ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ПРОГРАМНО-АПАРАТНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ В ПРИМІЩЕННІ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 123 Комп'ютерної інженерії
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерна інженерія
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ *Валерій ВОЛОВИК*
(підпис) *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. КІД-41
Валерій ВОЛОВИК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник: Анатолій ДАВИДЕНКО
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Рецензент: _____
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2026

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра 123 Комп'ютерної інженерії
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 123 Комп'ютерної інженерії
Освітньо-професійна програма Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою Наталія ЛАЩЕВСЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
«_____» _____ 2026р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Воловик Валерій Валерійович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Програмно-апаратна система контролю температури в приміщенні на базі мікроконтролера
керівник кваліфікаційної роботи Анатолій ДАВИДЕНКО,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «20» 02 2026р. № 51
2. Строк подання кваліфікаційної роботи «08» 05 2026р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Науково-технічна література, методи системного аналізу, мікроконтролери, математичний апарат, емпіричні методи
Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Аналітичний огляд існуючих рішень та технологій створення приладів для моніторингу внутрішнього мікроклімату
2. Мікропроцесорні платформи та сенсорні компоненти систем моніторингу мікроклімату
3. Практичне проєктування та створення апаратно-програмного комплексу моніторингу мікроклімату
4. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
5. Дата видачі завдання «09» 02 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір даних	25.02-24.03.2026	Виконано
2	Обробка матеріалу	23.03-05.04.2026	Виконано
3	Розробка теоретичної частини	06.04-10.04.2026	Виконано
4	Розробка практичної частини	11.04-20.04.2026	Виконано
5	Висновки за результатами аналізу	21.04-06.05.2026	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	07.05-08.05.2026	Виконано
7	Розробка презентації	09.05-11.05.2026	Виконано
8	Передзахист	27.05-29.05.2026	Виконано
9	Здача в деканат	02.06-05.06.2026	Виконано

Здобувач вищої освіти _____ Валерій ВОЛОВИК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій ДАВИДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 57 стор., 19 рис., 24 джерела.

Мета дослідження – розробка та практичне втілення програмно-апаратного комплексу для безперервного моніторингу параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на базі мікроконтролера.

Об'єкт дослідження – процес контролю та моніторингу параметрів навколишнього середовища в закритих приміщеннях.

Предмет дослідження – апаратно-програмні засоби та архітектурні рішення для побудови систем управління мікрокліматом з використанням мікропроцесорних технологій.

Короткий зміст роботи: Якість функціонування сучасних систем автоматизації безпосередньо залежить від точності інформації, яку постачають первинні перетворювачі. Аналіз існуючих на ринку IoT-систем демонструє, що комерційні платформи мають жорстку залежність від хмарних серверів виробника , а професійні системи класу BMS є економічно недоцільними для невеликих приміщень. З огляду на це, перспективним напрямком є розробка власних гнучких мікроконтролерних платформ.

У роботі запропоновано багаторівневу архітектурну модель IoT-системи, яка гарантує високу експлуатаційну надійність. Апаратна частина побудована на базі обчислювального ядра Arduino Uno (ATmega328P). Для збору даних використано комбінований датчик DHT22, барометр BMP280 та інфрачервоний газоаналізатор MH-Z19. Комунікаційний рівень реалізовано за гібридною схемою з використанням модулів ESP8266 (Wi-Fi) та HC-06 (Bluetooth), що підвищує загальну автономність комплексу. Програмне забезпечення розроблено мовами C та C++ з використанням принципу послідовного опитування сенсорів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МІКРОКОНТРОЛЕР, ARDUINO, МОНІТОРИНГ МІКРОКЛІМАТУ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, IOT, ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ, ESP8266, АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС.

ABSTRACT

Textual part of the qualification work for the bachelor's degree: 57 pages, 19 figures, 24 sources.

The purpose of the work is the development and practical implementation of a software and hardware complex for continuous monitoring of indoor microclimate parameters based on a microcontroller.The object of research is the process of control and monitoring of environmental parameters in enclosed spaces.The subject of research is hardware and software tools, and architectural solutions for building microclimate control systems using microprocessor technologies.Summary of the work:

The functioning quality of modern automation systems directly depends on the accuracy of the information provided by primary converters. An analysis of existing IoT systems on the market demonstrates that commercial platforms have a strict dependence on the manufacturer's cloud servers, and professional BMS class systems are economically unfeasible for small premises. Given this, the development of custom flexible microcontroller platforms is a promising direction.

The paper proposes a multi-level architectural model of an IoT system that guarantees high operational reliability. The hardware part is based on the Arduino Uno (ATmega328P) computing core. The combined DHT22 sensor, BMP280 barometer, and MH-Z19 infrared gas analyzer were used for data collection. The communication layer is implemented according to a hybrid scheme using ESP8266 (Wi-Fi) and HC-06 (Bluetooth) modules, which increases the overall autonomy of the complex. The software is developed in C and C++ using the principle of sequential sensor polling.

KEYWORDS: MICROCONTROLLER, ARDUINO, MICROCLIMATE MONITORING, INTERNET OF THINGS, IOT, TEMPERATURE SENSOR, ESP8266, HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Направляється здобувач Воловик В. В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерна інженерія
(назва)
на тему: «Програмно-апаратна система контролю температури в приміщенні на базі мікроконтролера».
Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІ _____ Катерина НЕСТЕРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Воловик В. В. показав відмінну теоретичну підготовку, уміння володіти та розуміння новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.
Все це дозволяє оцінити кваліфікаційну роботу студента Воловика Валерія Валерійовича на оцінку «відмінно», та присвоїти йому кваліфікацію «бакалавр з комп'ютерної інженерії».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій ДАВИДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«_» _____ 2026 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач *Воловик В. В.* допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою Комп'ютерної інженерії _____ Наталія ЛАЩЕВСЬКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну бакалаврську роботу

здобувача вищої освіти Воловик Валерій Валерійович
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему: «Програмно-апаратна система контролю температури в приміщенні на базі мікроконтролера»

Актуальність:

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена актуальному завданню сучасної інженерії — розробці автономної та гнучкої системи моніторингу параметрів внутрішнього мікроклімату. В умовах, коли ринок поділений між закритими комерційними хмарними системами та надзвичайно дорогими промисловими рішеннями класу BMS, створення доступного, масштабованого та локально-керованого апаратно-програмного комплексу на базі мікроконтролерних платформ має високу практичну цінність.

Позитивні сторони:

1. Автор вдало застосував багаторівневу парадигму (Sensor Layer, Edge Layer, Communication Layer, Web Layer), що дозволяє легко масштабувати систему в майбутньому без кардинальної перебудови апаратного комплексу.
2. Окремо варто відзначити проєктування комунікаційного рівня за гібридною схемою. Використання резервного каналу зв'язку на базі Bluetooth (HC-06) паралельно з основним Wi-Fi (ESP8266) суттєво підвищує автономність комплексу під час збоїв мережевої інфраструктури.
3. Програмний код має високий рівень модульності. Застосування алгоритмів первинної математичної обробки та діагностики сенсорів безпосередньо на мікроконтролері свідчить про глибоке розуміння автором принципів побудови надійних вбудованих систем.

Недоліки:

1. Хоча платформа Arduino Uno чудово підходить для прототипування, її відносно скромні обчислювальні ресурси дещо обмежують використання комплексу у промислових мережах високого рівня , порівняно з системами на кристалі ESP32.
2. Використання датчика DHT22 забезпечує базові потреби, проте він є відносно повільним у динаміці. Для досягнення професійного рівня метрології доцільніше було б інтегрувати прецизійний чип SHT31.

Висновок: *кваліфікаційна бакалаврська робота заслуговує оцінку " відмінно", а здобувач Воловик В. В. заслуговує присвоєння кваліфікації: бакалавра з комп'ютерної інженерії.*

Рецензент:
науковий ступінь, вчене звання _____ *підпис* _____ *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

ЗМІСТ

ВСТУП 10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ТЕХНОЛОГІЙ СТВОРЕННЯ ПРИЛАДІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВНУТРІШНЬОГО МІКРОКЛІМАТУ 11
1.1 Основні критерії та функціональні вимоги до комплексів управління мікрокліматом 11
1.2 Аналіз вимірювальних компонентів та їхніх технічних специфікацій 14
1.3 Апаратно-схемотехнічна організація та структурні компоненти пристрою 17
1.4 Комунікаційні інтерфейси та підсистеми програмної обробки інформаційних потоків 20
1.5 Аналіз поширених на ринку IoT-комплексів для моніторингу внутрішнього мікроклімату 22
2 МІКРОПРОЦЕСОРНІ ПЛАТФОРМИ ТА СЕНСОРНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ 29
2.1 Аналіз та порівняльна характеристика мікропроцесорних платформ для побудови комплексів кліматичного моніторингу 29
2.2 Комунікаційні протоколи та інтерфейси зв'язку між мікроконтролером і первинними перетворювачами 34
2.3 Аналітичний огляд та порівняльна характеристика сенсорів для вимірювання кліматичних показників 38
3 ПРАКТИЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ 47
3.1 Проєктування принципової електричної схеми апаратного модуля 47
3.2 Проєктування та програмна реалізація алгоритмів керування 49
ВИСНОВКИ 53

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 55
Додаток А 57

ВСТУП

Головним завданням сучасних систем автоматизації приміщень є здійснення безперервного вимірювання ключових чинників, які формують внутрішнє середовище, зокрема температури та вологості. Ці параметри мають прямий вплив не лише на теплосприйняття людини, але й на збереження електронного обладнання та запобігання утворенню конденсату. Сучасний сегмент IoT-систем для вирішення цих завдань є надзвичайно різноманітним. Проте масові комерційні платформи розумного дому функціонують на закритих пропрієтарних протоколах і мають жорстку залежність від хмарних серверів. У разі відсутності інтернет-з'єднання така система повністю втрачає свою працездатність. З іншого боку, існують потужні системи управління будівлями класу BMS, проте їх використання у невеликих приватних приміщеннях чи офісах є економічно недоцільним через величезні капітальні інвестиції.

Отже, виникає потреба у створенні надійного, автономного та гнучкого рішення. Проміжною та найбільш перспективною нішею є платформи для самостійного конструювання на базі мікроконтролерів. Їх використання гарантує надзвичайну простоту впровадження, феноменальну сумісність із датчиками та повний локальний контроль над даними без прихованих обмежень від виробників. Саме тому розробка апаратно-програмного комплексу для моніторингу мікроклімату на базі доступних мікроконтролерних платформ є актуальним інженерним завданням, що дозволяє досягти оптимального балансу між вартістю компонентної бази та необхідними функціональними можливостями.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ТЕХНОЛОГІЙ СТВОРЕННЯ ПРИЛАДІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВНУТРІШНЬОГО МІКРОКЛІМАТУ

1.1 Основні критерії та функціональні вимоги до комплексів управління мікрокліматом

Процес дослідження, проектування та подальшого практичного втілення апаратно-програмного комплексу для моніторингу параметрів навколишнього середовища вимагає чіткого формування базових критеріїв. Визначення технічного завдання та структурування деталізованих вимог є першочерговим етапом роботи, оскільки саме вони закладають фундамент для архітектури майбутнього пристрою, вибору сенсорної бази та комунікаційних протоколів. Комплексний підхід до проектування передбачає класифікацію всіх вимог до систем контролю мікроклімату за кількома взаємопов'язаними категоріями, що охоплюють як апаратний, так і програмний рівні[1].

Головним завданням проектованого пристрою є здійснення безперервного, всебічного та одночасного вимірювання ключових чинників, які формують внутрішнє середовище приміщення. До таких параметрів належать температура повітря, його відносна вологість, а також інтегральні показники якості повітряного простору. Зокрема, особлива увага приділяється концентрації вуглекислого газу, вмісту летких органічних сполук та, у разі потреби, наявності дрібнодисперсного пилу чи вимірюванню атмосферного тиску.

Сучасні функціональні можливості системи повинні виходити за рамки простої фіксації значень. Вони мають включати механізми первинної обробки отриманих даних безпосередньо на пристрої (наприклад, фільтрацію шумів та усереднення показників), локальне або хмарне збереження інформації, а також

її оперативне передавання до інтерфейсу користувача. Окремим критично важливим аспектом є інтелектуальний аналіз поточних параметрів, що передбачає гнучке налаштування гранично допустимих значень. У разі виходу будь-якого з показників за встановлені межі, система повинна миттєво генерувати сповіщення, що дозволяє вчасно реагувати на погіршення умов або інтегрувати пристрій у загальну структуру автоматизованого керування кліматичною технікою[2].

Якість функціонування всієї системи автоматизації безпосередньо залежить від точності інформації, яку постачають первинні перетворювачі. Метрологічні характеристики вимірювальних компонентів повинні гарантувати високу повторюваність та мінімальну абсолютну похибку в усьому робочому діапазоні експлуатації. Для каналів вимірювання температури та вологості першочергове значення мають роздільна здатність сенсорів та стабільність їхніх показів у часі.

Коли мова йде про оцінку якості повітря за допомогою газових датчиків, аналіз ускладнюється необхідністю врахування часу відгуку на зміну концентрації домішок та вибіркової чутливості до конкретних речовин. Оскільки напівпровідникові та електрохімічні сенсори схильні до деградації та часового дрейфу, архітектура системи повинна передбачати програмно-апаратні інструменти для їхнього періодичного калібрування. Це включає в себе алгоритми компенсації перехресної чутливості, коли покази датчиків газу корегуються залежно від поточних рівнів температури та вологості, що дозволяє уникнути спотворення результатів під час тривалої експлуатації.

Апаратна реалізація вимірювального комплексу має базуватися на принципах високої завадостійкості, надійності та використання уніфікованих рішень. Електронна схема пристрою повинна безперебійно функціонувати в умовах дії електромагнітних завад, які є типовими для сучасних будівель із великою кількістю побутової техніки. Використання стандартизованих цифрових інтерфейсів для підключення периферійних сенсорів дозволяє

забезпечити модульність конструкції та спрощує можливу модернізацію системи.

У питанні обробки та транспортування інформації пріоритет надається створенню надійного бездротового каналу зв’язку. Передача даних має здійснюватися на основі сучасних енергоефективних протоколів, орієнтованих на концепцію Інтернету речей. Програмне забезпечення вищого рівня повинно підтримувати безпроблемну інтеграцію з хмарними платформами та сторонніми сервісами автоматизації. Це забезпечує можливість довгострокового збереження великих масивів інформації, побудови наочних графіків, аналізу статистичних трендів та організації віддаленого доступу користувача до системи з будь-якої точки світу в режимі реального часу[3].

Проектування пристрою для повсякденного використання вимагає детального опрацювання його фізичних та конструктивних параметрів. Корпус вимірювального модуля має бути компактним та естетичним, щоб гармонійно вписуватися в інтер'єр житлових або офісних приміщень. При цьому конструкція повинна гарантувати ефективний природний приплив повітря до внутрішніх сенсорів, одночасно захищаючи чутливу мікропроцесорну техніку від пилу, випадкових механічних пошкоджень чи утворення конденсату.

Важливими експлуатаційними вимогами є максимальна спрощеність процедури первинного монтажу, інтуїтивно зрозуміле налаштування для кінцевого користувача, а також можливість бездротового оновлення мікропрограми пристрою без необхідності його демонтажу чи підключення до програматорів. З економічного погляду, розробка має характеризуватися оптимальним балансом між вартістю компонентної бази та функціональними можливостями. Модульний принцип побудови дозволяє легко масштабувати систему під конкретні фінансові та технічні вимоги замовника, роблячи її конкурентоспроможною на ринку IoT-рішень[4].

Мінімізація споживання електричної енергії є одним із найважливіших чинників під час створення сучасних інтелектуальних пристроїв. Схема живлення та програмний алгоритм контролера повинні підтримувати гнучке

керування енергетичними режимами, що включає переведення обчислювального ядра та радіомодуля в стан глибокого сну між циклами вимірювань. Такий підхід є критично важливим для автономних модифікацій датчиків, що живляться від гальванічних елементів або акумуляторів, оскільки він дозволяє максимізувати термін автономної роботи без обслуговування[5].

Надійність функціонування системи визначається її здатністю протистояти різноманітним програмним та апаратним збоям. У разі тимчасового зникнення живлення або втрати зв'язку з хмарним сервером пристрій не повинен втрачати накопичену інформацію. Для цього в архітектуру закладаються механізми локального кешування даних в енергонезалежну пам'ять та алгоритми автоматичного відновлення з'єднання після усунення проблеми. Застосування апаратних таймерів перезавантаження запобігає зависанню системи, що гарантує тривалу, стабільну та безпечну експлуатацію комплексу в приміщеннях будь-якого типу.

1.2 Аналіз вимірювальних компонентів та їхніх технічних специфікацій

Для побудови ефективної системи автоматизації необхідно здійснити глибокий аналіз доступних на ринку типів первинних перетворювачів кліматичних параметрів. Розробка апаратного забезпечення вимагає ретельного вивчення їхньої точності, меж вимірювання, швидкості реакції на зміни середовища та специфіки апаратно-програмної інтеграції з мікроконтролерними обчислювальними ядрами. Первинні сенсорні елементи відіграють роль «органів чуття» будь-якої системи контролю мікроклімату. Саме від їхньої здатності надавати достовірну, неспотворену інформацію про поточний стан внутрішнього середовища залежить коректність роботи всіх алгоритмів керування. Процес вибору конкретних компонентів є комплексним

завданням, яке спирається на жорсткі вимоги щодо мінімізації похибки вимірювань, стійкості показів у часі, суворих обмежень щодо енергоспоживання та легкості поєднання з цифровою логікою керуючого пристрою[6].

Температурні датчики є базовою складовою комплексу, оскільки їхнє головне призначення полягає в постійному моніторингу теплового режиму повітря для підтримання фізіологічно комфортних умов перебування людини в приміщенні. У сучасній практиці проектування кліматичних систем домінують цифрові інтегральні термодавачі та різноманітні терморезистивні компоненти (наприклад, термістори NTC або платинові резистори типу PT100). При виборі таких сенсорів інженери орієнтуються на їхній динамічний діапазон, абсолютну точність, крок роздільної здатності аналого-цифрового перетворювача та показник теплової інерції, який визначає швидкодію. Оскільки йдеться про житлові або офісні приміщення, оптимальним і цілком достатнім вважається робочий діапазон вимірювань від -10 °C до +50 °C. При цьому для забезпечення плавного керування кліматичною технікою абсолютна похибка вимірювача не повинна перевищувати ±0,5 °C[7].

Датчики вологості виконують критично важливу функцію оцінки рівня насиченості повітря водяною парою. Цей параметр має прямий вплив не лише на теплосприйняття та здоров'я дихальної системи людини, але й на збереження матеріалів, меблів та електронного обладнання, запобігаючи утворенню конденсату чи пересиханню. Технологічним стандартом у цій галузі стало використання ємнісних полімерних сенсорів. Їхній принцип дії базується на зміні діелектричної проникності чутливого шару під час поглинання молекул води. Такі елементи відрізняються чудовою довгостроковою стабільністю, мінімальними струмами витоку та мізерним енергоспоживанням. Під час проектування звертають увагу на здатність сенсора охоплювати повний діапазон від 0% до 100% відносної вологості. Окремої уваги вимагає апаратна або програмна компенсація гістерезису

(запізнювання реакції при циклічному зволоженні та висиханні), а також обов'язкове коригування показів залежно від поточної температури кристала.

Оцінка якості повітря є складною мультипараметричною задачею, для вирішення якої застосовується цілий спектр вузькоспеціалізованих сенсорів. Найважливішим є вимірювання концентрації вуглекислого газу (CO_2), оскільки саме він є головним маркером ефективності роботи систем вентиляції. Для виявлення запахів, випаровувань від будівельних матеріалів чи побутової хімії використовують датчики летких органічних сполук (VOC), побудовані на базі металооксидних напівпровідників. За необхідності систему доповнюють оптичними лазерними модулями для підрахунку дрібнодисперсних частинок пилу (PM2.5 та PM10). Головними технічними викликами при використанні таких давачів є забезпечення високої вибіркової чутливості до цільового газу, мінімізація часу відгуку та боротьба з явищем деградації сенсора. Для підтримання точності протягом років експлуатації мікропрограма пристрою повинна містити алгоритми автоматичного фонового калібрування базової лінії[8].

У сучасних кліматичних комплексах датчики атмосферного тиску (барометри), створені за технологією MEMS (мікроелектромеханічні системи), відіграють роль важливих допоміжних елементів. Їхня функція полягає не стільки в прогнозуванні погодних змін, скільки в забезпеченні даних для математичної корекції показів інших сенсорів. Наприклад, точність інфрачервоних датчиків вуглекислого газу суттєво залежить від густини повітря, яка безпосередньо пов'язана з поточним атмосферним тиском. Сучасні інтегральні барометри гарантують надзвичайно високу роздільну здатність (аж до фіксації перепаду висоти в кілька сантиметрів), мають наднизьке енергоспоживання в режимі очікування та працюють у широкому діапазоні тисків, що робить їх ідеальними кандидатами для безшовної інтеграції в архітектуру розумного будинку[9].

Загальна концепція побудови надійної архітектури вимагає, щоб усі обрані сенсорні елементи відповідали єдиним стандартам інтеграції. Для

мінімізації впливу електромагнітних завад на результати вимірювань, перетворювачі повинні мати вбудовані АЦП та підтримувати передачу даних через стандартизовані цифрові шини, такі як I²C, SPI або UART. Окремим жорстким критерієм є оптимізація енергоспоживання, що передбачає підтримку датчиками режимів глибокого сну. Крім того, інженерна реалізація вимагає використання компонентів у надкомпактних корпусах (SMD), які легко розміщуються на друкованих платах обмеженого розміру, мають єдиний стандарт напруги живлення (зазвичай 3,3 В) та постачаються із заводським калібруванням, що значно прискорює та здешевлює процес серійного виробництва пристроїв[10].

1.3 Апаратно-схемотехнічна організація та структурні компоненти пристрою

Апаратна архітектура сучасного пристрою для контролю кліматичних параметрів (зокрема температури) визначає не лише фізичну організацію електронних компонентів, але й базові принципи їхньої інформаційної та енергетичної взаємодії. Грамотно спроектована структурна схема є запорукою того, що система зможе виконувати прецизійні вимірювання, безперебійно обробляти великі масиви цифрових даних, здійснювати їхнє надійне транспортування та зберігати стабільність навіть в умовах тривалої або екстремальної експлуатації. На базовому рівні архітектура поділяється на кілька ключових функціональних блоків, які тісно взаємодіють між собою. До них належать первинні перетворювачі (сенсори), центральний обчислювальний модуль (мікроконтролер), підсистема живлення, комунікаційні інтерфейси та периферійні елементи індикації. Процес вимірювання починається з давача, який безпосередньо контактує із середовищем і перетворює теплову або хімічну енергію в електричний сигнал

чи цифровий код, що згодом передається до мікропроцесорного ядра для подальшої математичної обробки[11].

Центральним ядром та умовним «мозком» усієї апаратної платформи виступає мікроконтролерний блок. На нього покладено глобальне завдання з координації роботи всіх інших підсистем, циклічного збору даних із підключених датчиків, їхньої фільтрації, програмної корекції та маршрутизації інформаційних потоків. Під час проектування вибір конкретного сімейства мікроконтролерів здійснюється на основі ретельного аналізу кількох критичних технічних факторів. До уваги береться необхідна кількість портів введення-виведення загального призначення (GPIO), апаратна підтримка швидкісних цифрових шин передачі даних (таких як I^2C, SPI або UART), обсяг оперативної та енергонезалежної пам'яті, а також загальна обчислювальна потужність ядра. Для сучасних рішень у сфері Інтернету речей (IoT) найбільш раціональним є використання мікроконтролерів (або систем-на-кристалі), які вже містять інтегровані модулі бездротового зв’язку. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити габарити друкованої плати, знизити загальну вартість компонентів та значно оптимізувати енергоспоживання системи завдяки спільним режимам сну для процесора і радіотракту[12].

Підсистема первинного перетворення базується на кліматичних давачах та відповідних протоколах їхнього підключення до контролера. Інженерна практика передбачає використання як аналогових, так і цифрових сенсорів, проте останні мають безперечну перевагу в сучасній схемотехніці. Аналогові компоненти генерують безперервний сигнал, пропорційний вимірюваній величині, але вони вимагають наявності точного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та вкрай чутливі до електромагнітних завад на довгих лініях зв'язку. Натомість цифрові давачі здійснюють усі вимірювання та перетворення безпосередньо всередині власного корпусу і віддають мікроконтролеру вже готовий, захищений від перешкод інформаційний пакет. Це гарантує високу завадостійкість та дозволяє паралельно підключати кілька різних сенсорів до однієї цифрової шини, суттєво економлячи фізичні виводи

мікроконтролера. Вибір конкретного інтерфейсу підключення спирається на жорсткі вимоги до швидкодії, надійності, дистанції передачі та загальної простоти апаратної реалізації[13].

Стабільність і довговічність роботи всієї мікроелектронної системи критично залежить від якості підсистеми живлення. Цей апаратний вузол відповідає за перетворення, фільтрацію та безперебійне постачання електричної енергії стабільного номіналу до кожного компонента на друкованій платі. Залежно від цільового призначення та умов експлуатації пристрою, його живлення може бути організовано як від стаціонарної побутової електромережі через понижуючі адаптери, так і від повністю автономних джерел — акумуляторних батарей різної хімії. Схемотехніка високоякісного блоку живлення обов'язково повинна включати лінійні або імпульсні стабілізатори напруги, а також комплексні апаратні засоби захисту. Ці захисні ланцюги оберігають чутливі мікросхеми від раптових стрибків вхідної напруги, перевантажень по струму, коротких замикань та, у випадку портативних пристроїв, від критичного перерозряду батареї[14].

Останньою, але надзвичайно важливою ланкою апаратної архітектури є модулі комунікації та засоби локального відображення інформації для взаємодії з користувачем. Для транспортування зібраних показників про температуру та мікроклімат на зовнішні сервери або мобільні додатки найчастіше застосовуються різноманітні бездротові протоколи, хоча в специфічних умовах можуть використовуватися і класичні дротові магістралі зв'язку. Крім можливості віддаленого моніторингу, розробка повноцінного пристрою передбачає інтеграцію елементів локальної індикації. Залежно від складності системи, це можуть бути як повноцінні цифрові дисплеї, що в реальному часі виводять точні графіки та значення параметрів, так і мінімалістичні системи на базі світлодіодів. Останні дозволяють швидко та енергоефективно сигналізувати користувачеві про поточний робочий статус пристрою, наявність підключення до мережі або вихід кліматичних параметрів за межі норми[15].

1.4 Комунікаційні інтерфейси та підсистеми програмної обробки інформаційних потоків

Ефективність та загальна життєздатність будь-якого сучасного комплексу моніторингу кліматичних параметрів критично залежить від побудови надійної інфраструктури передавання та обробки даних. Саме ця підсистема виконує роль інформаційної магістралі, яка безперервно та безперебійно транспортує масиви отриманих значень від первинних сенсорних елементів до мікроконтролерного ядра, а згодом — до інтерфейсу кінцевого користувача або глобальної серверної платформи Інтернету речей (IoT). Від якості проектування цього етапу залежить не лише швидкість реакції системи на зміну мікроклімату, але й її стійкість до збоїв[16].

У сучасній інженерній практиці для організації обміну даними між вузлами кліматичних систем найчастіше віддають перевагу бездротовим технологіям. Такий підхід гарантує максимальну гнучкість під час просторового розміщення пристроїв у приміщенні, усуває потребу в прокладанні кабельних трас та суттєво спрощує інтеграцію нових модулів у вже існуючу екосистему розумного будинку чи промислового об'єкта.

Вибір конкретного фізичного середовища зв'язку є компромісом між необхідною дальністю передавання, пропускною здатністю, лімітами енергоспоживання та загальною кількістю підключених сенсорних вузлів.

Для забезпечення комунікації на вищому (прикладному) рівні між апаратним пристроєм та віддаленою IoT-платформою класичні веб-протоколи є занадто "важкими". Замість них активно впроваджуються спеціалізовані легковагові стандарти, такі як MQTT або CoAP. Їхня архітектура максимально оптимізована для функціонування в умовах жорстко обмежених обчислювальних ресурсів мікроконтролера та нестабільних каналів зв'язку. Наприклад, принцип публікації та підписки (Publish/Subscribe), закладений у

протокол MQTT, гарантує миттєву та гарантовану доставку телеметрії в режимі реального часу з мінімальним трафіком[17].

Сучасна парадигма проектування передбачає, що первинна аналітика інформації має відбуватися безпосередньо "на краю" мережі — тобто в самому мікроконтролері пристрою, ще до відправки даних на сервер. Цей процес охоплює цілий комплекс математичних операцій. Спочатку відбувається циклічне опитування сенсорів, після чого сирі дані проходять процедуру програмної фільтрації для відсічення випадкових шумів або апаратних збоїв (наприклад, за допомогою алгоритмів медіанного фільтра, коли з ряду вимірювань відкидаються екстремальні відхилення, а для подальшої роботи береться центральне значення)[18].

Далі система здійснює усереднення показників за певний проміжок часу, перевіряє їх на математичну коректність та порівнює із заздалегідь запрограмованими критичними порогами. Такий підхід до локальної обробки не лише розвантажує радіоканал, значно зменшуючи обсяг передаваного трафіку, але й радикально підвищує автономність і швидкодію системи: пристрій здатен самостійно увімкнути тривогу або керуючий сигнал ще до того, як сервер опрацює інформацію[19].

На вищому рівні архітектури розташовується серверна або хмарна інфраструктура, яка бере на себе завдання з довготривалого зберігання, глибокої аналітичної обробки та графічної візуалізації кліматичних параметрів. Отримані масиви інформації структуруються та накопичуються у спеціалізованих базах даних часових рядів. Це створює потужний фундамент для ретроспективного аналізу тенденцій мікроклімату за дні, місяці чи роки.

Завдяки накопиченій статистиці система здатна автоматично генерувати детальні звіти щодо енергоефективності приміщення та використовувати алгоритми прогнозування для завчасного корегування роботи систем опалення чи вентиляції. Крім того, хмарна парадигма забезпечує кросплатформенність: користувачі отримують миттєвий доступ до інтерактивних графіків та панелей керування (дашбордів) із будь-якого смартфона чи комп'ютера, а сам

кліматичний монітор легко інтегрується з іншими глобальними системами автоматизації через API.

Оскільки кліматичні параметри можуть містити чутливу інформацію про присутність людей у приміщенні або режим роботи інфраструктури, засоби обробки даних повинні відповідати суворим стандартам кібербезпеки. Система зобов'язана гарантувати абсолютний захист інформаційних потоків як від випадкової втрати, так і від цілеспрямованого несанкціонованого втручання.

Для реалізації цього завдання на всіх етапах передачі застосовуються стійкі алгоритми наскрізного шифрування каналів зв’язку (наприклад, протоколи TLS/SSL). Кожен вузол мережі проходить сувору процедуру цифрової автентифікації перед початком обміну даними. Для захисту від фізичної втрати показників під час тимчасового обриву інтернет-з'єднання, у мікроконтролерах реалізуються механізми резервного локального кешування — пристрій накопичує дані у власній незалежній пам'яті, щоб автоматично вивантажити їх на сервер відразу після відновлення зв'язку. Безкомпромісна надійність цього сегмента є фундаментальною умовою для безпечної та стабільної експлуатації кліматичних комплексів у реальних умовах.

1.5 Аналіз поширених на ринку IoT-комплексів для моніторингу внутрішнього мікроклімату

Для обґрунтованого вибору архітектури майбутнього пристрою необхідно здійснити детальний аналіз існуючих на ринку рішень, які дозволяють автоматизувати контроль за кліматичними параметрами у приміщеннях. Сучасний сегмент IoT-систем є надзвичайно різноманітним, і представлені в ньому комплекси суттєво відрізняються за базовою архітектурою, закладеними функціональними можливостями, ступенем

відкритості та рівнем інтеграції з іншим обладнанням. Увесь масив доступних рішень можна умовно поділити на кілька великих категорій: масові комерційні платформи, професійні системи управління будівлями та кастомні рішення для ентузіастів і розробників[20].

Комерційні платформи розумного дому, яскравими представниками яких є екосистеми Tuya Smart та Xiaomi Mi Home, концептуально орієнтовані на пересічного масового споживача. Головною перевагою таких рішень є реалізація принципу «Plug-and-Play» — вони гарантують максимально швидке розгортання та впровадження системи контролю мікроклімату з мінімальними зусиллями на налаштування. Користувачеві достатньо підключити датчик до домашньої мережі Wi-Fi та додати його у зручний мобільний застосунок. Однак за цю простоту доводиться платити обмеженою гнучкістю: такі пристрої працюють на закритих пропрієтарних протоколах і мають жорстку залежність від хмарних серверів виробника. Це означає, що у разі відсутності інтернет-з'єднання або збою на серверах компанії, система втрачає свою працездатність, а інтеграція зі стороннім обладнанням часто є неможливою. Візуальні приклади інтерфейсів популярних екосистем представлені нижче, рис. 1.1. – 1.3

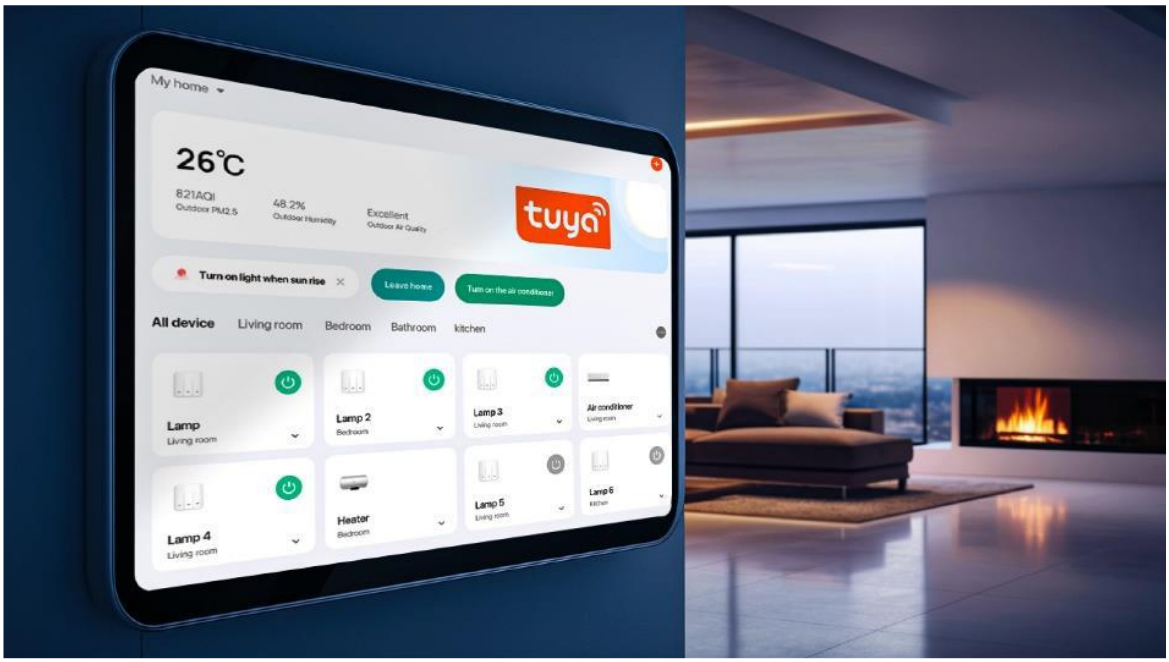


Рисунок 1.1 – Комерційна платформа розумного дому Tuya Smart

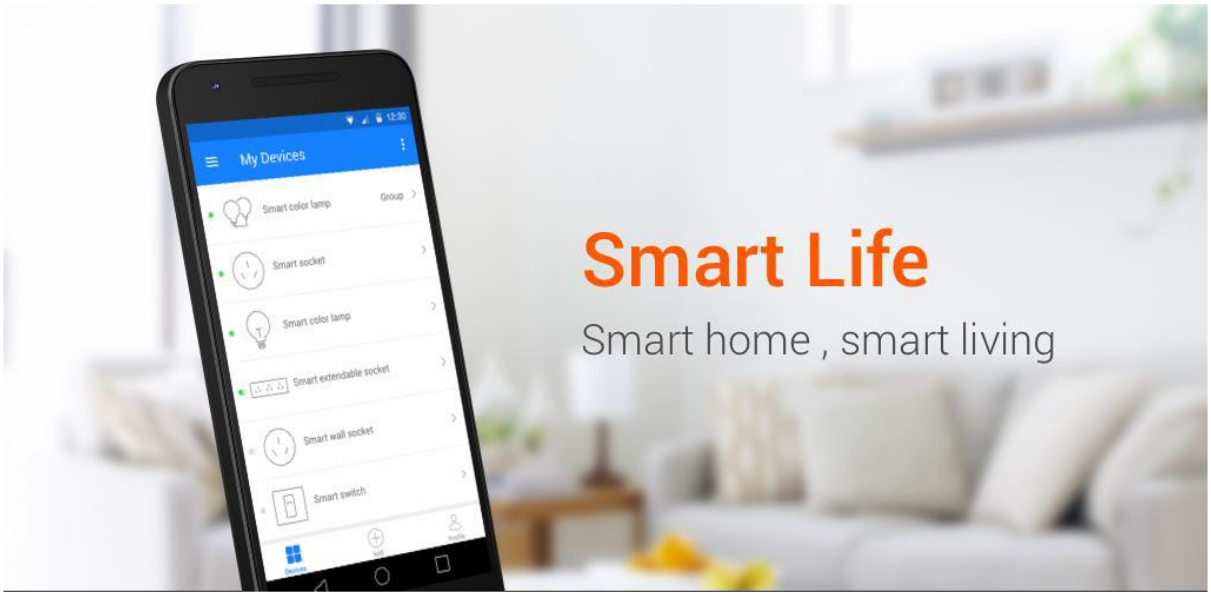


Рисунок 1.2 – Комерційна платформа розумного дому Smart Life

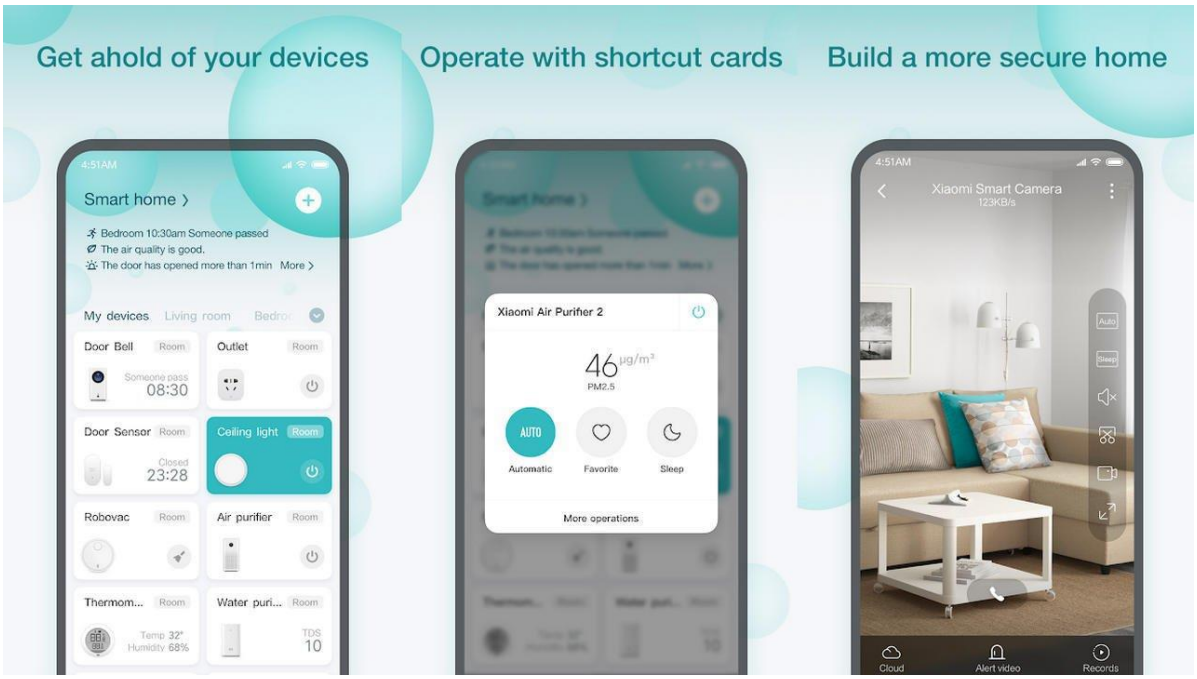


Рисунок 1.3 – Комерційна платформа розумного дому Xiaomi Mi Home

Абсолютно інший підхід реалізується у великих інфраструктурних проєктах. Системи класу BMS (Building Management System) застосовуються переважно в масштабах багатоповерхових комерційних будівель, торгових центрів та великих промислових об’єктів[21]. Їхнє головне призначення полягає в глибокій централізованій диспетчеризації та моніторингу всіх інженерних мереж споруди. У контексті контролю мікроклімату BMS

забезпечує безшовну інтеграцію з потужним промисловим обладнанням систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (HVAC). Це дозволяє реалізувати комплексний підхід до підтримання ідеального середовища, який балансує між максимальним комфортом для людей та суворою енергоефективністю будівлі загалом. Зовнішній вигляд типових інтерфейсів таких комплексів проілюстровано відповідним графічним матеріалом, рис. 1.4.

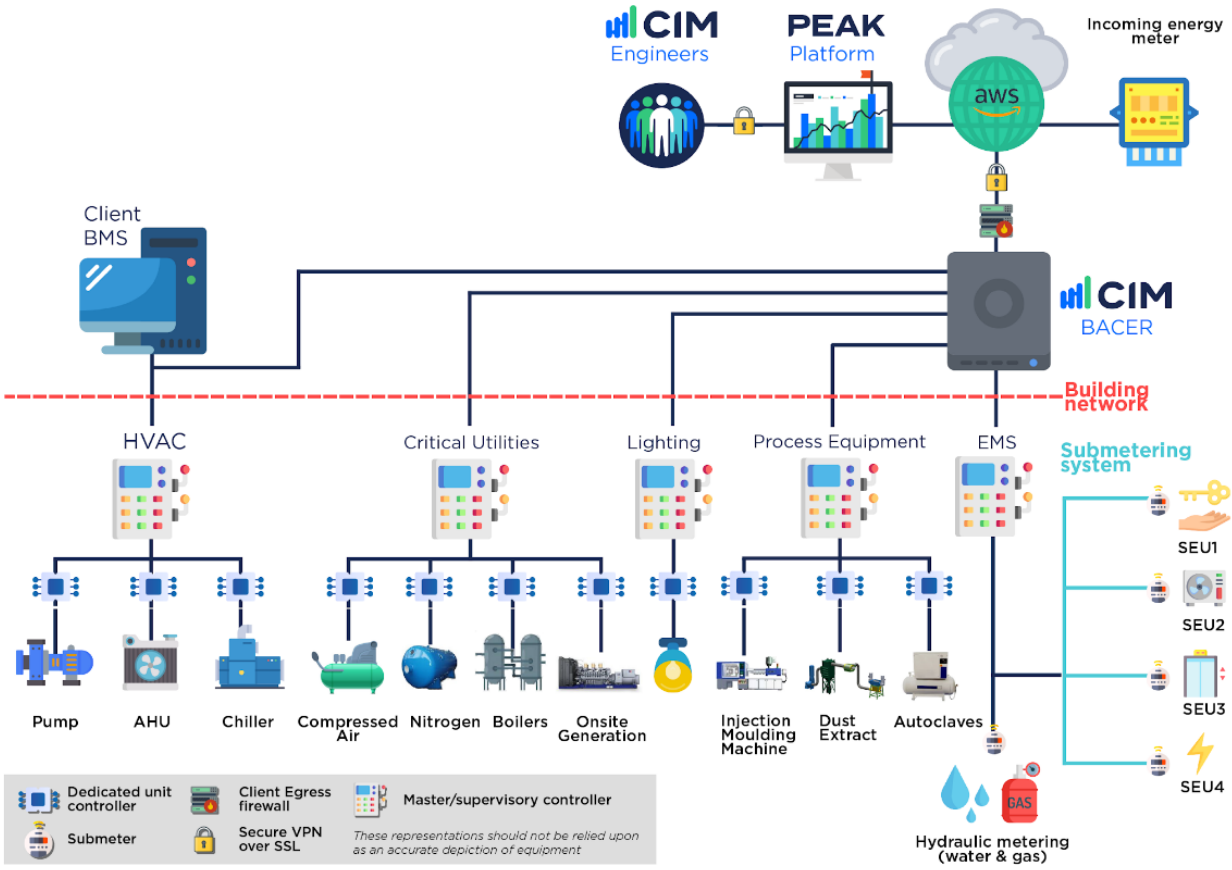


Рисунок 1.4 – Структурна організація та інтерфейс комплексів диспетчеризації будівель класу BMS

Фундаментальною особливістю систем BMS є їхня сувора ієрархічна архітектура. На найнижчому (польовому) рівні розташовуються високоточні промислові давачі температури, вологості, тиску та концентрації вуглекислого газу, а також виконавчі механізми (засувки, клапани, приводи). Вище знаходиться рівень локальних програмованих логічних контролерів (ПЛК), які здійснюють безпосереднє керування обладнанням. На самій вершині

розташовується диспетчерський пункт із центральним сервером. Для забезпечення безперебійного зв'язку між цими рівнями застосовуються виключно надійні промислові стандарти передачі даних, такі як BACnet, Modbus та KNX. Використання цих протоколів гарантує найвищу завадостійкість, детермінованість передачі команд та взаємозамінність обладнання від різних світових виробників.

Безперечною перевагою BMS є здатність алгоритмів автоматично підлаштовувати роботу кліматичних агрегатів не лише на основі внутрішніх показників, але й з урахуванням прогнозу погоди, поточного навантаження на електромережу, часу доби та навіть кількості людей у приміщенні.[22] Це призводить до колосальної економії ресурсів у довгостроковій перспективі. Проте впровадження такого комплексу супроводжується величезними капітальними інвестиціями у закупівлю апаратного забезпечення, вимагає складного інженерного проєктування та залучення вузькопрофільних спеціалістів для пусконалагоджувальних робіт. З огляду на це, використання BMS у невеликих приватних приміщеннях чи офісах є економічно недоцільним.

Проміжною та найбільш перспективною для дослідників нішею є платформи для самостійного конструювання (DIY-рішення). Зокрема, програмний комплекс Home Assistant у поєднанні з індивідуально спроєктованими мікроконтролерними модулями на базі чіпів серії ESP32 формує потужну екосистему, яка вдало поєднує безмежну гнучкість, масштабованість та вкрай низьку вартість компонентної бази. Основна ідеологія таких рішень — повний локальний контроль. Дані не відправляються на сторонні сервери, а обробляються локально на міні-комп'ютері користувача, що гарантує високу швидкість реакції та повну конфіденційність. Проте розгортання такої системи, приклад якої наведено нижче, рис. 1.5, вимагає від користувача глибоких технічних знань, розуміння принципів програмування та мережевої маршрутизації.

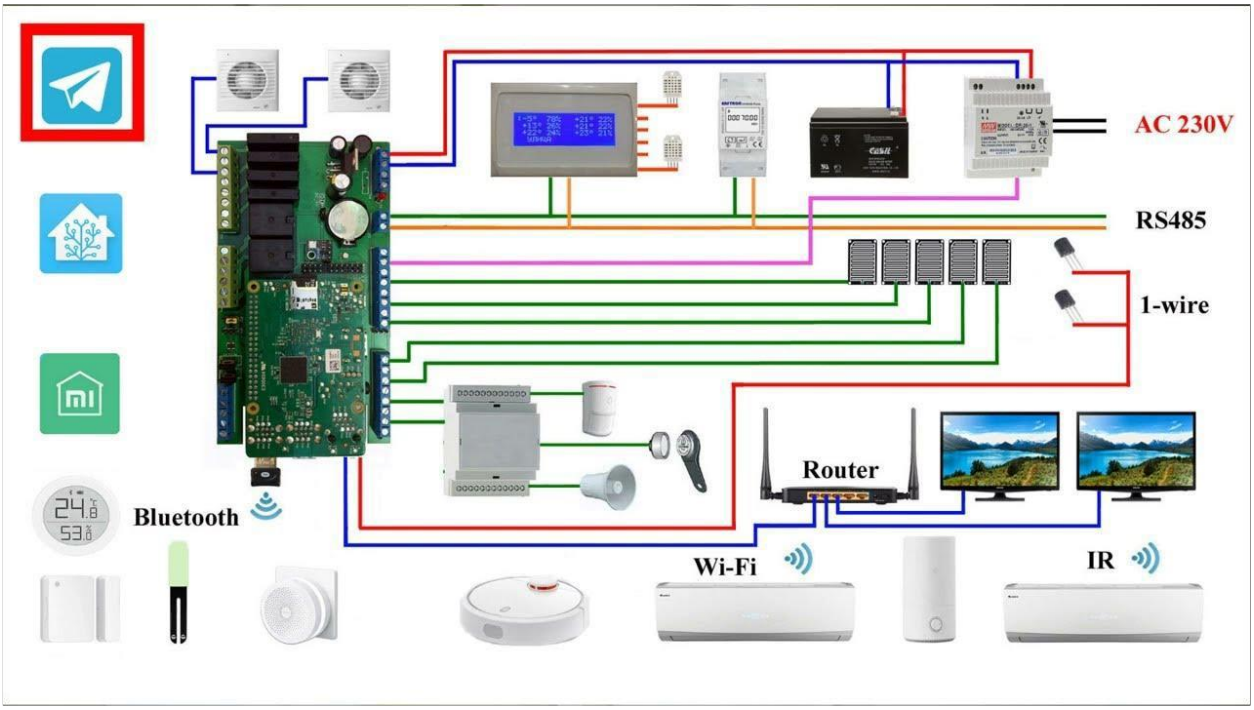


Рисунок 1.5 – Приклад розгортання відкритої платформи Home Assistant на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi

Підсумовуючи, можна стверджувати, що вибір оптимальної концепції системи мікроклімату диктується масштабами приміщення, виділеним бюджетом та бажаним рівнем автономності. Для цілей наукових досліджень, створення прототипів та розробки індивідуальних локальних мереж найбільший потенціал демонструють саме гнучкі мікроконтролерні платформи, такі як Arduino або сімейство ESP. Їхня привабливість зумовлена низкою вагомих факторів, які в комплексі роблять процес розробки максимально ефективним[23].

Передусім, використання екосистеми Arduino гарантує надзвичайну простоту старту та впровадження розробки. Завдяки інтуїтивно зрозумілому інтегрованому середовищу розробки (IDE) та наявності тисяч відкритих бібліотек, інженер може зосередитися на логіці роботи пристрою, суттєво скорочуючи час на написання базового коду для опитування датчиків. Крім того, ці платформи відрізняються феноменальною сумісністю з абсолютною більшістю існуючих на ринку електронних компонентів. До одного контролера можна легко підключити прецизійні сенсори температури, вологості, датчики

якості повітря та різноманітні радіомодулі (Wi-Fi, Bluetooth, LoRa чи ZigBee), формуючи унікальну апаратну конфігурацію під конкретне завдання.[24]

Важливим чинником є також економічна доцільність. Мікроконтролерні плати та супутні модулі мають надзвичайно низьку вартість, що робить їх ідеальним вибором для освітніх проєктів, створення експериментальних зразків або розгортання бюджетних локальних мереж. Завдяки модульній архітектурі, розробник отримує змогу легко масштабувати функціонал: додавання нового реле або датчика не вимагає глобального перепроєктування базової схеми. Відкритість платформи (Open Source) на рівні як апаратного забезпечення, так і програмного коду надає інженеру повний контроль над усіма процесами в системі, виключаючи будь-які приховані обмеження від виробників. Як показує практика, за умови грамотного схемотехнічного проєктування, створення якісної підсистеми живлення та оптимізації програмних алгоритмів, пристрої на базі цих контролерів здатні роками демонструвати високу надійність та стабільність у завданнях безперервного моніторингу кліматичних параметрів середовища.

2 МІКРОПРОЦЕСОРНІ ПЛАТФОРМИ ТА СЕНСОРНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ

2.1 Аналіз та порівняльна характеристика мікропроцесорних платформ для побудови комплексів кліматичного моніторингу

Проєктування будь-якої системи автоматизації починається з вибору її апаратного «серця» — мікроконтролерної платформи. Саме від цього компонента залежить здатність пристрою швидко обробляти дані з первинних перетворювачів, підтримувати стабільний зв'язок із зовнішнім світом та економно витрачати енергію. Сучасний ринок пропонує широкий спектр рішень, серед яких найбільш виділяються платформи Arduino, рис. 2.1, ESP32, STM32, а також більш вузькоспеціалізовані ESP8266 та Raspberry Pi Pico.

Розпочнемо огляд із платформи Arduino, яка є визнаним світовим стандартом у сфері швидкого прототипування електронних пристроїв. Це комплексна апаратно-програмна екосистема з відкритою архітектурою (Open Source), що здобула величезну популярність завдяки надзвичайній простоті написання програмного коду та колосальній базі готових бібліотек.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд популярних мікроконтролерних плат родини Arduino

У контексті створення комплексів для моніторингу клімату, Arduino пропонує низку вагомих переваг. Перш за все, це безпроблемна інтеграція з абсолютною більшістю існуючих кліматичних сенсорів. Завдяки наявності стандартних апаратних шин (I^2C, SPI, UART) та високоточних аналогових входів, до контролера можна одночасно підключити датчики температури, відносної вологості, а також складні аналізатори якості повітря (CO_2 та VOC). Крім того, незважаючи на відсутність вбудованих радіомодулів, архітектура платформи є надзвичайно масштабованою. Її можна легко доповнити зовнішніми комунікаційними шилдами (Wi-Fi, Bluetooth, LoRa чи навіть GSM-модемами) для організації повноцінного IoT-шлюзу. Економічна доступність платформи та наявність глобальної спільноти розробників дозволяють звести до мінімуму час і фінансові витрати на етапі створення перших експериментальних зразків. У таких системах Arduino бере на себе роль надійного центрального вузла: контролер безперервно опитує датчики, здійснює математичну фільтрацію сигналів від завад, порівнює отримані значення з еталонними порогами і, за потреби, формує керуючі сигнали для реле вентиляційних чи опалювальних систем. Проте варто враховувати, що відносно скромні обчислювальні ресурси та необхідність використання зовнішніх мережевих плат дещо обмежують використання Arduino у промислових IoT-мережах високого рівня.

Наступною важливою ланкою еволюції мікроконтролерів є сімейство ESP32, рис. 2.2. Це високопродуктивна система на кристалі (SoC), яка була спроєктована інженерами спеціально для задоволення потреб сучасного Інтернету речей. Головною концептуальною відмінністю цього рішення є наявність потужних вбудованих трансиверів Wi-Fi та Bluetooth безпосередньо на кремнієвому кристалі процесора.



Рисунок 2.2 – Мікроконтролерний модуль на базі архітектури ESP32

Використання ESP32 для контролю клімату відкриває значно ширші можливості. Завдяки двоядерній 32-бітній архітектурі та тактовій частоті до 240 МГц, цей контролер здатен не лише збирати дані, але й виконувати складну математичну аналітику, шифрувати інтернет-трафік та підтримувати безпечне з'єднання з хмарними серверами в реальному часі. Пристрій має багатий набір периферійних інтерфейсів, що гарантує сумісність із будь-якими цифровими та аналоговими сенсорами. Окремо варто відзначити просунуту систему керування живленням: ESP32 підтримує кілька режимів глибокого сну, в яких споживання струму падає до мікроамперів. Це робить платформу ідеальним кандидатом для створення повністю автономних, батарейних датчиків мікроклімату. Додатковою перевагою є те, що програмувати ESP32 можна в тому ж звичному середовищі Arduino IDE, що забезпечує плавний перехід для розробників.

Для завдань, що вимагають абсолютної безвідмовності в жорстких умовах експлуатації, використовується серія 32-бітних мікроконтролерів STM32, рис.2.3. Побудовані на базі передової архітектури ARM Cortex-M, ці чипи є стандартом де-факто у професійному промисловому та комерційному приладобудуванні.



Рисунок 2.3 – Промислова мікроконтролерна плата серії STM32

Платформа STM32 вирізняється безкомпромісною обчислювальною потужністю (окремі моделі працюють на частотах понад 180 МГц) та філігранною точністю апаратних таймерів. Вона здатна миттєво опрацьовувати гігантські масиви сенсорних даних, керувати складною кліматичною технікою за допомогою багатоканальної широтно-імпульсної модуляції (PWM) та інтегруватися у глобальні системи диспетчеризації будівель (BMS). Крім того, ці контролери мають виняткову завадостійкість та феноменальну енергоефективність. Однак, розробка програмного забезпечення для STM32 вимагає глибоких інженерних знань, роботи у спеціалізованих професійних середовищах (наприклад, Keil або IAR) та глибокого розуміння архітектури регістрів, що робить цей інструмент занадто складним для базових дослідницьких проєктів.

Поряд із флагманськими рішеннями, доцільно розглянути і більш компактні альтернативи. Однією з таких є мікросхема ESP8266, рис.2.4, яка свого часу здійснила революцію у сфері бюджетного IoT завдяки вбудованому Wi-Fi модулю.



Рисунок 2.4 – Компактний Wi-Fi модуль серії ESP8266

Ця платформа є надзвичайно компактною та економічно вигідною для розгортання простих мереж кліматичних датчиків. Її ресурсів цілком достатньо для опитування одного-двох сенсорів та відправки даних на сервер. Проте суттєво обмежена кількість портів введення-виведення (GPIO) та менша обчислювальна потужність не дозволяють будувати на її базі складні багатофункціональні кліматичні хаби.

Ще одним цікавим сучасним рішенням є плата Raspberry Pi Pico, рис.2.5. Цей контролер пропонує зовсім інший підхід: він робить ставку на величезну кількість вільних пінів GPIO для підключення десятків периферійних пристроїв та підтримку високорівневої мови програмування MicroPython.



Рисунок 2.5 – Мікроконтролерна плата Raspberry Pi Pico

Можливість писати логіку пристрою на мові Python критично прискорює процес створення складних алгоритмів керування мікрокліматом. Головним обмеженням базової версії Pico є фізична відсутність вбудованого бездротового інтерфейсу, що змушує інженерів знову повертатися до концепції зовнішніх радіомодулів для інтеграції пристрою в Інтернет речей.

Підсумовуючи цей порівняльний аналіз, можна чітко розмежувати сфери застосування кожної платформи. ESP32 є безумовним лідером для створення комерційних автономних IoT-пристроїв. STM32 залишається вибором для суворої промислової автоматизації. Чіпи ESP8266 чудово підходять для ультрабюджетних точкових рішень, а Raspberry Pi Pico розкриває свій потенціал у багатоканальних системах зі складним алгоритмічним керуванням. Водночас для завдань поточного дослідження, прототипування та швидкої перевірки концепцій керування кліматичними параметрами, найбільш доцільним і збалансованим вибором залишається платформа Arduino. Вона гарантує мінімальний поріг входження, високу швидкість отримання практичного результату та має достатній технічний потенціал для успішної реалізації поставленого завдання.

2.2 Комунікаційні протоколи та інтерфейси зв'язку між мікроконтролером і первинними перетворювачами

Надійна та безперебійна робота комплексу для моніторингу мікроклімату залежить не лише від якості самих сенсорів або потужності мікроконтролера, але й від того, наскільки правильно організовано інформаційний обмін між ними. Вибір комунікаційного інтерфейсу є критичним інженерним рішенням, яке визначає топологію підключення, максимальну відстань між елементами системи, загальну швидкодію та здатність протистояти електромагнітним завадам. У сучасній схемотехніці для

обміну даними між обчислювальним ядром та первинними перетворювачами використовується низка стандартизованих цифрових протоколів, а також класичні аналогові лінії зв'язку.

Інтерфейс I²C (Inter-Integrated Circuit) є одним із найпопулярніших стандартів послідовного зв'язку в сучасній електроніці. Його головна перевага полягає в надзвичайній економічності щодо апаратних ресурсів мікроконтролера: для організації повноцінного двостороннього обміну даними потрібні лише дві фізичні лінії зв'язку. Перша лінія (SDA) відповідає безпосередньо за передачу інформаційних бітів, тоді як друга (SCL) генерує синхронізуючі тактові імпульси.

Ця шина дозволяє підключати до однієї пари проводів десятки різних периферійних пристроїв паралельно. Кожен сенсор має власну унікальну апаратну адресу, завдяки чому мікроконтролер може безпомилково звертатися до конкретного датчика, не заважаючи іншим. Саме I²C є стандартом де-факто для інтеграції високоточних комбінованих датчиків температури, вологості та тиску (наприклад, серій BME280 чи SHT31), а також газоаналізаторів. Однак варто зазначити, що через використання підтягуючих резисторів (open-drain архітектура) лінія I²C є чутливою до паразитної ємності кабелю. Тому цей протокол найкраще розкриває себе на коротких відстанях, переважно в межах однієї друкованої плати або на дистанції до кількох десятків сантиметрів, де вплив зовнішніх завад є мінімальним.

Коли виникає потреба в обробці великих масивів інформації з мінімальними затримками, інженери віддають перевагу протоколу SPI (Serial Peripheral Interface). На відміну від I²C, ця шина використовує чотири окремі лінії: дві для зустрічного напрямку даних (MOSI та MISO), одну для тактової частоти (SCK) та індивідуальні лінії вибору пристрою (CS). Завдяки відсутності складної системи адресації та використанню повноцінних двотактних виходів (push-pull), SPI здатний працювати на надзвичайно високих частотах, забезпечуючи миттєву реакцію системи.

У кліматичних комплексах SPI застосовується дещо рідше для звичайних температурних датчиків, проте він є незамінним для підключення високошвидкісних зовнішніх аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), контролерів графічних дисплеїв або модулів пам'яті (SD-карт), які використовуються для локального збереження архівів мікрокліматичних показників (логіювання).

Протокол UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) кардинально відрізняється від попередніх тим, що він не використовує окремої лінії для тактової частоти. Замість цього пристрої узгоджують однакову швидкість передачі (baud rate) заздалегідь. Зв'язок здійснюється перехресним з'єднанням двох ліній: передавальної (TX) та приймальної (RX).

UART забезпечує виключно комунікацію «точка-точка» (лише між двома пристроями), але його схемотехнічна простота робить його ідеальним для зв'язку між різними мікроконтролерами або для роботи з радіомодулями. У системах розумного будинку саме через UART центральний процесор зазвичай спілкується з GSM-модемами, модулями Wi-Fi, Bluetooth-адаптерами або GPS-приймачами. Додатковою перевагою є можливість використання мікросхем-перетворювачів (наприклад, RS-485), які трансформують сигнал UART у диференціальний, дозволяючи передавати дані на сотні метрів в умовах сильних промислових завад.

Для вирішення завдань із розгортання розгалуженої мережі датчиків у різних частинах великого приміщення оптимально підходить технологія OneWire. Цей протокол дозволяє здійснювати і живлення сенсора, і повноцінний двосторонній обмін даними, використовуючи лише один інформаційний провідник (разом із загальним проводом заземлення).

Кожен пристрій стандарту OneWire ще на заводі отримує унікальний незмінний 64-бітний ідентифікатор. Це дозволяє підключати сенсори послідовно один за одним (шлейфом) на один фізичний вивід мікроконтролера. Класичним прикладом такого рішення є популярний цифровий термометр DS18B20. Хоча швидкість передачі даних у OneWire є

найнижчою серед усіх цифрових інтерфейсів, її цілком достатньо для інерційних теплових процесів. Крім того, завдяки специфіці формування сигналів, ця шина демонструє високу стійкість до завад і здатна стабільно працювати на кабельних лініях довжиною в десятки метрів.

Незважаючи на домінування цифрових інтерфейсів, частина специфічних сенсорів (наприклад, деякі газові аналізатори на базі діоксиду олова, фоторезистори або датчики вологості ґрунту для оранжерей) видають безперервний аналоговий сигнал у вигляді зміни напруги. Для їх підключення використовуються аналогові входи мікроконтролера, з'єднані з внутрішнім аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

Робота з аналоговими сигналами вимагає підвищеної уваги до схемотехніки. На відміну від цифрових шин, де логічний нуль чи одиниця розпізнаються безпомилково навіть при невеликих спотвореннях, будь-яка наведена електромагнітна завада на аналоговому кабелі безпосередньо змінює виміряне значення. Для забезпечення точності необхідно використовувати екрановані провідники, розміщувати датчики якомога ближче до контролера, а також застосовувати апаратні RC-фільтри низьких частот для відсікання електричного шуму від побутової мережі або імпульсних блоків живлення.

У процесі проєктування системи архітектору завжди доводиться шукати компроміс. Високошвидкісні інтерфейси (SPI) ідеально підходять для масивів даних, але їхня високочастотна природа робить їх вразливими до спотворень на довгих лініях. Протокол I²C забезпечує зручність на платі, але також має жорсткі ліміти щодо довжини кабелю. Для віддалених точок вимірювання в приміщенні найбільш доцільним є використання низькошвидкісної, але надзвичайно надійної шини OneWire або використання цифрових датчиків із подальшим перетворенням сигналу в завадостійкі промислові стандарти. Грамотне комбінування цих інтерфейсів дозволяє створити систему, яка миттєво реагує на критичні зміни (через SPI/I²C на центральній платі) та стабільно збирає фонову статистику з віддалених куточків кімнати (через OneWire або аналогові лінії з фільтрацією).

2.3 Аналітичний огляд та порівняльна характеристика сенсорів для вимірювання кліматичних показників

Для побудови надійного апаратно-програмного комплексу критично важливо здійснити глибокий аналіз первинних перетворювачів: сенсорів температури, відносної вологості, атмосферного тиску, а також датчиків концентрації вуглекислого газу. Кожен із цих типів давачів має власні унікальні фізичні принципи роботи, специфічні технічні характеристики та оптимальні сфери застосування, які необхідно детально розглянути для прийняття правильного інженерного рішення.

Температурні сенсори відіграють базову роль у будь-якій системі клімат-контролю. За фізичним принципом дії вони найчастіше реалізуються у вигляді термісторів (де електричний опір змінюється залежно від нагрівання), термопар для екстремальних температурних умов або ж інтегральних цифрових мікросхем на базі напівпровідникових структур. Сучасні температурні сенсори цього класу зазвичай забезпечують точність у межах від ±0,5 до ±1 °C та здатні працювати у широкому кліматичному діапазоні від −40 до +125 °C. Отримана з них інформація є фундаментом для керування вентиляцією, системами опалення та загального підтримання комфортних умов у приміщенні.

Серед найпопулярніших на ринку рішень класичним вибором для вимірювання виключно температури є цифровий датчик DS18B20, рис.2.6.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд та інтерфейс цифрового термометра DS18B20

Цей компонент вирізняється надзвичайною простотою комутації завдяки використанню однопровідної шини OneWire. Висока точність у поєднанні з доступною вартістю робить його ідеальним кандидатом для створення базових прототипів, розподілених мереж термометрії чи навчальних стендів.

Іншим надзвичайно поширеним рішенням є комбінований модуль DHT22, рис.2.7

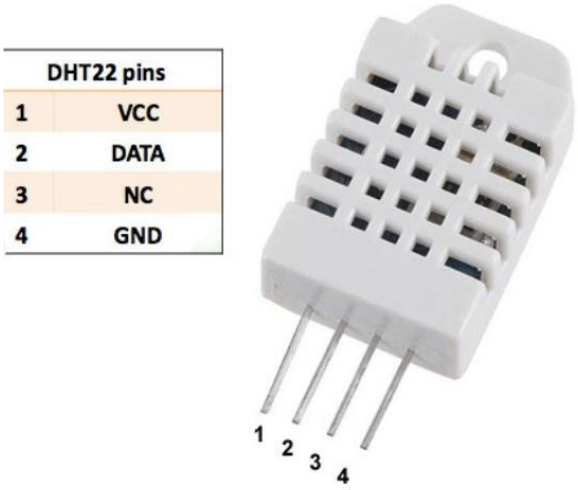


Рисунок 2.7 – Комбінований сенсор температури та вологості DHT22

Цей бюджетний компонент дозволяє мікроконтролеру одночасно фіксувати як теплові показники, так і рівень вологості. Проте, незважаючи на його популярність у простих DIY-проєктах, він має суттєві недоліки: відносно великий час реакції на зміни середовища та нижчу загальну точність вимірювання вологості порівняно з професійними аналогами.

Якщо ж архітектура пристрою вимагає максимальної надійності та компактності, інженери звертаються до інтегрального модуля BME280, рис.2.8.



Рисунок 2.8 – Універсальний кліматичний модуль BME280 із підтримкою шин I²C та SPI

Це флагманське універсальне рішення, яке з високою точністю обчислює одразу три параметри: температуру, відносну вологість та атмосферний тиск. Хоча BME280 є значно дорожчим компонентом і вимагає глибокого розуміння протоколів передачі даних для налаштування, він ідеально підходить для розгортання повноцінних комерційних IoT-систем із жорсткими вимогами до метрології.

Контроль рівня насиченості повітря водяною парою є наступним обов'язковим етапом моніторингу внутрішнього середовища. Для цього застосовуються датчики вологості, які за своєю внутрішньою структурою найчастіше поділяються на ємнісні та резистивні. У сучасній мікроелектроніці виробники практично завжди об'єднують їх із термодавачами на одному кремнієвому кристалі для забезпечення апаратної температурної компенсації показів у реальному часі. Типовий робочий діапазон таких пристроїв охоплює весь спектр від 0 до 100% відносної вологості, при цьому їхня абсолютна похибка коливається від ±2% до ±5%. Завдяки цим компонентам центральний хаб запобігає появі небезпечного конденсату на вікнах і стінах та здійснює інтелектуальне керування побутовими зволожувачами або осушувачами.

Як зазначалося, найпростішим інструментом у цій категорії є датчик DHT22, який задовольняє базові потреби, але є повільним у динаміці. Для серйозніших завдань, де критично важливою є миттєва реакція на зміну вологості повітря, значно кращим і професійнішим вибором стане прецизійний чип SHT31, рис.2.9.

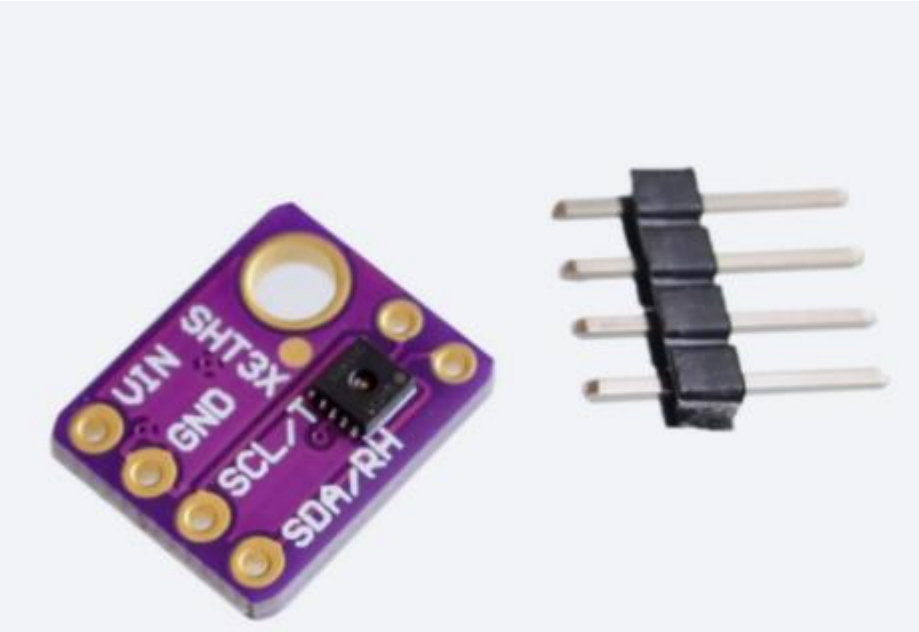


Рисунок 2.9 – Високоточний мікромодуль вологості та температури SHT31

Він характеризується не лише відмінною стабільністю показників упродовж тривалої експлуатації, але й надзвичайно високою швидкодією. Повною альтернативою для комплексних рішень знову ж таки виступає чип BME280, який повністю закриває потреби всебічного моніторингу, щоправда, за умови готовності до складнішої апаратної розв'язки.

Інтеграція датчиків атмосферного тиску дозволяє перетворити звичайний термометр на повноцінну метеостанцію. Сучасні електронні барометри конструюються на основі мікроелектромеханічних систем (технологія MEMS), що забезпечує їм мікроскопічні габарити та вражаючу точність (на рівні ±1…±2 гектопаскалів) у широкому діапазоні від 300 до 1100 гПа. Ці значення використовуються мікропроцесором для локального прогнозування різких змін погодних умов, математичної компенсації висоти під час роботи газових аналізаторів та адаптивного налаштування потужності витяжної вентиляції з урахуванням аеродинамічного опору.

Базовим і дуже надійним компонентом у цьому сегменті є сенсор BMP280, рис.2.10.

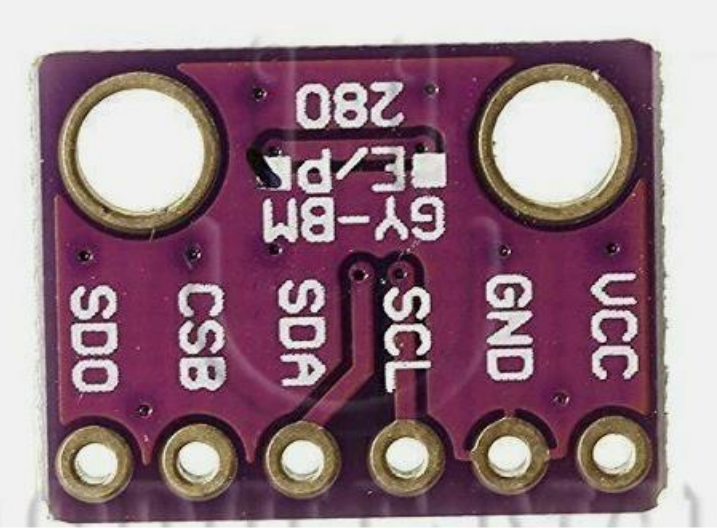


Рисунок 2.10 – Інтегральний барометр базового рівня BMP280

Це економічно вигідне рішення, яке вимірює тиск і температуру. Воно ідеально вписується в архітектуру систем, де програмний моніторинг вологості просто не передбачений логікою роботи. Для ширшого спектра завдань використовують його старшу версію BME280. Проте для вирішення вузькоспеціалізованих інженерних задач застосовуються специфічні рішення, такі як модуль MPL3115A2, рис.2.11.



Рисунок 2.11 – Високоточний датчик тиску з функцією альтиметра MPL3115A2

Цей барометр відрізняється винятковою точністю вимірювання абсолютного тиску та вбудованими алгоритмами визначення висоти над рівнем моря. Це робить його потужним інструментом для розробки складної автоматизації в системах вентиляції багатоповерхових будівель, де потрібно враховувати різницю барометричного тиску на різних поверхах.

Одним із найважливіших маркерів здорового мікроклімату, що безпосередньо впливає на продуктивність та самопочуття людей у закритому приміщенні, є концентрація вуглекислого газу. Для точної фіксації цього параметру використовують складні оптичні модулі, принцип дії яких базується на технології недисперсійного інфрачервоного поглинання (NDIR). Стандартний робочий діапазон високоякісних газових датчиків становить від 0 до 5000 часток на мільйон (ppm), при абсолютній похибці близько ±50 ppm. Завдяки швидкому часу реакції (кілька секунд), ці модулі виконують функцію ключових тригерів для активації систем примусового припливу свіжого повітря.

Під час розробки недорогих експериментальних прототипів розробники зазвичай інтегрують сенсор MH-Z19, рис.2.12.



Рисунок 2.12 – Інфрачервоний газоаналізатор бюджетного класу MH-Z19

Незважаючи на свою відносну дешевизну, він забезпечує цілком прийнятну стабільність показів для побутових потреб та навчальних проєктів.

У випадках, коли пристрій проєктується як еталонний кліматичний хаб, перевагу віддають преміальному рішенню — модулю SCD30, рис.2.13.



Рисунок 2.13 – Комбінований прецизійний аналізатор якості повітря SCD30

Унікальність цього пристрою полягає в тому, що окрім високоточного вимірювання рівня CO_2, він має вбудовані еталонні сенсори температури та вологості, що гарантує ідеальну апаратну самокомпенсацію та неймовірну точність зчитування загального стану середовища. Водночас для комерційних систем, де пристрої монтуються на роки і працюють у жорстких індустріальних умовах, неперевершеним стандартом надійності залишається датчик Senseair S8, рис.2.14.



Рисунок 2.14 – Надійний промисловий сенсор вуглекислого газу Senseair S8

Цей промисловий модуль славиться здатністю утримувати абсолютну стабільність базової лінії протягом усього життєвого циклу без необхідності регулярного ручного калібрування чи складного технічного обслуговування.

3 ПРАКТИЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ

3.1 Проєктування принципової електричної схеми апаратного модуля

Після затвердження базової структурної схеми наступним логічним етапом є розробка узагальненої архітектури майбутнього комплексу. Архітектурна модель створюваної IoT-системи спирається на класичну багаторівневу парадигму, яка гарантує високу експлуатаційну надійність. Ця інфраструктура логічно поділяється на чотири взаємопов'язані ешелони: рівень безпосереднього збору первинної інформації (Sensor Layer), рівень локальної обробки та керування (Edge / Controller Layer), комунікаційний рівень для транспортування даних (Communication Layer) та найвищий рівень представлення інформації кінцевому користувачу (Application / Web Layer). Застосування такого розподіленого підходу дозволяє досягти максимальної модульності, що в перспективі значно спрощує масштабування та інтеграцію нових функцій без необхідності кардинальної перебудови всього апаратного комплексу.

Фундаментом системи виступає рівень збору даних, який формується з високоточних цифрових перетворювачів. Для комплексного моніторингу ключових кліматичних показників залучено комбінований датчик DHT22, що відповідає за фіксацію температури та відносної вологості повітря. Вимірювання атмосферного тиску та резервний контроль теплових показників забезпечується барометричним модулем BMP280. Окрему увагу приділено оцінці якості повітряного середовища, для чого в систему інтегровано інфрачервоний газоаналізатор MH-Z19, який безперервно відстежує концентрацію вуглекислого газу. Перевага була віддана саме цифровим

сенсорам через їхню високу стійкість до електромагнітних завад, мінімальну потребу в періодичному калібруванні та здатність напряму взаємодіяти з мікроконтролером, повністю минаючи етап додаткового аналого-цифрового перетворення.

Центральним обчислювальним ядром на рівні обробки та керування обрано платформу Arduino Uno, побудовану на базі перевіреного мікроконтролера ATmega328P. Цей модуль володіє оптимальним балансом обчислювальної потужності, якої цілком достатньо для циклічного опитування сенсорів та первинної математичної обробки отриманих значень. Його апаратна архітектура пропонує всі необхідні інтерфейси зв'язку, включаючи цифрові порти загального призначення, апаратну шину I^2C та послідовний порт UART, а величезна екосистема готових бібліотек суттєво прискорює написання мікропрограми. На цьому етапі контролер виконує початкову ініціалізацію всіх підключених датчиків, зчитує сирі масиви даних, здійснює їхню фільтрацію, форматує у зручний вигляд та готує інформаційні пакети для відправки через радіоканали.

Для забезпечення безперебійного транспортування інформації комунікаційний рівень спроєктовано за гібридною схемою з використанням двох незалежних модулів. Основним маршрутом є інтеграція у локальну мережу Wi-Fi за допомогою чипа ESP8266, що відкриває пристрою доступ до глобальної мережі Інтернет та дозволяє взаємодіяти з віддаленим сервером. Другий, резервний канал зв'язку, реалізовано на базі Bluetooth-модуля HC-06. Він забезпечує пряму локальну передачу телеметрії на смартфони або портативні комп'ютери, що дозволяє проводити моніторинг та налаштування навіть за повної відсутності інфраструктури Wi-Fi. Таке дублювання суттєво підвищує загальну автономність комплексу та робить його значно зручнішим на етапі пусконалагоджувальних робіт.

Верхній рівень представлення даних реалізовано у форматі інтерактивного веб-інтерфейсу, який легко відкривається у будь-якому сучасному браузері. Його головним завданням є наочна візуалізація поточних

показників температури, вологості, тиску та рівня забруднення CO_2 у режимі реального часу для швидкого аналізу користувачем. Передача цих інформаційних масивів від центральної плати до клієнтського застосунку відбувається за посередництва модуля ESP8266 з використанням стандартних мережевих протоколів TCP/IP та HTTP. У підсумку, розроблена архітектура є ідеальним компромісом між широким функціоналом, фінансовою доступністю елементної бази та загальною простотою технічної реалізації.

У практичній площині розроблена принципова електрична схема повною мірою втілює заявлену архітектуру, гарантуючи коректну та безпечну взаємодію центрального мікропроцесора з усім масивом периферії. Підключення кожного елемента виконано з урахуванням специфіки його протоколу: барометр BMP280 розміщено на спільній шині I^2C для оптимізації виводів плати, датчик DHT22 використовує стандартну цифрову лінію, а газоаналізатор MH-Z19 разом із комунікаційними модулями підключено через послідовні порти. Окремим надважливим етапом проєктування схеми стала організація підсистеми живлення та узгодження логічних рівнів сигналів. Оскільки модулі бездротового зв'язку та газовий датчик мають специфічні вимоги до стабільності напруги, у схемі передбачено відповідні ланцюги живлення, а також враховано фізичні відмінності при поєднанні їх із 5-вольтовою логікою виводів Arduino Uno. Такий скрупульозний інженерний підхід забезпечує довготривалу, безпечну та безвідмовну роботу всіх електронних компонентів системи.

3.2 Проєктування та програмна реалізація алгоритмів керування

Процес створення програмного забезпечення для розроблюваного мікропроцесорного комплексу здійснювався у спеціалізованому інтегрованому середовищі Arduino IDE. Ця платформа є визнаним світовим

стандартом для написання мікропрограм під архітектуру контролерів даної родини. Вибір саме цього інструментарію зумовлений цілою низкою вагомих інженерних та практичних переваг. Насамперед, середовище гарантує абсолютну апаратну сумісність із ядром ATmega328P, на базі якого побудована плата Arduino Uno. Крім того, розробник отримує доступ до колосальної екосистеми відкритих бібліотек, що дозволяє значно прискорити процес інтеграції складних цифрових сенсорів та мережевих трансиверів. Кросплатформеність інструментарію, його вільне розповсюдження, а також інтуїтивно зрозумілий механізм компіляції та завантаження бінарного коду безпосередньо у флеш-пам'ять мікроконтролера роблять цей вибір максимально раціональним. Варто зазначити, що логіка пристрою реалізована на базі мов програмування C та C++, які були спеціально адаптовані та оптимізовані під специфіку роботи мікроконтролерного обладнання.

Алгоритмічна архітектура програмного коду спирається на класичну двокомпонентну парадигму, характерну для вбудованих систем, і відзначається високим рівнем модульності. На початковому етапі програми розміщується блок препроцесорних директив, де відбувається підключення зовнішніх бібліотек для роботи з периферією, а також глобальне виділення пам'яті під статичні константи та робочі змінні. Наступним фундаментальним елементом є ініціалізаційний блок. Ця частина мікропрограми виконується мікроконтролером лише один раз — відразу після подачі живлення або апаратного перезавантаження. Після успішного завершення налаштувань керування передається до нескінченного головного циклу, який безперервно виконує базовий алгоритм роботи пристрою. Для забезпечення високої читабельності та полегшення подальшого масштабування системи, специфічні завдання, такі як опитування конкретних датчиків чи форматування мережевих пакетів, винесені в окремі допоміжні користувацькі функції.

Детальніше розглядаючи етап апаратної ініціалізації, варто відзначити його критичну важливість для стабільності всієї системи. Саме під час стартового завантаження мікроконтролер активує інтерфейси зв'язку та

«пробуджує» підключені перетворювачі — датчик температури та вологості DHT22, барометр BMP280 та інфрачервоний аналізатор вуглекислого газу MH-Z19. Паралельно відбувається запуск програмних послідовних портів, необхідних для комунікації з мережевим співпроцесором ESP8266 та Bluetooth-модулем HC-06, із жорстким узгодженням швидкостей передачі даних (бодрейтів). Вкрай важливим кроком на цьому етапі є базова конфігурація Wi-Fi модуля: центральний процесор за допомогою спеціальних текстових AT-команд перевіряє фізичний зв'язок із чипом, переводить його в режим бездротового клієнта та ініціює процес автентифікації у локальній мережі роутера. Для запобігання програмним зависанням у цьому ж блоці реалізовано алгоритми діагностики, які перевіряють фізичну наявність та відгук кожного сенсора перед початком роботи.

Основна робоча логіка комплексу, що розгортається в головному нескінченному циклі, базується на принципі послідовного опитування. Спеціально розроблена функція по черзі звертається до кожного первинного перетворювача. Спочатку зчитуються цифрові показники теплового стану та вологості з модуля DHT22, потім система отримує дані про атмосферний тиск від барометра, і наостанок фіксується поточна концентрація діоксиду вуглецю від газоаналізатора. Отримані масиви сирих даних одразу ж піддаються математичній обробці, приводяться до загальноприйнятих метричних одиниць та кешуються у оперативній пам'яті для подальшого транспортування. Завдяки такій інкапсуляції процесу вимірювання, додавання нових датчиків у майбутньому вимагатиме мінімальних втручань у код.

Після формування пулу актуальних кліматичних параметрів активується алгоритм диспетчеризації даних, який використовує два незалежні радіоканали. З одного боку, сформований текстовий пакет із показниками транслюється через модуль HC-06 для забезпечення можливості локального сервісного моніторингу за допомогою смартфона без прив'язки до інтернет-інфраструктури. Одночасно з цим, масив інформації маршрутизується на співпроцесор ESP8266, який відповідає за пакування даних у мережеві

протоколи та їхню доставку до веб-інтерфейсу в локальній мережі. Використання стандартизованих рядкових форматів під час передачі суттєво спрощує завдання з парсингу та візуалізації інформації на приймальній стороні.

Підсумовуючи алгоритмічний цикл роботи мікропрограми, можна виділити чітку та надійну послідовність дій: після первинної конфігурації апаратури система переходить у фазу циклічного отримання показників, їхнього форматування, розподіленої бездротової передачі та переходу в стан запрограмованої затримки. Ця часова пауза між циклами вимірювання є критично необхідною для розвантаження комунікаційних шин, забезпечення коректного часу відгуку сенсорів та загальної стабілізації живлення комплексу. Тривалість цього інтервалу гнучко налаштовується на програмному рівні залежно від технічних вимог до швидкості реакції системи.

Таким чином, розроблений та успішно відлагоджений програмний комплекс повністю реалізує закладену архітектурну концепцію. Створена мікропрограма забезпечує надійну, детерміновану та безперебійну взаємодію обчислювального ядра з усім розмаїттям підключеної периферії. Модульний підхід до написання коду, використання перевірених системних бібліотек та грамотна організація потоків даних гарантують безпомилкове виконання повного циклу телеметрії. Запропоноване архітектурне рішення є не лише ефективним для поточних завдань моніторингу внутрішнього середовища, але й формує потужний та гнучкий фундамент для майбутніх модернізацій, зокрема для впровадження легковагових IoT-протоколів формату MQTT чи повноцінної інтеграції пристрою з глобальними хмарними платформами аналітики.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було успішно спроєктовано та практично реалізовано програмно-апаратну систему контролю параметрів мікроклімату в приміщенні.

Аналіз результатів дозволяє зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу існуючих рішень доведено, що архітектурна модель системи повинна спиратися на багаторівневу парадигму (рівень сенсорів, обробки, комунікації та веб-рівень), що гарантує високу експлуатаційну надійність та модульність конструкції.

2. Для інструментального забезпечення рівня збору даних обрано цифрові датчики: модуль DHT22 для фіксації температури та вологості, барометр BMP280 для контролю тиску та інфрачервоний газоаналізатор MH-Z19 для відстеження концентрації вуглекислого газу. Застосування цифрових інтерфейсів забезпечило високу завадостійкість системи.

3. Центральним обчислювальним ядром виступила платформа Arduino Uno (ATmega328P), потужності якої достатньо для циклічного опитування сенсорів та первинної математичної обробки отриманих значень.

4. Комунікаційний рівень було успішно спроєктовано за гібридною схемою. Основний маршрут передачі даних реалізовано через модуль ESP8266 (Wi-Fi) для доступу до Інтернету, а резервний канал — на базі модуля HC-06 (Bluetooth) для локального моніторингу, що суттєво підвищило загальну автономність комплексу.

5. Програмне забезпечення, написане мовами C та C++, функціонує за принципом послідовного опитування сенсорів з подальшим кешуванням інформації. Впровадження алгоритмів діагностики та часових пауз між циклами вимірювання дозволило запобігти програмним зависанням та розвантажити комунікаційні шини.

6. Запропоноване архітектурне рішення є ефективним для поточних завдань та формує потужний фундамент для майбутніх модернізацій, зокрема для інтеграції легковагових IoT-протоколів формату MQTT.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Margolis M., Jepson B., Nicholas A. Arduino Cookbook. - 3rd ed. - Sebastopol : O'Reilly Media, 2020. - 982 p.
2. HC-06 Bluetooth Module Datasheet [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://components101.com.
3. Espressif Systems. ESP8266 Technical Reference [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.espressif.com.
4. Руденко О. М. Вбудовані системи та Інтернет речей : навч. посіб. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 240 с..
5. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey // Computer Networks. - 2010. - Vol. 54, No. 15. - P. 2787–2805.
6. Kolban N. Kolban's Book on ESP8266. - Leanpub, 2018. - 310 p.
7. Banks A., Gupta R. MQTT Version 3.1.1. - OASIS Standard, 2014. - 81 p.
8. Adafruit Industries. DHT22 Sensor Datasheet [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://learn.adafruit.com.
9. Fielding R. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures : Doctoral dissertation. - Irvine : University of California, 2000. - 162 p.
10. Winsen Electronics. MH-Z19 Infrared CO_2 Sensor Datasheet. - Zhengzhou, 2019. - 15 p.
11. ISO/IEC 30141:2018. Internet of Things (IoT) - Reference Architecture. - ISO, 2018. - 64 p.
12. Flanagan D. JavaScript: The Definitive Guide. - 7th ed. - Sebastopol : O'Reilly Media, 2020. - 706 p.
13. Buyya R., Dastjerdi A. V. Internet of Things: Principles and Paradigms. -Boston : Morgan Kaufmann, 2016. - 396 p.

14. W3C. HTML5 Specification [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.w3.org.

15. Hunkeler U., Truong H. L., Stanford-Clark A. MQTT-S - A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks // Proceedings of COMSWARE. - 2008. - P. 791–798.

16. Тарасов В. М. Мікроконтролерні системи : навч. посіб. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. - 212 с.

17. Bahga A., Madisetti V. Internet of Things: A Hands-On Approach. - Hyderabad : VPT, 2015. - 312 p.

18. Козирєв О. М. Основи побудови вбудованих систем. - Харків : ХНУРЕ, 2018. - 256 с.

19. Bosch Sensortec. BMP280 Digital Pressure Sensor Datasheet. - Bosch, 2018. - 57 p.

20. Monk S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. - 2nd ed. - New York : McGraw-Hill, 2016. - 196 p.

21. Arduino. Arduino Uno Rev3 Datasheet [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.arduino.cc.

22. Shelby Z., Bormann C. 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet. - Chichester : Wiley, 2011. - 250 p.

23. McEwen A., Cassimally H. Designing the Internet of Things. - Chichester : Wiley, 2014. - 336 p.

24. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future Generation Computer Systems. - 2013. - Vol. 29, No. 7. - P. 1645–1660.

Додаток А

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

(Презентація)