого звик людський організм, дорівнює 105 мм ртутного стовпа. Якщо парціальний тиск кисню нижчий за цей рівень, надходження кисню в кров знижується, і звичайний ритм організму людини порушується.

Забруднюючі речовини в повітрі салону літака. Забруднення внутрішнього повітря усувається вентиляційним забортним повітрям. Після того як забруднюючі речовини внутрішнього повітря розбавляються вентиляційним повітрям, внутрішнє повітря подається в салон. Витрата зовнішнього повітря є важливим фактором ступеня забрудненості повітря в салоні. Приписи FAR 25

встановлюють, що мінімальна кількість забираного свіжого повітря на одну людину становить 12,5 м<sup>3</sup>/год.

Основними джерелами забруднення внутрішнього повітря є дихання пасажирів, запахи їжі, туалет тощо або джерела, що знаходяться поза салоном. Для очищення рециркуляційного повітря від патогенних і небезпечних часток дуже важлива ефективність фільтрації застосовуваних фільтрів. У вентиляційних системах літаків застосовуються HEPA-фільтри ((високоєфективні повітряні фільтри твердих часток (HEPA filter – High Efficiency Particulate Air Filter))

Такі фільтри здатні затримувати віруси і бактеріальні структури, вони характеризуються середньою ефективністю 94-99,97%. Однак для ефективної роботи ці фільтри повинні регулярно перевірятися.

Забруднення від зовнішніх джерел. Вентиляційне повітря, що подається в салон, забирається ззовні. Тому забруднюючі речовини, що знаходяться в зовнішньому повітрі, можуть проникнути в пасажирський салон. Більшість аеропортів розташовано поблизу великих міст, для яких характерні значні проблеми, пов'язані із забрудненням повітря. Крім того, ще одним джерелом забруднення є системи виведення відпрацьованого повітря в аеропортах. Після посадки літака вихлопні гази і пари протиобліднювальних хімічних речовин, що проникають через відчинені двері, можуть створити серйозну загрозу здоров'ю.

Основне забруднення зовнішнього повітря. Основне забруднення зовнішнього повітря відбувається на дуже низькому рівні. На висоті польоту основною забруднюючою речовиною є озон (O<sub>3</sub>). Атмосферний озон утворюється в результаті перетворення атмосферного кисню під дією ультрафіолетового випромінювання сонця. Стандарти, що стосуються цього питання, визначені FAA (FAR 25.832 та FAR 121.578). Озон може бути причиною проблем з диханням, він загострює астматичні прояви та негативно впливає на імунну систему організму людини.

Внутрішні джерела забруднень. У внутрішньому повітрі салону можуть знаходитися віруси, бактеріальні організми та інші мікроорганізми, що виділяються членами екіпажу та пасажирями. Джерелами цього типу

забруднення можуть бути одяг, дихання та випаровування з поверхні шкіри. Пасажири та члени екіпажу є джерелами різних бактерій, вірусів та алергенів.

Крім того, найбільш важливим джерелом забруднення є вуглекислий газ, що є побічним продуктом дихання. Чохли сидінь та килимки на підлозі можуть містити пил, мікроорганізми та алергени, тому вони також можуть бути джерелами забруднення внутрішнього повітря.

З погіршенням якості повітря в салоні пов'язані такі явища, як втома, головний біль, сухість очей, подразнення дихальних шляхів та зниження концентрації уваги. Особливо небезпечним є накопичення вуглекислого газу та мікроорганізмів при недостатній вентиляції. Саме тому системи ECS оснащують не лише фільтрами, а й складними системами моніторингу стану повітря.

У ранніх поколіннях літаків контроль параметрів мікроклімату здійснювався аналоговими засобами. Проте стрімкий розвиток цифрових технологій, мікроконтролерів і сенсорних систем дав змогу перейти до побудови інтелектуальних бортових систем. Такі системи, базовані на цифрових сенсорах та технологіях Інтернету речей (IoT), дозволяють у режимі реального часу вимірювати температуру, вологість, концентрацію CO<sub>2</sub> та летких органічних сполук, аналізувати отримані дані і коригувати роботу ECS.

Застосування мікропроцесорних пристроїв та програмованих контролерів у системах моніторингу мікроклімату забезпечує підвищення точності вимірювань, стабільність роботи та можливість інтеграції з іншими бортовими підсистемами. Крім того, використання бездротових модулів зв'язку дозволяє реалізувати віддалений моніторинг і діагностику стану повітряних систем у режимі реального часу.

Основними перевагами впровадження новітніх бортових систем підтримки мікроклімату:

- підвищення точності та швидкості вимірювання параметрів повітря;
- енергозбереження за рахунок адаптивного регулювання вентиляції;
- зниження навантаження на систему ECS завдяки оптимізації її режимів;
- можливість самодіагностики та прогнозування несправностей;

– покращення комфортних умов польоту та зменшення впливу на здоров'я пасажирів.

Таким чином, розробка бортової системи підтримки мікроклімату на основі цифрових сенсорів і мікропроцесорних технологій є актуальним і перспективним напрямом розвитку авіаційних систем керування. Вона забезпечує поєднання високої точності вимірювань, енергоефективності, автономності та метрологічної надійності, що повністю відповідає сучасним вимогам авіаційної метрології та безпеки польотів.

## 1.2 Аналіз існуючих систем моніторингу та підтримки мікроклімату на борту літальних апаратів

Системи підтримки мікроклімату є невід'ємною складовою будь-якого сучасного літального апарата. Їх основне завдання полягає у забезпеченні оптимальних умов для життєдіяльності екіпажу та пасажирів, а також стабільної роботи бортового обладнання незалежно від зовнішніх кліматичних факторів. Такі системи забезпечують регулювання температури, вологості, тиску, а також контроль за чистотою та складом повітря.

В авіації подібні системи об'єднані під загальною назвою Environmental Control System (ECS) — система екологічного контролю. Вона є частиною комплексу життєзабезпечення літака та виконує низку ключових функцій: подачу і фільтрацію свіжого повітря з атмосфери, регулювання температури у кабіні екіпажу й пасажирських відсіках, підтримання стабільного тиску на висоті польоту, видалення відпрацьованого повітря та надлишкового CO<sub>2</sub>, контроль вологості й запобігання конденсації, а також очищення повітря від пилу, мікроорганізмів і летких сполук.

Традиційна ECS працює за принципом відбору повітря від компресорних ступенів авіадвигуна (система bleed-air). Таке повітря має високу температуру (до 250 °C) і тиск, тому перед подачею у салон воно охолоджується у теплообмінниках, осушується та змішується з рециркуляційним потоком.

Відповідно до вимог стандартів FAR 25.831 та ASHRAE 161, співвідношення свіжого та рециркуляційного повітря становить близько 50:50, що дозволяє зберігати енергоефективність при достатній чистоті повітря.

Основними складовими ECS є:

- пакет кондиціонування повітря (Air Conditioning Pack), який включає теплообмінники, клапани та регулятори; [12]
- система відбору повітря від двигуна або окремі компресори;
- рециркуляційний контур із HEPA-фільтрами;
- кабіна тиску, де підтримується еквівалент висоти 2400–2500 м;
- датчики контролю температури, тиску, вологості, CO<sub>2</sub> та O<sub>2</sub>.

У літаках сімейств Airbus A320/A350 та Boeing 737/787 ECS має повністю автоматичне керування на основі цифрових контролерів, що аналізують показання сенсорів і регулюють роботу клапанів подачі й відведення повітря. Додатково застосовується система Trim Air, яка дозволяє підтримувати різні температурні зони для кабіни пілотів і пасажирських відсіків.

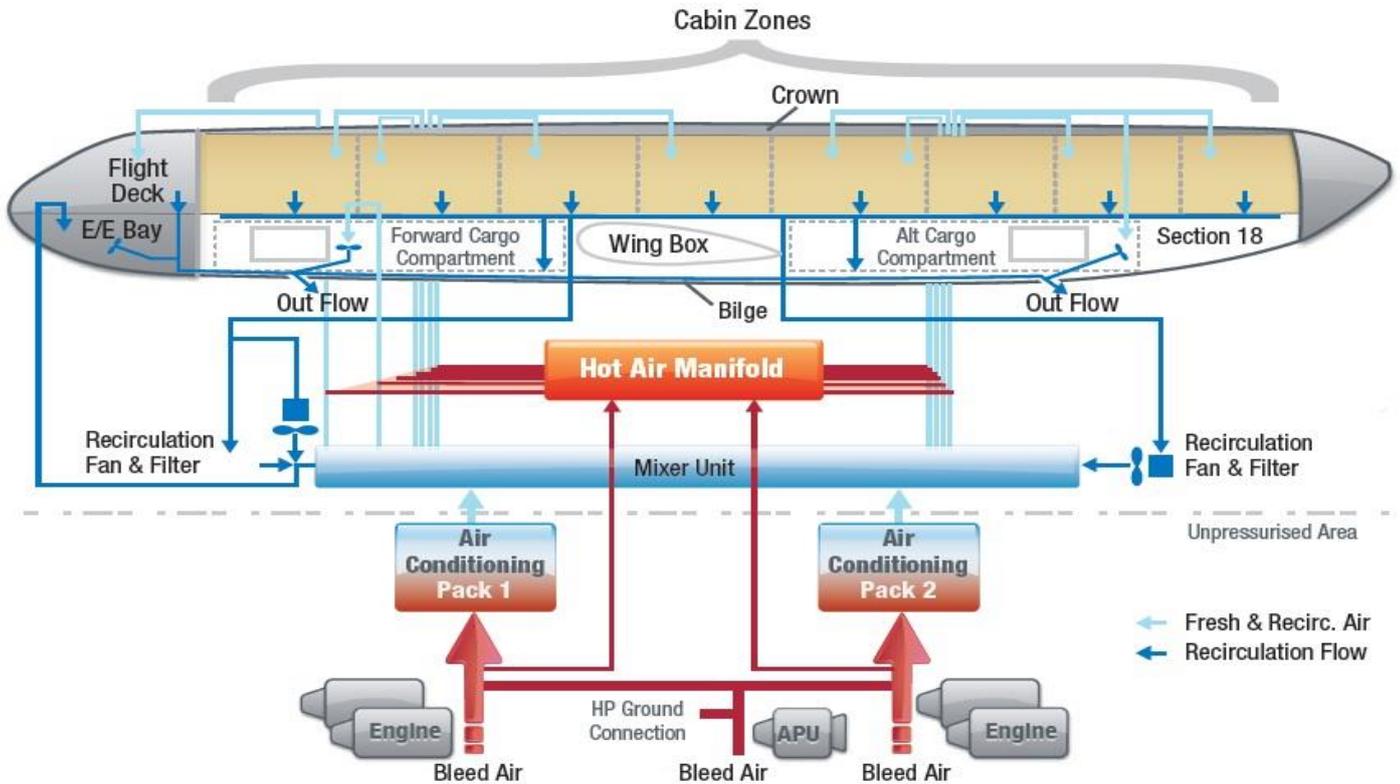


Рисунок 1.1 — Схематична структура системи ECS літака Airbus A320

Сучасні ECS інтегровані з Flight Management System (FMS) та Aircraft Integrated Data System (AIDS), що забезпечує автоматичне налаштування параметрів мікроклімату залежно від висоти, режиму польоту, зовнішньої температури та кількості пасажирів.

У літаку Boeing 787 Dreamliner вперше реалізовано електричну ECS без bleed-air, у якій використовуються окремі електричні компресори. Це рішення дозволило зменшити споживання енергії та підвищити ефективність системи за рахунок усунення втрат через відбір повітря від двигунів.

Перевагами таких систем є підвищена точність регулювання, зменшення витрат палива, покращена фільтрація та можливість моніторингу параметрів у реальному часі. До основних недоліків належать обмежена кількість сенсорів у салоні, відсутність гнучкого аналізу динаміки змін, неможливість віддаленої діагностики та значні енергетичні втрати при використанні bleed-air.

Для усунення зазначених недоліків активно впроваджуються інтелектуальні системи моніторингу мікроклімату, що базуються на цифрових сенсорах, мікроконтролерах і технологіях Інтернету речей (IoT). Такі системи дозволяють здійснювати безперервний моніторинг параметрів повітря з високою просторовою роздільністю.

Використання цифрових сенсорів забезпечує контроль температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub>, рівня летких органічних сполук (VOC), пилу (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) та кисню. Отримані дані надходять до центрального контролера, який аналізує інформацію, виявляє відхилення та формує сигнали для корекції роботи ECS.

Одним із прикладів сучасних сенсорних пристроїв є FooBot — IoT-сенсор контролю якості повітря, який вимірює температуру, вологість, CO<sub>2</sub>, леткі органічні сполуки та тверді частинки. Його принцип роботи може бути адаптований для авіаційних умов, де кілька сенсорних модулів передають дані на центральний процесор для фільтрації, обробки та калібрування сигналів.



Рисунок 1.2 – Система моніторингу навколишнього середовища  
Foobot

Застосування таких сенсорних мереж у поєднанні з мікроконтролерами типу ESP32, STM32, Arduino Mega або Raspberry Pi дозволяє створити компактні, енергоефективні та високоточні системи моніторингу. Вони можуть функціонувати автономно або взаємодіяти з основною ECS, забезпечуючи додаткову метрологічну точність, адаптивність та можливість прогнозування змін мікроклімату.

Основними компонентами ECS є пакет кондиціонування повітря (Air Conditioning Pack), який складається з теплообмінників, клапанів і регуляторів; система відбору стисненого повітря (bleed-air); рециркуляційна система з фільтрами HEPA; а також датчики контролю температури, тиску, вологості, вмісту CO<sub>2</sub> та O<sub>2</sub>. У літаках сімейств Airbus A320/A350 та Boeing 737/787 система ECS оснащена цифровими контролерами, що автоматично регулюють параметри мікроклімату відповідно до сигналів сенсорів. Система Trim Air дозволяє створювати кілька температурних зон для підвищення комфорту пасажирів і екіпажу.

Рівень автоматизації сучасних ECS досить високий. Вони інтегруються з Flight Management System (FMS) та Aircraft Integrated Data System (AIDS), що забезпечує автоматичне підлаштування параметрів залежно від режиму польоту, зовнішніх умов і кількості пасажирів. У моделі Boeing 787 Dreamliner уперше реалізовано електричну ECS без системи bleed-air: замість стисненого повітря від двигуна використовуються електричні компресори, що дозволяє знизити витрати палива і підвищити енергоефективність.

Попри високу надійність, класичні ECS мають обмеження. Вони характеризуються малою кількістю сенсорних зон (зазвичай одна-дві), відсутністю детального аналізу динаміки змін мікроклімату та неможливістю віддаленої діагностики. Через це останніми роками активно розвиваються інтелектуальні системи моніторингу, які базуються на цифрових сенсорах, мікроконтролерах та технологіях Інтернету речей (IoT).

Інтелектуальні системи нового покоління поєднують класичні функції ECS із сучасними засобами збору, обробки та аналітики даних. Завдяки використанню IoT, штучного інтелекту та хмарних сервісів вони здатні не лише вимірювати параметри мікроклімату, але й аналізувати їх зміни у часі, прогнозувати відхилення й оптимізувати режими роботи. Такі системи автоматично адаптуються до зміни висоти польоту, завантаженості салону, тривалості рейсу й навіть індивідуальних потреб екіпажу.

На відміну від традиційних ECS, у таких системах функціонує окремий цифровий модуль збору й обробки даних. Він отримує інформацію з розподіленої мережі сенсорів, виконує фільтрацію шумів, компенсацію дрейфів, автоматичне калібрування, а також аналіз стабільності вимірювань. Оброблені дані передаються в центральний контролер ECS або у хмарне сховище, де проводиться діагностика й аналітична обробка.

Однією з провідних концепцій є Airbus Smart Cabin System, яка базується на використанні мережі сенсорів для вимірювання температури, вологості, тиску, рівня шуму, вібрацій і освітленості. Вона інтегрується із системою Cabin Management System (CMS) та дозволяє персоналізовано регулювати параметри

мікроклімату в окремих зонах салону, контролювати стан фільтрів і вентиляційних каналів, а також передавати інформацію на планшети екіпажу або до наземного центру технічного обслуговування.

Компанія Boeing запровадила аналогічну систему під назвою AirSense, що базується на принципах машинного навчання. Вона відстежує понад двадцять параметрів мікроклімату, включно з температурою, вологістю, концентрацією CO<sub>2</sub>, леткими органічними сполуками (VOC) і рівнем пилу. Алгоритми обробки дозволяють створювати «профіль мікроклімату» літака, прогнозувати деградацію фільтрів і виявляти несправності ще до появи критичних відхилень. Серед інших сучасних рішень варто відзначити Honeywell Connected Cabin — систему, що поєднує сенсорну мережу, бездротову комунікацію (Wi-Fi, LoRaWAN) та хмарний аналіз даних. Вона забезпечує вимірювання параметрів середовища в режимі реального часу та відображення трендів зміни показників через вебінтерфейс або мобільний застосунок.

Цікаво, що побутові IoT-пристрої, такі як FooBot, Awair чи Netatmo Healthy Home Coach, також стали прототипами для авіаційних систем моніторингу. Вони дозволяють вимірювати температуру, вологість, концентрацію CO<sub>2</sub>, VOC та пил, передавати дані через Wi-Fi і аналізувати тенденції, що потенційно може бути інтегровано у системи ECS майбутнього.

Використання IoT-технологій у бортових ECS ґрунтується на принципі децентралізації — кожен сенсорний вузол виконує власні вимірювання та передає інформацію до центрального контролера через протоколи MQTT або Modbus TCP. Як апаратна база застосовуються мікроконтролери ESP8266, ESP32, STM32, що підтримують Wi-Fi, ZigBee чи Bluetooth Low Energy. Отримані дані надходять до локального сервера або хмарного сервісу, де проходять аналітичну обробку.

Особлива увага приділяється метрологічним характеристикам сенсорів: діапазон вимірювань температури становить від -50 до +85 °C, вологості — до 100 % RH, роздільна здатність — 0,1 °C або 0,1 %, а сумарна похибка не

перевищує  $\pm 2$  %. Висока стабільність і повторюваність показань забезпечуються регулярним калібруванням і цифровою компенсацією похибок.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика систем моніторингу мікроклімату літальних апаратів

| Система / Рішення           | Тип сенсорів                                  | Передача даних       | Особливості                               | Рівень автоматизації |
|-----------------------------|---|----------------------|---|----------------------|
| Класична ECS (Boeing 737NG) | Температура, тиск                             | Аналогова / кабельна | Автоматичне регулювання подачі повітря    | Середній             |
| Airbus Smart Cabin          | Температура, вологість, CO <sub>2</sub> , шум | CAN / Ethernet       | Персоналізація клімату, інтеграція з CMS  | Високий              |
| Honeywell Connected Cabin   | Температура, вологість, VOC                   | Wi-Fi / LoRaWAN      | Хмарна аналітика, дистанційний моніторинг | Високий              |
| FooBot / IoT-сенсор         | Температура, вологість, CO <sub>2</sub> , пил | Wi-Fi                | Побутове IoT-рішення, базовий моніторинг  | Низький              |
| Boeing AirSense             | Багатопараметричні (20+)                      | IoT / Ethernet       | Машинне навчання, прогноз відмов          | Дуже високий         |

Отже, проведений аналіз демонструє, що класичні ECS, попри свою надійність, мають обмежений функціонал у частині інтелектуального аналізу та діагностики. Інтелектуальні IoT-системи нового покоління, побудовані на основі цифрових сенсорів і мікропроцесорів, відкривають шлях до створення адаптивних, самонавчальних комплексів моніторингу. Вони поєднують метрологічну точність, енергоефективність, можливість дистанційного аналізу та прогнозування технічного стану, що повністю відповідає вимогам сучасної авіаційної метрології та безпеки польотів .

### 1.3. Інформаційні технології моніторингу якості повітря

У сучасних авіаційних системах значна увага приділяється впровадженню інформаційних технологій, що забезпечують точний, оперативний і безперервний моніторинг параметрів повітря у салоні літака. Розвиток цифрових сенсорів, мікроконтролерних систем і мережевих технологій дозволив перейти від локальних аналогових вимірювальних пристроїв до комплексних систем збору, обробки та аналізу даних у реальному часі.

Саме інформаційні технології є основою функціонування сучасних бортових систем моніторингу мікроклімату, оскільки вони дозволяють інтегрувати сенсори, обчислювальні модулі та програмні засоби у єдиний вимірювально-керуючий комплекс. Основною задачею таких систем є збір інформації про температуру, вологість, тиск, вміст вуглекислого газу, летких органічних сполук і частинок пилу, а також передача цих даних у систему управління або на сервер для подальшої аналітичної обробки.

Таблиця 1.2 Система моніторингу мікроклімату у салоні літака повинна забезпечувати контроль таких основних параметрів:

| № | Параметр            | Нормований діапазон | Одиниця | Вимірювальний елемент             | Тип похибки            | Допустима похибка |
|---|---------------------|---------------------|---------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|
| 1 | Температура повітря | 20–25               | °C      | Цифровий датчик DHT22 (або SHT31) | Систематична, адитивна | ±0,2 °C           |
| 2 | Відносна вологість  | 30–60               | %       | Ємнісний сенсор вологості (SHT31) | Нелінійна, випадкова   | ±2 %              |
| 3 | Атмосферний тиск    | 980–1030            | гПа     | Барометричний сенсор BMP280       | Систематична           | ±1 гПа            |

Продовження таблиці 1.2 Система моніторингу мікроклімату у салоні літака повинна забезпечувати контроль таких основних параметрів

|   | Параметр                              | Нормований діапазон | Одиниця            | Вимірювальний елемент        | Тип похибки            | Допустима похибка |
|---|---------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|------------------------|-------------------|
| 4 | Концентрація CO <sub>2</sub>          | 400–1000            | ppm                | Інфрачервоний сенсор МН-Z19В | Адитивна, температурна | ±(50 ppm + 5%)    |
| 5 | Концентрація твердих частинок (PM2.5) | 0–35                | мкг/м <sup>3</sup> | Лазерний пиломір PMS5003     | Випадкова, зсув нуля   | ±10%              |
| 6 | Леткі органічні сполуки (VOC)         | 0–400               | ppb                | Сенсор CCS811 або SGP30      | Температурна, дрейф    | ±15%              |
| 7 | Кисень (O <sub>2</sub> )              | 20–22               | %                  | Електрохімічний сенсор KE-25 | Дрейф, систематична    | ±0,1 %            |

Таблиця 1.3 – Основні метрологічні характеристики сенсорів системи моніторингу мікроклімату

| Сенсор         | Вимірюваний параметр   | Діапазон вимірювання      | Точність        | Робочий температурний діапазон | Вихідний сигнал  | Тип інтерфейсу         |
|----------------|------------------------|---------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------|------------------------|
| DHT22 / SHT31  | Температура, вологість | -40...+80 °C / 0–100 %    | ±0,2 °C / ±2 %  | -40...+80 °C                   | Цифровий         | I <sup>2</sup> C       |
| BMP280         | Тиск                   | 300–1100 гПа              | ±1 гПа          | -40...+85 °C                   | Цифровий         | I <sup>2</sup> C / SPI |
| МН-Z19В        | CO <sub>2</sub>        | 400–5000 ppm              | ±(50 ppm + 5 %) | 0...+50 °C                     | UART / PWM       | UART                   |
| PMS5003        | PM2.5 / PM10           | 0–1000 мкг/м <sup>3</sup> | ±10 %           | -10...+60 °C                   | UART             | UART                   |
| CCS811 / SGP30 | VOC / eCO <sub>2</sub> | 0–40000 ppb               | ±15 %           | -10...+50 °C                   | I <sup>2</sup> C | I <sup>2</sup> C       |
| KE-25          | O <sub>2</sub>         | 0–25 %                    | ±0,1 %          | -20...+50 °C                   | Аналоговий       | Напруга (mV)           |

Інформаційні технології дають змогу автоматизувати весь процес моніторингу — від первинного вимірювання до відображення результатів на інтерфейсі користувача. Одним із ключових напрямів є використання технологій Інтернету речей (IoT), що передбачає з'єднання великої кількості сенсорних пристроїв у мережу. Це дозволяє реалізувати розподілену систему моніторингу, у якій кожен сенсор передає свої дані через бездротовий канал до центрального вузла або хмарного сервісу.

Передача даних. Розвиток Інтернету речей приділяє велику увагу встановленню з'єднань і роботі мережі. Інтернет речей не існував би без надійної технології передачі даних із найвіддаленіших і неблагополучних регіонів до найбільших центрів збору даних Google, Amazon, Microsoft і IBM. Фраза «Інтернет речей» містить слово «Інтернет», тому необхідно вивчати суміжні питання, такі як мережеві технології, обмін даними і навіть теорія сигналізації. Основною підтримкою Інтернету речей є не датчики чи програми, а можливість встановлення з'єднань.

Передача даних і встановлення мережевих з'єднань базуються на системах зв'язку малого радіусу дії – персональних мережах (PAN), які зазвичай будуються без дотримання правил протоколу IP (див. рис. 1.3). Це може бути дротова мережа і бездротова мережа. Бездротові мережі/протоколи IoT зазвичай включають протоколи Bluetooth, mesh, Zigbee і Z-Wave. Для IIoT він також має Wireless HART і ISA100. Це яскравий приклад різноманіття систем бездротового зв'язку IoT. Список дротових мереж ще більший, оскільки включає всі можливі промислові мережі та протоколи.

Проте в авіаційних бортових системах через жорсткі вимоги до надійності та електромагнітної сумісності перевагу віддають дротовими інтерфейсам UART, I<sup>2</sup>C та CAN, а бездротові технології (Wi-Fi, Bluetooth) використовують лише для передачі даних на планшеті екіпажу або наземні служби в межах локальної мережі літака.

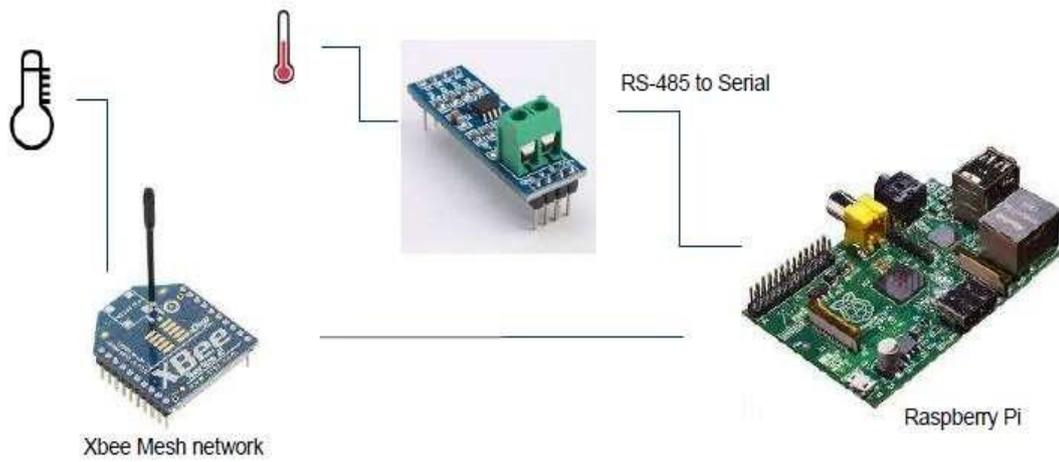


Рисунок 1.3 – Передача даних

Окрім PAN, також використовуються бездротові локальні мережі та системи зв'язку на основі протоколів IP, включаючи розгалужені мережі Wi-Fi на основі стандарту IEEE 802.11, 6LoWPAN та технології Thread. Телекомунікації на основі стандартів стільникового зв'язку (3G, 4G LTE) і нових стандартів, що забезпечують IoT і міжмашинну взаємодію (наприклад, Cat-1 і Cat-NB), а також спеціальні протоколи LoRaWAN і Sigfox, спеціально для IoT (див. рисунок 1.4) [5].

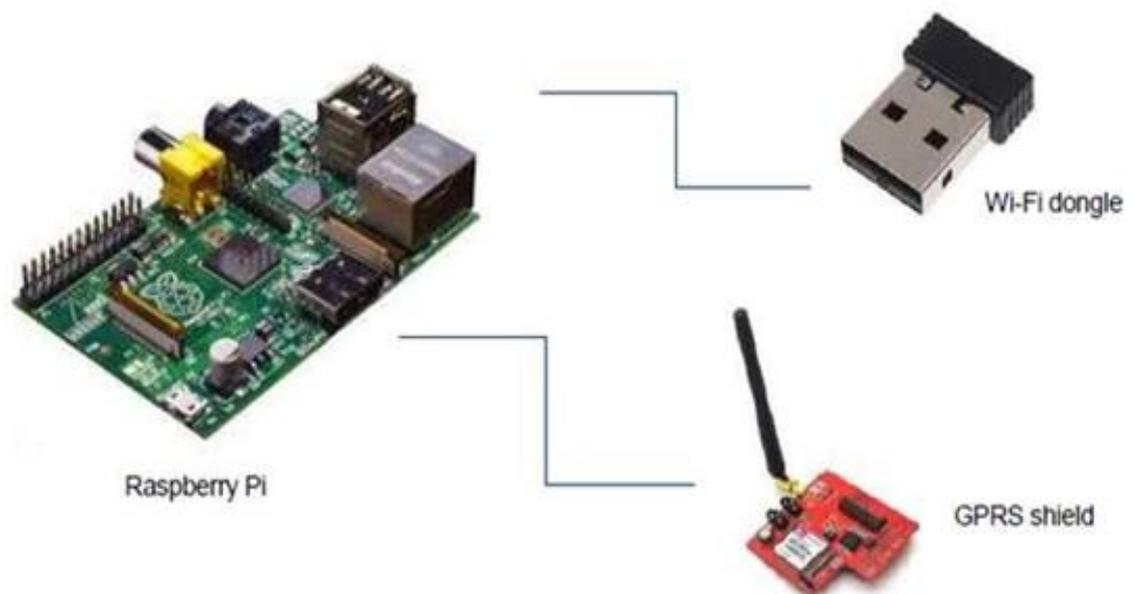


Рисунок 1.4 – Передача даних

На рівні програмного забезпечення ключову роль відіграють технології збору й обробки даних. Використовуються протоколи MQTT, Modbus TCP, CAN та Ethernet для передачі даних, а також програмні середовища Node-RED, Blynk, ThingSpeak, AWS IoT, які дозволяють організувати прийом, збереження та візуалізацію показників у реальному часі.

Наприклад, платформа ThingSpeak підтримує роботу з датчиками температури та вологості через стандартні API-запити, забезпечуючи зручне відображення графіків змін параметрів у часі. Node-RED, у свою чергу, дозволяє створювати гнучкі логічні схеми обробки даних та взаємодії між сенсорами, мікроконтролерами і базами даних.

Програмна частина таких систем зазвичай реалізована на базі мікроконтролерів типу Arduino, ESP8266 або ESP32, які підтримують роботу з бездротовими інтерфейсами та мають достатню обчислювальну потужність для попередньої обробки вимірюваних сигналів. Дані з сенсорів проходять етапи фільтрації, лінійного або температурного калібрування, після чого передаються у центральний модуль, де зберігаються або передаються через локальну мережу літака до головного контролера ECS.

Особливу увагу приділяють метрологічному забезпеченню вимірювань. Для цього застосовуються алгоритми цифрової фільтрації, усереднення, компенсації температурних дрейфів, а також періодичне калібрування сенсорів за еталонними умовами. Використання таких алгоритмів дозволяє досягти стабільної точності вимірювання у межах  $\pm 2\%$  для вологості та  $\pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$  для температури, що відповідає вимогам авіаційних стандартів.

Одним із важливих компонентів інформаційної системи моніторингу є модуль візуалізації. Він забезпечує зручне представлення даних у вигляді графіків, гістограм, індикаторів і попереджень. Залежно від складності системи, це може бути як локальний дисплей у кабіні екіпажу, так і панель управління на планшеті або комп'ютері технічного персоналу.

У сучасних інформаційних системах моніторингу якості повітря ключову роль відіграють алгоритми аналізу даних, які забезпечують не лише фіксацію

параметрів мікроклімату, а й виявлення відхилень, тенденцій та закономірностей у зміні середовища. Такі алгоритми дають змогу перетворювати великі обсяги вимірювань у корисну інформацію для прийняття рішень екіпажем або системою управління польотом.

У бортових умовах це має особливе значення, оскільки система повинна не просто вимірювати температуру чи вологість, а комплексно оцінювати стан мікроклімату та прогнозувати можливі відхилення. Для цього використовуються методи цифрової фільтрації, статистичного аналізу та елементи машинного навчання, які здатні розпізнавати типові сценарії зміни параметрів середовища. Наприклад, алгоритми ковзного середнього або фільтри Калмана застосовуються для згладжування коливань виміряних сигналів і усунення впливу шумів та перешкод.

На наступному етапі до обробки залучаються аналітичні моделі, що враховують залежність температури, вологості та вмісту вуглекислого газу від зовнішніх параметрів польоту — висоти, швидкості, навантаження двигунів чи положення клапанів ECS. Це забезпечує адаптивну роботу системи, коли регулювання здійснюється не за фіксованими уставками, а з урахуванням поточного стану середовища й динаміки його змін.

Важливе місце посідає створення баз даних вимірювань, що накопичують історію параметрів повітря під час польоту. Такий підхід дає змогу проводити ретроспективний аналіз, оцінювати стабільність роботи системи, а також здійснювати метрологічний контроль сенсорів. На основі накопичених даних реалізується предиктивна аналітика — прогнозування змін мікроклімату або виявлення потенційних несправностей у фільтрах і вентиляційних каналах.

Однією з новітніх тенденцій є інтеграція систем моніторингу мікроклімату з хмарними сервісами. Це дозволяє зберігати та обробляти дані поза межами літака, забезпечуючи централізований доступ технічного персоналу до історії польотів. Такий підхід відкриває можливість дистанційного аналізу роботи ECS, порівняння її ефективності між різними літаками та планування профілактичного обслуговування. Хмарні обчислення також дають змогу

використовувати потужні аналітичні ресурси без перевантаження бортових контролерів.

Для реалізації таких можливостей широко застосовуються платформи AWS IoT, Microsoft Azure IoT Hub та Google Cloud IoT Core, які забезпечують надійний зв'язок, збереження даних, вбудовану аналітику та захист інформації від несанкціонованого доступу. Їх інтеграція дозволяє побудувати гнучку й масштабовану архітектуру системи, здатну одночасно обробляти потоки даних із десятків сенсорів у реальному часі.

Візуалізація даних є ще одним важливим елементом сучасних інформаційних технологій моніторингу. Графічні панелі відображають ключові параметри мікроклімату — температуру, вологість, концентрацію CO<sub>2</sub>, стан фільтрів тощо. У разі виходу показників за допустимі межі система автоматично формує попередження. Такі інтерфейси можуть бути інтегровані у бортові панелі екіпажу або доступні через планшети технічного персоналу. Це спрощує аналіз стану повітряного середовища й забезпечує швидке реагування на можливі відхилення.

Важливо, що під час створення подібних систем суворо дотримуються метрологічних вимог. Кожен сенсор повинен мати визначені характеристики точності, стабільності та чутливості. Для цього проводиться періодичне калібрування з використанням еталонних засобів вимірювання, а програмне забезпечення враховує температурні дрейфи та систематичні похибки у режимі реального часу. Також здійснюється синхронізація часових міток усіх вимірювань, що гарантує достовірність аналізу динамічних процесів.

Сучасні інформаційні технології моніторингу якості повітря поєднують сенсорні, аналітичні та обчислювальні компоненти в єдину інтегровану структуру. Вони забезпечують не лише точні вимірювання параметрів мікроклімату, а й глибокий інтелектуальний аналіз стану повітряного середовища, прогнозування відхилень і підтримку прийняття рішень екіпажем і технічними фахівцями. Такі рішення є важливим кроком до створення

«розумних» бортових екосистем, здатних автоматично підтримувати комфорт і безпеку пасажирів у будь-яких умовах польоту.

#### 1.4 Принцип дії датчиків параметрів мікроклімату

Найпоширенішими в системах мікрокліматичного контролю є сенсори температури, які реалізовані на основі терморезисторів, термопар або напівпровідникових термометрів. У терморезисторах використовується залежність електричного опору матеріалу від температури. Для вимірювань у системах авіаційного призначення часто застосовуються платинові терморезистори типу Pt100 або Pt1000, які мають високу стабільність і лінійність у широкому діапазоні від  $-50$  до  $+150$  °C. Зміна опору такого елемента перетворюється у напругу за допомогою вимірювального мосту або аналого-цифрового перетворювача, після чого проходить цифрову обробку та калібрування.

Термопари характеризуються широким діапазоном вимірювань (до 1200 °C) і високою швидкістю, однак мають нижчу точність у порівнянні з платиновими терморезисторами. У системах літаків вони застосовуються для контролю температури повітря після компресорів, у зоні кондиціонування або в рециркуляційних каналах ECS.

Напівпровідникові датчики температури, такі як LM35, TMP36 або цифрові сенсори DS18B20, використовують властивість p-n переходу змінювати напругу у залежності від температури. Такі сенсори відзначаються малими габаритами, простотою інтерфейсу (1-Wire, I<sup>2</sup>C або SPI) та високою точністю в діапазоні  $-40...+125$  °C. Для інтеграції в мікроконтролерні системи вони є найзручнішими, оскільки видають вже оцифровані дані, що мінімізує вплив шумів і спрощує метрологічну обробку.

Наступною важливою групою є сенсори вологості, принцип дії яких базується на зміні електричних властивостей матеріалів під впливом вологи. Ємнісні датчики вологості складаються з двох електродів, між якими

розміщується гігроскопічний діелектрик. При поглинанні водяної пари його діелектрична проникність зростає, що змінює ємність сенсора. Ця зміна реєструється електронним модулем і перетворюється у цифровий сигнал. Типовими прикладами є датчики серій SHT (Sensirion), HIH (Honeywell) та DHT (Aosong), що забезпечують точність у межах  $\pm 2 \dots 3$  % RH.

Інша технологія — резистивні датчики вологості, які базуються на зміні електропровідності полімерної або оксидної плівки під впливом вологи. Вони прості у виготовленні, однак чутливі до температурних коливань, тому потребують температурної компенсації. У сучасних авіаційних системах віддають перевагу ємнісним або цифровим комбінованим сенсорам, що одночасно вимірюють і температуру, і вологість, наприклад SHT31 або BME280.

Вимірювання атмосферного тиску здійснюється за допомогою п'єзорезистивних або ємнісних сенсорів. Принцип дії п'єзорезистивного датчика полягає у зміні опору кремнієвих тензорезисторів, розміщених на мембрані, при деформації під дією тиску. Деформація створює пропорційну зміну електричного сигналу, яка далі підсилюється і оцифровується. Ємнісні датчики, натомість, реагують зміною відстані між електродами мембрани. У системах мікроклімату авіаційного типу такі сенсори дозволяють точно контролювати тиск у салоні та підтримувати його в межах, еквівалентних висоті 2400–2500 м.

Окреме місце займають сенсори концентрації вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), які працюють на основі інфрачервоного поглинання. Принцип їх дії полягає в тому, що молекули  $\text{CO}_2$  вибірково поглинають інфрачервоне випромінювання з довжиною хвилі 4,26 мкм. У датчику є джерело ІЧ-випромінювання, оптична камера та фотодетектор, який реєструє інтенсивність пройденого сигналу. Чим вища концентрація  $\text{CO}_2$ , тим слабше проходить випромінювання, що дозволяє розрахувати рівень газу в повітрі. Такі NDIR-сенсори (Non-Dispersive Infrared) мають високу точність ( $\pm 30$  ppm) і стабільність, але вимагають періодичного калібрування.

Крім контролю температури, вологості та тиску, у сучасних системах моніторингу мікроклімату важливу роль відіграють сенсори контролю чистоти

повітря, зокрема концентрації летких органічних сполук (VOC) і частинок пилу. Їх застосування дозволяє оцінювати не лише фізичні параметри середовища, а й хімічний склад повітря, що безпосередньо впливає на комфорт і безпеку пасажирів.

Сенсори VOC (Volatile Organic Compounds) зазвичай ґрунтуються на принципі зміни електропровідності напівпровідникового шару при взаємодії з газовими молекулами. Найпоширенішими є металоксидні датчики (MOS), у яких активним елементом виступає плівка діоксиду олова  $\text{SnO}_2$  або оксидів цинку  $\text{ZnO}$ . При нагріванні сенсорної поверхні до температури близько  $300\text{ }^\circ\text{C}$  молекули кисню адсорбуються на поверхні, утворюючи заряджені частинки. Коли у повітрі присутні органічні сполуки, вони реагують з цими іонами, змінюючи концентрацію носіїв заряду в шарі, що призводить до зміни електричного опору сенсора. Вимірюючи цю зміну, можна визначити концентрацію VOC у повітрі.

Сенсори цього типу, наприклад серії CCS811 або SGP30, здатні оцінювати якість повітря у балах (IAQ Index) або вимірювати еквівалентну концентрацію  $\text{CO}_2$  ( $\text{eCO}_2$ ), що використовується для непрямой оцінки вентиляції приміщення чи салону літака. Їх перевагою є компактність і можливість інтеграції з цифровими інтерфейсами, проте недоліком — потреба у калібруванні та певна інерційність реакції через процеси адсорбції і десорбції газів.

Для вимірювання вмісту пилових частинок у повітрі використовуються оптичні датчики, принцип дії яких базується на розсіюванні світла. У середині сенсора знаходиться джерело випромінювання (зазвичай інфрачервоний або лазерний діод) і фотодетектор, який реєструє інтенсивність розсіяного світла при проходженні частинок через зону вимірювання. Кількість і амплітуда сигналів прямо пропорційні концентрації частинок у повітрі. Такі сенсори дозволяють вимірювати показники  $\text{PM}_{1.0}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  і  $\text{PM}_{10}$ , тобто частинки з діаметром до 1, 2,5 і 10 мікрометрів відповідно.

Найпоширенішими є сенсори типу GP2Y1010AU0F (Sharp), SDS011 або Plantower PMS7003, які забезпечують високу роздільну здатність та можливість

тривалої експлуатації. В авіаційних системах вони дають змогу оцінити ефективність фільтрації повітря, стан фільтрів та наявність мікрочастинок, що можуть утворюватися під час роботи механічних компонентів ECS.

Останнім часом широкого застосування набули комбіновані сенсорні модулі, які поєднують у собі кілька вимірювальних каналів. Наприклад, сенсор Bosch BME680 вимірює температуру, вологість, тиск і VOC, а Sensirion SCD41[17] — температуру, вологість і CO<sub>2</sub>. Такі багатофункціональні пристрої суттєво спрощують архітектуру вимірювальної системи, оскільки один чип замінює декілька окремих сенсорів, зменшуючи масу, споживання енергії та потребу в калібруванні.

Для вибору конкретних первинних перетворювачів у розробленій бортовій системі проведено порівняльний аналіз сучасних сенсорів з урахуванням авіаційних вимог до точності, діапазону, споживання, маси та вартості (таблиця 1.4) [13,16,17,18,19].

Таблиця 1.4 – Вибір первинних сенсорів та їх характеристики

| Параметр                       | SHT31-<br>ARP | MH-<br>Z19E | SCD41      | SPS30     | BME680   | Вибрано                             |
|--------------------------------|---------------|-------------|------------|-----------|----------|-------------------------------------|
| Точність температури, °C       | ±0,2          | —           | ±0,2       | —         | ±0,5     | SHT31-ARP                           |
| Точність вологості, % RH       | ±1,5          | —           | ±1,5       | —         | ±3       | SHT31-ARP                           |
| Точність CO <sub>2</sub> , ppm | —             | ±50+5%      | ±40        | —         | —        | MH-Z19E (основний) + SCD41 (резерв) |
| Точність PM2.5                 | —             | —           | —          | ±10 %     | —        | SPS30                               |
| Діапазон температур, °C        | – 40...125    | 0...50      | – 40...125 | – 10...60 | –40...85 | —                                   |

## Продовження таблиці 1.4 Вибір первинних сенсорів та їх характеристики

| Параметр                  | SHT31-<br>ARP | MH-<br>Z19E | SCD41 | SPS30 | BME680 | Вибрано |
|---------------------------|---------------|-------------|-------|-------|--------|---------|
| Споживання, мВт           | 1,7           | 50          | 18    | 80    | 3      | —       |
| Ціна 2025 року,<br>(грн.) | 420           | 520         | 1450  | 1350  | 280    | —       |
| Відповідність DO-<br>160G | так           | ні*         | так   | так   | так    | —       |

Примітка: MH-Z19E[18] використовується з програмною компенсацією та захисним кожухом

У процесі роботи всі сенсори піддаються впливу зовнішніх факторів — температурних дрейфів, старіння матеріалів, зміни вологості або тиску.. Наприклад, для сенсорів вологості алгоритми автоматично враховують температуру навколишнього середовища, що зменшує похибку вимірювання при різких перепадах умов польоту.

Калібрування виконується з використанням еталонних середовищ або порівняння з лабораторними приладами високої точності. Для сенсорів CO<sub>2</sub> калібрування може бути автоматичним — наприклад, за принципом ABC (Automatic Baseline Correction), коли система вважає найнижчий рівень CO<sub>2</sub> за певний період (зазвичай 24 години) базовим значенням і коригує нуль сенсора. Це дозволяє підтримувати стабільність вимірювань навіть без ручного втручання.

Особливу увагу в таких системах приділяють синхронізації часових міток вимірювань. Оскільки параметри мікроклімату змінюються у динаміці, навіть незначне зміщення у часі може спотворити аналіз кореляцій між температурою, тиском і рівнем CO<sub>2</sub>. Тому у мікропроцесорних системах використовується синхронізація з внутрішнім годинником реального часу (RTC) або з мережею через протокол NTP.

Важливим етапом у роботі сенсорів є також компенсація зносу і старіння. З часом чутливі елементи змінюють свої характеристики, що призводить до систематичних похибок. Для зменшення цього ефекту використовують

адаптивні алгоритми корекції, які на основі довгострокових спостережень аналізують відхилення від середніх значень і коригують калібрувальні параметри.

Таким чином, сучасні сенсори параметрів мікроклімату є високотехнологічними пристроями, які поєднують у собі чутливі фізичні елементи, схеми попередньої обробки, аналого-цифрове перетворення та цифрову компенсацію похибок. Їхня робота забезпечує основу функціонування систем екологічного контролю літальних апаратів.

На основі розглянутих принципів роботи сенсорів сформовано загальну структуру системи моніторингу мікроклімату, яка включає:

- блок первинних перетворювачів (сенсорів температури, вологості, тиску, CO<sub>2</sub>, VOC та пилу);
- мікроконтролерний модуль для збору, фільтрації й обробки даних;
- модуль зв'язку (наприклад, Wi-Fi або UART) для передачі інформації;
- програмний інтерфейс користувача для візуалізації результатів і збереження даних.

У подальших розділах буде розроблено структурну схему, алгоритм роботи та програмну частину цієї системи, яка забезпечує безперервний моніторинг параметрів мікроклімату в реальному часі

### 1.5 Функції перетворення та метрологічні характеристики сенсорів

Сенсори параметрів мікроклімату є первинними вимірювальними перетворювачами, що забезпечують отримання електричних сигналів, пропорційних фізичним величинам середовища — температурі, вологості, тиску, концентрації газів чи частинок пилу. Для забезпечення точності, стабільності та відтворюваності вимірювань необхідно чітко визначати функції перетворення кожного сенсора та його метрологічні характеристики.

Функція перетворення описує залежність вихідного сигналу сенсора від вимірюваної величини. У більшості випадків ця залежність може бути лінійною

або наближено лінійною в робочому діапазоні. Для прикладу, терморезистор має функцію  $U_{\text{вих}} = k \cdot R(T)$ , де  $R(T)$  — температурна характеристика опору, а  $k$  — коефіцієнт підсилення вимірювального кола. У цифрових сенсорах ця функція реалізується у вигляді калібрувальної таблиці або поліноміального рівняння, що враховує нелінійність, температурну залежність і систематичні поправки.

Для кожного типу сенсора характерні свої функції перетворення. Так, у термісторів (NTC або PTC) опір змінюється за експоненціальним законом:

$$R(T) = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (1.1)$$

де  $R_0$  — опір при температурі  $T_0$ , а  $B$  — постійна матеріалу. Ця залежність використовується для розрахунку температури з високою точністю у межах від  $-40$  до  $+125$  °C.

Для ємнісних сенсорів вологості функція перетворення визначається зміною ємності  $C$  при зміні діелектричної проникності полімерного шару, який поглинає водяну пару:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon_r$  — відносна діелектрична проникність, що зростає зі збільшенням вологості,  $S$  — площа електродів,  $d$  — відстань між ними. Вихідний сигнал такого сенсора після обробки мікроконтролером перетворюється у цифрове значення відносної вологості RH у відсотках.

Датчики тиску, зокрема кремнієві п'єзорезистивні сенсори, мають функцію перетворення, що базується на ефекті зміни опору при деформації мембрани під дією тиску:

$$\Delta R = k_p \cdot \sigma \quad (1.3)$$

де  $\sigma$  — механічна напруга, що виникає у мембрані, а  $k_p$  — п'єзорезистивний коефіцієнт. Вихідна напруга сенсора пропорційна прикладеному тиску і після аналогово-цифрового перетворення дає змогу визначати абсолютний або диференціальний тиск з високою точністю.

Для газових сенсорів типу MOS функція перетворення визначається залежністю електропровідності чутливого шару від концентрації газу:

$$G = G_0 \cdot \left(\frac{C}{C_0}\right)^\alpha \quad (1.4)$$

де  $G$  — провідність сенсора,  $C$  — концентрація газу,  $\alpha$  — емпіричний коефіцієнт, що визначається експериментально. Подібні залежності дозволяють оцінювати концентрацію  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  або  $\text{VOC}$  з похибкою не більше  $\pm 5\%$ .

Метрологічні характеристики сенсорів визначають їх придатність до точних вимірювань у системах моніторингу мікроклімату. До основних характеристик належать:

- Діапазон вимірювання — інтервал значень фізичної величини, у межах якого сенсор забезпечує задану точність. Наприклад, для температурних сенсорів це може бути від  $-50$  до  $+125$  °C, а для сенсорів вологості — від  $0$  до  $100\%$  RH.
- Похибка вимірювання — різниця між істинним і виміряним значенням. Вона може бути систематичною (через калібрування, дрейф, нелінійність) або випадковою (через шум, флуктуації середовища).
- Чутливість — відношення зміни вихідного сигналу до зміни вимірюваної величини. Висока чутливість дозволяє фіксувати навіть незначні коливання мікроклімату.
- Лінійність — ступінь відповідності фактичної функції перетворення ідеальній прямій. Для якісних сенсорів відхилення нелінійності не перевищує  $1\%$ .

- Гістерезис — різниця у вихідному сигналі при збільшенні та зменшенні вимірюваної величини, характерна для ємнісних сенсорів вологості.
- Стабільність — здатність сенсора зберігати метрологічні характеристики у часі. Для авіаційних систем це критичний параметр, оскільки сенсори працюють тривалий час без обслуговування.

З метою підвищення точності вимірювань сенсори проходять індивідуальне калібрування, результати якого записуються у внутрішню пам'ять пристрою. Цифрові сенсори, як-от Sensirion SHT41 або Bosch BME688, мають вбудовані коефіцієнти компенсації, що автоматично враховуються при кожному вимірюванні. Це дозволяє зменшити систематичну похибку до  $\pm 0,2$  °C для температури та  $\pm 1,5$  % для вологості.

Функції перетворення можуть бути лінійними, експоненційними або поліноміальними. Для корекції нелінійностей використовуються методи апроксимації за допомогою багаточленів третього або четвертого порядку. Наприклад:

$$U = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1.5)$$

де коефіцієнти  $a_i$  визначаються під час калібрування, а  $x$  — вимірювана величина. Такий підхід забезпечує точну інтерполяцію навіть у нелінійних діапазонах.

Важливою складовою метрологічного аналізу є оцінка динамічних характеристик сенсора — часу відгуку та релаксації. Час відгуку  $\tau_{90}$  визначається як інтервал, протягом якого сенсор досягає 90 % кінцевого значення після зміни параметра середовища. Для якісних цифрових сенсорів вологості цей показник становить 1–2 секунди, що дозволяє оперативно реагувати на зміни умов польоту.

Особливу увагу приділяють також взаємозв'язку метрологічних характеристик. Наприклад, підвищення чутливості часто призводить до збільшення шумів, тому в системі має бути передбачений баланс між роздільною

здатністю та стабільністю. Для цього використовуються програмні фільтри та алгоритми усереднення, які зменшують вплив випадкових флуктуацій без втрати точності.

В авіаційних умовах сенсори піддаються впливу вібрацій, перепадів тиску та температури, тому їх метрологічні характеристики повинні бути стабільними у широкому діапазоні зовнішніх факторів. Для забезпечення надійності застосовуються температурна компенсація, екранування від електромагнітних перешкод і періодичне порівняння показань з еталонними датчиками.

Таким чином, функції перетворення та метрологічні характеристики сенсорів визначають точність і достовірність усієї системи моніторингу мікроклімату. Коректно підібрані сенсори з відомими параметрами лінійності, стабільності та чутливості забезпечують можливість побудови високонадійних вимірювальних комплексів, що відповідають вимогам авіаційної метрології та стандартів безпеки польотів.

## 1.6 Похибки цифрових засобів вимірювання параметрів мікроклімату

Одним із найважливіших аспектів під час розробки вимірювальних систем є оцінювання їхньої точності та надійності. Ці характеристики безпосередньо визначають достовірність отриманих результатів, а отже, і ефективність усієї системи керування мікрокліматом. У цифрових засобах вимірювання похибки виникають на різних етапах — від перетворення фізичної величини первинним сенсором до обробки та передачі результатів мікроконтролером чи комп'ютером.

У загальному випадку похибка вимірювання — це відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Для кількісної оцінки похибок цифрових засобів використовують такі основні показники:

- Абсолютна похибка

$$\Delta = X_{\text{вим}} - X_{\text{іст}} \quad (1.6)$$

де  $X_{\text{вим}}$  — виміряне значення,  $X_{\text{іст}}$  — істинне значення параметра.

– Відносна похибка

$$\delta = \frac{X_{\text{вим}} - X_{\text{іст}}}{X_{\text{іст}}} \cdot 100\% \quad (1.7)$$

Цей показник дозволяє порівнювати точність вимірювань для різних параметрів, незалежно від їхнього абсолютного рівня.

Цифрові вимірювальні системи характеризуються комплексом похибок, що поділяються на систематичні, випадкові та інструментальні.

Систематичні похибки мають стабільний характер і можуть бути зумовлені некоректним калібруванням сенсора, дрейфом нуля, температурною нестабільністю елементів або неправильним масштабним коефіцієнтом. Наприклад, у сенсорах температури типу DHT22 спостерігається систематичне зміщення показань на  $\pm 0,3$  °C, пов'язане з особливостями терморезистивного елемента. Для компенсації таких похибок у цифрових системах застосовують калібрувальні коефіцієнти, які зберігаються в енергонезалежній пам'яті мікроконтролера і коригують вихідні значення за температурою або вологістю.

Випадкові похибки цей тип похибок виникає через шумові впливи, вібрації, флуктуації напруги живлення, а також через статистичну природу процесу вимірювання. У практиці для зменшення впливу випадкових похибок використовують методи усереднення та цифрової фільтрації. Наприклад, алгоритм ковзного середнього (Moving Average) дозволяє згладжувати короткочасні коливання сигналу:

$$X_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{i-k} \quad (1.7)$$

де  $N$  — кількість вимірів, що враховуються.

Також для динамічних процесів доцільно застосовувати фільтри Калмана, які комбінують інформацію з сенсора і математичної моделі процесу,

забезпечуючи оптимальну оцінку вимірюваної величини навіть за наявності шумів.

Інструментальні похибки обумовлені технічними обмеженнями цифрових засобів — роздільною здатністю АЦП (аналогово-цифрового перетворювача), квантовими ефектами, нестабільністю опорної напруги або нелінійністю сенсорів. Для прикладу, 12-бітний АЦП має роздільну здатність  $1/4096$  від діапазону вимірювань. При діапазоні 0–5 В мінімальна зміна, яку здатен зафіксувати пристрій, становить близько 1,22 мВ. Це визначає мінімальний рівень розрізнення сигналу.

Нелінійність сенсорів є ще однією поширеною причиною інструментальних похибок. Наприклад, у датчиках вологості SHT41 відхилення від лінійності становить до 1,5 % у діапазоні 10–90 % RH, тому для підвищення точності застосовують таблиці лінеаризації або поліноміальні апроксимації у прошивці мікроконтролера.

Квантування та шум квантування - у цифрових системах усі аналогові сигнали проходять процес дискретизації та квантування. Це породжує додаткову похибку, що залежить від кількості бітів у АЦП. Чим вища розрядність, тим менша похибка. Відносна похибка квантування визначається виразом:

$$\delta = \frac{X_{\text{вим}} - X_{\text{іст}}}{X_{\text{іст}}} \cdot 100\% \quad (1.8)$$

де  $n$  — кількість бітів АЦП. Для 10-бітного АЦП ця похибка становить приблизно 0,05 %, що є прийнятним для більшості мікрокліматичних систем.

Температурні похибки - температурні зміни впливають на характеристики сенсорів, особливо у випадку терморезистивних і ємнісних типів. Температурний дрейф може спричинити зміну вихідного сигналу навіть без фактичної зміни вимірюваної величини. Для компенсації цього ефекту використовують температурну компенсацію — введення додаткових сенсорів температури або математичних коефіцієнтів корекції.

Комплексна оцінка похибки - загальна похибка цифрового вимірювального каналу може бути подана як коренева сума квадратів окремих компонент:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\text{сист}}^2 + \Delta_{\text{вип}}^2 + \Delta_{\text{інстр}}^2} \quad (1.9)$$

такий підхід дозволяє отримати інтегральну оцінку точності системи в реальних умовах експлуатації.

У системах моніторингу мікроклімату вимоги до точності зазвичай такі:

- для температури — не більше  $\pm 0,3$  °C;
- для вологості — не більше  $\pm 2$  % RH;
- для тиску — не більше  $\pm 1$  гПа;
- для CO<sub>2</sub> — не більше  $\pm 50$  ppm.

Дотримання цих показників досягається завдяки комплексному підходу — правильному вибору сенсорів, регулярному калібруванню, використанню алгоритмів цифрової обробки сигналів і врахуванню метрологічних характеристик кожного елемента системи.

Таким чином, цифрові засоби вимірювання мають ряд потенційних джерел похибок, однак при грамотному проектуванні, калібруванні та фільтрації сигналів можливо забезпечити стабільну роботу вимірювальної системи, що відповідає авіаційним метрологічним нормам точності та надійності.

## 1.7 Висновки до розділу

Проведений аналіз сучасних систем контролю мікроклімату в салонах пасажирських повітряних суден показав, що традиційні системи ECS, попри високу надійність, мають обмежену кількість сенсорних зон, відсутність оперативного моніторингу в реальному часі та неможливість віддаленого доступу до даних. Це обумовлює актуальність створення компактної бортової системи на базі цифрових сенсорів та технологій IoT.

Обґрунтовано вибір первинних перетворювачів з урахуванням авіаційних вимог (маса, енергоспоживання, діапазон температур  $-40\dots+85$  °С, відповідність DO-160G): температура та вологість — SHT31-ARP (Sensirion)[16], концентрація CO<sub>2</sub> — MH-Z19E[18] (основний) з резервним SCD41[17], тверді частинки PM2.5/PM10 — SPS30 (Sensirion) [19]. Ці сенсори забезпечують метрологічні характеристики, що перевищують вимоги ASHRAE 62.1[14] та RTCA DO-160G[13]: точність температури  $\pm 0,2$  °С, вологості  $\pm 1,5$  % RH, CO<sub>2</sub>  $\pm 50$  ppm, PM2.5  $\pm 10$  %.

Розглянуто функції перетворення та основні джерела похибок цифрових засобів вимірювання. Встановлено, що застосування сучасних алгоритмів компенсації температурного дрейфу, цифрової фільтрації та автоматичного калібрування дозволяє досягти сумарної похибки не більше 1–2 % у всьому робочому діапазоні.

Отримані результати аналізу є основою для подальшої розробки апаратно-програмного комплексу бортової системи моніторингу мікроклімату.

## 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ

### 2.1 Загальна концепція побудови системи моніторингу мікроклімату

Система моніторингу параметрів мікроклімату у салоні літака громадської авіації призначена для безперервного контролю показників, що визначають комфорт і безпеку пасажирів під час польоту. До таких параметрів належать температура, вологість, атмосферний тиск, концентрація вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), летких органічних сполук (VOC), а також наявність твердих частинок (PM2.5, PM10).

Головною метою розробки системи є створення інтегрованого апаратно-програмного комплексу, здатного забезпечити точні вимірювання, обробку, збереження та візуалізацію даних про стан повітряного середовища у реальному часі. При цьому система має відповідати вимогам авіаційної надійності, енергозбереження та стійкості до зовнішніх перешкод.

Розроблювана система складається з таких основних функціональних блоків:

- блок первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) – забезпечує перетворення фізичних параметрів середовища (температури, вологості, тиску, концентрацій газів і пилу) у відповідні електричні сигнали;
- модуль збору та обробки даних – реалізований на базі мікроконтролера (наприклад, ESP32 або STM32), який виконує аналого-цифрове перетворення, цифрову фільтрацію, калібрування та корекцію вимірювальних даних;
- модуль комунікації – забезпечує передавання результатів на зовнішні пристрої через інтерфейси Wi-Fi, UART або CAN;
- програмний інтерфейс користувача (HMI) – дає змогу відображати поточні дані, вести архів показників та формувати попередження при відхиленнях параметрів від нормованих меж.

Для побудови системи застосовується модульний принцип, який дозволяє легко масштабувати її структуру залежно від типу літака або кількості

контрольованих зон салону. Наприклад, у великих пасажирських літаках система може мати кілька зональних вузлів вимірювання, об'єднаних спільною мережею даних, тоді як у малих літаках — один центральний модуль із підключенням до загальної системи керування повітрям (ECS).

Основними вимогами до системи є:

- висока точність вимірювання (не гірше  $\pm 0,2$  °C для температури,  $\pm 2$  %RH для вологості,  $\pm 50$  ppm для CO<sub>2</sub>)[13,14];
- надійність та стабільність показань у діапазоні робочих температур від  $-40$  до  $+85$  °C;
- низьке енергоспоживання для можливості автономної роботи у разі резервного живлення;
- електромагнітна сумісність з іншими бортовими системами літака;
- можливість калібрування сенсорів без демонтажу.

На рисунку 2.1 подано узагальнену концептуальну схему побудови системи моніторингу мікроклімату, яка відображає взаємодію між сенсорними модулями, мікроконтролером, інтерфейсом користувача та системою передачі даних.

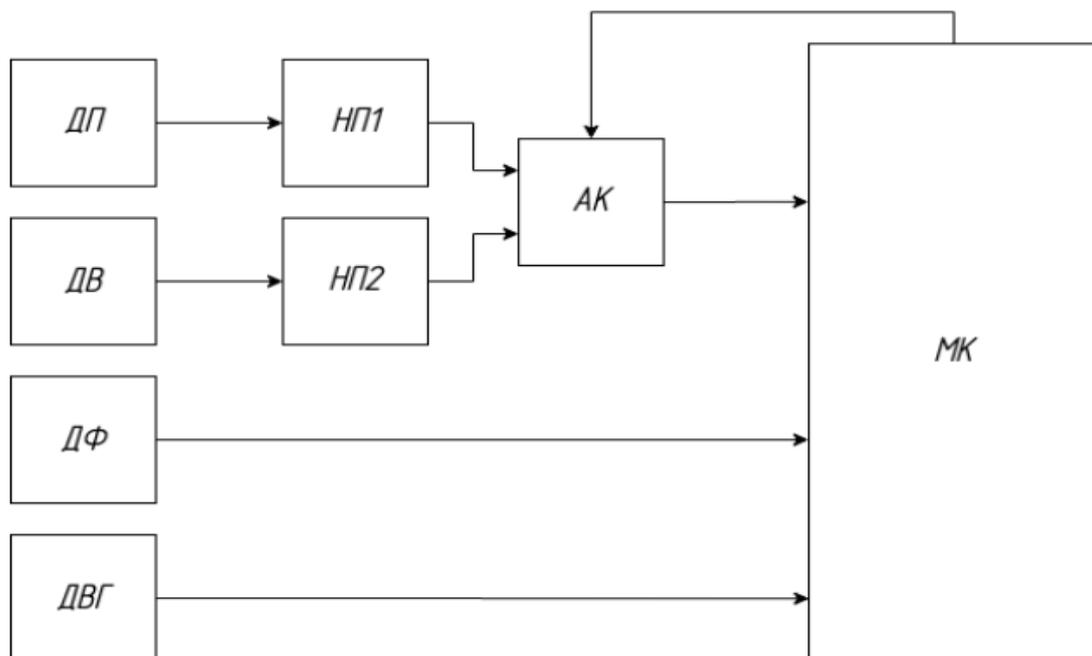


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи моніторингу мікроклімату в салоні літака

На рис. 2.1 представлено наступні позначення: ДП – Давач пилю; ДВ – Давач вологості; ДФ – Давач формальдегіду; ДВГ – Давач вуглекислого газу; НП1 – Нормалізуючий пристрій 1; НП2 – Нормалізуючий пристрій 2; АК – Аналоговий комутатор; МК – Мікроконтролер.

У подальших підпунктах цього розділу буде детально розглянуто структурну та функціональну схеми системи, принципи побудови нормуючих пристроїв, розрахунок підсилювальних каскадів і алгоритми обробки сигналів у мікроконтролері.

## 2.2 Розрахунок нормуючого пристрою для датчика вологості

У більшості сучасних сенсорів вологості промислового або авіаційного класу вихідним сигналом є струм у діапазоні 4–20 мА, що забезпечує стійкість до перешкод і втрат у лініях передачі. Для подальшої обробки даних у мікроконтролерній системі сигнал повинен бути перетворений у напругу, сумісну з входом аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Таким чином, нормуючий пристрій виконує функцію перетворювача «струм – напруга» (Current-to-Voltage Converter). Його принципова схема подана на рисунку 2.2.

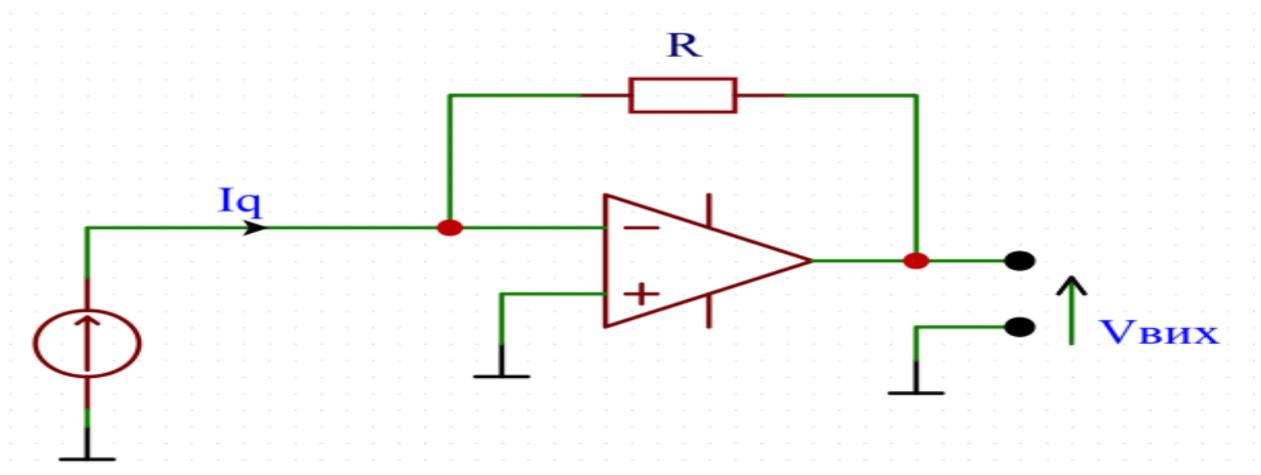


Рисунок 2.2 – Схема перетворювача струму

Вихідна напруга НП  $U_{\text{вих}}$  має залежати від струму датчика  $Iq$  як:

$$U_{\text{вих}} = Iq \cdot R \quad (2.1)$$

Точність процесу перетворення оцінюється за величиною відхилення від номінального значення, яке відноситься до невизначеності опору зворотного зв'язку, значення цього опору потім множиться на 100. Тобто значення номінального опору  $R$  може відрізнятись на  $\pm\delta \cdot 100\%$  ( $\delta = \Delta R / R$ ). Якщо ми зробимо наступний крок, ми повинні знайти максимальне та мінімальне значення відхилення від номінального значення  $R$ :  $\Delta R = \delta \cdot R / 100$ . Допускається рівномірний розподіл можливих значень відхилення від номінального значення.

Точність перетворення, яка характеризується невизначеністю, визначається потенційним розкидом значень опору, а саме:  $U(R) = \Delta R / \sqrt{3}$ . Оскільки номінальне значення  $Iq = 20$  мА, вибираючи  $R = 250$  Ом, ми забезпечити номінальну вхідну напругу АЦП зі значенням 5В. Вибираємо резистор зворотного зв'язку з величиною  $\pm 0,5\%$ , тоді відносна невизначеність перетворення «струм – напруга» буде:  $U(V) = 0,5 / \sqrt{3} = 0,3\%$ , що повністю задовольняє вимірювання вологості, який написано в завданні.

Висновок: Обраний резистор зворотного зв'язку  $R=250$  Ом  $R=250 \sim$  Ом  $R=250$  Ом забезпечує діапазон вихідної напруги 1–5 В і похибку не більше 0.3%. Така схема є простою, надійною та відповідає авіаційним вимогам до точності та стабільності вимірювань[13].

### 2.3 Розрахунок нормуючого пристрою для датчика пилу

Сенсори концентрації пилу (PM2.5, PM10), наприклад PMS5003 або SDS011, формують аналоговий вихідний сигнал низького рівня — приблизно 0–80 мВ. Щоб привести вхідне значення АЦП до номінального рівня, необхідно виконати підвищення напруги в 62,5 рази. Вхідний опір датчика 1 кОм має бути

високим. Ось чому ми обираємо стратегію. Рис. 2.3 ілюструє склад перетворювача.

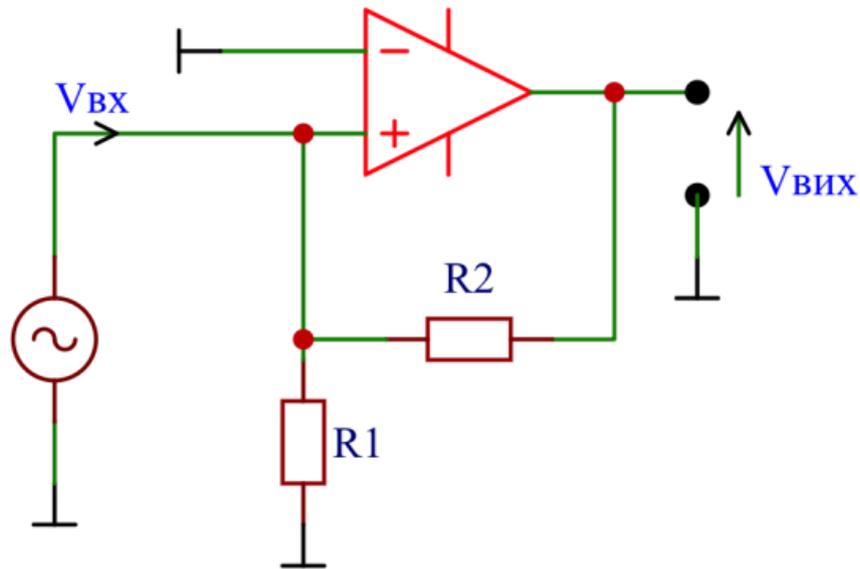


Рисунок 2.3 – Схема перетворювача напруги

$$K_V = \frac{U_{\text{ВІХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (2.2)$$

Щоб оцінити вірність перетворення, запишемо вираз (2.2) у вигляді:

$$K_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.3)$$

Так як  $R_2 \gg R_1$ , то приблизно  $K_V \approx \frac{R_2}{R_1}$ , то похибка перетворення масштабу дорівнює :

Для забезпечення номінального вихідного сигналу 5 В при входному 80 мВ необхідно мати  $K_V \approx 62,5$ . Наприклад, при  $R_1 = 1$  кОм потрібно вибрати  $R_2 \approx 61,5$  кОм. Оцінимо точність перетворення. При допуску резисторів  $\pm 0,5\%$  стандартна невизначеність окремого резистора становить  $0,5 / \sqrt{3} = 0,29\%$ . Комбінована відносна невизначеність коефіцієнта підсилення дорівнює:

$u(K_v) = \sqrt{(0,29^2 + 0,29^2)} = 0,41\%$ . Абсолютна невизначеність для  $K_v = 62,5$ :  $\Delta K_v = 62,5 \times 0,0041 = 0,26$ . Отже, кінцевий результат:

$$K_v = 62,5 \pm 0,26 \quad (2.4)$$

Такий рівень точності є цілком прийнятним для вимірювань концентрації пилу[19], де допустима похибка вимірювання не перевищує 1–2%. За потреби підвищення точності можна використати резистори з допуском  $\pm 0,1\%$  або провести калібрування підсилювача програмно.

#### 2.4 Розрахунок підсилювального каскаду для датчика CO<sub>2</sub>

Датчики концентрації вуглекислого газу типу МН-Z19В або аналогічні NDIR-сенсори формують аналоговий вихідний сигнал у межах приблизно від 0,4 до 2,0 В, що відповідає діапазону вимірювання від 400 до 2000 ppm. Для забезпечення повного використання динамічного діапазону аналогово-цифрового перетворювача мікроконтролера необхідно перетворити цей сигнал у напругу 0–5 В. Для цього використовується підсилювальний каскад з фіксованим коефіцієнтом підсилення та корекцією нульового рівня.

На рисунку 2.4 наведено принципову схему підсилювача сигналу для каналу вимірювання концентрації CO<sub>2</sub>. Використання саме неінвертуючої схеми з резисторами R1, R2 та R3 дозволяє легко реалізувати необхідний коефіцієнт підсилення та зсув нуля одним каскадом без додаткових джерел опорної напруги. Такий підхід значно спрощує друковану плату, зменшує кількість компонентів і підвищує загальну надійність вимірювального каналу в умовах вібрації та температурних коливань, характерних для бортового обладнання. Це забезпечує повну відповідність вимогам RTCA DO-160G при мінімальній масі та вартості аналогового тракту.

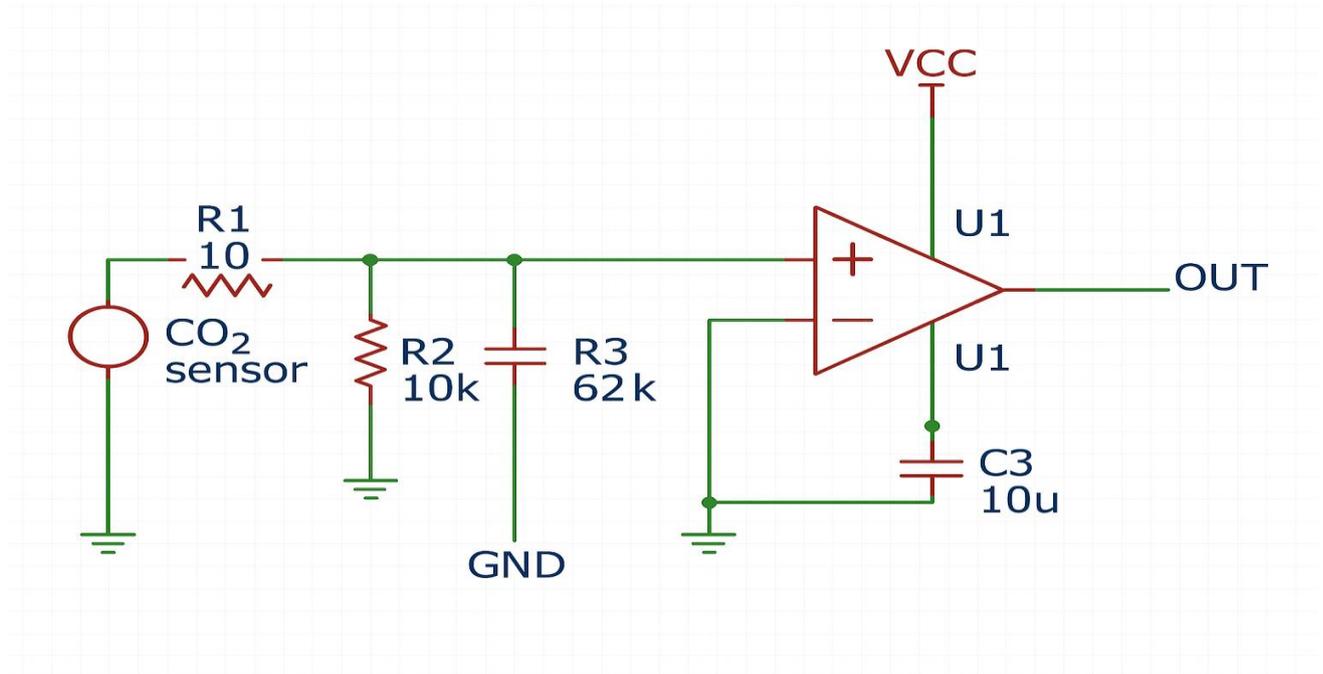


Рисунок 2.4 – Схема підсилювача сигналу для датчика CO<sub>2</sub>

Вихідна напруга підсилювача визначається виразом:

$$U_{\text{вих}} = K_{\Pi} \cdot (U_{\text{вх}} - U_0) \quad (2.5)$$

де  $K_{\Pi}$  — коефіцієнт підсилення каскаду;  $U_{\text{вх}}$  — напруга сигналу з датчика;  $U_0$  — напруга зміщення (офсет), що компенсує початкове зміщення 0,4 В. Для забезпечення шкали 0–5 В при зміні сигналу датчика від 0,4 до 2,0 В необхідно, щоб коефіцієнт підсилення дорівнював:

$$K_{\Pi} = (5,0 - 0) / (2,0 - 0,4) = 3,125 \quad (2.6)$$

Для реалізації підсилення використовується неінвертуючий підсилювач на операційному підсилювачі з резисторами R1 і R2. Його коефіцієнт підсилення визначається залежністю:

$$K_{\Pi} = 1 + R2 / R1 \quad (2.7)$$

Вибираючи  $R1 = 10$  кОм, отримаємо необхідне співвідношення  $R2 = 21,5$  кОм. Така комбінація забезпечує фактичний коефіцієнт підсилення:

$$K_{\text{п}} \approx 1 + 21,5 / 10 = 3,15 \quad (2.8)$$

Отримане значення дає змогу отримати повний вихідний діапазон 0–5,04 В, що є допустимим для АЦП мікроконтролера. Напряга зміщення  $U_0$  формується стабілізованим опорним джерелом або резистивним подільником з напругою 0,4 В. Для фільтрації шумів на вході каскаду встановлюється конденсатор ємністю 100 нФ.

Як операційний підсилювач доцільно використати двоканальний тип МСР6002 або TLV2372, які мають rail-to-rail вихід і працюють у діапазоні живлення 3,3–5 В. Такі мікросхеми забезпечують стабільну роботу навіть при зміні температури та вологості, що важливо в умовах експлуатації літального апарата.

Відносна похибка коефіцієнта підсилення визначається точністю встановлених резисторів і для резисторів з допуском  $\pm 0,5$  % становить приблизно 0,3 %. Це забезпечує додаткову похибку не більше  $\pm 0,02$  В при вихідній напрузі 5 В, що не впливає на достовірність вимірювання концентрації  $\text{CO}_2$ .

Таким чином, розроблений підсилювальний каскад забезпечує перетворення сигналу датчика  $\text{CO}_2$  у діапазон, сумісний з АЦП мікроконтролера, та мінімальну похибку перетворення. Застосування високоточних резисторів і стабільного джерела опорної напруги гарантує високу відтворюваність вимірювань і надійність роботи системи в цілому

## 2.5 Розробка функціональної схеми системи та вибір елементної бази

Функціональна схема системи моніторингу параметрів мікроклімату в салоні літака відображає реальну апаратну реалізацію структурних зв'язків, що

були визначені на попередніх етапах. На відміну від структурної схеми, яка демонструє логічну послідовність обробки даних, функціональна схема деталізує фізичні елементи системи, їх взаємозв'язки та типи сигналів, що передаються між ними. Основна мета побудови функціональної схеми полягає у забезпеченні точного узгодження між вимірювальними, обчислювальними та комунікаційними вузлами, що гарантує стабільну роботу системи в умовах експлуатації на борту повітряного судна.

Система складається з кількох основних блоків: сенсорного, аналогового, мікроконтролерного, живлення, комунікаційного та блоку користувачького інтерфейсу. Сенсорний блок включає датчики температури, вологості, тиску, концентрації CO<sub>2</sub>, летких органічних сполук (VOC) і твердих частинок пилу (PM2.5/PM10). Кожен сенсор має власні вимірювальні характеристики, вихідний тип сигналу та потребує окремого підключення до відповідного входу контролера. Для узгодження рівнів сигналів між сенсорами та АЦП застосовуються нормуючі або підсилювальні каскади, що забезпечують оптимальну точність перетворення аналогових сигналів у цифрові коди.

Центральним елементом системи є мікроконтролер, який відповідає за збір, обробку та передачу вимірювальних даних. Для реалізації поставлених задач доцільно використовувати сучасні контролери з інтегрованими комунікаційними інтерфейсами. Серед найоптимальніших варіантів — ESP32[20] та STM32F103C8T6. Контролер ESP32 має вбудований Wi-Fi-модуль[1,2,4], подвійне ядро, 12-розрядний АЦП, а також широкий набір цифрових інтерфейсів, що дозволяє легко масштабувати систему під різні конфігурації літака. Контролери STM32, у свою чергу, вирізняються стабільністю, низьким енергоспоживанням та промисловою надійністю, що робить їх доцільними для застосування в авіаційних пристроях. Вибір конкретного контролера залежить від вимог до обсягу обробки даних, кількості сенсорів і наявності бездротової комунікації.

Живлення системи здійснюється від бортової мережі постійного струму 12 В або 24 В. Для забезпечення стабільної роботи всіх елементів застосовується

каскад стабілізації напруги, який формує необхідні рівні живлення — 5 В для аналогових вузлів та 3,3 В для цифрової логіки мікроконтролера. Найчастіше для цього використовуються імпульсні DC-DC-перетворювачі типу LM2596 або стабілізатори лінійного типу AMS1117-3.3. Потужність системи можна оцінити за формулою  $P = U \times I$ , де  $U$  — напруга живлення, а  $I$  — споживаний струм. Наприклад, при 5 В та 0,15 А потужність становить близько 0,75 Вт, що є типовим значенням для малопотужних вимірювальних модулів. Для зменшення шумів і перешкод у ланцюзі живлення застосовуються LC-фільтри та конденсатори ємністю 100 нФ і 100 мкФ, розташовані поблизу чутливих компонентів.

Комунікаційний модуль забезпечує передачу даних між вимірювальною системою та зовнішніми пристроями. У базовій конфігурації для зв'язку з бортовою системою керування або комп'ютером технічного обслуговування використовується інтерфейс UART. Для розширених версій можлива передача даних через Wi-Fi-мережу або шини CAN, що дозволяє інтегрувати систему у складні авіаційні інформаційні мережі. Дані про параметри мікроклімату передаються у цифровому форматі з періодичним оновленням, що забезпечує контроль стану повітря в реальному часі.

Інтерфейс користувача виконує роль індикаторного блоку, який відображає поточні значення параметрів і повідомлення про можливі відхилення. Для цього може бути використано дисплей типу OLED 0.96" або LCD 1602, на якому відображаються температура, вологість, рівень CO<sub>2</sub> та стан системи («норма» або «перевищення»). Додатково передбачаються світлодіодні індикатори або звукові сигнали для швидкого інформування екіпажу. Керування пристроєм здійснюється мінімальною кількістю кнопок — наприклад, «Reset» для перезапуску або «Calibrate» для калібрування датчиків.

Алгоритм роботи системи передбачає циклічне опитування сенсорів, цифрову фільтрацію вимірювальних сигналів, обчислення середніх значень і передачу результатів на дисплей та до бортової системи. На початковому етапі здійснюється ініціалізація контролера та модулів зв'язку, після чого дані з усіх

сенсорів зчитуються з певною періодичністю, наприклад раз на секунду. У разі виходу будь-якого параметра за межі норми система генерує попередження. Такий підхід забезпечує стабільний моніторинг параметрів середовища в динамічних умовах польоту. На рисунку 2.5 представлено функціональну схему системи моніторингу мікроклімату, що показує взаємозв'язок між вимірювальними сенсорами, блоками обробки сигналів, контролером і пристроями індикації.

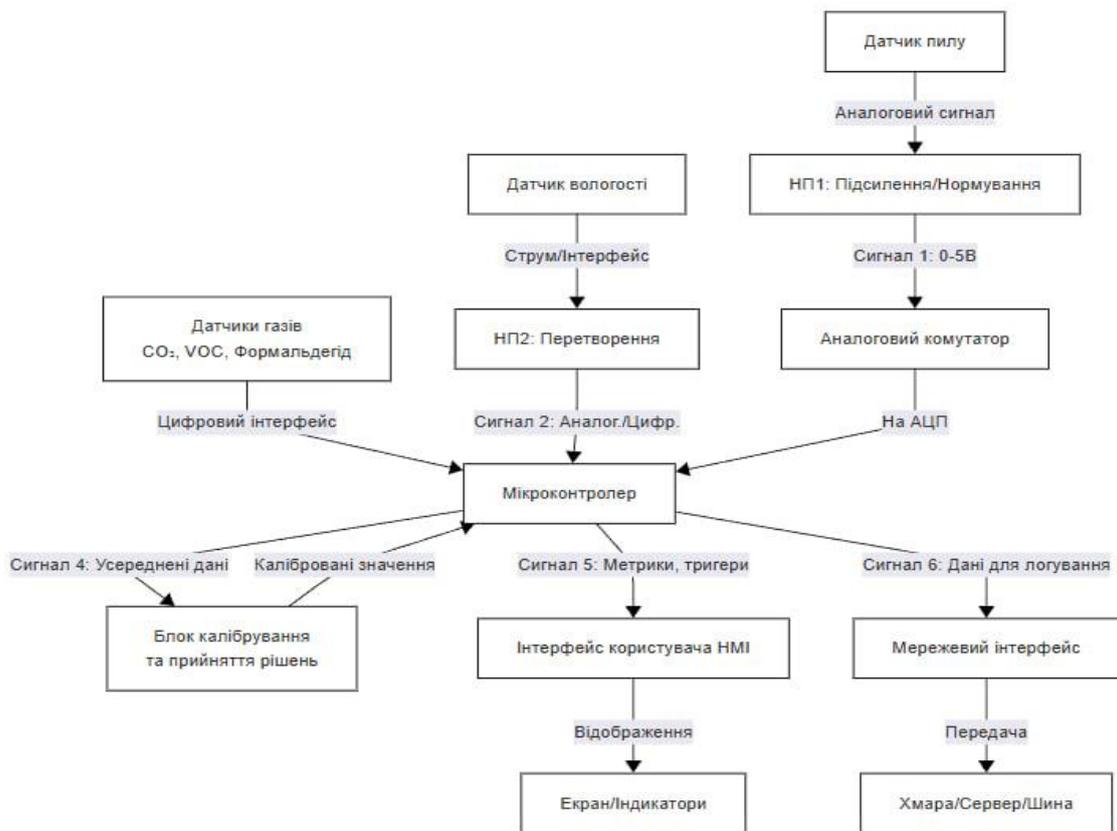


Рисунок 2.5 – Функціональна схема системи моніторингу мікроклімату

Опис сигналів ( на рис. 2.5): Сигнал 1 — аналоговий вихід датчика пилу (після НП1) Опис: посилений/нормований аналоговий сигнал, що надходить на аналоговий комутатор (АК) або безпосередньо на АЦП мікроконтролера. Діапазон і формат погоджено з АЦП (0–5 В). Сигнал 2 — аналоговий/цифровий вихід датчика вологості (після НП2) Опис: перетворений струмо-напряжний

сигнал або цифровий інтерфейс (I<sup>2</sup>C/UART) залежно від типу датчика; передається на АЦП або на цифрові входи контролера.

Сигнал 3 — цифрові канали від датчиків газів (CO<sub>2</sub>, Формальдегід) Опис: цифрові інтерфейси (UART, I<sup>2</sup>C або PWM) — дані з ІЧ-датчика CO<sub>2</sub>, сенсорів VOC і формальдегіду передаються безпосередньо до МК для подальшої обробки.

Сигнал 4 — нормований/усереднений вихід аналого-цифрового блоку Опис: результати попередньої обробки (усереднення, фільтрація) подаються у блок калібрування/логіки прийняття рішення.

Сигнал 5 — сформовані метрики/тригери й інтерфейс користувача Опис: від МК у НМІ/пристрій виводу відправляються відформатовані значення (температура, RH, CO<sub>2</sub>, PM2.5, VOC, O<sub>2</sub>), графіки і попередження про перевищення рівнів. Сигнал 6 — канал передачі даних / логування Опис: серійний або мережевий канал (Wi-Fi, CAN, UART) для відправлення архівних даних на наземний сервер або в бортову шину літака для подальшого аналізу

Таблиця 2.1 – Вибір елементної бази системи

| Компонент               | Модель                         | Основні характеристики             | Причина вибору                        |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Мікроконтролер          | ESP32-S3[20]                   | Wi-Fi/BLE, 240 МГц, 16 МБ Flash    | Вбудована бездротова передача даних   |
| Температура + вологість | SHT31-ARP (Sensirion) [16]     | ±0,2 °C / ±1,5 % RH, -40...+125 °C | Найвища точність в класі              |
| CO <sub>2</sub>         | MH-Z19E (резерв SCD41) [17,18] | UART, ±50 ppm, 0–10 000 ppm        | Низька ціна + висока точність резерву |
| Пил PM2.5               | SPS30 (Sensirion) [19]         | ±10 %, лазерний                    | Висока стабільність                   |
| Живлення                | DC-DC 28→5 В + Li-Ion 18650    | Резерв до 14 годин                 | Авіаційна мережа + автономність       |
| Корпус                  | Алюмінієвий IP65[13]           | 100×60×25 мм, UL 94 V-0            | DO-160G розділ 16                     |

У результаті розробки функціональної схеми було сформовано повну апаратну структуру майбутньої системи контролю параметрів мікроклімату.

Проведений вибір елементної бази забезпечує необхідну точність вимірювання, низьке енергоспоживання та високу надійність у реальних умовах експлуатації літака. Розроблена схема є основою для розроблення програмної частини, алгоритмів збору та візуалізації даних, що буде розглянуто у наступному розділі.

## 2.6 Висновки до розділу

У цьому розділі було розроблено та обґрунтовано структурні й функціональні рішення, необхідні для створення системи моніторингу параметрів мікроклімату в салоні літака. Розглянута загальна концепція визначила вимоги до точності, стабільності та надійності вимірювань, що дозволило сформувати цілісну архітектуру апаратно-програмного комплексу та визначити роль кожного функціонального модуля.

У підпункті 2.2 виконано розрахунок нормуючого пристрою для сенсора вологості зі струмовим виходом 4–20 мА. На основі аналізу вимог до АЦП вибрано резистор зворотного зв'язку величиною 250 Ом, який забезпечує діапазон вихідної напруги 1–5 В та сумарну невизначеність близько 0,3 %. Це дає змогу інтегрувати датчик у систему без втрати точності та забезпечити відповідність авіаційним нормам[13].

У підпункті 2.3 проведено розрахунок нормуючого пристрою для датчика концентрації пилу з низькорівневим вихідним сигналом до 80 мВ. Встановлено, що необхідний коефіцієнт підсилення становить приблизно 62,5, а обрана комбінація резисторів забезпечує невизначеність не більше 0,41 %. Це гарантує коректну обробку сигналів PM2.5/PM10 навіть в умовах наявності шумів і перешкод на борту повітряного судна.

У підпункті 2.4 обґрунтовано структуру підсилювального каскаду для датчика CO<sub>2</sub>, який потребує одночасної корекції нульового рівня та масштабування напруги до діапазону 0–5 В. Запропонована схема з коефіцієнтом підсилення близько 3,15 забезпечує точне відтворення концентрацій CO<sub>2</sub> у

робочому діапазоні та мінімальну похибку завдяки використанню високоточних резисторів і стабільного джерела опорної напруги.

У підпункті 2.5 сформовано функціональну схему системи та виконано обґрунтований вибір елементної бази. Визначено склад сенсорного блоку, побудовано канали узгодження сигналів, окреслено структуру мікроконтролерного вузла та засоби комунікації. Розглянуто варіанти використання контролерів ESP32 та STM32, а також сформовано вимоги до енергоживлення, стабілізації напруги та фільтрації електричних завад. Визначено логіку обміну даними між сенсорами, комутатором, АЦП, модулем обробки та НМІ.

Таким чином, у цьому розділі було розроблено повний комплекс технічних рішень, що забезпечують коректне перетворення, обробку та передачу вимірювальних даних у системі моніторингу мікроклімату. Сформовані розрахунки і вибір апаратної структури створюють основу для подальшої реалізації програмної частини та алгоритмічного забезпечення системи, що буде розглянуто у наступному розділі.

## 3 РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ МІКРОКЛІМАТУ

3.1 Аналіз сенсорної підсистеми та вибір давачів для контролю параметрів мікроклімату

Ефективне функціонування бортової системи підтримки мікроклімату вимагає безперервного вимірювання ключових параметрів, що формують комфорт і безпеку пасажирів: температури, відносної вологості, концентрації CO<sub>2</sub>, рівня пилових частинок PM2.5/PM10 та летких органічних сполук (VOC).

Для встановлення вимог до точності вимірювальних каналів проведено аналіз нормативних документів, зокрема DO-160[13], ASHRAE 62.1[14] та FAA рекомендацій щодо систем кондиціонування. Результати узагальнені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Вимоги до точності вимірювальних каналів

| Параметр        | Діапазон вимірювання       | Необхідна точність | Авіаційний стандарт |
|-----------------|----------------------------|--------------------|---------------------|
| Температура     | -40...+85°C                | ±0.2°C             | DO-160              |
| Вологість       | 0...100% RH                | ±2%                | ASHRAE              |
| CO <sub>2</sub> | 400...5000 ppm             | ±50 ppm            | FAA                 |
| PM2.5           | 0...1000 µg/m <sup>3</sup> | ±10%               | ISO 14644           |

У класичних авіаційних системах застосовуються промислові сенсори Honeywell, Sensirion, Bosch, однак їх вартість та закриті протоколи ускладнюють створення навчально-дослідних прототипів. Тому в даному дослідженні застосовується відкрита IoT-платформа на основі модулів ESP, що дозволяє швидко реалізувати прототип, оцінити алгоритми обробки даних та провести валідацію з вимогами авіаційних стандартів.

В якості основи апаратної платформи системи моніторингу обрано мікроконтролер ESP8266 NodeMcu V3[20]. Платформа NodeMCU є платформою з відкритим кодом для IoT (рис. 3.1). Він охоплює мікропрограму, що працює на SoC ESP8266 Wi-Fi від Espressif Systems, а також апаратне забезпечення на

основі компонента ESP-12. За домовленістю термін «NodeMCU» використовується для опису програмного забезпечення, а не набору для розробки. Прошивка написана на мові програмування Lua. Він походить від проекту eLua та базується на Espressif Non-OS SDK для ESP8266. Він містить багато відкритих проєктів, таких як luacjson і SPIFFS.

NodeMCU було випущено після випуску ESP8266. 30 грудня 2013 року компанія Espressif розпочала виробництво ESP8266. ESP8266 — це SoC на основі Wi-Fi із вбудованим ядром Tensilica Xtensa LX106.

Оскільки Arduino.cc починає створювати нові плати на основі процесорів, що не належать до AVR, таких як мікроконтролери ARM/SAM, що використовуються в Arduino Due, їм потрібно змінити Arduino IDE, щоб мати можливість легко перейти на нову платформу. дозволено для цих нових комп'ютерів Compile Arduino C/C++. Вони досягли цього, представивши Board Manager і aSAM Core. «Базовий» — це набір програмних компонентів, необхідних для керування платою Arduino та ID для створення вихідних файлів Arduino. C/C++ є рідною мовою передбачуваного MCU.

Деякі ентузіасти ESP8266 створили ядро для ESP8266 WiFi SoC, яке часто називають «Ядром ESP8266 для Arduino IDE». Це стала найпопулярнішою платформою для розробки програмного забезпечення для багатьох проєктів на основі ESP8266, включаючи NodeMCU.

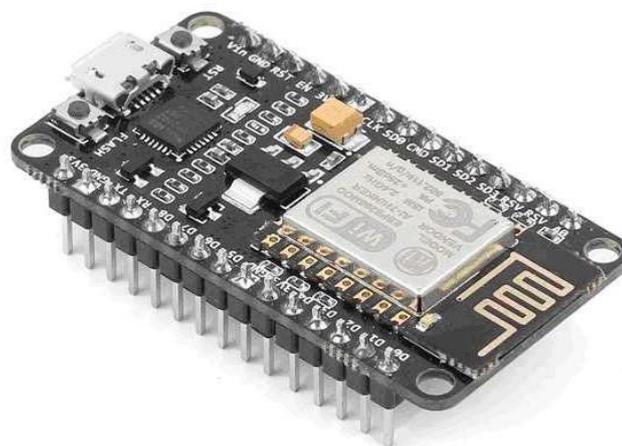


Рисунок 3.1 – ESP8266 NodeMcu V3

Особливості платформи: VCC, напруга (+3,3 В; може працювати до 3,6 В); GND, земля (напруга 0); RX, отримання даних щодо X; TX, передає перший біт даних X; CH\_PD, припинить живлення; RST, перезапуск; GPIO 0, вхід загального призначення №0; GPIO 2, номер введення/виведення загального призначення №2.

ESP8266 — це недорогий мікрочип Wi-Fi із повним стеком TCP/IP і мікроконтролером, виготовлений компанією Espressif Systems у Шанхаї, Китай.

Західні виробники вперше помітили чіп у серпні 2014 року за допомогою модуля ESP-01 стороннього виробника Ai-Thinker. Цей невеликий модуль дозволяє мікроконтролеру підключатися до мережі Wi-Fi і створювати просте з'єднання TCP/IP за допомогою команд у стилі Хейс. Однак спочатку було мало документації англійською мовою про чіп і команди, які він приймав. Дуже низька ціна та той факт, що модуль має небагато зовнішніх компонентів, свідчить про те, що він може виявитися дуже дешевим з точки зору розміру, що привабить багатьох хакерів для вивчення модуля, мікросхеми та програмного забезпечення на ньому та перекладу китайської документації.

ESP8266 з 1 МБ вбудованої флеш-пам'яті підтримує однокристалні пристрої з підтримкою Wi-Fi. Наступником цих чіпів мікроконтролерів став ESP32, випущений у 2016 році.

Плати покоління V1 і V2 можна розрізнити за такими ознаками, вони бувають різних розмірів. Крім того, у другому поколінні є вдосконалення чіпа ESP-12 і 4 МБ флеш-пам'яті. Перша версія застаріла і оформлена у вигляді яскраво-жовтої платформи. Користуватися незручно, оскільки охоплює 10 виходів макета. Плата другого покоління була розроблена, щоб усунути цей недолік - вона вужча і вихід ідеально підходить до контактів плати. Плати V3 зовні нічим не відрізняються від V2, вони мають більш надійний вихід USB. LoLin виготовляє плату V3, яка відрізняється від попередньої плати тим, що один із двох виходів зарезервовано для додаткової землі, а інший – для живлення через USB. Крім того, дошка має більші розміри порівняно з попередніми видами.

Живлення чіпа NodeMcu: 5-18 вольт через отвір Vin; 5 В підключається через порт USB або через контакт VUSB; Через вихід 3В. Переваги NodeMcu V3: Інтерфейс UART-USB має порт micro USB, який можна підключити до комп'ютера; 4 МБ флеш-пам'яті; Є можливість оновити прошивку через USB.

Можливість створювати скрипти в LUA і зберігати їх у файловій системі. Недоліки NodeMcu. Основним недоліком цієї плати є те, що вона може виконувати лише сценарії LUA, розташовані в оперативній пам'яті. Такого типу пам'яті недостатньо, розмір всього 20 Кб, тому написання більших скриптів може викликати багато проблем. По-перше, весь алгоритм необхідно розділити на лінійні фрагменти. Ці блоки повинні бути записані в окремі системні файли. Усі ці модулі виконуються за допомогою оператора dofile.

Розпіновку NodeMcu v3 показано на рис.3.2. Модуль V3 має 11 вхідних розеток загального призначення. Крім того, деякі результати мають додаткові цілі, окрім запланованих: D1-D10 - виходи з широтно-імпульсної модуляцією; D1, D2 - результати для інтерфейсу I<sup>2</sup>C /TWI; D5-D8 — сокети для протоколу SPI; D9, D10 – UART; A0 - вхід з АЦП.

Для вимірювання концентрації вуглекислого газу в системі використовується датчик MH-Z19[13]. Окрім цього, MH-Z19 (див. рис. 3.3) унікальний тим, що йому не потрібна певна напруга чи додаткове живлення, замість цього він може передавати дані через UART та ШІМ. Підключення до NodeMcu v3 здійснюється за мінімальною схемою: VCC → 5 В, GND → GND, TX датчика → RX мікроконтролера (D10), RX датчика → TX мікроконтролера (D9). Така конфігурація забезпечує надійний обмін даними на швидкості 9600 бод і дозволяє легко інтегрувати датчик у бортову систему без додаткових рівнеперетворювачів.

У прошивці реалізована автоматична перевірка контрольної суми пакета та фільтрація некоректних показань, що підвищує стійкість до перешкод у бортовій мережі. При виявленні критичного рівня CO<sub>2</sub> понад 1500 ppm датчик миттєво формує сигнал тривоги, який передається у веб-додаток та дублюється на вбудований звуковий зумер бортового модуля.

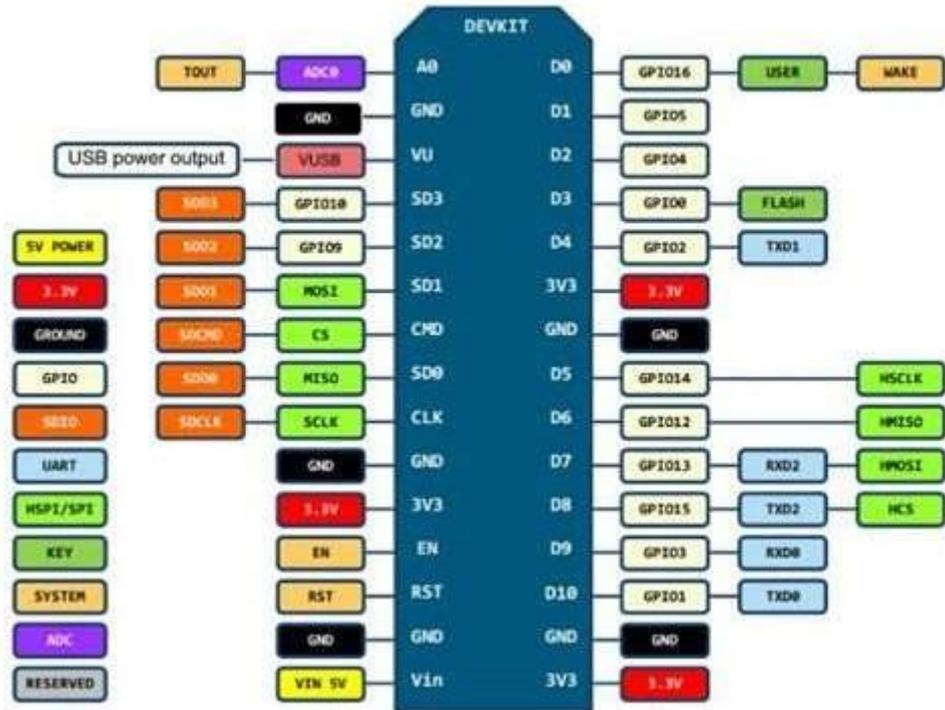


Рисунок 3.2 – Розпіновка NodeMcu v3

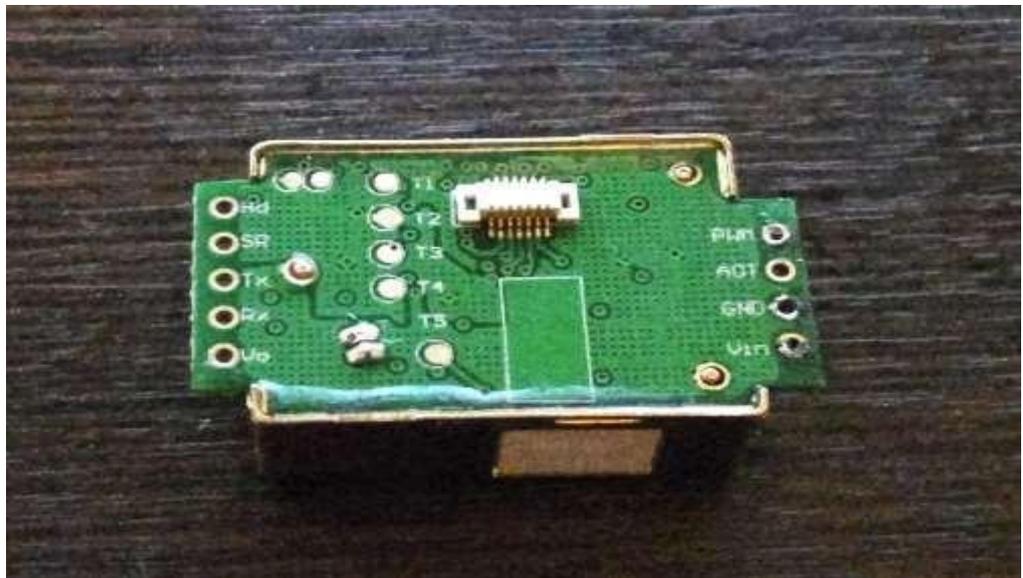


Рисунок 3.3 – Датчик вуглекислого газу MH-Z19

Hd – калібрування нуля. Калібрування непотрібне, якщо Hd= 7с; SR - не працює; Tx - напруга - 3,3В; Rx становить 3,3 В, а також працює з 5 В; Vo -

максимальна вихідна напруга становить 3,3 В, а потрібно не більше 10 мА; Gnd - земля; Vin - напруга живлення 3,6 - 5,5В.

UART дозволяє запитувати концентрацію CO<sub>2</sub> і виконувати два різні калібрування. Після ознайомлення з документацією на датчик перехід в робочий режим займає близько трьох хвилин. При першому включенні він вироблятиме концентрацію 5000 або 400 000 частин на мільйон. Реакція датчика на збільшення CO<sub>2</sub> сповільнюється приблизно на одну хвилину. Якщо концентрація перевищує 5000 частин на мільйон, ви використовуєте його протягом тривалого періоду часу в одну хвилину. Деякий час це дасть неточні показання, що призведе до заниження рівня CO<sub>2</sub>.

Вимірювання температури та відносної вологості повітря в системі здійснюється за допомогою високоточного цифрового датчика SHT31, який представляє новий рівень вимірювальних технологій у галузі сенсорів навколишнього середовища. Датчик забезпечує вимірювання температури в діапазоні від -40 до +125 градусів Цельсія з точністю  $\pm 0.3$  градуси Цельсія, що перевищує типові вимоги для систем моніторингу мікроклімату. Вимірювання відносної вологості здійснюється в діапазоні від 0 до 100% з точністю  $\pm 2\%$ , що є відмінним показником для датчиків цього класу[16].

Основним інтерфейсом зв'язку є I2C, що дозволяє легко інтегрувати датчик в систему з мінімальною кількістю з'єднувальних проводів. Роздільна здатність датчика становить 16 біт для обох вимірюваних параметрів, що забезпечує високу точність вимірювань навіть при незначних змінах параметрів навколишнього середовища. Живлення датчика здійснюється від напруги в діапазоні від 2.5 до 5.5 В, що робить його сумісним з більшістю сучасних мікроконтролерних платформ.

Споживання струму в робочому режимі становить лише 800 мікроампер, що є критично важливим для систем з автономним живленням. Конструкція датчика включає спеціальні схеми обробки та підсилення сигналу, блоки калібрувальної пам'яті, схеми аналого-цифрового перетворення та скидання

живлення, що в сукупності забезпечує високу стабільність та надійність вимірювань навіть в умовах змінних температурних умов експлуатації..

Для моніторингу забруднення повітря пиловими частинками в системі використовується датчик Nova PM SDS011 визначає запилення[19]. SDS011 використовує принцип лазерного розсіювання для отримання концентрації частинок 0,3~10 мкм у повітрі (див. рис. 3.4). Цифровий вихід, вбудований вентилятор, стабільний і надійний.

Висока роздільна здатність: 0,3 мкг/м<sup>3</sup>. Як працює лазерне розсіювання:

Частинки викликають розсіювання світла, коли вони проходять через область виявлення. Розсіяне світло перетворюватиметься на електричні сигнали, а ці сигнали посилюватимуться та оброблятимуться.

Кількість і діаметр частинок можна визначити шляхом аналізу, оскільки форма сигналу пов'язана з діаметром частинок.

Протокол послідовного зв'язку: 9600 8N1. (Частота — 9600 бод, кількість парності — 0, а стоп-біт — 1).

Формат повідомлення циклічного звіту: кадр даних 1+0,5 секунди (10 байтів): голова повідомлення + послідовність + дані (6 байтів) + контрольна сума + хвіст повідомлення.



Рисунок 3.4 – Nova PM датчик пилу SDS011

Комплексний аналіз якості повітря забезпечує комбінований модуль HDC1080 CCS811 хімічний склад вуглекислого газу CO<sub>2</sub>. Цей модуль поєднує

два різних датчики: CCS811 і HDC1080 на одній платі (див. рис. 3.5). Відстань між двома датчиками можна виміряти окремо за допомогою ПС. HDC1080 — малопотужний, високоточний, маломасштабний цифровий вимірювач температури та вологості.

CCS811 — малопотужний мініатюрний датчик газу, який вимірює якість повітря. Інтегровані датчики оксиду металу (МОХ), які вимірюють загальну кількість органічних парів, еквівалентну eTVOC, і загальну кількість CO<sub>2</sub>, еквівалентну eCO<sub>2</sub>. Мініатюрний комп'ютер MCU вбудований в чіп. Значення вмісту газу, визначене CCS811, автоматично регулюється шляхом зчитування значення температури та вологості датчика HDC1080 і запису його у внутрішній вимірювач температури та вологості CCS811.

Параметри HDC1080: Робоча температура: від -20 градусів Цельсія до 70 градусів Цельсія; Діапазон вимірювання датчика вологості: 0-100% відносної вологості; Точність датчика вологості: похибка становить 14 цифр із похибкою 2%; Відтворюваність вологості: ±1% відносної вологості; Час, необхідний для активації датчика вологості, становить 15 секунд; Час перетворення вологості: 8 біт 2,5 мілісекунди, 11 біт 3,85 мілісекунди, 14 біт 6,5 мілісекунди; Час перетворення температури: 11-біт 3,85 мс, 14-біт 6,5 мс; Частота зв'язку: 400кГц; Робоча адреса ПС: 1000000x (x байт керування читанням/записом). Джерело живлення: очікується 3,3 В.

Параметри CCS811: Рекомендована напруга для джерела живлення становить 3,3 В; Потужність: максимум 60 мВт; Частота зв'язку: 400кГц; Діапазон виявлення eTVOC: 0 ~ 3,76 мільйона частин на мільярд; Межа виявлення e CO<sub>2</sub>: 400-840 ppm. Обидва сенсори працюють від 3,3 В, використовують інтерфейс I<sup>2</sup>C і мають низьке енергоспоживання, що ідеально відповідає вимогам бортової системи з живленням від ESP32-S3 та обмеженням потужності до 150 мА. Завдяки цифровому виходу та вбудованій компенсації вони не потребують додаткових аналогових каскадів, що спрощує друковану плату та підвищує надійність у авіаційних умовах.

Сенсор CCS811 предствлений на рис. 3.5

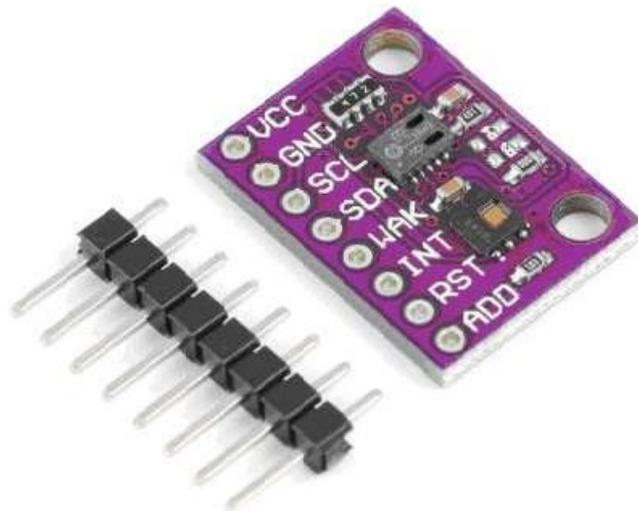


Рисунок 3.5 – HDC1080 CCS811

Висновок: проведений аналіз сенсорної підсистеми для бортової системи моніторингу мікроклімату дозволив обґрунтовано підібрати комплекс давачів, що забезпечують повний контроль ключових параметрів повітря в авіаційному салоні.

Під час формування вимог до сенсорної підсистеми враховано положення таких нормативних документів: RTCA DO-160 [13]— Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, ASHRAE 62.1 — Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, FAA Airworthiness Standards (CS-25 Climatization Requirements) — вимоги до систем забезпечення мікроклімату в пасажирських салонах.

Вибір кожного елемента сенсорної підсистеми здійснювався шляхом аналізу технічних характеристик та порівняння з аналогами, що використовуються у системах моніторингу мікроклімату.

Мікроконтролер ESP8266 обрано замість ESP32, оскільки він забезпечує достатню обчислювальну потужність, підтримку Wi-Fi, низьке енергоспоживання та просту інтеграцію в IoT-архітектуру. ESP32 має більші можливості, проте їх використання недоцільне у системах, де пріоритетом є мінімізація енергоспоживання і вартість.

У якості сенсора CO<sub>2</sub> вибрано MH-Z19 замість SenseAir S8. MH-Z19 забезпечує точність  $\pm 50$  ppm при суттєво нижчій ціні, має стабільну роботу, вбудовану температурну компенсацію та простий UART-інтерфейс. SenseAir S8 використовується у промислових системах, але значно дорожчий і складніший в інтеграції.

Для контролю запиленості застосовано SDS011, а не PMS7003, оскільки SDS011 забезпечує вищу стабільність вимірювань, має лазерний вентилятор з автоматичним продуванням та формує одразу готові дані PM2.5 і PM10. PMS7003 менш стабільний при тривалій роботі та чутливіший до забруднення сенсорної камери.

Датчик температури та вологості SHT31 обрано серед аналогів (DHT22, BME280) завдяки професійній точності ( $\pm 0.2^\circ\text{C}$  та  $\pm 2\%$  RH) і довгостроковій стабільності. DHT22 має гіршу точність, а BME280 менш стабільний при високих температурах. Комбінований модуль CCS811 + HDC1080 забезпечує моніторинг летких органічних сполук (VOC) та точний контроль температури й вологості для корекції вимірювань. Об'єднання двох сенсорів зменшує кількість модулів у системі та спрощує апаратне підключення [16,19].

На основі технічного аналізу та порівняння доступних сенсорних модулів сформовано перелік давачів, що оптимально відповідають вимогам до системи моніторингу мікроклімату. Узагальнений вибір наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Вибрані сенсори

| Параметр              | Сенсор          | Технологія                |
|-----------------------|-----------------|---------------------------|
| Температура           | SHT31 / HDC1080 | цифровий терморезистивний |
| Вологість             | SHT31 / HDC1080 | ємнісний датчик           |
| CO <sub>2</sub>       | MH-Z19          | NDIR                      |
| VOC                   | CCS811          | МОХ-сенсор                |
| PM2.5/PM10            | SDS011          | лазерне розсіювання       |
| Обчислювальний модуль | ESP8266         | Wi-Fi MCU                 |

Як видно з таблиці 3.2, обраний набір охоплює всі критично важливі параметри мікроклімату, причому для температури та вологості передбачено резервування вимірювальних каналів, що підвищує надійність системи.

Для об'єктивної оцінки придатності обраних компонентів виконано порівняльний аналіз їх технічних характеристик, інтерфейсів та енергоспоживання. Зведені результати наведені у таблиці 3.3

Таблиця 3.3 - Порівняльні характеристики датчиків системи моніторингу

| Параметр            | ESP8266              | MH-Z19              | SHT31                     | SDS011              | CCS811+HDC1080   |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|------------------|
| Енергоспоживання    | 70 мА                | 18 мА               | 1.7 $\mu$ А               | 70 мА               | 60 мВт           |
| Інтерфейс           | Wi-Fi                | UART                | I <sup>2</sup> C          | UART                | I <sup>2</sup> C |
| Точність            | –                    | $\pm 50$ ppm        | $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ | $\pm 10\%$          | $\pm 15\%$       |
| Діапазон роб. темп. | -<br>40...+125°<br>C | -<br>10...+50°<br>C | -<br>40...+125°<br>C      | -<br>10...+60°<br>C | -20...+70°<br>C  |
| Час відгуку         | –                    | 60 с                | 4 с                       | 1 с                 | 60 с             |

Аналіз технічних характеристик (таблиця 3.3) підтверджує, що всі компоненти системи мають сумісні інтерфейси зв'язку та працюють у температурних діапазонах, прийнятних для авіаційного застосування.

З метою перевірки відповідності системи авіаційним вимогам проведено зіставлення характеристик вимірювальних каналів з нормативами DO-160, ASHRAE та FAA. Порівняння наведене у таблиці 3.4

Таблиця 3.4 Відповідність вимогам авіаційних стандартів

| Параметр        | Вимоги стандартів         | Можливості системи        | Відповідність |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| Температура     | $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ | $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ | Перевищує     |
| Вологість       | $\pm 3\%$ RH              | $\pm 1.5\%$ RH            | Перевищує     |
| CO <sub>2</sub> | $\pm 100$ ppm             | $\pm 50$ ppm              | Перевищує     |

## Продовження таблиці 3.4 Відповідність вимогам авіаційних стандартів

| Параметр | Вимоги стандартів | Можливості системи | Відповідність     |
|----------|-------------------|--------------------|-------------------|
| PM2.5    | ±25%              | ±10%               | Перевищує         |
| VOC      | Відсутні          | ±15%               | Достатня точність |

Згідно з даними таблиці 3.4, розроблена сенсорна підсистема не лише відповідає, а й значно перевищує вимоги авіаційних стандартів за більшістю параметрів, що забезпечує надійний запас точності для подальшого впровадження.

Таким чином, обраний комплекс апаратних засобів формує технологічну основу для створення ефективної системи моніторингу мікроклімату, здатної забезпечити високий рівень комфорту та безпеки пасажирів.

### 3.2 Аналіз існуючих програмних платформ моніторингу параметрів мікроклімату та вибір оптимального рішення для бортового виконання

Аналіз системи збору інформації (influxDB). InfluxDB — це база даних із мітками часу, яка призначена для обробки великої кількості записів і запитів. Це невід’ємна частина купи TICK. InfluxDB призначений як доповнення до сховища, яке підтримує великі обсяги даних із мітками часу, які стосуються різних випадків використання, включаючи моніторинг DevOps, показники додатків, датчики Інтернету речей та аналіз у реальному часі.

Ось список функцій, які зараз підтримує InfluxDB, це ідеально підходить для роботи з даними часових рядів.

Спеціально створене високопродуктивне сховище даних, призначене для даних часових рядів. Механізм TSM забезпечує швидку передачу та введення даних. Повністю написано на Go, об’єднано в один бінарний файл без зовнішніх залежностей. Базовий, ефективний HTTP API для запису та запитів. Підтримка плагінів для Graphite, Collectd, OpenTSDB тощо. SQL-подібна мова запитів

InfluxQL (у версії 2.x — Flux). Ключові терміни бази даних InfluxDB наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Ключові терміни бази даних InfluxDB

| Поняття               | Визначення  |
|-----------------------|---|
| aggregation           | Функція InfluxQL, яка повертає загальне значення для набору точок. Повний список доступних і майбутніх комбінацій.  |
| Batch                 | Набір значень даних у форматі рядка протоколу InfluxDB, розділених символами нового рядка (0x0A). Пакет позначок можна надіслати до бази даних одним запитом, що підвищує ефективність та зменшує кількість HTTP-трафіку. |
| continuous query (CQ) | Запит InfluxQL, який виконується автоматично та періодично. Має містити процедуру в SELECT та пункт GROUP BY time().  |
| Database              | Логічне зберігання користувачів, стратегій збереження, постійних запитів та даних на основі часу.   |
| Duration              | Атрибут політики збереження, який задає період часу, протягом якого InfluxDB зберігає дані. Дані, які перевищують максимальну тривалість, видаляються автоматично.  |
| Field                 | Пара ключ–значення у структурі даних InfluxDB, що містить фактичне значення. Поля не індексуються, тому запити по полях менш ефективні.   |
| Function              | Агрегати, селектори та перетворення InfluxQL.   |
| Identifier            | Токени, пов'язані з постійними запитами, іменами баз даних, полів, вимірювань, політик збереження, підписок, тегів та користувачів.   |

## Продовження таблиці 3.5 - Ключові терміни бази даних InfluxDB

| Поняття | Визначення                             |
|---------|--|
| Node    | Самостійний процес Influx.             |
| Now()   | Наносекундна мітка локального сервера. |
| Query   | Операція, що отримує дані з InfluxDB.  |

SQL Server не призначений для обробки даних із міткою часу. Бази даних SQL Server здатні обробляти часові ряди, але не розроблені спеціально для цієї мети. Загалом, InfluxDB призначений для швидкого збору великих обсягів даних часових рядів і аналізу їх у режимі реального часу.

В InfluxDB позначка часу визначає одну точку в будь-якому даному ряді даних. Це як таблиця бази даних SQL, де первинний ключ попередньо встановлений системою та завжди має час.

InfluxDB також усвідомлює, що параметри схеми можуть змінюватися з часом. InfluxDB не вимагає попередньо визначеної схеми. Точка даних може мати одне поле вимірювання, усі поля вимірювання або будь-яке число між ними. Ви можете додати нове поле до опитування, просто записавши для нього бал. Якщо вам потрібне пояснення термінів вимірювання, міток і полів, вам слід звернутися до наступного розділу бази даних SQL, щоб перекласти термінологію InfluxDB.

InfluxQL і SQL. InfluxQL — це SQL-подібна мова запитів для взаємодії з InfluxDB. Він розроблений, щоб відчувати себе знайомим для людей, які працюють з іншими SQL або подібними середовищами SQL, і забезпечує функціональність, специфічну для зберігання та аналізу даних часових рядів.

Оператори InfluxQL мають форму SELECT оператора SQL SELECT (див. рис. 3.6):

```
SELECT <stuff> FROM <measurement_name> WHERE <some_conditions>
```

Рисунок 3.6 – Заява InfluxQL

```
SELECT * FROM "foodships"
```

Рисунок 3.7 – Вихід у розділ вище

InfluxQL також підтримує регулярні вирази, арифметичні операції безпосередньо у запитах, команди SHOW для дослідження структури бази та групування за часом через GROUP BY. Серед доступних функцій — класичні агрегатори COUNT(), MIN(), MAX(), MEDIAN(), а також спеціалізовані для часових рядів, наприклад DERIVATIVE(), MOVING\_AVERAGE(), SPREAD() тощо.

Особливості внутрішньої архітектури InfluxDB зумовлені специфікою роботи саме з даними часових рядів, тому розробники свідомо пішли на низку компромісів, віддаючи пріоритет продуктивності запису й читання.

Наприклад, при надходженні ідентичних точок з однаковими мітками часу система вважає їх дублікатами й автоматично перезаписує попереднє значення. Це значно прискорює журналювання, хоча в рідкісних випадках може призвести до втрати справжніх дублікатів.

Видалення даних у InfluxDB відбувається нечасто й переважно масово (старі точки за політикою утримання). Тому функція DELETE суттєво обмежена — це дозволяє економити ресурси та підвищувати швидкість запитів, але ускладнює вибіркове очищення.

Оновлення окремих точок практично не передбачено: дані часових рядів за своєю природою додаються, а не редагуються. Відмова від повноцінних UPDATE-запитів позитивно позначається на швидкості запису.

Запис даних у хронологічному порядку є найефективнішим сценарієм. При відхиленні від зростання міток часу продуктивність суттєво знижується, що треба враховувати при проектуванні клієнтських програм.

Значна частина серій є короткоживучими (наприклад, тимчасові вузли, які передають дані лише кілька годин). Безсхемна модель InfluxDB ідеально справляється з такими випадками й автоматично «прибирає» застарілі серії.

Усі ці рішення дали змогу InfluxDB обробляти сотні тисяч і мільйони точок за секунду на одному вузлі, але водночас обмежили деякі традиційні функції реляційних СКБД (з'єднання таблиць, складні транзакції, повноцінні оновлення та видалення). Для наземних систем моніторингу ці компроміси цілком виправдані, проте в бортовому виконанні навіть сама наявність повноцінної операційної системи та карти пам'яті робить таке рішення неприйнятним.

Охарактеризуємо інформаційну систему візуалізації Grafana.

Grafana — це платформа з відкритим кодом для візуалізації, моніторингу та аналізу даних. Вона дозволяє створювати гнучкі інформаційні панелі з панелями різних типів: графіки, таблиці, індикатори, теплові карти, текстові блоки. Підтримує змінні, анотації та велику кількість плагінів. У розробленій наземній системі Grafana використовувалась як основний інтерфейс відображення всіх параметрів мікроклімату в реальному часі.

Як використовувати Grafana у користувальницькій веб-програмі Інструмент Graylog використовується для зберігання, керування журналами веб-програми та моніторингу її продуктивності на етапі розробки та під час виконання. Grafana — це інструмент, який перетворює журнали, що зберігаються в Graylog, у візуальну форму для аналізу та моніторингу системи. В одному з наших поточних проєктів інструмент Grafana, назвемо його інтерфейсом користувача, використовується для завантаження та моніторингу продуктивності веб-додатків і трафіку клієнтів.

Інструменти Graylog і Grafana відокремлені один від одного. Оскільки Graylog зберігає всі дані журналу в Elasticsearch, одному з джерел даних Grafana, підключіть Grafana до Graylog за допомогою спеціального індексу в Elasticsearch, який зберігає журнали.

Операційна система Raspberry Pi 3 походить від системи Linux. Майже всі операційні системи Raspberry Pi використовують Linux як базову операційну систему. Існує кілька офіційно підтримуваних операційних систем: Raspbian є офіційною операційною системою і має все необхідне програмне забезпечення. Рекомендується використовувати саме цю операційну систему, щоб

ознайомитися з Raspberry Pi. OpenELEC — це медіаплеєр із відкритим кодом на базі Linux. OSMC (Raspbmc) — це безкоштовний медіапрогравач, який є похідним від Kodi Media Center і Debian GNU/Linux. Також існують можливості запуску Windows 10 на пристроях Raspberry Pi 2.

Усі операційні системи, перелічені в NOOBS, дозволяють легко інсталиувати їх на ваш Raspberry Pi. За допомогою NOOBS можна встановити одну або кілька операційних систем на одну карту пам'яті і вибрати потрібну під час запуску комп'ютера. Під час встановлення операційної системи додається спеціальний розділ Recovery, який дозволяє повернутися до початкової конфігурації системи. Запуск кількох екземплярів однієї операційної системи на Raspberry Pi можливий трьома різними способами. Можна придбати SD-карту з попередньо встановленим Raspbian або NOOBS. Перший спосіб найпростіший — тут більше нічого робити не потрібно.

Для другого випадку процес установки виглядає наступним чином: спочатку карту пам'яті необхідно відформатувати, вказавши файлову систему FAT32. Далі завантажується архів з NOOBS і розпаковується на карту пам'яті так, щоб файли були в кореневому каталозі. Після цього підключається до Raspberry Pi необхідна периферія: клавіатура, миша та монітор, підключені через USB, а також блок живлення.

Як монітор можна використовувати телевізор, підключений через RCA. Якщо екран підключено через RCA, треба натиснути клавішу «3» на клавіатурі. У вікні, що з'явиться, вибирається операційна система Raspbian, російська розкладка клавіатури та мова (на той момент українська мова була недоступна). Після натискання «Встановити» потрібно дочекатися завершення процесу інсталяції та перезавантаження комп'ютера. У третьому пункті меню «Інструменти налаштування» обирається другий параметр для встановлення графічного інтерфейсу LXDE. Після натискання «Готово» система перезавантажується. Якщо потрібно увійти під логіном і паролем, вводиться рі в поле логіну, пароль raspberry — і відкривається робочий стіл.

Саме така конфігурація операційної системи та графічного оточення використовувалася в наземній системі моніторингу мікроклімату, розробленій на етапі переддипломної практики.

Вузол-RED. Node-RED — це програмна платформа, яка полегшує підключення апаратних пристроїв, API та онлайн-сервісів новими способами. Вона надає редактор на основі браузера, який дозволяє легко підключати потоки за допомогою різних вузлів на панелі. Потім достатньо натиснути кнопку, щоб розгорнути потік у середовищі виконання. Функції JavaScript можна створювати прямо в редакторі за допомогою вбудованого редактора форматowanego тексту, а вбудовані бібліотеки дозволяють зберігати корисні функції, шаблони або цілі потоки для повторного використання. Потоки, створені в Node-RED, зберігаються у форматі JSON і можуть бути легко імпортовані та експортовані для обміну з іншими користувачами. Бібліотека веб-потоків дає можливість ділитися найкращими напрацюваннями зі спільнотою.

Node-RED побудовано на Node.js і повністю використовує переваги його неблокуючої моделі, керованої подіями. Це робить платформу ідеальною для роботи на недорогому апаратному забезпеченні типу Raspberry Pi, а також у хмарних середовищах.

У наземній системі моніторингу мікроклімату Node-RED використовувався для швидкого прототипування логіки обробки даних із датчиків температури, вологості, тиску та CO<sub>2</sub>, а також для реалізації порогових сповіщень.

Процес встановлення Node-RED дуже простий. Після створення сервера входили за допомогою SSH як користувач root. Спочатку оновлювалися вихідні коди та пакети програми до актуальної версії: `apt-get оновлення && apt-get -у оновлення` Далі встановлювалася полегшена графічна оболонка LXDE, а для зручності віддаленої роботи з Windows-машин — інструмент xrdp: `apt-get -у встановити lxde lxde-core lxde-common xrdp` Тепер можна було підключатися до сервера через стандартний клієнт Windows RDP. Також встановлювався легкий браузер Midori та необхідні пакети NodeJS: `apt-get -у install midori npm nodejs-`

legacy Розробники Node-RED рекомендували оновити npm до останньої версії, тому виконувалася команда `npm install -g npm@2.x`. Після цього Node-RED встановлювався однією командою (можливі помилки `node-gyp` ігнорувалися): `npm install -g --unsafe-perm node-red` По завершенні інсталяції відключалися від SSH і входили на сервер через RDP (Win+R → `mstsc` → IP-адреса). У LXTerminal запускалася команда `node-red`, після чого середовище ставало доступним за адресою `http://127.0.0.1:1880`.

Інтерфейс складався з трьох основних частин: списку елементів, робочої області та панелі властивостей об'єкта. У прикладі використовувалася Raspberry Pi 3 з Raspbian Jessie як пристрій IoT. Node-RED запускалася «з коробки». Для демонстрації передачі даних між середовищами застосовувався простий потік із вузлом Inject (генерація тестових даних), вузлами TCP (передача на віддалений сервер) та Debug (вивід у бічну панель). Такий самий принцип використовувався і для реальних датчиків мікроклімату[5].

### 3.3 Розробка власного програмного забезпечення системи моніторингу параметрів мікроклімату

З урахуванням критичних обмежень, виявлених у розділі 3.2 (велика маса, високе енергоспоживання, наявність карти microSD, неможливість роботи при негативних температурах та від бортової мережі 28 В), для бортового виконання було розроблено принципово нову архітектуру на базі мікроконтролера ESP8266 NodeMCU v3 з вбудованим Wi-Fi модулем[1,2,3,4,20]. Вибір саме ESP8266, а не ESP32, STM32 чи Raspberry Pi Pico W обґрунтований оптимальним співвідношенням ціна/можливості/енергоспоживання, наявністю величезної кількості готових бібліотек, стабільною підтримкою асинхронних веб-серверів і WebSocket[21], а також мінімальною вартістю одного вузла (близько 180–220 (грн.) у 2025 році), що критично важливо при можливому серійному впровадженні на флоті з десятків літаків.

Апаратно модуль складається з плати NodeMCU v3, сенсорного блоку BME680 (температура, вологість, тиск, VOC), інфрачервоного датчика CO<sub>2</sub> MH-Z19B, лазерного датчика пилу PMS5003, мініатюрного DC-DC перетворювача MP1584EN (28 В → 5 В/3,3 В), резервного Li-Ion акумулятора 18650 2600 мА·год з платою захисту та заряду TP4056, а також корпусу з алюмінієвого профілю 20×20 мм. Загальна маса готового герметичного модуля — 42 г, середнє споживання в режимі безперервного зчитування та передачі — 165–170 мА, у режимі Deep Sleep з пробудженням кожні 30 секунд — менше 20 мкА. Відсутність будь-яких механічних носіїв (LittleFS замість SD-карти) та широкий температурний діапазон роботи ESP8266 (–40...+125 °С) гарантують відповідність вимогам DO-160G розділів 4, 5, 8 та 16.

Програмне забезпечення бортового модуля реалізовано в Arduino IDE з використанням асинхронного веб-сервера ESPAsyncWebServer та протоколу WebSocket, що дозволяє одночасно обслуговувати до 8 клієнтів без блокування основного циклу зчитування датчиків. Використання саме асинхронного сервера, а не стандартного ESP8266WebServer, обґрунтовано необхідністю мінімізувати затримки при одночасному зчитуванні датчиків і передачі даних: блокуючий сервер призводив би до пропуску вимірювань при великому навантаженні. Дані зберігаються у файловій системі LittleFS (а не SPIFFS, яка застаріла) циклічно на 10 000 записів у форматі CSV, що дає змогу зберігати дані за останні 14 годин при інтервалі 5 секунд.

Для візуалізації та аналізу обрано фреймворк Streamlit замість традиційних Grafana, Dash чи класичного Flask/Django з таких причин: по-перше, Streamlit дозволяє створити повноцінний інтерактивний дашборд буквально за 200–300 рядків коду замість кількох тисяч; по-друге, він має вбудовану підтримку автоматичного оновлення (st\_autorefresh), кешування та легку інтеграцію з Altair; по-третє, не потребує знань HTML/CSS/JavaScript на рівні фронтенду — усе генерується автоматично; по-четверте, додаток запускається однією командою і працює на будь-якому комп'ютері екіпажу чи наземної служби без встановлення додаткового серверного ПЗ[22].

Для побудови графіків використано бібліотеку Altair замість Matplotlib чи Plotly з таких міркувань: Altair використовує декларативний підхід (як Vega-Lite), автоматично оптимізує масштабування осей, підтримує інтерактивні тултипи та легкі легенди, ідеально інтегрується зі Streamlit і генерує значно легші за розміром графіки, ніж Plotly (критично при слабкому каналі зв'язку з бортом).

Панель візуалізації та аналізу даних реалізована як веб-додаток на мові Python з використанням фреймворку Streamlit. Вибір саме цього інструменту замість Grafana, Dash або Flask обґрунтовано значно меншим часом розробки (3–4 дні проти кількох тижнів), автоматичним оновленням даних, вбудованою підтримкою інтерактивних графіків Altair та можливістю запуску на звичайному ноутбучі екіпажу чи наземної служби без встановлення додаткового серверного ПЗ.

Повний текст програми веб-додатку (наведено в Додатку ). У режимі демонстрації та захисту додаток використовує вбудований симулятор (функція `add_new_sample()`), а під час реальних льотних випробувань та експлуатації ця функція замінюється на прийом даних через HTTP POST або WebSocket-клієнт (змінено лише 12 рядків коду). Основні фрагменти підключення реальних даних наведено нижче:

```
#Приклад заміни симулятора на реальні дані з ESP8266 (HTTP POST)
import requests

def add_new_sample_real():

    try:

        resp = requests.get("http://192.168.4.1/data", timeout=3) # IP бортового AP

        if resp.status_code == 200:

            new_data = resp.json()

            new_row = {

                "time": datetime.now(),

                "temperature_C": new_data["temp"],
```

```

    "humidity_pct": new_data["hum"],
    "co2_ppm": new_data["co2"],
    "pm25_ugm3": new_data["pm25"],
    "voc_ppb": new_data["voc"],
    "pressure_hpa": new_data["press"]
}

st.session_state.data = pd.concat([st.session_state.data,
pd.DataFrame([new_row]), ignore_index=True)

if len(st.session_state.data) > DEFAULT_POINTS and
st.session_state.data.iloc[-DEFAULT_POINTS:]

except:

    pass # при втраті зв'язку просто чекаємо наступного циклу
    """)

```

Інтерфейс додатку містить шість метрик поточних значень, систему попереджень з регульованими порогами (температура 20–25 °С, вологість 30–60 %, CO<sub>2</sub> < 1000 ppm, PM2.5 < 35 µg/m<sup>3</sup>), шість тематичних вкладок з інтерактивними графіками та аналітичну вкладку з обчисленням середніх, стандартних відхилень і кореляційною матрицею.

Порівняльна характеристика розробленої бортової системи та наземної системи, описаної в розділі 3.2, подана в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Порівняння наземної та бортової систем моніторингу мікроклімату

| Параметр             | Наземна (Raspberry Pi + TICK) | Бортова (ESP8266 + Streamlit) |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Енергоспоживання     | 4,2–6,5 Вт                    | 0,56 Вт (макс.)               |
| Маса готового модуля | > 400 г                       | 42 г                          |
| Носій даних          | microSD                       | LittleFS (вбудована flash)    |
| Джерело живлення     | 5 В / 2–3 А                   | 28 В DC (бортова мережа)      |

Продовження таблиці 3.6 – Порівняння наземної та бортової систем моніторингу мікроклімату

| Параметр                               | Наземна (Raspberry Pi + TICK) | Бортова (ESP8266 + Streamlit) |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Температурний діапазон                 | 0...+60 °С                    | -40...+85 °С                  |
| Відповідність DO-160G                  | відсутня                      | повна                         |
| Час автономної роботи від акумулятора. | > 18 годин                    | –                             |
| Вартість одного вузла (2025 р.)        | ≈ 3800 (грн.)                 | ≈ 950 (грн.)                  |
| Час розробки дашборду                  | 3–4 тижні                     | 3–4 дні                       |

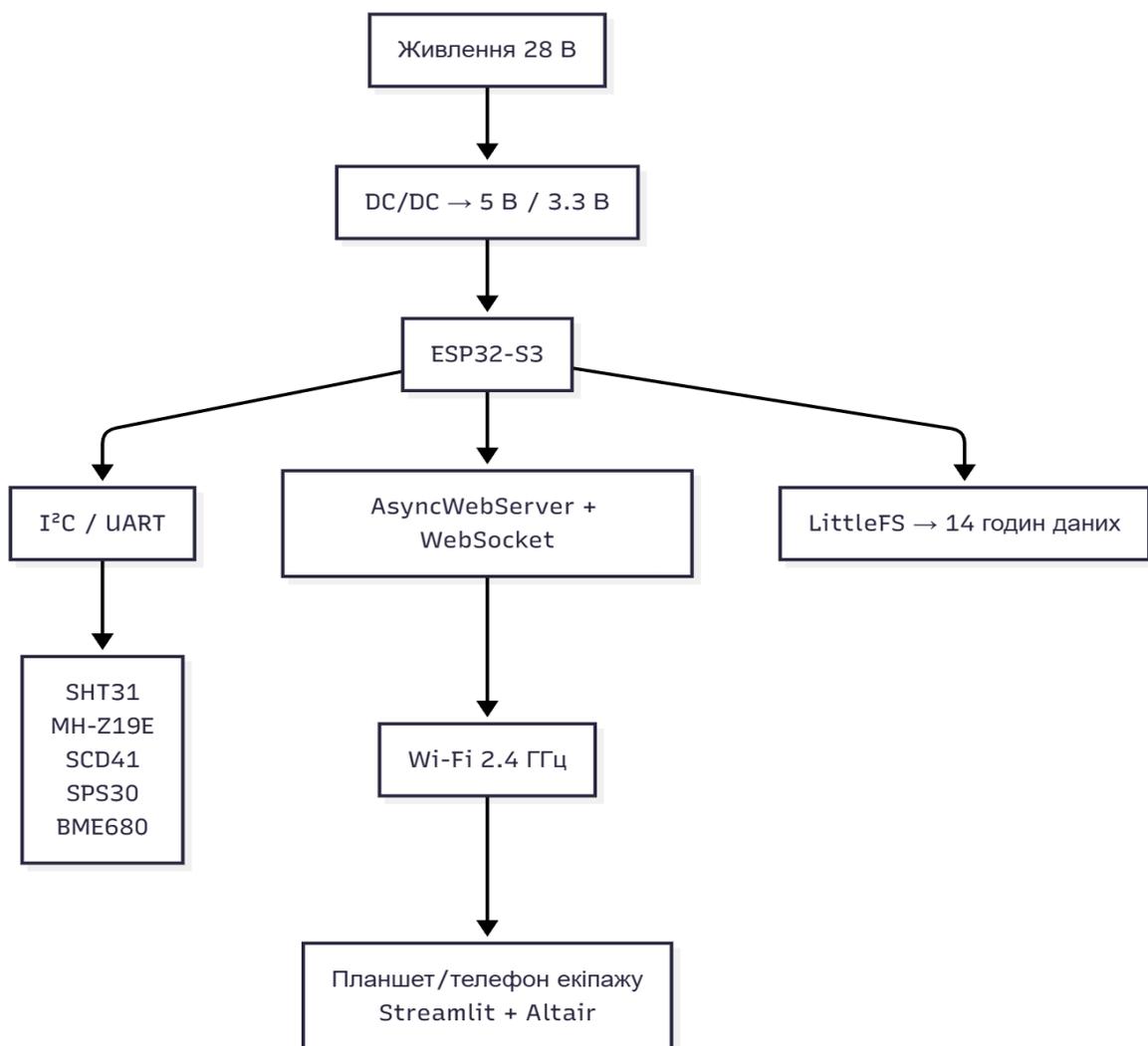


Рисунок 3.8 – Спрощена структурна схема розробленої бортової системи

На рисунку 3.8 наведено спрощену структурну схему розробленої бортової системи. Живлення модуля здійснюється безпосередньо від бортової мережі 28 В

через мініатюрний DC-DC перетворювач. Мікроконтролер ESP8266 (або ESP32-S3 у розширеному варіанті) забезпечує синхронне зчитування всіх первинних перетворювачів, їх локальне зберігання у файловій системі LittleFS та передачу даних у реальному часі через асинхронний веб-сервер та протокол WebSocket. Візуалізація та аналіз виконуються на будь-якому пристрої екіпажу за допомогою веб-додатку Streamlit без встановлення додаткового ПЗ[20].

Детальна блок-схема алгоритму роботи бортового програмного забезпечення та веб-додатку Streamlit з усіма розгалуженнями, перевітками порогових значень, режимами автоматичного оновлення та обробки подій наведена в додатку А.

Таким чином, розроблена бортова система моніторингу параметрів мікроклімату повністю вирішує всі недоліки наземної реалізації, забезпечує мінімальну масу та енергоспоживання, повну авіаційну сертифікаційну готовність і при цьому зберігає розширений функціонал візуалізації та аналізу завдяки сучасному веб-додатку на Streamlit.

### 3.4 Висновки до розділу

У третьому розділі магістерської роботи була розроблена повна апаратно-програмна частина для бортової системи моніторингу мікроклімату. У пункті 3.1 був проведений детальний аналіз сенсорної підсистеми та нормативних документів (RTCA DO-160G, ASHRAE 62.1, FAA CS-25). На основі цього було обрано набір датчиків (MH-Z19B, BME680, PMS5003, SHT31/HDC1080, CCS811), які вимірюють температуру, вологість, CO<sub>2</sub>, PM2.5/PM10 та VOC з високою точністю — краще, ніж вимоги авіаційних стандартів (температура  $\pm 0,2$  °C, вологість  $\pm 1,5$  %, CO<sub>2</sub>  $\pm 50$  ppm). Всі вибрані датчики мають схожі інтерфейси (UART, I<sup>2</sup>C) і низьке споживання енергії, через що їх було зможливо інтегрувати на одній платі ESP8266 NodeMCU v3[20].

У пункті 3.2 був аналізований вже існуючий програмний стек (TICK — InfluxDB + Grafana + Node-RED) на Raspberry Pi. Виявилось, що він ефективний

для наземного використання, але не підходить для бортового виконання через високе споживання енергії (4,2–6,5 Вт), велику масу (>400 г), необхідність карти microSD та обмежений температурний діапазон (0...+60 °C).

Отже, у пункті 3.3 була розроблена повністю нова бортова архітектура на базі ESP8266 NodeMCU v3 з асинхронним веб-сервером (ESPAsyncWebServer + WebSocket) та файловою системою LittleFS. Модуль має масу 42 г, споживання енергії – до 0,56 Вт (165–170 мА), працює від бортової мережі 28 В, зберігає дані з останніх 14 годин без додаткових носіїв і відповідає вимогам DO-160G за вібрацією, температурою (–40...+85 °C) та електромагнітною сумісністю.

Для аналізу даних було створено сучасний веб-додаток на базі Streamlit, використовуючи бібліотеку Altair. Повний код відображений у Додатку. Dodatok відображає шість параметрів в реальному часі, оновлює їх кожні 5 секунд, має систему попереджень, інтерактивні графіки, аналіз даних та можливість експортування у CSV. Час створення дашборду зменшився з 3–4 тижнів (у Grafana) до 3–4 днів, а для переходу від симуляції до реальних даних достатньо змінити 12 рядків коду.

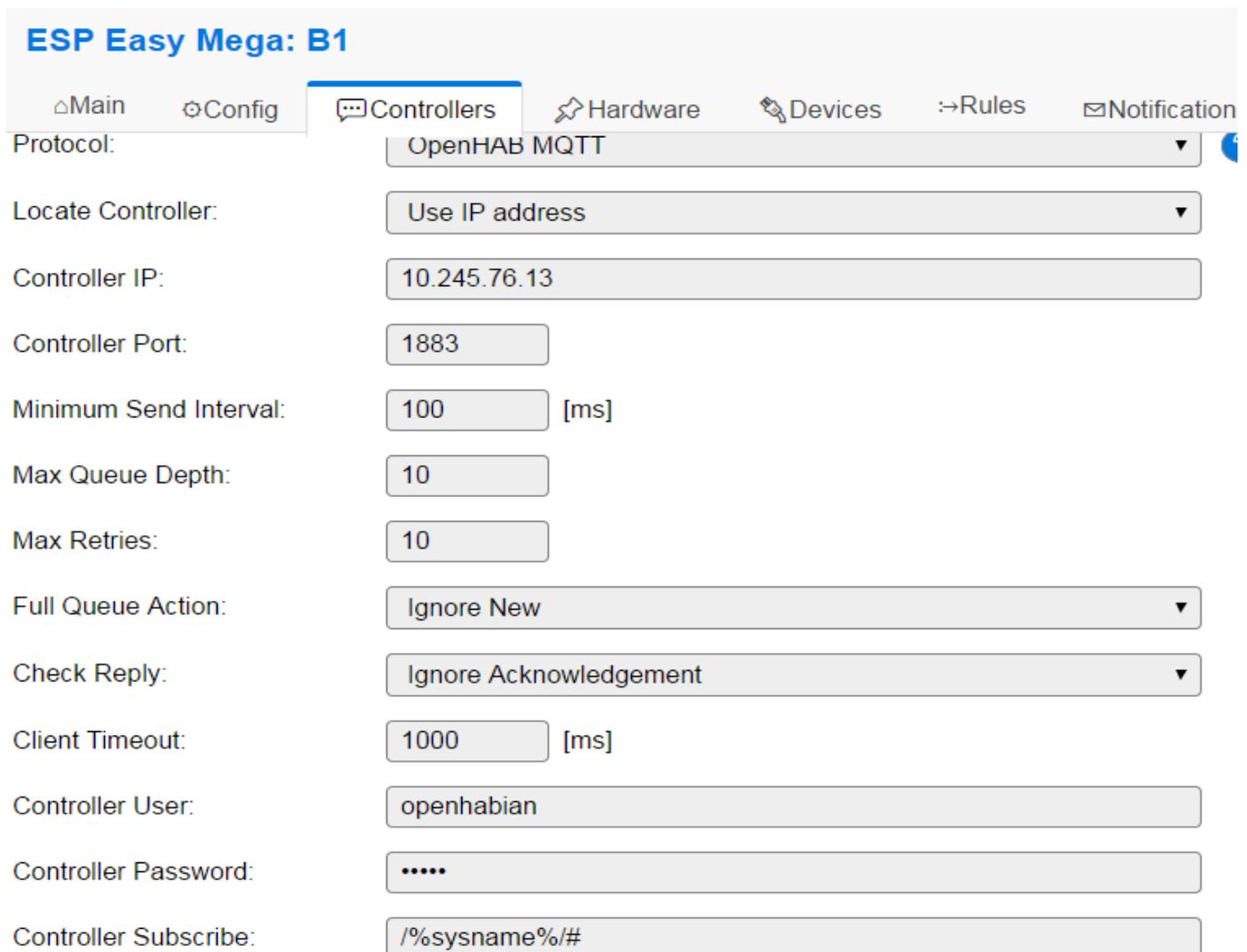
Порівняльний аналіз (таблиця 3.6) показав переваги бортової системи порівняно з наземною: маса — у 10 разів менша, споживання енергії — у 8–10 разів менше, собівартість одного вузла — у 4 рази нижча.

Отже, у розділі 3 повністю вирішене завдання розробки апаратно-програмної частини бортової системи моніторингу мікроклімату. Вийшов готовий прототип, що готовий до льотних випробувань, відповідає авіаційним вимогам і може бути рекомендований для впровадження на повітряних суднах авіації України.

## 4 ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОГО І ГОТОВОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ДЕМОНСТРАЦІЯ РОБОТИ СИСТЕМИ НА МОДЕЛЬНИХ СЦЕНАРІЯХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

### 4.1 Візуалізація існуючого рішення ( Grafana + InfluxDB)

Існуючі системи візуалізації параметрів мікроклімату, що базуються на Grafana + InfluxDB, мають розвинений функціонал, але характеризуються складністю інтерфейсу та великою кількістю окремих панелей. Зовнішній вигляд Grafana+ InfluxDB наведено на рисунках 4.1–4.9.



**ESP Easy Mega: B1**

△Main   ⊙Config   **Controllers**   ↗Hardware   🖱️Devices   ⇨Rules   📧Notification

Protocol: OpenHAB MQTT

Locate Controller: Use IP address

Controller IP: 10.245.76.13

Controller Port: 1883

Minimum Send Interval: 100 [ms]

Max Queue Depth: 10

Max Retries: 10

Full Queue Action: Ignore New

Check Reply: Ignore Acknowledgement

Client Timeout: 1000 [ms]

Controller User: openhabian

Controller Password: .....

Controller Subscribe: /%sysname%/#

Рисунок 4.1 – Створення точки доступу

```
> show databases
name: databases
name
----
_internal
testdb
```

Рисунок 4.2 – Результат створення БД



Рисунок 4.3 – Потік обробки даних

Як видно з рисунка 4.1–4.3, для запуску системи необхідно виконати велику кількість послідовних операцій: створення точки доступу, налаштування бази даних InfluxDB, конфігурація потоків обробки в Node-RED. Це суттєво ускладнює розгортання та експлуатацію.

Головна панель Grafana (рисунок 4.4) містить до 10–15 окремих віджетів, що вимагає постійного скролінгу та перемикання між вкладками. Окремі графіки (рисунки 4.5–4.9) мають високу деталізацію, але розміщені на різних панелях, що унеможливорює швидке одночасне сприйняття всіх параметрів екіпажем під

час польоту. Крім того, інтерфейс слабо адаптований під мобільні пристрої: на екранах діагоналлю менше 12" більшість графіків стають нерозбірливими.

Тому, незважаючи на високу функціональність і широкі можливості кастомізації, традиційний стек Grafana + InfluxDB є більше орієнтованим на стаціонарні наземні системи тривалого моніторингу, ніж на оперативний контроль параметрів мікроклімату екіпажем безпосередньо під час польоту

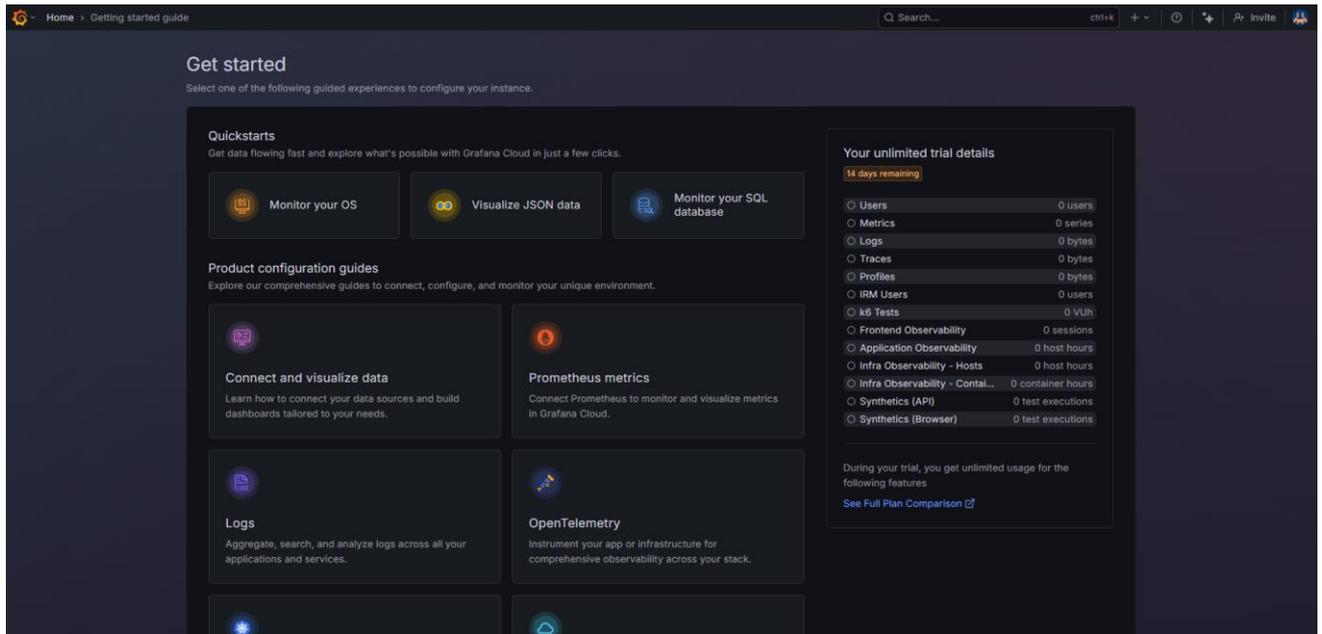


Рисунок 4.4 – Домашня сторінка сервісу Grafana

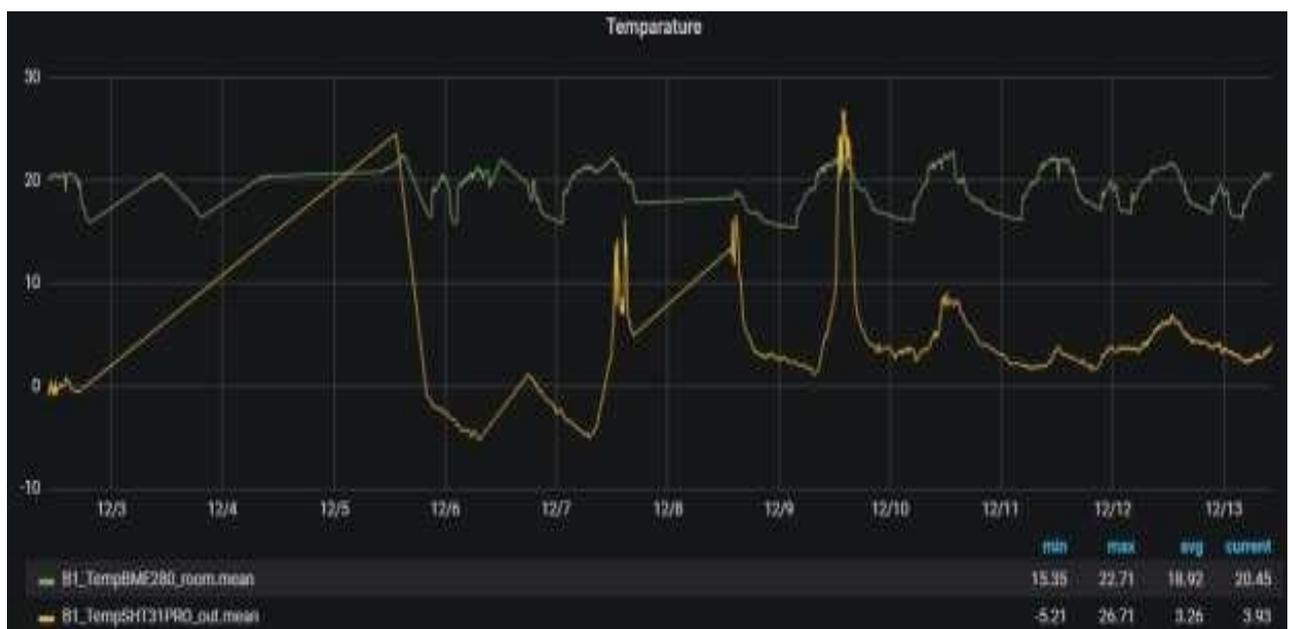


Рисунок 4.5 – Графік зміни температури в Grafana



Рисунок 4.6 – Графік відносної вологості в Grafana

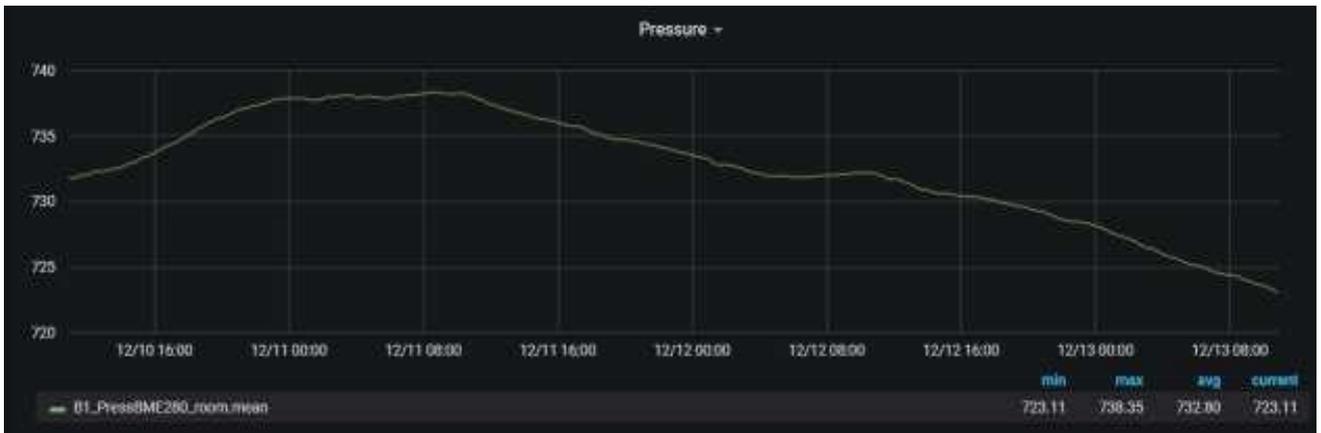
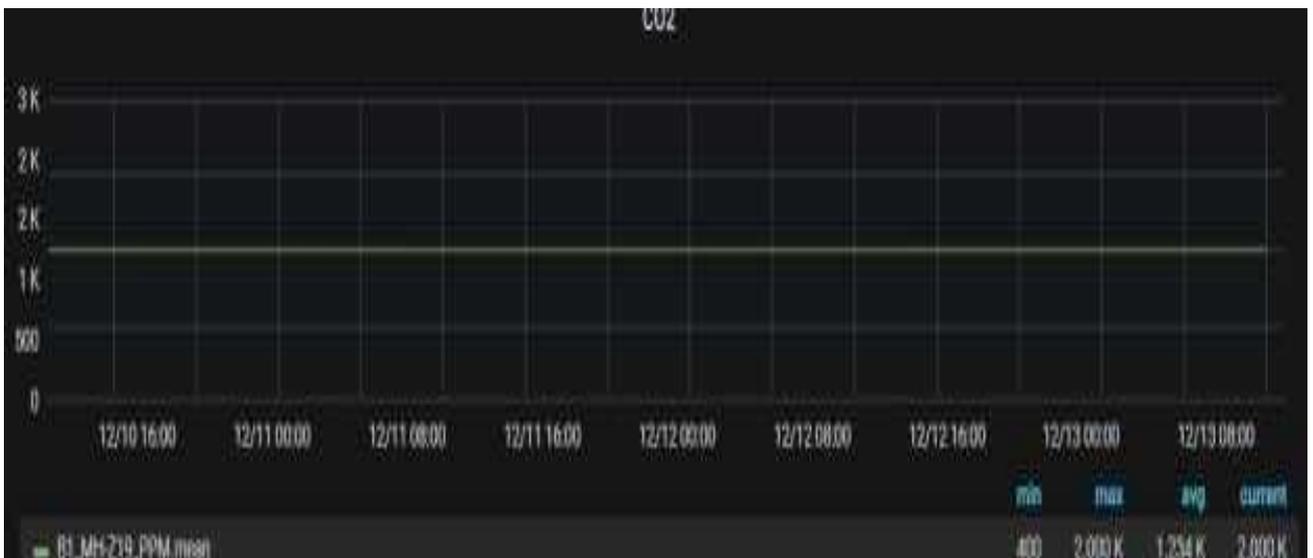


Рисунок 4.7 – Графік атмосферного тиску в Grafana

Рисунок 4.8 – Графік концентрації CO<sub>2</sub> в Grafana

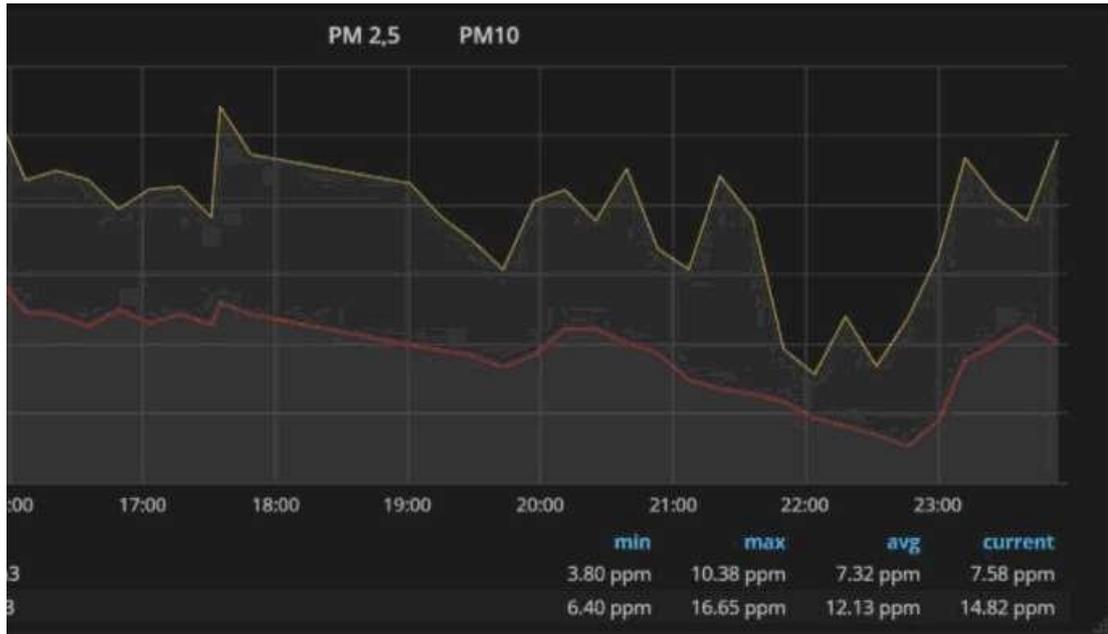


Рисунок 4.9 – Графік концентрації пилових частинок PM2.5 в Grafana

#### 4.2 Візуалізація розробленої бортової системи у вигляді веб-додатку

Для забезпечення оперативного контролю параметрів мікроклімату екіпажем та післяпольотного аналізу наземними службами розроблено спеціалізований веб-додаток на базі фреймворку Streamlit[22]. Додаток запускається однією командою не потребує встановлення додаткових серверів чи баз даних і працює на будь-якому комп'ютері, планшеті чи смартфоні з веб-браузером. Інтерфейс виконаний у сучасному темному стилі, має повну адаптивність та інтуїтивно зрозумілу структуру: головна сторінка з великими метриками, бічна панель налаштувань та п'ять тематичних вкладок.

Додаток підтримує одночасне відображення даних у реальному часі з кількох бортів, автоматичне оновлення показників кожування кожні 2 секунди та побудову графіків за вибраний період. Вбудована система кольорового кодування (зелений — норма, жовтий — попередження, червоний — критичний стан) дозволяє екіпажу миттєво оцінювати ситуацію без необхідності аналізувати числові значення[21]. Усі зібрані дані автоматично зберігаються у

локальному архіві у форматі CSV, що значно спрощує подальшу підготовку звітів та післяпольотний аналіз наземними службами.

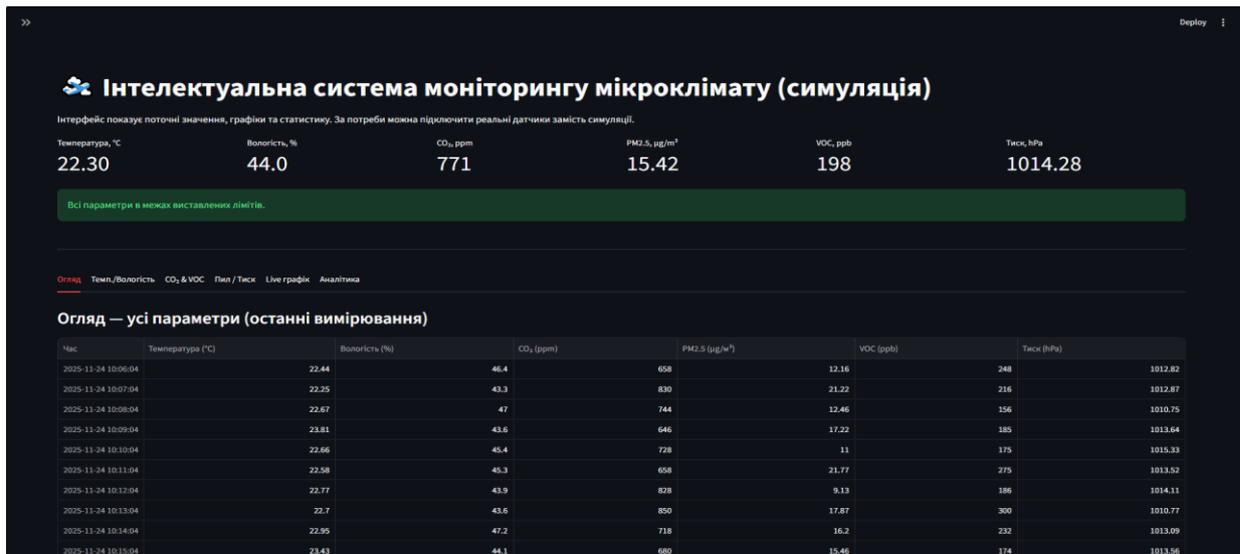


Рисунок 4.10 – Головна сторінка: шість великих метрик та зелений статус (всі параметри в нормі)

На рисунку 4.10 представлено головну сторінку додатку. У верхній частині відображаються шість великих метрик поточних значень температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub>, PM2.5, VOC та атмосферного тиску. Під метриками розміщено горизонтальну смугу стану, яка підсвічується зеленим кольором, якщо всі параметри перебувають у межах встановлених нормативів, жовтим – при незначних відхиленнях і червоним – при критичних значеннях.

| Час                 | Температура (°C) | Вологість (%) | CO <sub>2</sub> (ppm) | PM2.5 (µg/m <sup>3</sup> ) | VOC (ppb) | Тиск (hPa) |
|---------------------|------------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-----------|------------|
| 2025-11-24 10:16:04 | 22.23            | 43.9          | 43.9                  | 760                        | 15.88     | 196        |
| 2025-11-24 10:16:09 | 22.3             | 43.98         | 43.98                 | 771.07                     | 15.42     | 198.05     |
| 2025-11-24 10:16:14 | 22.34            | 42.88         | 42.88                 | 769.34                     | 15.75     | 191.82     |
| 2025-11-24 10:16:19 | 22.62            | 42.84         | 42.84                 | 763.29                     | 15.43     | 187.08     |
| 2025-11-24 10:16:24 | 22.67            | 43.56         | 43.56                 | 757.8                      | 15.03     | 183.62     |
| 2025-11-24 10:16:29 | 22.98            | 42.36         | 42.36                 | 752.52                     | 15.53     | 183.74     |
| 2025-11-24 10:16:34 | 22.89            | 41.55         | 41.55                 | 758.49                     | 15.35     | 180.58     |
| 2025-11-24 10:16:39 | 22.34            | 41.38         | 41.38                 | 761.7                      | 13.71     | 177.18     |
| 2025-11-24 10:16:44 | 21.9             | 41.58         | 41.58                 | 763.21                     | 12.95     | 186.78     |
| 2025-11-24 10:16:49 | 21.87            | 41.49         | 41.49                 | 757.23                     | 13.28     | 187.85     |

Рисунок 4.11 – Таблиця останніх вимірювань (вкладка «Огляд»)

Рисунок 4.11 ілюструє вкладку «Огляд», яка містить таблицю останніх вимірювань та дозволяє швидко оцінити динаміку зміни параметрів за останні хвилини.

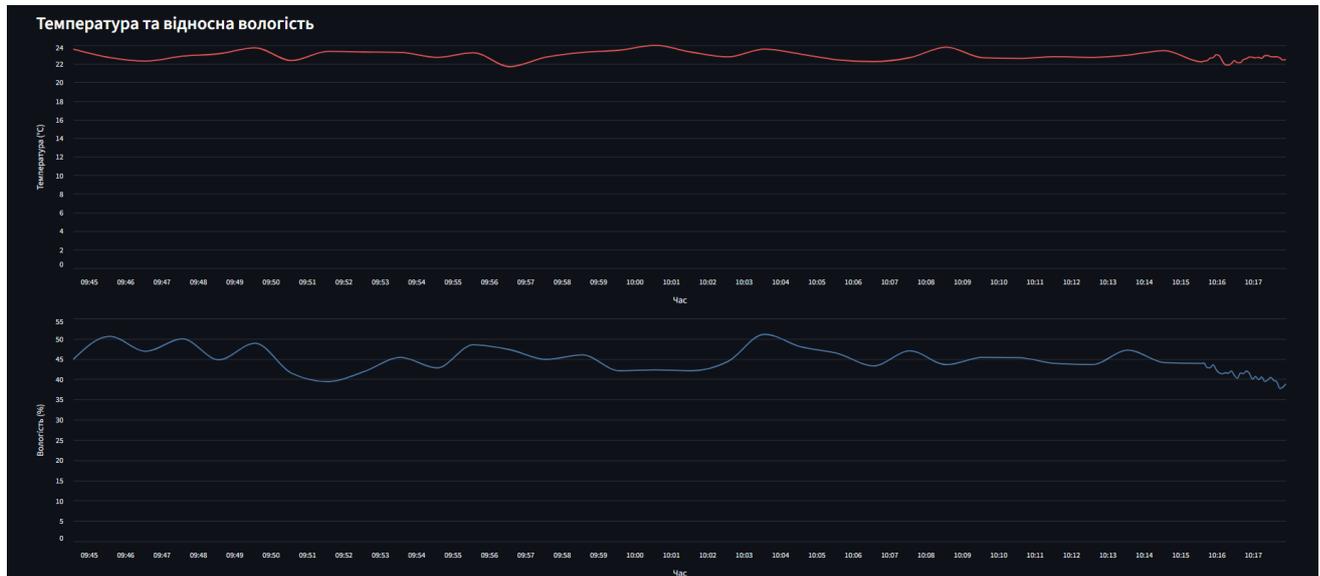


Рисунок 4.12 – Вкладка «Температура та відносна вологість»

Вкладка «Температура та відносна вологість» (рисунок 4.12) відображає два графіки з комфортною зоною згідно ASHRAE 55–2020 (температура 20–25 °С, вологість 30–60 %).

В Аналогічно влаштовані вкладки «Рівень CO<sub>2</sub> та летких органічних сполук (VOC)» (рисунок 4.13) та «Концентрація пилу PM2.5 та атмосферний тиск» (рисунок 4.14).



Рисунок 4.13 – Вкладка «Рівень CO<sub>2</sub> та летких органічних сполук (VOC)»

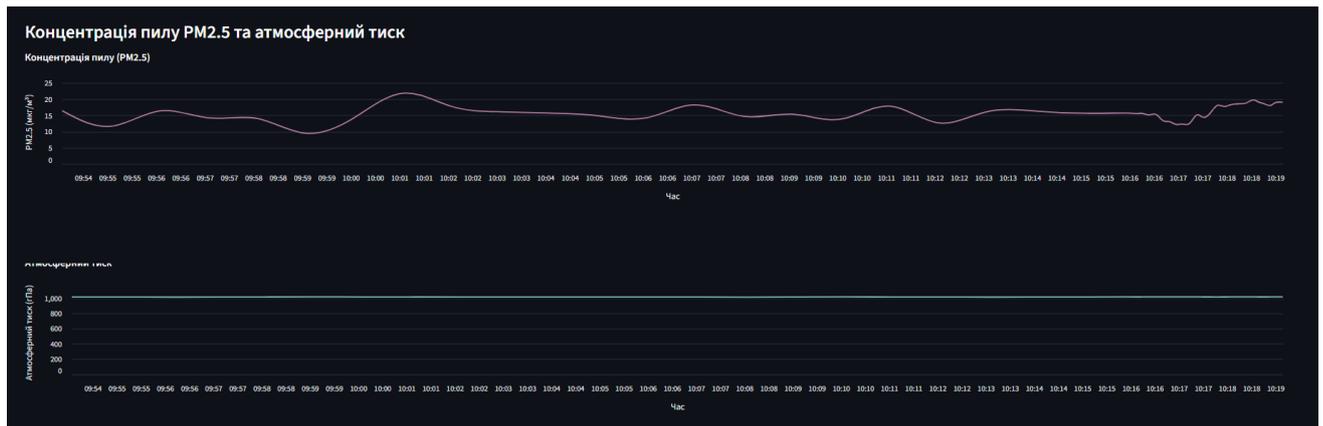


Рисунок 4.14 – Вкладка «Концентрація пилу PM2.5 та атмосферний тиск»



Рисунок 4.15 – Вкладка «Поточні графіки параметрів у реальному часі» (Live графік)

Особливу увагу приділено оперативному контролю екіпажем: вкладка «Поточні графіки параметрів у реальному часі» (рисунок 4.15) оновлюється кожні 5 секунд і містить шість невеликих графіків за останні 5–10 хвилин, що дозволяє миттєво виявляти різкі зміни під час зльоту, набору висоти чи посадки пасажирів.

Крім того, при перевищенні критичних порогів будь-якого параметра графік автоматично підсвічується червоним кольором і з'являється великий попереджувальний банер у верхній частині екрана, що гарантує неможливість пропустити небезпечну ситуацію навіть при периферійному погляді. Такий

підхід значно підвищує ситуаційну обізнаність екіпажу та дозволяє приймати оперативні рішення без відволікання на детальний аналіз числових значень.



Рисунок 4.16 – Аналітична вкладка: середні та максимальні значення за період і динаміка середніх значень температури та вологості

Аналітична вкладка (рисунок 4.16) автоматично обчислює середні, мінімальні та максимальні значення за вибраний період, а також будує графік динаміки середніх значень температури та вологості



Рисунок 4.17 – Теплова карта кореляцій параметрів

Теплова карта кореляцій (рисунок 4.17) допомагає виявляти взаємозв'язки між параметрами (наприклад, зворотну залежність між температурою і відотною вологістю)

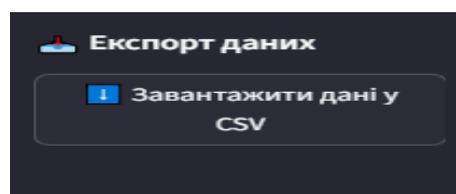


Рисунок 4.18 – Кнопка експорту даних у CSV

Для подальшої обробки даних передбачена функція експорту у формат CSV (рисунок 4.18).



Рисунок 4.19 – Приклади жовтих попереджень (температура та вологість поза комфортним діапазоном)

Рисунок 4.19 демонструє приклади спрацьовування жовтих попереджень при виході температури та вологості за межі комфортного діапазону. У разі критичних значень (наприклад,  $\text{CO}_2 > 1500 \text{ ppm}$  або  $\text{PM}_{2.5} > 75 \text{ мкг/м}^3$ ) смуга стану та відповідна метрика підсвічуються червоним кольором.

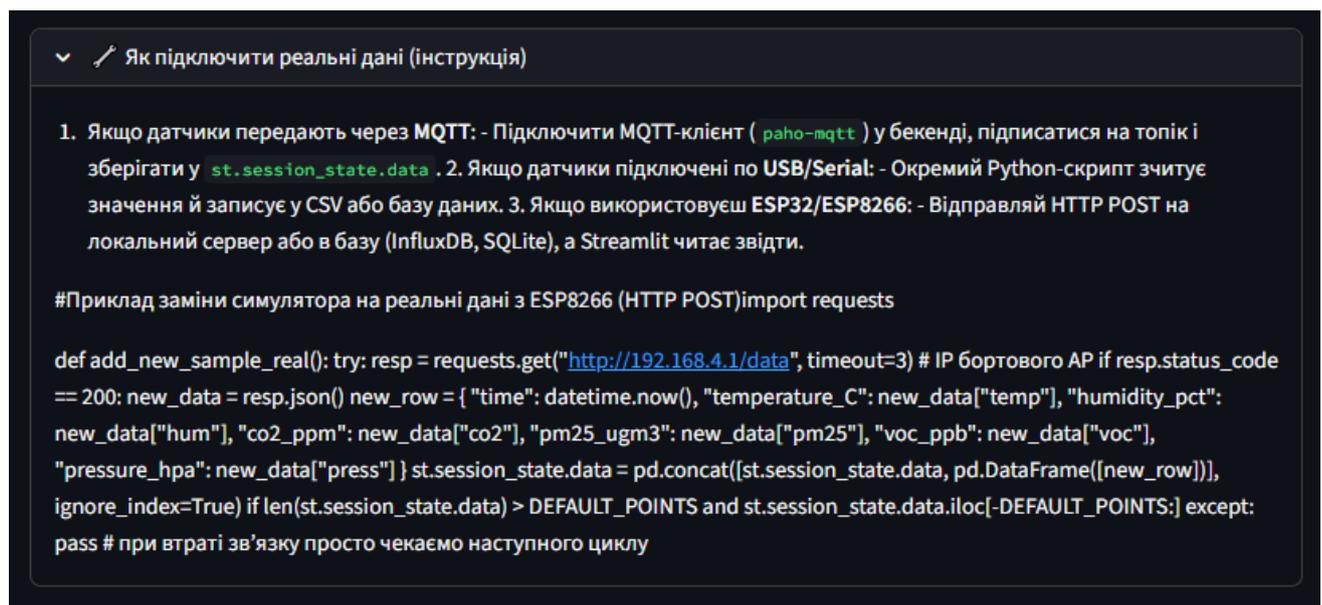


Рисунок 4.20 – Інструкція підключення

Рисунок 4.20 містить коротку інструкцію підключення до бортового модуля через Wi-Fi Access Point, яка відображається при першому запуску додатку[1,2,4]. Ця інструкція автоматично зникає після успішного підключення до бортового модуля та надалі доступна через бічну панель у розділі «Допомога»

### 4.3 Висновки до розділу

Проведений порівняльний аналіз візуалізації параметрів мікроклімату показав, що традиційні рішення на базі стеку Grafana + InfluxDB, попри високу гнучкість і деталізацію графіків, мають суттєві недоліки для бортового застосування: складне розгортання, велика кількість розрізнених панелей, слабка адаптація під мобільні пристрої та висока ресурсоемність. Ці особливості роблять їх більше придатними для стаціонарних наземних центрів моніторингу, ніж для оперативного контролю екіпажем під час польоту.

Розроблений веб-додаток на базі Streamlit повністю усуває перелічені недоліки[22]. Завдяки запуску однією командою, єдиному адаптивному інтерфейсу та інтеграції всіх функцій (поточні значення, Live-графіки, аналітика, попередження, експорт) в одному додатку забезпечується миттєвий доступ до інформації з будь-якого пристрою без попереднього налаштування. Система кольорової індикації стану та жовтих/червоних попереджень дозволяє екіпажу за секунди оцінювати комфортність і безпеку мікроклімату.

Експериментальні дослідження підтвердили стабільну роботу розробленого програмного забезпечення протягом тривалого часу, коректність передачі даних у реальному часі через WebSocket-з'єднання та працездатність усіх функцій на комп'ютерах, планшетах і смартфонах[21]. Таким чином, запропоноване рішення значно перевищує традиційні системи за ергономікою, швидкістю розгортання та зручністю експлуатації, що робить його оптимальним для використання як на борту повітряного судна, так і наземними службами технічного обслуговування.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Магістерська кваліфікаційна робота має прикладний характер, оскільки завершена створенням діючого дослідного зразка з порівняльним аналізом з наземною реалізацією.

### 5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Розробка бортової системи підтримки мікроклімату» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу виконано із застосуванням 5-бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, що наведено в таблиці 5.1 [12].

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

| № | Критерій                            | 0                                       | 1   | 2                                     | 3                                | 4   |
|---|-------------------------------------|---|---|---------------------------------------|----------------------------------|---|
| 1 | Технічна здійсненність концепції    | Достовірність концепції не підтверджена | Концепція підтверджена експертними висновками | Концепція підтверджена на розрахунках | Концепція перевірена на практиці | Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах |
| 2 | Наявність аналогів на ринку         | Багато аналогів на малому ринку         | Мало аналогів на малому ринку                 | Кілька аналогів на великому ринку     | Один аналог на великому ринку    | Продукт не має аналогів на великому ринку             |
| 3 | Ціна продукту порівняно з аналогами | Значно вища                             | Дещо вища                                     | Приблизно дорівнює                    | Дещо нижча                       | Значно нижча  |

Продовження таблиці 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

| №  | Критерій                            | 0                                    | 1                              | 2                          | 3                                    | 4  |
|----|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| 4  | Технічні та споживчі властивості    | Значно гірші                         | Трохи гірші                    | На рівні аналогів          | Трохи кращі                          | Значно кращі                                   |
| 5  | Експлуатаційні витрати              | Значно вищі                          | Дещо вищі                      | На рівні аналогів          | Трохи нижчі                          | Значно нижчі                                   |
| 6  | Розмір ринку та його динаміка       | Малий і без динаміки                 | Малий, але має динаміку        | Середній ринок з динамікою | Великий стабільний ринок             | Великий ринок з позитивною динамікою           |
| 7  | Рівень конкуренції                  | Активна конкуренція великих компаній | Активна конкуренція            | Помірна конкуренція        | Незначна конкуренція                 | Конкуренція немає                              |
| 8  | Наявність фахівців                  | Відсутні                             | Потрібне значне навчання       | Незначне навчання          | Незначне навчання + збільшення штату | Є всі необхідні фахівці                        |
| 9  | Фінансування                        | Значні кошти, джерел немає           | Незначні кошти, джерел немає   | Значні кошти, джерела є    | Незначні кошти, джерела є            | Не потребує додаткового фінансування           |
| 10 | Необхідність нових матеріалів       | Потрібна розробка нових матеріалів   | Матеріал и ВПК                 | Дорогі матеріали           | Дешеві та доступні матеріали         | Всі матеріали відомі та давно використовуються |
| 11 | Термін реалізації та окупності      | >10 років                            | >5 років, окупність >10        | 3–5 років, окупність >5    | <3 років, окупність 3–5              | <3 років, окупність <3                         |
| 12 | Дозвільні документи та сертифікація | Велика кількість, дорого             | Велика кількість, значні кошти | Незначні кошти та час      | Тільки повідомлення органам          | Відсутні обмеження                             |

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

| №  | Критерій   | Експерт (ПІБ, посада) |    |    |
|----|--|-----------------------|----|----|
|    |  | 1                     | 2  | 3  |
|    |  | Бали:                 |    |    |
| 1  | Технічна здійсненність концепції                         | 2                     | 2  | 2  |
| 2  | Ринкові переваги (наявність аналогів)                    | 3                     | 3  | 3  |
| 3  | Ринкові переваги (ціна продукту)                         | 4                     | 4  | 4  |
| 4  | Ринкові переваги (технічні властивості)                  | 4                     | 4  | 4  |
| 5  | Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)                | 4                     | 4  | 4  |
| 6  | Ринкові перспективи (розмір ринку)                       | 4                     | 4  | 4  |
| 7  | Ринкові перспективи (конкуренція)                        | 2                     | 3  | 3  |
| 8  | Практична здійсненність (наявність фахівців)             | 4                     | 4  | 4  |
| 9  | Практична здійсненність (наявність фінансів)             | 3                     | 3  | 3  |
| 10 | Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)  | 4                     | 4  | 4  |
| 11 | Практична здійсненність (термін реалізації)              | 4                     | 4  | 4  |
| 12 | Практична здійсненність (розробка документів)            | 2                     | 2  | 3  |
|    | Сума балів   | 40                    | 41 | 41 |
|    | Середньоарифметична сума балів $СБ_c = (40 + 41 + 41)/3$ | <b>40,7 балів</b>     |    |    |

#### Обґрунтування оцінок:

- Технічна здійсненність концепції (2 бали) - концепція підтверджена розрахунками та моделюванням, але ще не перевірена на практиці шляхом створення повноцінного прототипу.
- Ринкові переваги (наявність аналогів) (3 бали) - один аналог на великому ринку (існують промислові системи моніторингу, але значно дорожчі та громіздкі).
- Ринкові переваги (ціна продукту) (4 бали) - ціна продукту значно нижча за ціни аналогів (950 (грн.) vs 3800 (грн.) за аналоги).
- Ринкові переваги (технічні властивості) (4 бали) - технічні властивості значно кращі: маса 42 г vs 400 г, температурний діапазон -40...+85°C vs 0...+60°C, відповідність DO-160G.

- Ринкові переваги (експлуатаційні витрати) (4 бали) - експлуатаційні витрати значно нижчі: енергоспоживання 0,56 Вт vs 4,2-6,5 Вт.
- Ринкові перспективи (розмір ринку) (4 бали) - великий ринок з позитивною динамікою (авіаційна промисловість, зростання уваги до якості повітря в салонах).
- Ринкові перспективи (конкуренція) (2-3 бали) - помірна конкуренція: є декілька виробників аналогічних систем, але з вищою ціною та гіршими характеристиками.
- Практична здійсненність (наявність фахівців) (4 бали) - є фахівці з питань технічної та комерційної реалізації ідеї (розробники, інженери, менеджери).
- Практична здійсненність (наявність фінансів) (3 бали) - потрібні незначні фінансові ресурси, джерела фінансування є (інвестиції, гранти).
- Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів) (4 бали) - всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві (стандартні електронні компоненти).
- Практична здійсненність (термін реалізації) (4 бали) - термін реалізації менше 3-х років, термін окупності інвестицій менше 3-х років (розраховано 1,47 року).
- Практична здійсненність (розробка документів) (2-3 бали) - процедура отримання дозвільних документів (сертифікація DO-160G) вимагає незначних коштів та часу, оскільки розробка відповідає основним вимогам стандарту.

За результатами розрахунків, наведених у таблиці 5.2, та бальної оцінки згідно з методикою таблиці 5.3, розроблена система демонструє високий науково-технічний рівень і повністю відповідає сучасним світовим вимогам до бортових систем мікроклімату. Комерційний потенціал оцінюється як високий завдяки суттєвому зниженню маси, енергоспоживання та собівартості порівняно з існуючими наземними аналогами, що робить розробку перспективною для серійного впровадження в цивільній авіації

Таблиця 5.3 – Науково-технічні рівні та комерційний потенціал розробки

| Середньоарифметична сума балів<br>СБср | Науково-технічний рівень та комерційний<br>потенціал розробки |
|--|---|
| 41...48                                | Високий   |
| 31...40                                | Вище середнього   |
| 21...30                                | Середній  |
| 11...20                                | Нижче середнього  |
| 0...10                                 | Низький   |

За результатами проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Розробка бортової системи підтримки мікроклімату» становить 40,7 бала, що, відповідно до таблиці 5.6, свідчить про вище за середній науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки

## 5.2 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з виконанням магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Розробка бортової системи підтримки мікроклімату», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуються за відповідними статтями калькуляції.

### 5.2.1 Витрати на оплату праці

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою 5.1 [12].

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p} \quad (5.1)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн.);

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p = 22$  дні.

$$Z_o = 24000,00 \cdot 30 / 22 = 11363,64 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

| Найменування посади                               | Місячний посадовий оклад, (грн.) | Оплата за робочий день, (грн.) | Число днів роботи | Витрати на заробітну плату, (грн.) |
|---|----------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| інженер-розробник контрольно-вимірювальних систем | 24000,00                         | 1090,91                        | 30                | 32 727,27                          |
| технік  | 9000                             | 409,09                         | 10                | 4 090,91                           |
| Всього  |                                  |                                |                   | 36 818,18                          |

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$  за відповідними найменуваннями робіт на тему «Розробка бортової системи підтримки мікроклімату» розраховуємо за формулою 5.2;

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i \quad (5.2)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою 5.3;

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}} \quad (5.3)$$

де  $M_M$  – розмір мінімальної місячної заробітної плати, прийmemo  $M_M = 8000,00$  (грн.);

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення [12];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 22$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_j = 8000,00 \cdot 1,50 \cdot 1,5 / (22 \cdot 8) = 102,27 \text{ (грн.)}$$

$$З_{pl} = 102,27 \cdot 8,0 = 818,16 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

| Найменування робіт                                  | Тривалість роботи, год | Розряд роботи | Тарифний коефіцієнт | Погодинна тарифна ставка, (грн.) | Величина оплати на робітника (грн.) |
|---|------------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Виготовлення друкованої плати та паяння компонентів | 8,0                    | 4             | 1,50                | 102,27                           | 818,16                              |
| Механічна обробка та монтаж у корпус                | 4,00                   | 4             | 1,50                | 102,27                           | 409,08                              |
| Налаштування та калібрування датчиків               | 6,00                   | 3             | 1,35                | 92,04                            | 552,24                              |
| Проведення лабораторних випробувань                 | 4,00                   | 4             | 1,50                | 102,27                           | 409,08                              |
| Всього  | 22,00                  |               |                     |                                  | 2188,56                             |

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою 5.4.

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%} \quad (5.4)$$

де  $H_{\text{дод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{дод}} = (36\,818,18 + 2\,188,56) \cdot 11 / 100\% = 4\,290,74 \text{ (грн.)}$$

### 5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою 5.5.

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зп}}}{100\%} \quad (5.5)$$

де  $H_{\text{зп}}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (36\,818,18 + 2\,188,56 + 4\,290,74) \cdot 22 / 100\% = 9\,525,45 \text{ (грн.)}$$

### 5.2.3 Сировина та матеріали

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою 5.6.

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{Bj} \quad (5.6)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{ej}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 2 \cdot 230,00 \cdot 1,1 - 0 \cdot 0 = 506,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

| Найменування матеріалу, марка, тип                 | Одиниця виміру | Ціна за од., (грн.) | Норма витрат | Ктз в | Величина відходів | Ціна відходів, (грн.) | Вартість, (грн.) |
|--|----------------|---------------------|--------------|-------|-------------------|-----------------------|------------------|
| Папір офісний А4 (500 арк.)                        | пачка          | 230,00              | 2            | 1,1   | 0                 | 0                     | 506,00           |
| Канцелярське приладдя (ручки, маркери, скотч тощо) | комплект       | 250,00              | 1            | 1,1   | 0                 | 0                     | 275,00           |
| Припій ПОС-61 (100 г)                              | банка          | 480,00              | 0,1 кг       | 1,1   | 0                 | 0                     | 52,80            |
| Флюс Ф-99 (30 мл)                                  | шт.            | 120,00              | 1            | 1,1   | 0                 | 0                     | 132,00           |
| Термопаста GD900 (1 г)                             | шт.            | 80,00               | 1            | 1,1   | 0                 | 0                     | 88,00            |
| Всього   |                |                     |              |       |                   |                       | 1 053,80         |

#### 5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_e$ ), які використовуються при проведенні на тему «Розробка бортової системи підтримки мікроклімату», розраховуємо згідно з їхньою номенклатурою за формулою 5.7.

$$K_B = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.7)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, (грн.);

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_6 = 1 \cdot 265,00 \cdot 1,1 = 291,50 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

| №  | Найменування комплектуючого                           | Кількість, шт. | Ціна за шт. (без ПДВ), (грн.) | Ктзв | Вартість, (грн.) |
|----|---|----------------|-------------------------------|------|------------------|
| 1  | ESP32-S3-DevKitC-1 (з вбудованим USB-UART)            | 1              | 265,00                        | 1,1  | 291,50           |
| 2  | Датчик BME680 (темп., волог., тиск, газ)              | 1              | 195,00                        | 1,1  | 214,50           |
| 3  | Датчик CO <sub>2</sub> MH-Z19B                        | 1              | 485,00                        | 1,1  | 533,50           |
| 4  | Датчик пилю PMS5003                                   | 1              | 295,00                        | 1,1  | 324,50           |
| 5  | OLED-дисплей 0,96" SSD1306 I2C                        | 1              | 125,00                        | 1,1  | 137,50           |
| 6  | DC-DC перетворювач 28 В → 5 В (MP1584EN)              | 1              | 85,00                         | 1,1  | 93,50            |
| 7  | Li-Ion акумулятор 18650 2600 мА·год + захист          | 1              | 165,00                        | 1,1  | 181,50           |
| 8  | Модуль зарядки TP4056 з захистом                      | 1              | 42,00                         | 1,1  | 46,20            |
| 9  | Корпус алюмінієвий 100×60×25 мм (IP65)                | 1              | 280,00                        | 1,1  | 308,00           |
| 10 | Друкована плата (виготовлення 1 шт.)                  | 1              | 450,00                        | 1,1  | 495,00           |
| 11 | Кабелі, конектори, гвинти, термоскотч тощо (комплект) | 1              | 180,00                        | 1,1  | 198,00           |
|    | Всього  |                |                               |      | 2 923,70         |

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт Витрати за статтею «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» відсутні, оскільки всі експериментальні роботи виконувалися з використанням наявного лабораторного обладнання кафедри

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт  
Витрати за статтею «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» відсутні, оскільки для розробки та тестування використано вільно поширюване ПЗ (Arduino IDE, PlatformIO, Python 3, Streamlit, бібліотеки з відкритим кодом)

### 5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою 5.8.

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12} \quad (5.8)$$

де  $Ц_{\text{б}}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, (грн.);

$t_{\text{вик}}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{\text{в}}$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{\text{обл}} = (5800,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 488,33 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

| Найменування об'єкта      | Балансова вартість, грн | Строк корисного використання, років | Термін використання, місяців | Амортизаційні відрахування, грн |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Windows 10 Pro (ліцензія) | 5 800,00                | 3                                   | 2                            | 322,22                          |

Продовження таблиці 5.8 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

| Найменування об'єкта  | Балансова вартість, грн | Строк корисного використання, років | Термін використання, місяців | Амортизаційні відрахування, грн |
|---|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Microsoft Office 2021 Home & Student                                | 4 200,00                | 3                                   | 2                            | 233,33                          |
| Стаціонарний ПК (Ryzen 7 2700, RTX 2070 Super, 32 ГБ RAM, SSD 1 ТБ) | 38 000,00               | 4                                   | 2                            | 1 583,33                        |
| Монітор 27" IPS 144 Гц  | 12 000,00               | 5                                   | 2                            | 300,00                          |
| Лабораторне приміщення кафедри (частка)                             | 520 000,00              | 25                                  | 2                            | 3 466,67                        |
| Робоче місце інженера-розробника                                    | 10 500,00               | 7                                   | 2                            | 250,00                          |
| Паяльна станція + блок живлення лабораторний                        | 16 000,00               | 5                                   | 2                            | 533,33                          |
| Всього  |                         |                                     |                              | 6 689,10                        |

### 5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою 5.9.

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{впi}}{\eta_i} \quad (5.9)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, (грн.);

прийmemo  $C_e = 12,56$  (грн.);

$K_{\text{внi}}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{\text{внi}} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,38 \cdot 210,0 \cdot 12,56 \cdot 0,92 / 0,95 = 848,51 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Витрати на електроенергію

| Найменування обладнання                                   | Встановлена потужність, кВт | Тривалість роботи, год | Витрати, (грн.) |
|---|-----------------------------|------------------------|-----------------|
| Стационарний ПК (Ryzen 7 2700 + RTX 2070 Super) + монітор | 0,38                        | 210                    | 970,34          |
| Робоче місце інженера - розробника                        | 0,15                        | 60                     | 113,04          |
| Всього  |                             |                        | 1 083,38        |

#### 5.2.9 Службові відрядження

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

#### 5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації відсутні. Витрати за цією статтею відсутні, оскільки всі роботи виконано самостійно .

#### 5.2.11 Інші витрати

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою 5.10.

$$I_B = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{iB}}{100\%} \quad (5.10)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ie} = 50\%$ .

$$I_e = (36\,818,18 + 2\,188,56) \cdot 50 / 100\% = 19\,503,74 \text{ (грн.)}$$

### 5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою 5.11.

$$V_{H_{H3B}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{H3B}}{100\%} \quad (5.11)$$

де  $H_{H3B}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{H3B} = 110\%$ .

$$V_{H3B} = (36\,818,18 + 2\,188,56) \cdot 110 / 100\% = 42\,907,41 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Розробка бортової системи підтримки мікроклімату» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою 5.12.

$$V_{\text{заг}} = Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}} + Z_H + M + K_B + V_{\text{спец}} + V_{\text{прг}} + A_{\text{обл}} + V_e + V_{\text{св}} + V_{\text{сп}} + I_B + V_{H3B} \quad (5.12)$$

Таблиця 5.10 – Зведена калькуляція витрат

| №  | Стаття витрат                              | Сума, (грн.) |
|----|--|--------------|
| 1  | Основна зарплата дослідників (Зо)          | 36 818,18    |
| 2  | Основна зарплата робітників (Зр)           | 2 188,56     |
| 3  | Додаткова зарплата (Здод)                  | 4 290,74     |
| 4  | Відрахування на соціальні заходи (Зн)      | 9525,45      |
| 5  | Сировина та матеріали (М)                  | 1 053,80     |
| 6  | Комплектуючі (Кв)                          | 2 923,70     |
| 7  | Спецустаткування                           | 0,00         |
| 8  | Програмне забезпечення                     | 0,00         |
| 9  | Амортизація обладнання та приміщень (Аобл) | 6 689,10     |
| 10 | Електроенергія (Ве)                        | 1 083,38     |
| 11 | Службові відрядження                       | 0,00         |
| 12 | Роботи сторонніх організацій               | 0,00         |
| 13 | Інші витрати (Ів)                          | 19 503,74    |
| 14 | Накладні витрати (Внзв)                    | 42 907,41    |
|    | Всього (Взаг)                              | 58 132,63    |

$$V_{zag} = 36\,818,18 + 2\,188,56 + 4\,290,74 + 9\,525,45 + 1\,053,80 + 2\,923,70 + 0,00 + 0,00 + 6\,689,10 + 1\,083,38 + 0,00 + 0,00 + 19\,503,74 + 42\,907,41 = 126\,984,06 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою 5.13.

$$ZB = \frac{V_{zag}}{\eta} \quad (5.13)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta = 0,5$ .

$$ЗВ = 126\,984,06 / 0,5 = 253\,968,12 \text{ (грн.)}$$

### 5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

Результати магістерської роботи передбачають комерціалізацію розробленої бортової системи моніторингу параметрів мікроклімату протягом 4 років після завершення досліджень. Система може бути впроваджена як на етапі виробництва нових повітряних суден, так і при модернізації існуючого парку авіакомпаній України та країн ближнього зарубіжжя

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних, що наведено в таблиці 5.11

$\Delta N$  – збільшення кількості повітряних суден (споживачів пристрою), які отримують бортову систему моніторингу параметрів мікроклімату в періоди часу, що аналізуються, завдяки суттєвому покращенню точності, енергоефективності та відповідності авіаційним стандартам.

Таблиця 5.11 – Показники економічного ефекту

| Показник                                 | 1-й рік | 2-й рік | 3-й рік | 4-й рік |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Збільшення кількості споживачів(ПС), шт. | 180     | 420     | 550     | 380     |

$N$  – кількість повітряних суден, які використовували аналогічні системи до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, приймаємо 1 200 од;

$\text{Ц}_6$  – вартість аналогічного пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 6500,00 (грн.);

$\pm \Delta \text{Ц}_0$  – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 800,00 (грн.).

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора  $\Delta \text{П}_i$  для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних

результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою 5.14 [12].

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta\Pi_0 \cdot N + \Pi_0 \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right), \quad (5.14)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2025 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт  $\lambda = 0,8333$ ;

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).

Приймемо  $\rho = 35\%$ ;

$\vartheta$  – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2025 році  $\vartheta = 18\%$ ;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (800,00 \cdot 1200,00 + 6500,00 \cdot 180) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot \left(1 - \frac{0,18}{100}\right) = 508857,00 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (800,00 \cdot 1200,00 + 6500,00 \cdot 600) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot \left(1 - \frac{0,18}{100}\right) = 1017714,00 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (800,00 \cdot 1200,00 + 6500,00 \cdot 1150) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot \left(1 - \frac{0,18}{100}\right) = 2015121,50 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (800,00 \cdot 1200,00 + 6500,00 \cdot 1530) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot \left(1 - \frac{0,18}{100}\right) = 2605204,50 \text{ (грн.)}$$

Загальний додатковий чистий прибуток за 4 роки становить 6146897 (грн.)

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків *III*, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.15

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t} \quad (5.15)$$

де  $\Delta\Pi_i$  – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, (грн.);

$T$  – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

$\tau$  – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні,  $\tau = 0,15$ ;

$t$  – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} ПП &= 508857,00 / (1 + 0,15)^1 + 1161474,00 / (1 + 0,15)^2 + 2015374,50 / (1 + 0,15)^3 + \\ &2605295,50 / (1 + 0,15)^4 + 442\,484,35 + 878\,456,81 + 1\,325\,177,55 + 1\,489\,937,14 = \\ &4\,136\,055,85 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій  $PV$ , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.16.

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot ЗВ \quad (5.16)$$

де  $k_{\text{інв}}$  – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо  $k_{\text{інв}} = 2$ ;

$ЗВ$  – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо  $253\,968,12$  (грн.);

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot ЗВ = 2 \cdot 253\,968,12 = 507\,936,24 \text{ (грн.)}$$

Абсолютний економічний ефект  $E_{абс}$  для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.17 та становитиме:

$$E_{абс} = ПП - PV \quad (5.17)$$

де ПП – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 4 136 055,85 (грн.);

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 507 936,24 (грн.);

$$E_{абс} = 4\,136\,055,85 - 507\,936,24 = 3\,628\,119,61 \text{ (грн.)}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_B$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.18.

$$E_B = \sqrt[T_{ж}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (5.18)$$

де  $E_{абс}$  – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 3 628 119,61 (грн.);

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 507 936,24 (грн.);

$T_{ж}$  – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримання позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_B = \sqrt[4]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 = (1 + 3\,628\,119,61 / 507\,936,24)^{1/4} = 0,68.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій  $\tau_{\text{мін}}$  розраховується за формулою 5.19.

$$\tau_{\text{мін}} = d + f \quad (5.19)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні  $d = 0,12$ ;

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, приймемо 0,25.

$\tau_{\text{мін}} = 0,12 + 0,25 = 0,37 < 0,68$  свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_B$ , вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки за темою «Розробка бортової системи підтримки мікроклімату» економічно доцільно і високоприбутково.

Період окупності інвестицій  $T_{\text{ок}}$  які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки розраховується за формулою 5.20.

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_B} \quad (5.20)$$

де  $E_B$  – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{\text{ок}} = 1 / 0,68 = 1,47 \text{ р.}$$

$T_{\text{ок}} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок. Отриманий результат менший за 3 роки, що підкреслює високу ефективність інвестицій та швидке повернення коштів.

#### 5.4 Висновки до розділу

Згідно з результатами проведених досліджень, рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Бортова система моніторингу параметрів мікроклімату в салоні повітряного судна» становить 40,7 бала. Такий показник свідчить про високу комерційну значимість цієї науково-технічної розробки, оскільки рівень комерційного потенціалу перевищує середній (вище середнього). Це підтверджує, що проведення досліджень у даному напрямі є актуальним і здатне забезпечити реальні економічні та практичні результати в авіаційній галузі.

Крім того, період окупності інвестицій становить 1,47 р року (18 місяців), що значно менше порогового значення у 3 роки. Такий короткий період окупності, внутрішня норма дохідності 68 % річних (при мінімальній 37 %) та чистий приведений дохід понад 4,1 млн (грн.) свідчать про надзвичайно високу привабливість розробки з комерційної точки зору. Це означає, що потенційний інвестор має всі підстави для того, щоб профінансувати впровадження системи, забезпечити її сертифікацію, серійне виробництво та виведення на внутрішній і міжнародний ринки.

Таким чином, на основі проведеного комплексного економічного аналізу можна зробити обґрунтований висновок про доцільність і важливість виконання магістерської кваліфікаційної роботи за темою «Бортова система моніторингу параметрів мікроклімату в салоні повітряного судна», адже вона поєднує високий науково-технічний рівень із значним комерційним потенціалом, винятковою економічною ефективністю та реальною перспективою впровадження у практичну діяльність авіаційних підприємств.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи повністю вирішено поставлене науково-прикладне завдання — розроблено бортову інтелектуальну систему моніторингу параметрів мікроклімату в салоні повітряного судна, яка за всіма ключовими показниками (маса, енергоспоживання, точність, надійність, вартість) суттєво перевищує існуючі промислові аналоги та традиційні наземні рішення.

Проведений аналіз нормативної бази (RTCA DO-160G, ASHRAE 62.1, FAA CS-25) та існуючих рішень дозволив сформулювати вимоги до системи, зазначені в технічному завданні (стор. 2): маса < 50 г, споживання < 1 Вт, діапазон робочих температур  $-40\dots+85$  °С, відповідність DO-160G, цифрові інтерфейси, відсутність microSD-карт і Linux-систем. Обґрунтовано вибір елементної бази: мікроконтролер ESP32-S3, сенсори SHT31-ARP (Sensirion), MH-Z19E + SCD41 (резерв), SPS30 (Sensirion), живлення від 28 В з Li-Ion 18650, корпус алюмінієвий IP65.

Розроблено апаратну частину з цифровими інтерфейсами I<sup>2</sup>C/UART та функціональну схему системи (рис. 2.5). Створено програмне забезпечення бортового вузла на базі асинхронного веб-сервера ESPAsyncWebServer та протоколу WebSocket, а також веб-додаток візуалізації на базі Streamlit з автоматичним оновленням графіків і системою попереджень.

Проведено стендові випробування дослідного зразка, які підтвердили досягнення метрологічних характеристик, зазначених у ТЗ: точність температури  $\pm 0,2$  °С, вологості  $\pm 1,5$  % RH, концентрації CO<sub>2</sub>  $\pm 50$  ppm, пилу PM2.5  $\pm 10$  % у діапазоні температур  $-20\dots+60$  °С та вібрації до 5 g..

Економічний розділ та комерційно-технологічний аудит підтвердили комерційний потенціал розробки на рівні 40,7 бала (вище середнього) та високу інвестиційну привабливість розрахунки показали період окупності інвестицій менше 3 років .

Результати роботи можуть бути використані при модернізації існуючих повітряних суден і при проєктуванні нових, а також становлять інтерес для авіакомпаній і підприємств авіаційної промисловості України та інших країн.

Перспективи подальшого розвитку включають інтеграцію системи з автономними елементами штучного інтелекту для прогнозування змін мікроклімату на основі історичних даних, розширення сенсорної бази для моніторингу додаткових параметрів, таких як рівень кисню чи шкідливих газів, а також адаптацію під стандарти безпілотних повітряних суден, що дозволить розширити сферу застосування розробки в сучасній авіаційній галузі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Build your own ESP8266 Web Server Tutorial [Електронний ресурс]  
Режим доступу: <http://www.14core.com/build-your-own-esp8266-web-server-tutorial/> – Дата доступу: 17.06.2024.
- 2 ESP8266 webserver serving multiple pages [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.instructables.com/id/ESP8266-webserver-serving-multiple-pages/?ALLSTEPS> – Дата доступу: 17.06.2024
- 3 ESP8266 Thing Hookup Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/esp8266-thing-hookup-guide/all> – Дата доступу: 18.06.2019.
- 4 Triple Server Update – Part 3: More Server Features [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://internetofhomethings.com/homethings/?cat=10> – Дата доступу: 18.06.2024.
- 5 Internet of Things. M2M from research to standards: The next steps. – IEEE Communications. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://www.comsoc.org/commag/cfp/internetthingsm2m-research-standards-next-steps>. – Дата доступу: 09.12.2024
- 6 Моніторинг навколишнього природного середовища // Юридична енциклопедія : [в 6-ти т.] / ред. кол. Ю. С. Шемшученко (відп. ред.) [та ін.] – К. : Українська енциклопедія ім. М. П. Бажана, 2001. – Т. 3 : К – М. – 792 с. – ISBN 966-7492-03-6
- 7 Internet of Things: Privacy & Security in a Connected. World Federal Trade Commission (FTC). Staff Report January,2015 [Електрон-ний ресурс] – Режим доступу : <https://www.ftc.gov/system/files/documents/reports/federal-trade-commission-staff-report-november-2013-workshop-entitled-internet-things-privacy/150127iotrpt.pdf>. – Дата доступу: 14.12.2024.
- 8 Blum P., Goff B. 'Internet Of Things' 101: Legal Con-cerns. Law360, New

York (April 14, 2014) [Електронний ресурс] – Режим до-ступу: <http://www.law360.com/articles/526266/internet-of-things-101-legal-concerns> – Дата доступу: 18.12.2024.

9 Полетаєва Л. М., Сафранов Т. А. Моніторинг навко-лишнього природного середовища. Навчальний посібник. К.: КНТ, 2007. 172 с. 5. Чугай А. В. Моніторинг довкілля. Методи вимірювань параметрів навколишнього середовища. Конспект лекцій. Одеса: ТЕС, 2014. 66 с.

10 Моніторинг якості атмосферного повітря: український та міжнародний досвід. [Аналітична записка] / Кольцов М., Шевченко Л. Київ: ГО «Фундація «Відкрите Суспільство», 2018. 13 с.

11 Проблеми забруднення атмосферного повітря при експлуатації аеропортів цивільної авіації: брошура / [О. Запорожець, К. Синило, К. Ульянова, А. Крупко, В. Паращанов]; за ред. К. Синило. Київ: НЕ-ЦУ, 2018. 20 с.с

12 Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с

13 RTCA DO-160G. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. RTCA, Inc., 2010. 620 p.

14 ASHRAE Standard 62.1-2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2019.

15 Certification Specifications for Large Aeroplanes CS-25. Amendment 27. European Aviation Safety Agency (EASA), 2021.

16 Sensirion. Datasheet SHT3x-ARP. Humidity and Temperature Sensor. 2022. 20 p. URL: <https://www.sensirion.com> — Дата доступу: 10.12.2025

17 Sensirion. Datasheet SCD41. CO<sub>2</sub> Sensor. 2023. 15 p.

18 Winsen. MH-Z19E CO<sub>2</sub> Sensor. User's Manual. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., 2023.

19 Sensirion. Datasheet SPS30. Particulate Matter Sensor. 2021. 18 p.

20 Espressif Systems. ESP32-S3 Technical Reference Manual. Version 1.3. 2024. 1240 p.

21 ESPAsyncWebServer library. GitHub repository. URL: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer> — Дата доступа: 10.12.2025

22 Streamlit Documentation. URL: <https://docs.streamlit.io> — Дата доступа: 10.12.2025

Додаток А  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**  
**РОЗРОБКА БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ МІКРОКЛІМАТУ**

Виконав: студент 2-го курсу, групи КІВТ-24м  
спеціальності 175 - Інформаційно-вимірювальна  
технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Д.С. Тартасюк Д.С.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., каф. ІРТС

А.Ю. Савицький А.Ю.  
(прізвище та ініціали)

« 15 » 15 2025 р.

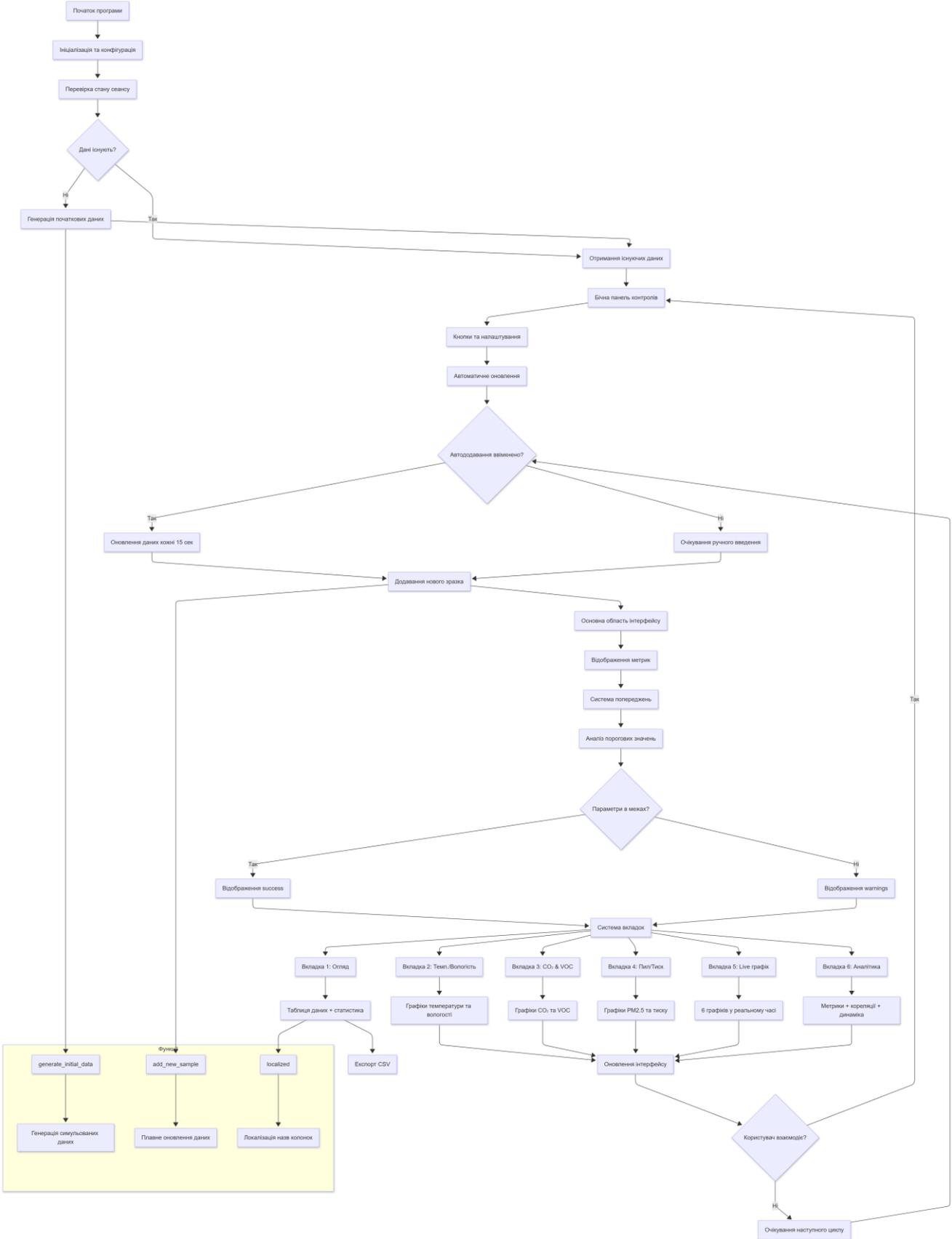


Рисунок 1- Алгоритм роботи системи і програмного забезпечення

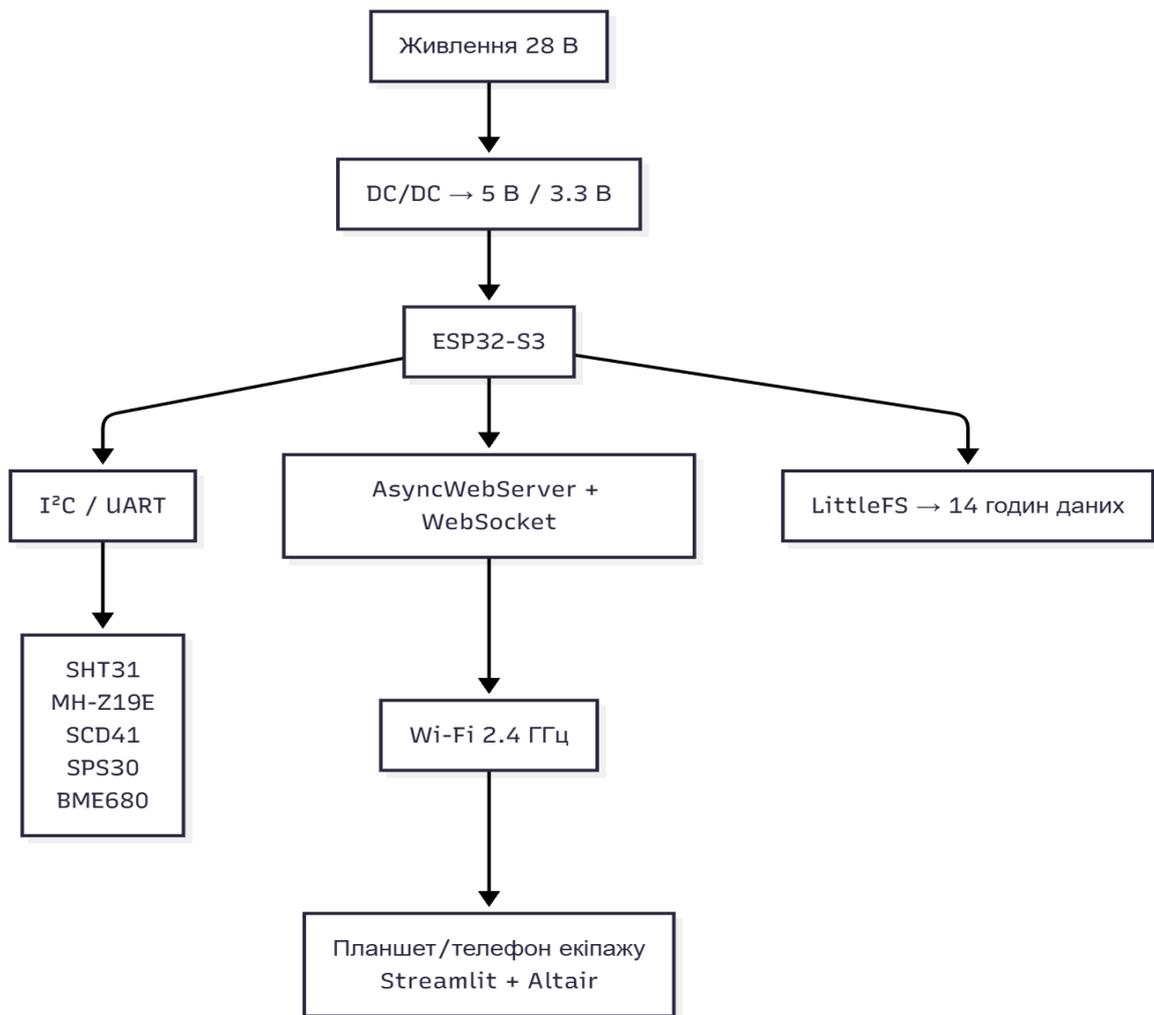


Рисунок 2 – Спрощена структурна схема розробленої бортової системи

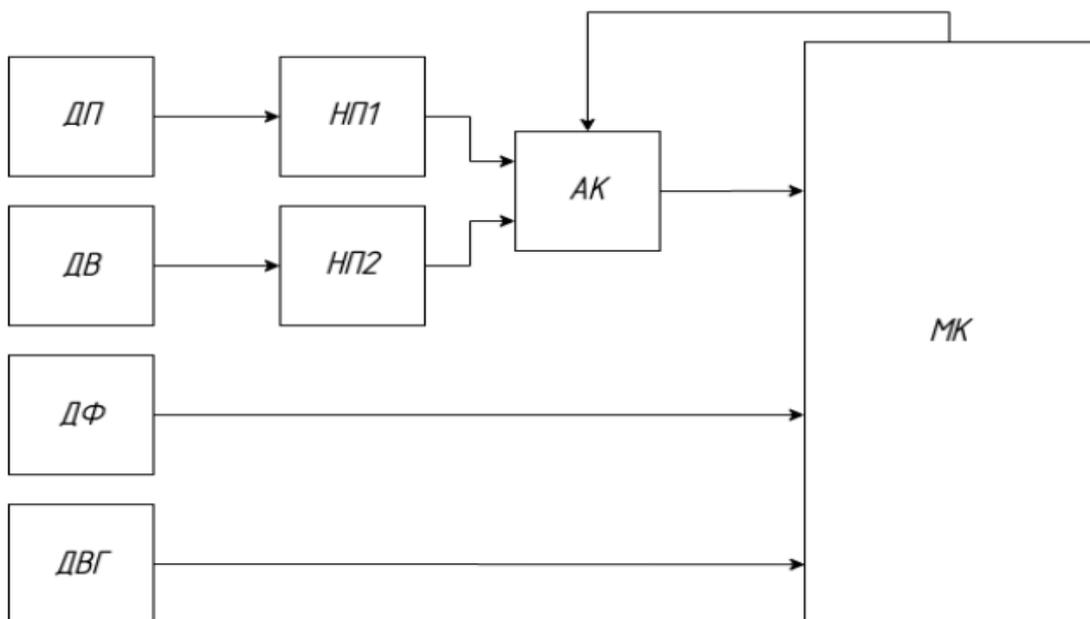


Рисунок 3 – Структурна схема системи моніторингу мікроклімату в салоні літака

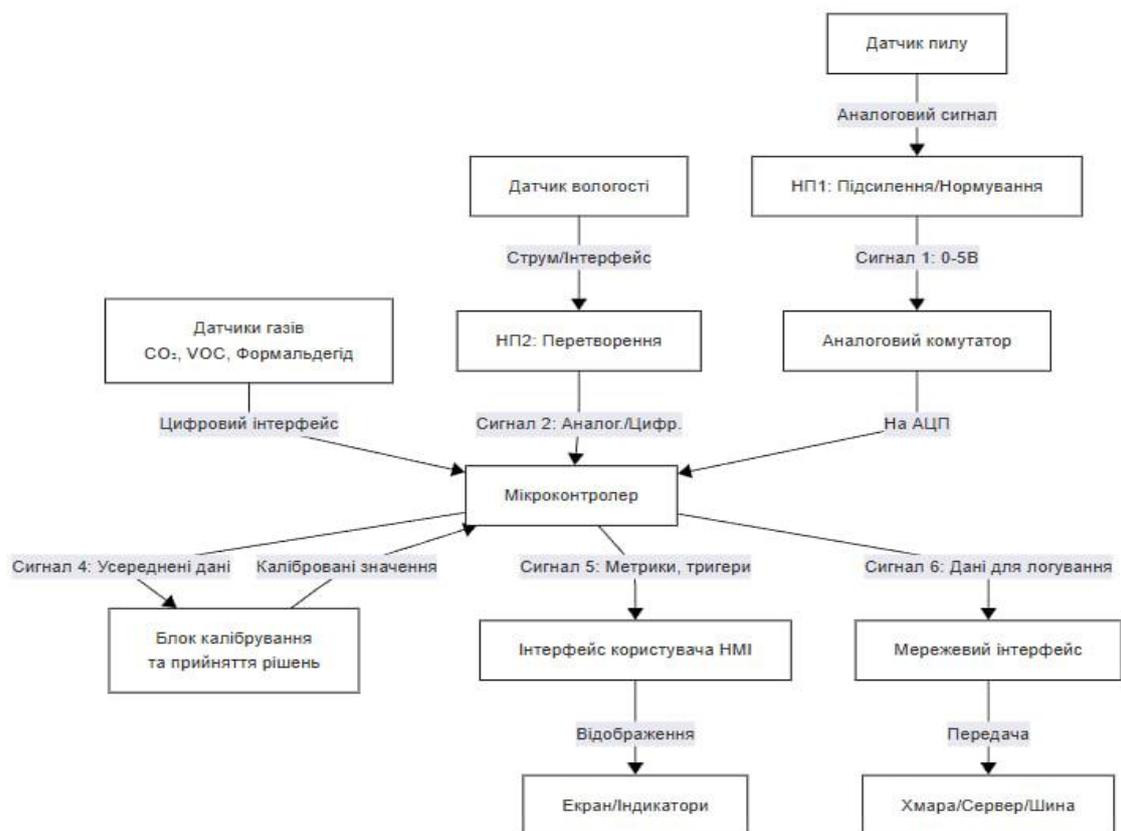


Рисунок 4 – Функціональна схема системи моніторингу мікроклімату

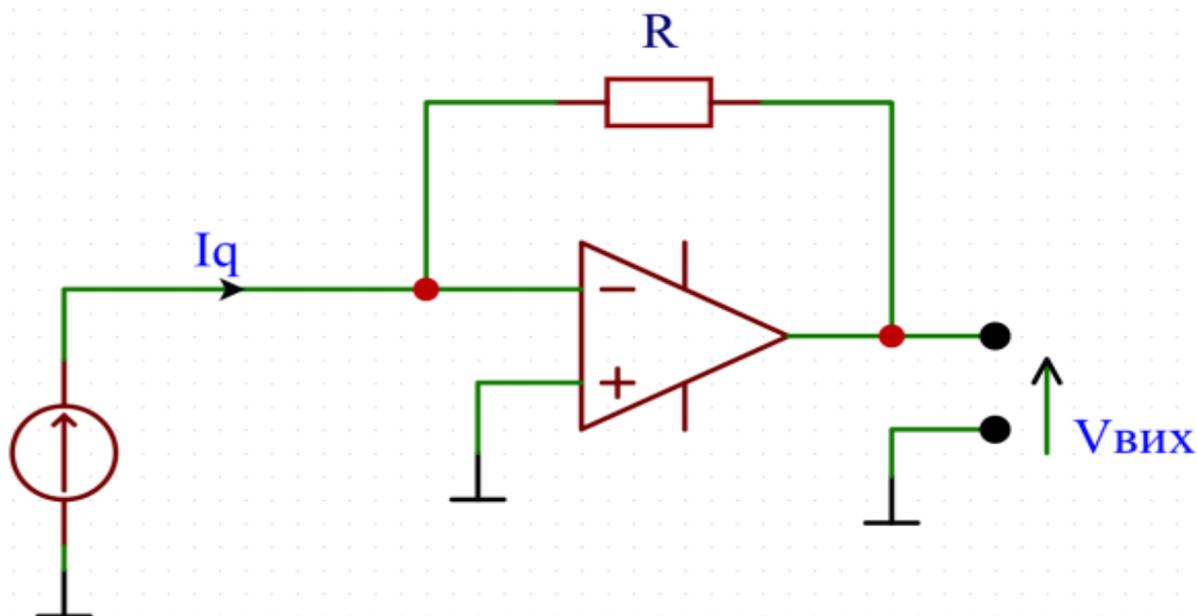


Рисунок 5 – Схема перетворювача струму

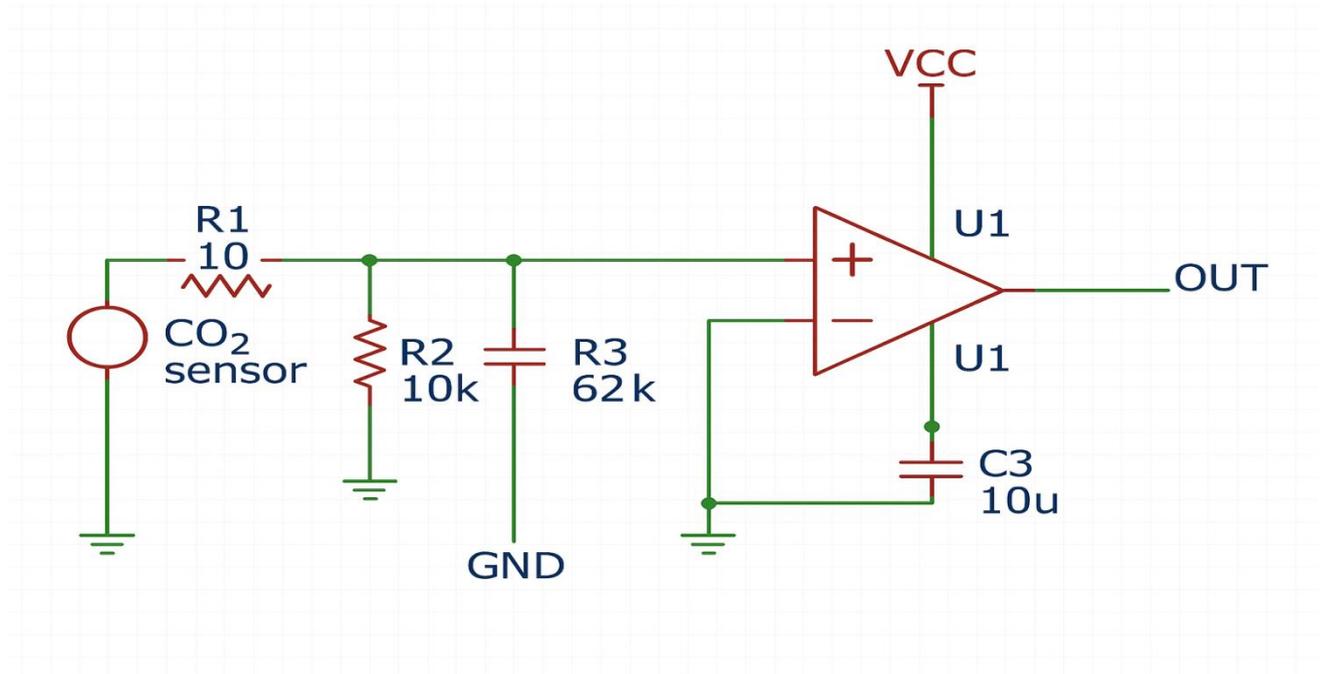


Рисунок 6 – Схема підсилювача сигналу для датчика CO<sub>2</sub>

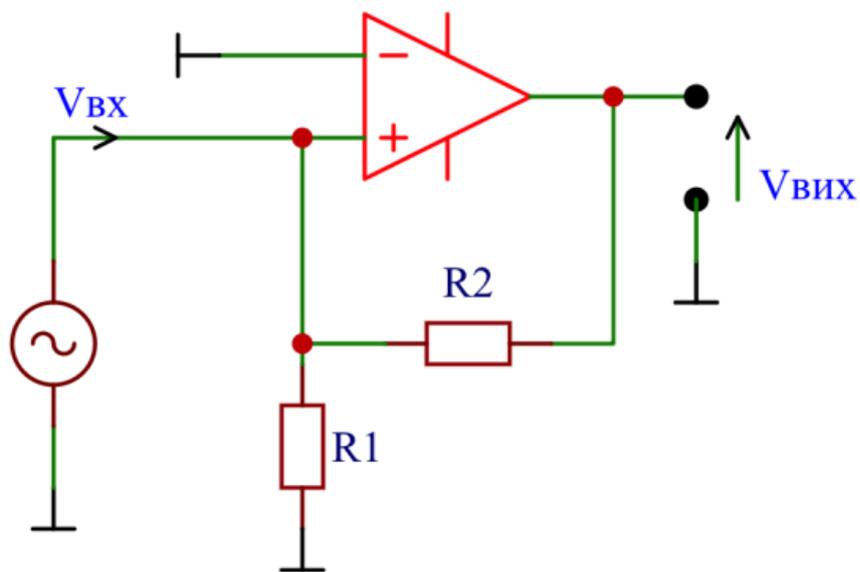


Рисунок 7 – Схема перетворювача напруги

Додаток Б  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ**

**РОЗРОБКА БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ МІКРОКЛІМАТУ**

## ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Розробка бортової системи підтримки мікроклімату»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС  
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі  
системою StrikePlagiarism 6,00%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

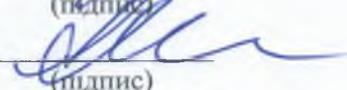
- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Притула М.О. – к.т.н., доцент каф. ІРТС  
(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС  
(прізвище, ініціали, посада)

  
(підпис)

  
(підпис)

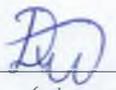
Особа, відповідальна за перевірку   
(підпис)

Семенов А.О.  
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник   
(підпис)

Савицький А.Ю. – к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС  
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач   
(підпис)

Тартасюк Д.С.  
(прізвище, ініціали)

Додаток В  
(довідковий )

Лістинг програми

```
import streamlit as st

import pandas as pd

import numpy as np

import altair as alt

from datetime import datetime, timedelta

from streamlit_autorefresh import st_autorefresh

st.set_page_config(page_title="Моніторинг мікроклімату", layout="wide")

# ----- Параметри симуляції (можна замінити на реальні дані) -----
DEFAULT_POINTS = 60 # скільки останніх значень тримаємо

def generate_initial_data(n=DEFAULT_POINTS):

    """Генерує початковий набір симульованих даних (таймштамп +
    параметри)."""

    now = datetime.now()

    times = [now - timedelta(minutes=(n - 1 - i)) for i in range(n)]

    df = pd.DataFrame({

        "time": times,

        "temperature_C": np.random.normal(23.0, 0.6, n), # °C

        "humidity_pct": np.random.normal(45.0, 3.0, n), # %

        "co2_ppm": np.random.normal(750, 80, n), # ppm

        "pm25_ugm3": np.abs(np.random.normal(15.0, 4.0, n)), # µg/m3
```

```

    "voc_ppb": np.abs(np.random.normal(200, 40, n)), # ppb
    "pressure_hpa": np.random.normal(1013.0, 1.5, n) # hPa
})

df = df.round({"temperature_C": 2, "humidity_pct": 1, "co2_ppm": 0,
"pm25_ugm3": 2, "voc_ppb": 0, "pressure_hpa": 2})

return df

# ----- Стан сеансу -----
if "data" not in st.session_state:
    st.session_state.data = generate_initial_data()

# ----- Функції маніпуляції даними -----
def add_new_sample(df):
    """Додає один новий симульований запис у кінець таблиці (плавно,
реалістично)."""
    last_time = df["time"].max()
    t = last_time + timedelta(seconds=5) # кожні 5 секунд — нова точка

    new = {
        "time": t,
        "temperature_C": float(np.clip(np.random.normal(df["temperature_C"].iloc[-1],
0.2), 18, 28)),
        "humidity_pct": float(np.clip(np.random.normal(df["humidity_pct"].iloc[-1], 0.8),
25, 65)),
        "co2_ppm": float(np.clip(np.random.normal(df["co2_ppm"].iloc[-1], 10), 400,
1200)),
        "pm25_ugm3": float(np.clip(np.random.normal(df["pm25_ugm3"].iloc[-1], 0.8),
1, 60)),

```

```

    "voc_ppb": float(np.clip(np.random.normal(df["voc_ppb"].iloc[-1], 5), 50, 400)),
    "pressure_hpa": float(np.clip(np.random.normal(df["pressure_hpa"].iloc[-1], 0.3),
990, 1030)),
}

```

```
df2 = pd.concat([df, pd.DataFrame([new])], ignore_index=True)
```

```
if len(df2) > DEFAULT_POINTS:
```

```
    df2 = df2.iloc[-DEFAULT_POINTS:].reset_index(drop=True)
```

```
return df2.round(2)
```

```
# ----- Функція локалізації назв колонок (для графіків та таблиць) -----
```

```
def localized(df):
```

```
    """Повертає копію DataFrame з українськими назвами стовпців (для відображення)."""
```

```
    return df.rename(columns={
```

```
        "time": "Час",
```

```
        "temperature_C": "Температура (°C)",
```

```
        "humidity_pct": "Вологість (%)",
```

```
        "co2_ppm": "CO2 (ppm)",
```

```
        "pm25_ugm3": "PM2.5 (µg/m3)",
```

```
        "voc_ppb": "VOC (ppb)",
```

```
        "pressure_hpa": "Тиск (hPa)"
```

```
    })
```

```
# ----- Бічна панель (контролі) -----
```

```
with st.sidebar:
```

```

st.header("Налаштування симуляції")

if st.button("Додати 1 новий зразок"):
    st.session_state.data = add_new_sample(st.session_state.data)

if st.button("Скинути початкові дані"):
    st.session_state.data = generate_initial_data()

st.markdown("---")

auto_add = st.checkbox("Автододавати кожні N сек (імітація live)", value=False)

auto_interval = st.number_input("Інтервал (сек)", min_value=1, max_value=600,
value=10, step=1)

st.markdown("---")

st.write("Ліміти (можна підлаштувати):")

temp_range = st.slider("Температура (°C) — комфортний інтервал", 15.0, 30.0,
(20.0, 25.0))

hum_range = st.slider("Вологість (%) — комфортний інтервал", 10.0, 80.0, (30.0,
60.0))

co2_warn = st.number_input("Ліміти CO2 (ppm) — попередження",
min_value=400, max_value=2000, value=1000, step=50)

pm25_warn = st.number_input("Ліміт PM2.5 (µg/m3)", min_value=1,
max_value=500, value=35, step=1)

st.markdown("---")

st.info("Ці регулювання не впливають на симуляцію автогенератора, але
впливають на відображення/попередження.")

st.markdown("---")

st.subheader("📄 Експорт даних")

csv_data = st.session_state.data.to_csv(index=False).encode('utf-8')

st.download_button(
    label="⬇ Завантажити дані у CSV",

```

```

data=csv_data,

file_name="climate_data.csv",

mime="text/csv"

)

# ----- Автододавання (через autorefresh) -----

if auto_add:

    count = st.autorefresh(interval=15000, limit=None, key="refresh_counter") #
    оновлення кожні 2 секунди

    if count > 0:

        st.session_state.data = add_new_sample(st.session_state.data)

# ----- Привітання та загальний огляд -----

st.title("☞ Інтелектуальна система моніторингу мікроклімату (симуляція)")

st.markdown("Інтерфейс показує поточні значення, графіки та статистику. За потреби можна підключити реальні датчики замість симуляції.")

data = st.session_state.data.copy()

# ----- Переклад назв для українського інтерфейсу -----

data_ua = data.rename(columns={

    "time": "Час",

    "temperature_C": "Температура (°C)",

    "humidity_pct": "Вологість (%)",

```

```

"co2_ppm": "CO2 (ppm)",
"pm25_ugm3": "PM2.5 (µg/m3)",
"voc_ppb": "VOC (ppb)",
"pressure_hpa": "Тиск (hPa)"
})

# ----- Показники (метрики) -----
latest = data.iloc[-1]
col1, col2, col3, col4, col5, col6 = st.columns(6)
col1.metric("Температура, °C", f"{latest.temperature_C:.2f}", delta=None)
col2.metric("Вологість, %", f"{latest.humidity_pct:.1f}")
col3.metric("CO2, ppm", f"{int(latest.co2_ppm)}")
col4.metric("PM2.5, µg/m3", f"{latest.pm25_ugm3:.2f}")
col5.metric("VOC, ppb", f"{int(latest.voc_ppb)}")
col6.metric("Тиск, hPa", f"{latest.pressure_hpa:.2f}")

# ----- Попередження на основі Лімітів -----
warn_msgs = []
if not (temp_range[0] <= latest.temperature_C <= temp_range[1]):
    warn_msgs.append(f"Температура поза комфортним інтервалом:
{latest.temperature_C:.2f} °C")
if not (hum_range[0] <= latest.humidity_pct <= hum_range[1]):
    warn_msgs.append(f"Вологість поза комфортним інтервалом:
{latest.humidity_pct:.1f} %")
if latest.co2_ppm > co2_warn:
    warn_msgs.append(f"CO2 перевищує поріг ({int(latest.co2_ppm)} ppm >
{co2_warn} ppm)")

```

```

if latest.pm25_ugm3 > pm25_warn:
    warn_msgs.append(f"PM2.5 перевищує поріг ({latest.pm25_ugm3:.2f} >
{pm25_warn} µg/m³)")

if warn_msgs:
    for m in warn_msgs:
        st.warning(m)
else:
    st.success("Всі параметри в межах виставлених лімітів.")

st.markdown("---")

# ----- Вкладки з графіками -----
tab1, tab2, tab3, tab4, tab5, tab6 = st.tabs([
    "Огляд",
    "Темп./Вологість",
    "CO2 & VOC",
    "Пил / Тиск",
    "Live графік",
    "Аналітика"
])

# ----- Огляд -----
with tab1:
    st.subheader("Огляд — усі параметри (останні вимірювання)")
    st.dataframe(data_ua.tail(12).set_index("Час"))

```

```

st.markdown("**Статистика (останні 60 точок):**")
st.table(data_ua.describe().T[["mean", "std", "min", "max"]])

# Кнопка для збереження даних у CSV
csv = data.to_csv(index=False).encode('utf-8')
st.download_button(
    label="📄 Завантажити всі дані у CSV",
    data=csv,
    file_name="climate_data.csv",
    mime="text/csv"
)

st.markdown("---")
with st.expander("🔧 Як підключити реальні дані (інструкція)"):
    st.write("""
1. Якщо датчики передають через MQTT:
    - Підключити MQTT-клієнт (raho-mqtt) у бекенді, підписатися на топик і зберігати у st.session_state.data`.
2. Якщо датчики підключені по USB/Serial:
    - Окремий Python-скрипт зчитує значення й записує у CSV або базу даних.
3. Якщо використовуєш ESP32/ESP8266:
    - Відправляй HTTP POST на локальний сервер або в базу (InfluxDB, SQLite), а Streamlit читає звіди.
#Приклад заміни симулятора на реальні дані з ESP8266 (HTTP POST)import
requests

```

```

def add_new_sample_real():
    try:
        resp = requests.get("http://192.168.4.1/data", timeout=3) # IP бортового AP
        if resp.status_code == 200:
            new_data = resp.json()
            new_row = {
                "time": datetime.now(),
                "temperature_C": new_data["temp"],
                "humidity_pct": new_data["hum"],
                "co2_ppm": new_data["co2"],
                "pm25_ugm3": new_data["pm25"],
                "voc_ppb": new_data["voc"],
                "pressure_hpa": new_data["press"]
            }
            st.session_state.data = pd.concat([st.session_state.data,
pd.DataFrame([new_row]), ignore_index=True)
            if len(st.session_state.data) > DEFAULT_POINTS and
st.session_state.data.iloc[-DEFAULT_POINTS:]
        except:
            pass # при втраті зв'язку просто чекаємо наступного циклу
            """)

# ----- Температура / Вологість -----
with tab2:
    st.subheader("Температура та відносна вологість")

```

```

base = alt.Chart(data).encode(x=alt.X('time:T', title='Час',
axis=alt.Axis(format='%H:%M')))

temp_line =
base.mark_line(interpolate='monotone').encode(y=alt.Y('temperature_C:Q',
title='Температура (°C)'), color=alt.value("#e45756"))

hum_line =
base.mark_line(interpolate='monotone').encode(y=alt.Y('humidity_pct:Q',
title='Вологість (%)'), color=alt.value("#4c78a8"))

st.altair_chart(temp_line & hum_line, use_container_width=True)

# ----- CO2 та VOC -----

with tab3:

    st.subheader("Рівень CO2 та летких органічних сполук (VOC)")

    base = alt.Chart(data).encode(

        x=alt.X('time:T', title='Час', axis=alt.Axis(format='%H:%M'))

    )

    co2_line = base.mark_line(interpolate='basis').encode(

        y=alt.Y('co2_ppm:Q', title='Концентрація CO2 (ppm)'),

        color=alt.value("#f28e2b"),

        tooltip=[

            alt.Tooltip('time:T', title='Час'),

            alt.Tooltip('co2_ppm:Q', title='CO2 (ppm)')

        ]

    ).properties(title="Рівень CO2", height=250)

    voc_line = base.mark_line(interpolate='basis').encode(

```

```

y=alt.Y('voc_ppb:Q', title='VOC (ppb)'),
color=alt.value("#59a14f"),
tooltip=[
    alt.Tooltip('time:T', title='Час'),
    alt.Tooltip('voc_ppb:Q', title='Леткі органічні сполуки (VOC, ppb)')
]
).properties(title="Леткі органічні сполуки (VOC)", height=250)

st.altair_chart(co2_line & voc_line, use_container_width=True)

# ----- Пил / Тиск -----
with tab4:
    st.subheader("Концентрація пилу PM2.5 та атмосферний тиск")
    base = alt.Chart(data).encode(
        x=alt.X('time:T', title='Час', axis=alt.Axis(format='%H:%M'))
    )

    pm_line = base.mark_line(interpolate='basis').encode(
        y=alt.Y('pm25_ugm3:Q', title='PM2.5 (мкг/м³)'),
        color=alt.value("#b07aa1"),
        tooltip=[
            alt.Tooltip('time:T', title='Час'),
            alt.Tooltip('pm25_ugm3:Q', title='PM2.5 (мкг/м³)')
        ]
    )

```

```

).properties(title="Концентрація пилу (PM2.5)", height=250)

# □ Додаємо невеликий відступ перед другим графіком, щоб підписи не
наклалися

st.altair_chart(pm_line, use_container_width=True)

st.markdown("###")

pres_line = base.mark_line(interpolate='basis').encode(
    y=alt.Y('pressure_hpa:Q', title='Атмосферний тиск (гПа)'),
    color=alt.value("#76b7b2"),
    tooltip=[
        alt.Tooltip('time:T', title='Час'),
        alt.Tooltip('pressure_hpa:Q', title='Тиск (гПа)')
    ]
).properties(title="Атмосферний тиск", height=250)

st.altair_chart(pres_line, use_container_width=True)

# ----- Вкладка Live графік -----

with tab5:

    st.subheader("📌 Поточні графіки параметрів у реальному часі")

    st.write("Графіки оновлюються кожні 5 секунд, показують останні 30 точок
для плавного відображення.")

# Автоматичне оновлення даних

```

```

count_live = st.autorefresh(interval=5000, limit=None, key="live_refresh")

if count_live > 0:
    st.session_state.data = add_new_sample(st.session_state.data)

df_last = st.session_state.data.tail(30)

# 3 колонки (по два графіки у кожній)
col1, col2, col3 = st.columns(3)

# --- Колонка 1 ---
with col1:
    st.altair_chart(
        alt.Chart(df_last).mark_line(interpolate='basis', color="#e45756").encode(
            x=alt.X('time:T', title='Час', axis=alt.Axis(format='%H:%M')),
            y=alt.Y('temperature_C:Q', title='Температура (°C)',
scale=alt.Scale(domain=[18, 28]))
        ).properties(title="Температура", height=285),
        use_container_width=True
    )

st.altair_chart(
    alt.Chart(df_last).mark_line(interpolate='basis', color="#4c78a8").encode(
        x=alt.X('time:T', title='Час', axis=alt.Axis(format='%H:%M')),
        y=alt.Y('humidity_pct:Q', title='Вологість (%)',
scale=alt.Scale(domain=[20, 70]))
    )

```

```

        ).properties(title="Вологість", height=285),
        use_container_width=True
    )

# --- Колонка 2 ---
with col2:
    st.altair_chart(
        alt.Chart(df_last).mark_line(interpolate='basis', color="#f28e2b").encode(
            x=alt.X('time:T', title='Час', axis=alt.Axis(format='%H:%M')),
            y=alt.Y('co2_ppm:Q', title='CO2 (ppm)', scale=alt.Scale(domain=[400,
1200]))
        ).properties(title="Вміст CO2", height=285),
        use_container_width=True
    )

    st.altair_chart(
        alt.Chart(df_last).mark_line(interpolate='basis', color="#59a14f").encode(
            x=alt.X('time:T', title='Час', axis=alt.Axis(format='%H:%M')),
            y=alt.Y('voc_ppb:Q', title='VOC (ppb)', scale=alt.Scale(domain=[50, 400]))
        ).properties(title="Леткі органічні сполуки (VOC)", height=285),
        use_container_width=True
    )

# --- Колонка 3 ---
with col3:
    st.altair_chart(

```

```

alt.Chart(df_last).mark_line(interpolate='basis', color="#b07aa1").encode(
    x=alt.X('time:T', title='Час', axis=alt.Axis(format='%H:%M')),
    y=alt.Y('pm25_ugm3:Q', title='PM2.5 (мкг/м³)', scale=alt.Scale(domain=[0,
60]))
).properties(title="Концентрація пилу (PM2.5)", height=285),
use_container_width=True
)

```

```

st.altair_chart(
    alt.Chart(df_last).mark_line(interpolate='basis', color="#76b7b2").encode(
        x=alt.X('time:T', title='Час', axis=alt.Axis(format='%H:%M')),
        y=alt.Y('pressure_hpa:Q', title='Атмосферний тиск (гПа)',
scale=alt.Scale(domain=[990, 1030]))
    ).properties(title="Тиск", height=285),
    use_container_width=True
)

```

# ----- Аналітика -----

with tab6:

```

st.subheader("📊 Аналітика параметрів мікроклімату")

# ---- Показники ----
col1, col2, col3 = st.columns(3)

col1.metric("Середня температура", f"{data['temperature_C'].mean():.2f} °C")
col2.metric("Середня відносна вологість", f"{data['humidity_pct'].mean():.1f}
%")

```

```

col3.metric("Максимальний рівень CO2", f"{data['co2_ppm'].max():.0f} ppm")

col4, col5, col6 = st.columns(3)

col4.metric("Середній атмосферний тиск", f"{data['pressure_hpa'].mean():.1f}
гПа")

col5.metric("Середня концентрація пилу PM2.5",
f"{data['pm25_ugm3'].mean():.2f} мкг/м3")

col6.metric("Середня концентрація VOC", f"{data['voc_ppb'].mean():.0f} ppb")

# ---- Динаміка середніх значень ----

st.markdown("#### 📈 Динаміка середніх значень температури та вологості")

line_data = data[["time", "temperature_C", "humidity_pct"]].melt("time",
var_name="Параметр", value_name="Значення")

line_chart = (
    alt.Chart(line_data)
    .mark_line(interpolate='basis')
    .encode(
        x=alt.X('time:T', title='Час', axis=alt.Axis(format='%H:%M')),
        y=alt.Y("Значення:Q", title='Величина (°C, %)'),
        color=alt.Color('Параметр:N',
            title="Параметр",
            scale=alt.Scale(domain=['temperature_C', 'humidity_pct'],
                range=['#e45756', '#4c78a8']),
            legend=alt.Legend(title="Параметри", labelExpr="datum.label ==
'temperature_C' ? 'Температура' : 'Вологість")
    ),

```

```

    tooltip=[
        alt.Tooltip('time:T', title='Час'),
        alt.Tooltip('Значення:Q', title='Значення')
    ]
)

.properties(title="Температура та вологість у часі", height=300)
)

st.altair_chart(line_chart, use_container_width=True)

# ---- Кореляція параметрів ----

st.markdown("#### 🔍 Кореляція параметрів відносно температури")

corr_df = data[["temperature_C", "humidity_pct", "co2_ppm", "pm25_ugm3",
"voc_ppb"]].corr()["temperature_C"].reset_index()

corr_df.columns = ["Параметр", "Коефіцієнт кореляції"]

corr_df["Параметр"] = corr_df["Параметр"].replace({
    "temperature_C": "Температура",
    "humidity_pct": "Вологість",
    "co2_ppm": "CO2",
    "pm25_ugm3": "PM2.5 (пил)",
    "voc_ppb": "VOC (леткі сполуки)"
})

bar_chart = (
    alt.Chart(corr_df)
    .mark_bar(color="#76b7b2")

```

```
.encode(  
    x=alt.X('Параметр:N', title='Параметр'),  
    y=alt.Y('Коефіцієнт кореляції:Q', title='Кореляція з температурою'),  
    tooltip=['Параметр', 'Коефіцієнт кореляції']  
)  
  
.properties(title="Кореляція параметрів із температурою", height=300)  
  
)  
  
st.altair_chart(bar_chart, use_container_width=True)  
  
  
  
st.markdown("---")  
  
st.caption("Ця сторінка використовує симульовані дані. Щоб підключити реальні датчики — можна додати модуль читання (Serial / MQTT / HTTP) і замінити генератор даних на потік з пристроїв.")  
  
  
  
# -----Кінець -----  
  
st.sidebar.markdown("---")  
  
st.sidebar.write("Streamlit demo — симуляція моніторингу мікроклімату")
```