

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-
КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Автоматизована система клімат-контролю на основі IoT-технологій»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології

освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

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

Михайло Аксьонов

Виконав:
здобувач вищої освіти
група ІСД-42

Михайло Аксьонов

Керівник:
науковий ступінь,
вчене звання

Віктор САГАЙДАК
доктор філософії

Рецензент:
науковий ступінь,
вчене звання

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти Бакалавра

Спеціальність Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедрою ІСТ

_____ Каміла СТОРЧАК
« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ СТУДЕНТУ

Михайло Аксьонов

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система клімат-контролю на основі IoT-технологій»

керівник кваліфікаційної роботи Віктор САГАЙДАК, доктор філософії
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «24» лютого 2025 року № 56.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи: 30 травня 2025 року.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Науково-технічна література з тем IoT, сенсорних систем, мікроконтролерів (ESP32), протоколів MQTT/CoAP. Дані з практичного використання сенсорів DHT22, SCD30, MH-Z19. Відомості щодо кластерів для обробки даних із хмарним доступом. Веб-ресурси з реалізації систем на основі Node-RED, Blynk, Grafana. Офіційна документація з API OpenWeather, Firebase, AWS IoT. Методичні рекомендації щодо архітектури IoT-рішень від IEEE, NIST та Ministry of Internal Affairs of Japan.

.

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

1. Аналіз архітектурних підходів в IoT-системах клімат-контролю
2. Аналіз типів мікроконтролерів і сенсорів, що використовуються в системах моніторингу
3. Протоколи передачі даних у мережах IoT (MQTT, CoAP, HTTP/REST, WebSocket)
4. Хмарні сервіси і бази даних для зберігання та візуалізації кліматичних даних
5. Аналіз операційних систем для IoT (FreeRTOS, Arduino OS, Linux-based IoT OS)
6. Розробка веб-інтерфейсу користувача для доступу до системи клімат-контролю
7. Безпека даних та автентифікація в IoT-системах
8. Тестування та оптимізація системи в умовах реального середовища
9. Перспективи впровадження системи у розумних будівлях, офісах, агросекторі

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація

- Аналіз теми
- Аналіз апаратної та програмної архітектури IoT-системи
- Аналіз операційної системи та протоколів передачі даних
- Розробка та робота з веб-сайтом для віддаленого моніторингу
- Перспективи подальшого розвитку системи в рамках Smart Home / Smart Office

6. Дата видачі завдання: 30 травня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз науково-технічної літератури щодо IoT та сенсорних систем	24.02 – 02.03.25	Виконав
2	Розробка схеми взаємодії мікроконтролера (ESP32) із сенсорами	03.03 – 07.03.25	Виконав
3	Реалізація базової структури IoT-системи збору та обробки даних	08.03 – 15.03.25	Виконав
4	Розробка веб-інтерфейсу для моніторингу кліматичних параметрів	16.03 – 21.03.25	Виконав
5	Інтеграція сенсорів (DHT22, SCD30, MH-Z19) до системи	22.03 – 28.03.25	Виконав
6	Налагодження бездротової передачі даних (MQTT/CoAP)	29.03 – 06.04.25	Виконав
7	Тестування системи в умовах змінного мікроклімату	07.04 – 18.04.25	Виконав
8	Написання пояснювальної записки, формування висновків, реферату	19.04 – 30.04.25	Виконав
9	Розробка презентації та демонстраційних матеріалів	01.05 – 12.05.25	Виконав
10	Попередній перегляд, доопрацювання і підготовка до захисту	13.05 – 25.05.25	Виконав

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Михайло Аксьонов

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

кваліфікаційної роботи

(підпис)

Віктор САГАЙДАК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 72 стор., 8 рисунків, 1 таблиця, 32 використані джерела.

У кваліфікаційній роботі досліджено та розроблено автоматизовану систему клімат-контролю, що базується на технологіях Інтернету речей (IoT). Актуальність теми обумовлена зростанням потреб у енергоефективних, адаптивних та інтелектуальних рішеннях для управління мікрокліматом у житлових, офісних і виробничих приміщеннях. Розроблена система покликана забезпечити високу гнучкість, масштабованість, безпеку й автономність, враховуючи сучасні виклики, пов'язані з урбанізацією, енергетичною нестабільністю та розвитком Smart City.

Метою роботи є створення комплексної IoT-системи клімат-контролю, яка включає в себе сенсорні модулі, апаратну платформу ESP32, бездротові протоколи передачі даних (MQTT, CoAP), мобільні та хмарні сервіси, інтерфейс користувача, а також алгоритми адаптивного регулювання температури та вологості.

У процесі роботи проведено аналітичний огляд сучасних IoT-рішень у сфері HVAC та BMS, здійснено порівняльний аналіз апаратного і програмного забезпечення, обґрунтовано вибір технологій для реалізації системи. Побудовано архітектурну модель, розроблено електричну схему, програмне забезпечення та логіку взаємодії компонентів.

Особливу увагу приділено питанням безпеки, енергоефективності та захисту інформації. Система підтримує автономне живлення, можливість локального зберігання даних та віддаленого керування.

Результати апробовані на міжнародній науково-технічній конференції, де підтверджено ефективність і практичну значущість запропонованої моделі для впровадження в реальні об'єкти. Робота має теоретичну, методичну та прикладну цінність у сфері сучасних інформаційних технологій.

Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система клімат-контролю на основі IoT-технологій»

Мета кваліфікаційної роботи:

Розробка та реалізація автоматизованої IoT-системи клімат-контролю, що забезпечує інтеграцію сенсорних модулів, протоколів бездротового зв'язку, програмного забезпечення та хмарних сервісів для енергоефективного, адаптивного та безпечного управління мікрокліматом у розумних будівлях.

Завдання дослідження:

1. Провести аналітичний огляд сучасних апаратно-програмних рішень у сфері клімат-контролю на базі IoT.
2. Сформулювати технічні, функціональні та енергетичні вимоги до системи клімат-контролю.
3. Обґрунтувати вибір апаратної платформи (ESP32, сенсори, реле) та протоколів передачі даних (MQTT, CoAP, Wi-Fi).
4. Побудувати архітектуру IoT-системи з урахуванням багаторівневої структури (сенсорний, мережевий, аналітичний рівні).
5. Розробити структурну та електричну схему системи клімат-контролю з підключенням сенсорів температури, вологості, CO₂.
6. Реалізувати програмне забезпечення для збору, обробки та візуалізації даних з використанням Node-RED, Blynk або Home Assistant.
7. Виконати тестування системи в лабораторному середовищі, оцінити точність, стабільність та затримки.
8. Проаналізувати енергоефективність, автономність роботи та можливість масштабування системи.
9. Надати обґрунтування доцільності впровадження IoT-системи в умовах житлових або офісних об'єктів України з урахуванням сучасних енергетичних викликів.

Об'єкт дослідження:

Автоматизовані системи управління мікрокліматом у закритих приміщеннях, що базуються на технологіях Інтернету речей (IoT).

Предмет дослідження:

Методи, технічні засоби та програмно-апаратна архітектура побудови IoT-систем клімат-контролю з урахуванням енергоефективності, безпеки, масштабованості, автономності та інтеграції із сучасними протоколами передачі даних.

Методи дослідження:

У роботі використано метод системного аналізу – для побудови концептуальної моделі; порівняльний аналіз – для вибору апаратного та програмного забезпечення; метод структурного моделювання – для архітектури IoT-системи; теоретичне моделювання – для опису логіки роботи; експериментальні методи – для тестування в лабораторних умовах; економічний аналіз – для оцінки вартості та доцільності впровадження; метод графічного зображення інформації – для побудови схем та інтерфейсів.

Коротко про структуру роботи:

Кваліфікаційна робота містить вступ, три основні розділи, висновки та список джерел.

- Розділ 1 присвячений аналітичному огляду літератури, ринку IoT-рішень, порівнянню технологій і аналізу існуючих систем.
- Розділ 2 містить теоретичні засади побудови IoT-систем, зокрема протоколи зв'язку, архітектуру та енергоефективність.
- Розділ 3 зосереджений на проєктуванні IoT-системи: технічні вимоги, вибір платформи (ESP32), електрична схема, логіка роботи, програмне забезпечення, питання безпеки та охорони праці.

Основні результати та висновки:

Розроблено автоматизовану IoT-систему клімат-контролю з сенсорними модулями, контролером ESP32, протоколами MQTT/HTTP, логікою автоматизації та інтерфейсом користувача. Проведено тестування, яке підтвердило стабільність, точність регулювання та енергоефективність системи. Доведено її придатність для автономної роботи з можливістю локального або хмарного зберігання даних. Робота апробована на міжнародній конференції та рекомендована для впровадження у житлових, офісних або тимчасових об'єктах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: IOT, КЛІМАТ-КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, СЕНСОРИ, ESP32, MQTT, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, SMART HOME, МІКРОКОНТРОЛЕР, РОЗУМНА БУДІВЛЯ.

ABSTRACT

The textual part of the bachelor's qualification thesis: 72 pages, 8 figures, 1 table, 32 references.

This bachelor's qualification thesis investigates and develops an automated climate control system based on Internet of Things (IoT) technologies. The relevance of the topic stems from the growing demand for energy-efficient, adaptive, and intelligent solutions for managing indoor microclimates in residential, office, and industrial environments. The designed system aims to provide high flexibility, scalability, security, and autonomy, taking into account modern challenges related to urbanization, energy instability, and the development of Smart Cities.

The objective of the thesis is to create a comprehensive IoT-based climate control system that integrates sensor modules, the ESP32 hardware platform, wireless data transmission protocols (MQTT, CoAP), mobile and cloud services, a user interface, as well as adaptive temperature and humidity control algorithms.

The work includes an analytical review of existing IoT solutions in the HVAC and BMS sectors, a comparative analysis of hardware and software platforms, and justification of technology choices. The architectural model was designed, including the electrical circuitry, system software, and interaction logic among components.

Special attention is paid to issues of information security, energy efficiency, and system autonomy. The system supports independent power supply, local data storage, and remote access.

The proposed model was validated at an international scientific and technical conference, where its efficiency and practical relevance for real-world implementation were confirmed. The thesis holds theoretical, methodological, and applied significance within the domain of modern information technologies.

Thesis title:

"Automated Climate Control System Based on IoT Technologies"

Thesis objective:

To design and implement an automated IoT-based climate control system that enables the integration of sensor modules, wireless communication protocols, software platforms, and cloud services for efficient, adaptive, and secure microclimate management in smart buildings.

Research tasks:

1. Conduct an analytical review of current hardware-software solutions for climate control based on IoT.

2. Define technical, functional, and energy-related requirements for the climate control system.
3. Justify the selection of hardware components (ESP32, sensors, relays) and data protocols (MQTT, CoAP, Wi-Fi).
4. Construct a multi-level IoT architecture (sensor, network, analytical layers).
5. Develop structural and electrical schematics with integration of temperature, humidity, and CO₂ sensors.
6. Implement software for data acquisition, processing, and visualization using Node-RED, Blynk, or Home Assistant.
7. Perform system testing in a lab environment; assess accuracy, stability, and latency.
8. Analyze the system's energy efficiency, autonomy, and scalability potential.
9. Justify the feasibility of system deployment in Ukrainian residential and office environments under current energy conditions.

Object of research:

Automated microclimate management systems in enclosed environments based on IoT technologies.

Subject of research:

Methods, technical tools, and hardware-software architectures for developing IoT climate control systems with emphasis on energy efficiency, security, scalability, autonomy, and integration with modern data transmission protocols.

Research methods:

The study employs systems analysis for modeling, comparative analysis for technology selection, structural modeling for architecture development, theoretical modeling for system logic, experimental methods for testing, economic analysis for implementation assessment, and graphical techniques for creating diagrams and user interfaces.

Structure of the thesis:

The thesis consists of an introduction, three main chapters, conclusions, and a list of references.

- Chapter 1 provides a literature review, market analysis of IoT solutions, and technology comparisons.

- Chapter 2 elaborates on theoretical foundations of IoT system architecture, communication protocols, and energy optimization.
- Chapter 3 focuses on system design, including technical specifications, ESP32 platform selection, circuitry, logic, software, and safety considerations.

Key findings and conclusions:

An automated IoT climate control system was developed, incorporating sensor modules, an ESP32 controller, MQTT/HTTP protocols, automation logic, and a user interface. Laboratory testing confirmed the system's stability, control precision, and energy efficiency. The solution was proven suitable for autonomous operation with local or cloud-based data storage. It was successfully presented at an international conference and is recommended for implementation in residential, office, or temporary facilities.

KEYWORDS: IOT, CLIMATE CONTROL, AUTOMATION, SENSORS, ESP32, MQTT, ENERGY EFFICIENCY, SMART HOME, MICROCONTROLLER, SMART BUILDING.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА АНАЛОГІВ СИСТЕМ.	15
1.1. Огляд сучасних технологій у сфері IoT.....	15
1.2. Існуючі рішення для клімат-контролю.	18
1.3. Порівняльний аналіз доступних апаратних і програмних засобів.	25
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІОТ-СИСТЕМ КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ.	29
2.1. Архітектура IoT-систем для автоматизованого клімат-контролю.	30
2.2. Протоколи передачі даних у IoT-системах клімат-контролю	34
2.3. Сенсори та виконавчі пристрої, що застосовуються у кліматичних IoT-системах.....	37
2.4. Безпека, енергоефективність та автономність роботи IoT-систем.	39
РОЗДІЛ 3. КОМПЛЕКСНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМИ КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ: АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА ЧАСТИНИ.	43
3.1. Формування технічних та експлуатаційних вимог до автоматизованої IoT-системи клімат-контролю.....	43
3.2. Обґрунтування вибору апаратної платформи для реалізації системи.....	46
3.3. Структура IoT-системи клімат-контролю та організація взаємодії її компонентів.....	48
3.4. Розробка електричної схеми підключення пристроїв.	50
3.5. Програмне забезпечення системи: логіка, інтерфейси, автоматизація	52
3.6 Логіка роботи системи.....	53
3.7 Охорона праці та безпека життєдіяльності при впровадженні IoT-систем клімат-контролю.....	64
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

ВСТУП

Актуальність теми

У сучасних умовах глобальної урбанізації, розвитку концепцій розумного міста (Smart City) та інтелектуальних будівель (Smart Buildings) все більшого значення набувають автоматизовані системи керування мікрокліматом. Енергетична ефективність, комфортність середовища та екологічна стабільність стали ключовими аспектами функціонування як житлових, так і комерційних об'єктів. За даними досліджень Європейської комісії (2022) та Міжнародного енергетичного агентства (IEA, 2023), системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) є одними з найбільших споживачів енергії у будівлях – до 60% загального споживання.

Традиційні системи клімат-контролю поступово поступаються місцем гнучким, адаптивним та самонавчальним рішенням на основі інтернету речей (IoT), що дозволяє не лише зменшити споживання енергії, а й підвищити рівень керованості та аналітичності процесів. Згідно зі звітом компанії Statista (2024), кількість підключених IoT-пристроїв у сфері житлового сектора сягнула понад 1,4 млрд одиниць, і цей показник зростає з темпом близько 18% щорічно. Особливої актуальності набуває створення недорогих, відкритих та масштабованих систем, які можуть бути адаптовані під специфічні умови конкретного об'єкта, країни чи кліматичного поясу.

Розробка автоматизованої IoT-системи клімат-контролю передбачає комплексний підхід: від теоретичного аналізу архітектури та протоколів до практичного моделювання і тестування. Тематика даного дослідження має високу практичну значущість як у контексті реалізації політик сталого розвитку, так і з точки зору імплементації цифрових технологій у щоденне життя громадян. У контексті військових викликів, енергетичної нестабільності та переходу на альтернативні джерела живлення, автономні системи керування кліматом є особливо важливими для українського суспільства.

Мета і завдання дослідження

Метою даної кваліфікаційної роботи є:

розробка автоматизованої системи клімат-контролю на основі IoT-технологій із використанням доступних апаратних та програмних рішень, що забезпечує інтеграцію сенсорних модулів, хмарних сервісів і алгоритмів адаптивного управління.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **завдання**:

1. Провести аналітичний огляд сучасних досліджень і технологій в області IoT-систем для клімат-контролю.
2. Сформулювати вимоги до системи з урахуванням функціональних і економічних критеріїв.
3. Обрати апаратну платформу та протоколи обміну даними для реалізації архітектури IoT-системи.
4. Розробити структурну схему інтеграції сенсорних модулів, керувальних пристроїв і центрального вузла.
5. Створити програмну логіку взаємодії системи із користувачем та з хмарним сервером.
6. Провести тестування розробленої системи в умовах лабораторного середовища.
7. Здійснити аналіз ефективності, стабільності й точності роботи системи.
8. Обґрунтувати економічну доцільність впровадження розробленої системи.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є автоматизовані системи управління мікрокліматом у закритих приміщеннях, які ґрунтуються на технологіях інтернету речей.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є методи, технічні засоби та програмно-апаратна архітектура побудови IoT-систем для клімат-контролю, з урахуванням енергозбереження, безпеки, масштабованості та гнучкості.

Методи дослідження

У процесі реалізації дослідження використовувалися такі **наукові методи**:

- **Метод системного аналізу** –для побудови концептуальної моделі системи;
- **Порівняльний аналіз** –для вибору оптимального апаратного забезпечення та програмного середовища;
- **Метод структурного моделювання** –для побудови архітектури взаємодії компонентів IoT-системи;
- **Методи теоретичного моделювання** –при описі логіки функціонування системи;
- **Експериментальні методи** –при тестуванні функціональності в реальному або моделювальному середовищі;
- **Економічний аналіз** –для оцінки вартості системи та рентабельності її впровадження;
- **Метод графічного зображення інформації** –для ілюстрації структур, потоків даних та інтерфейсів користувача.

Апробація результатів та публікації

Основні результати кваліфікаційної роботи за темою *«Автоматизована система клімат-контролю на основі IoT-технологій»* були апробовані на **VI Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT»**, що відбулася на базі кафедри комп'ютерної інженерії Державного університету інфраструктури та технологій у 2025 році (Київ, Україна).

У межах конференції було представлено тези доповіді, у яких висвітлено розроблену архітектуру IoT-системи кліматичного моніторингу та керування, алгоритми адаптивного регулювання температурного режиму приміщень, використання сенсорної мережі на базі протоколу MQTT та аналіз ефективності впровадження такої системи в умовах реального середовища.

Теоретична, методична та практична значущість отриманих результатів

Теоретична значущість полягає в узагальненні підходів до побудови структурно-функціональних моделей систем автоматизованого клімат-контролю, розробці архітектурного шаблону, що може бути адаптований до різних платформ.

Методична значущість полягає в формалізації алгоритмів прийняття рішень у межах IoT-екосистеми, а також у створенні набору інструкцій, що можуть бути використані в освітньому процесі при викладанні дисциплін «Embedded Systems», «IoT-Architectures», «Building Automation».

Практична значущість обумовлена можливістю реального впровадження розробленої системи для потреб енергоефективного управління мікрокліматом у житлових приміщеннях, офісах, лабораторіях, а також у критичних умовах – наприклад, у тимчасових спорудах чи укриттях. Система може бути використана у поєднанні з автономними джерелами живлення, акумуляторами або фотоелементами.

РОЗДІЛ 1. Аналітичний огляд літературних джерел та аналогів систем.

1.1. Огляд сучасних технологій у сфері IoT.

Інтернет речей (IoT) як основа цифрової трансформації клімат-контролю.

Інтернет речей (IoT) –це глобальна концепція, що передбачає інтеграцію фізичних об’єктів у віртуальне інформаційне середовище через вбудовані сенсори, виконавчі пристрої та мережі передачі даних. У контексті автоматизованих систем клімат-контролю, IoT відіграє фундаментальну роль у забезпеченні адаптивного, персоналізованого та енергоефективного управління середовищем у житлових, офісних та промислових приміщеннях. Згідно з аналітичним звітом *IEEE Internet of Things Journal* (2023), понад 65% сучасних рішень у галузі автоматизації будівель використовують IoT-компоненти для підвищення точності та керованості процесів[1].

Структурна модель IoT-систем

IoT-система складається з трьох функціональних рівнів:

1. Рівень сенсорів і виконавчих пристроїв (perception layer), який забезпечує збір і початкову обробку даних із фізичного середовища. Сюди належать температурні сенсори (DHT22, SHT31), сенсори вологості (AM2302), сенсори вуглекислого газу (MH-Z19B, SCD30), сенсори освітлення (BH1750) тощо[1].

2. Мережевий рівень (network layer), що відповідає за передачу даних від сенсорів до серверів, хмарних сервісів або інтерфейсів керування. У цьому контексті ключову роль відіграють протоколи MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), CoAP (Constrained Application Protocol), LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), а також більш традиційні HTTP-з'єднання.

3. Рівень прикладних сервісів (application layer), який забезпечує взаємодію користувача з системою, візуалізацію, аналітику, сценарії автоматизації

та віддалене керування. Тут найчастіше використовуються платформи Home Assistant, Blynk, Node-RED, OpenHAB та інші.

Протоколи передачі даних: еволюція та порівняння

Протоколи обміну даними –це основа функціонування IoT-систем, оскільки вони забезпечують стабільну, надійну й енергоефективну взаємодію компонентів. Серед найбільш поширених –MQTT, який є брокер-орієнтованим і побудований на основі моделі publish-subscribe. Він оптимізований для роботи в умовах обмежених ресурсів та нестабільного каналу зв'язку, тому є ідеальним для домашніх і промислових IoT-систем. Згідно з дослідженням *Elsevier: Journal of Network and Computer Applications* (2022), MQTT демонструє на 37% менше енергоспоживання, ніж HTTP, при тих самих об'ємах трафіку[1].

Протокол CoAP, своєю чергою, базується на UDP та призначений для пристроїв із критичними обмеженнями по енергетиці та обчислювальній потужності. Його основною перевагою є компактність заголовків та можливість мультикаст-комунікації. LoRaWAN використовується для наддовгих дистанцій (до 15 км), з наднизьким енергоспоживанням, але має обмежену пропускну здатність – що робить його доцільним у сільських регіонах або для управління кліматом у великих фермерських господарствах чи теплицях[2].

Платформи керування та програмне забезпечення

Розробка інтерфейсів і логіки роботи IoT-кліматичних систем передбачає вибір програмного середовища, яке підтримує зворотний зв'язок, обробку даних, аналітику та візуалізацію. Node-RED –графічне середовище для програмування потоків, дозволяє будувати складні сценарії логіки керування за допомогою drag-and-drop підходу. Його використання значно спрощує побудову взаємозв'язків між даними з сенсорів, умовами тригерів і реакціями виконавчих пристроїв[2].

Home Assistant, як відкритий фреймворк на Python, дозволяє реалізувати повноцінні сценарії автоматизації та підтримує понад 2000 інтеграцій (у тому числі Google Assistant, Amazon Alexa, MQTT-брокери, ZigBee, Z-Wave тощо). Платформа Blynk, зі свого боку, надає можливість швидко створювати мобільні додатки для моніторингу кліматичних показників, зміни налаштувань, або активації сценаріїв

через смартфон, що особливо актуально для користувачів із низьким рівнем технічної підготовки[1].

Апаратне забезпечення IoT-систем: аналіз ефективності

Серед найпоширеніших мікроконтролерів у системах клімат-контролю слід відзначити:

- **ESP8266 і ESP32** –контролери від Espressif Systems, що поєднують в собі вбудовані Wi-Fi та Bluetooth-модулі, багатофункціональні GPIO-порти, підтримку SPI, I2C, ADC та PWM. ESP32 має два ядра й значно більші можливості в плані обробки даних.
- **Arduino Uno/Nano** –зручні для прототипування, проте мають обмеження в порівнянні з ESP по пам'яті, швидкості й енергоспоживанню.
- **Raspberry Pi Zero/W/4** –потужні одноплатні комп'ютери, які дозволяють реалізувати повноцінні локальні сервери для обробки, зберігання й візуалізації даних у межах локальної мережі без залучення хмари.

Згідно з публікацією *Sensors Journal (MDPI, 2023)*, ESP32 демонструє оптимальний баланс між енергоспоживанням, функціональністю й ціною, тому є лідером серед платформ для створення дешевих і масштабованих систем контролю мікроклімату[2].

Енергозбереження та автономність

Однією з ключових переваг IoT-систем є можливість побудови автономних рішень. Наприклад, комбінація сенсора температури DS18B20, мікроконтролера ESP8266, модуля живлення на Li-Ion батареї з контролем заряду (TP4056) та підключенням до сонячної панелі дозволяє створити незалежний мікрокліматичний вузол, що працює без живлення від мережі. У дослідженнях *Tokyo Institute of Technology (2022)* наголошується на важливості використання режимів deep sleep (глибокий сон), які зменшують споживання ESP8266 з 70 мА до менш ніж 20 мкА, дозволяючи пристрою функціонувати до 8 місяців на одній батареї[3].

Безпека в IoT-контексті

Безпека IoT-систем –один із найкритичніших аспектів, особливо в контексті клімат-контролю в приміщеннях з обмеженим доступом (серверні кімнати, медичні установи тощо). Загрози включають несанкціонований доступ до керування, підміна даних сенсорів або злам хмарного API. Згідно з рекомендаціями *National Institute of Standards and Technology (NIST SP 800-183, 2023)*, необхідним є використання TLS/SSL-шифрування, сертифікатів, локального контролю доступу та журналювання усіх дій користувачів[3].

Інтеграція з іншими системами та перспективи розвитку

Інтеграція IoT-клімат-систем із розумними електромережами (Smart Grid), прогнозуванням погоди, біометричними показниками користувача або даними з IoT-камер і присутності дозволяє створювати комплексні, адаптивні рішення нового покоління. Зокрема, у дослідженнях *Hitachi Global R&D* та *Panasonic Smart Environment Group* (2024) розглядаються системи, що самостійно прогнозують температурні коливання на основі синоптичних даних і завчасно активують сценарії охолодження/нагріву, враховуючи пікові навантаження на мережу.

1.2. Існуючі рішення для клімат-контролю.

Загальна характеристика сучасних систем клімат-контролю.

У XXI столітті системи керування кліматом у приміщеннях набули статусу не лише інженерного інструменту забезпечення температурного комфорту, а й складових інтегрованих кіберфізичних систем. У поєднанні з концепцією Інтернету речей (IoT) вони стали однією з ключових ланок у розбудові інтелектуальних середовищ –таких як Smart Home (розумний дім), Smart Building (розумна будівля) та навіть Smart Grid (розумна енергомережа).

Сучасні системи клімат-контролю базуються на адаптивних технологіях, що дозволяють реагувати в режимі реального часу на зміни температури, вологості, рівня CO₂, присутності людей та інших факторів. Переваги полягають у мінімізації енерговитрат, підтриманні стабільного мікроклімату й забезпеченні автономної

роботи без постійного втручання користувача. Їхня ефективність залежить від трьох ключових компонентів: типу пристроїв, програмного забезпечення та архітектурного підходу до інтеграції[4].

Упродовж останнього десятиліття системи автоматизованого клімат-контролю зазнали суттєвого розвитку завдяки поєднанню класичних принципів терморегуляції з концепціями цифрової трансформації. Найбільшого поширення набули моделі, що базуються на технологіях Інтернету речей (Internet of Things, IoT), здатні інтегрувати сенсори, виконавчі пристрої, мережеві шлюзи та інтелектуальні алгоритми керування в єдине розподілене середовище. З огляду на глобальну діджиталізацію побуту та інженерних систем, сьогодні в світі існує декілька усталених підходів до реалізації клімат-контролю, зокрема через розумні домогосподарства (Smart Home), централізовані системи HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), а також комплексні платформи керування інженерною інфраструктурою будівель –BMS (Building Management Systems). Усі ці рішення різняться за функціональністю, гнучкістю, відкритістю протоколів і масштабованістю, однак поєднані спільною метою – забезпечення оптимального мікроклімату, мінімізації енергоспоживання та підвищення інтелектуального комфорту користувача[4].

Концепція розумного дому (Smart Home) передбачає децентралізовану модель управління, коли кожен кліматичний пристрій має локальний контролер і часто підключений до хмарної платформи або мобільного додатку. Найбільш відомими прикладами реалізації таких систем є Google Nest, Ecobee, Honeywell T-series, а також Tado – європейська система термостатів, орієнтована на оптимізацію опалення в умовах холодного клімату. Наприклад, Nest використовує алгоритми машинного навчання для адаптації до поведінки користувача: за кілька днів пристрій формує прогноз графіка перебування власника вдома, на основі якого модулює теплове навантаження. Згідно з дослідженням компанії Parks Associates (2023), впровадження таких термостатів дозволяє зменшити витрати на опалення та кондиціонування в середньому на 15–22%, а в деяких випадках – до 30% при коректному зональному налаштуванні. Водночас, такі пристрої мають низку

обмежень: вони зазвичай закриті для кастомізації, не підтримують сторонні сенсори, і часто повністю залежать від підключення до хмарного сервісу, що унеможлиблює їхнє використання в умовах слабкої інфраструктури або вимог до офлайн-режимів[4].

У контексті більш гнучких і масштабованих рішень варто розглянути інтеграцію IoT у традиційні HVAC-системи. Останні, зазвичай, складаються з центрального котла або охолоджувача, системи вентиляції з рекуперацією, а також зонального розподілу повітря з керованими заслінками. Згідно з дослідженнями Американського товариства інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (ASHRAE, 2022), використання IoT-модулів для моніторингу температури, вологості, тиску та якості повітря дозволяє не лише автоматизувати процеси, а й впроваджувати предиктивне обслуговування, що значно знижує ризики аварійних збоїв. Такі виробники як Daikin, Mitsubishi Electric, Trane та Panasonic активно впроваджують MQTT-шлюзи до своїх мультизональних систем, дозволяючи інтегрувати їх у сторонні програмні комплекси. Наприклад, система Panasonic VRF i-Net дозволяє централізовано зчитувати робочі параметри десятків внутрішніх блоків, отримувати алертинг у разі підвищення рівня вологості або зниження витрати повітря, а також дистанційно регулювати продуктивність компресорів. На відміну від рішень типу Smart Home, ці системи значно глибше інтегруються в інфраструктуру будівлі, проте потребують високої кваліфікації персоналу для налаштування та обслуговування, а також вищих початкових інвестицій[5].

Найбільш повним за функціоналом є підхід, реалізований у рамках систем BMS – це інтелектуальні платформи керування будівлею, що поєднують управління кліматом, освітленням, енергопостачанням, безпекою, пожежогашінням та іншими критичними компонентами. У таких системах модуль клімат-контролю є лише одним із елементів, який підпорядкований централізованому ядру – серверу або контролеру. BMS, як правило, використовує промислові протоколи типу BACnet/IP, KNX, OPC-UA, або LonWorks, і забезпечує збір даних з великої кількості вузлів. Згідно з даними Європейської асоціації автоматизації будівель

(eu.bac), впровадження BMS у середньостатистичній будівлі площею 4000–6000 м² дозволяє зменшити енергоспоживання на 28–40% упродовж 18 місяців. Прикладом такої системи є Siemens Desigo CC, яка дозволяє в реальному часі моніторити усі кліматичні зони будівлі, адаптувати навантаження в залежності від часу доби, прогнозу погоди або розкладу приміщень. Вона також підтримує аналітику на основі історичних даних, виявлення аномалій, попереджувальні сигнали про збої та автоматичну оптимізацію роботи вентиляторів, заслінок і водяних контурів[4].

Водночас, попри високу функціональність, більшість рішень BMS мають суттєві обмеження: значна вартість ліцензування та компонентів, вимоги до серверного обладнання, складність у налаштуванні протоколів зв'язку між підсистемами, а також закритість багатьох API. У дослідженні, проведеному в межах кафедри інженерної кібернетики Токійського університету (2023), було зазначено, що 67% BMS-рішень у комерційних офісах Токіо не допускають інтеграції сторонніх сенсорів або відкритих платформ типу Node-RED чи Home Assistant, що обмежує можливість адаптації систем під специфіку кожного об'єкта[6].

На тлі зазначених обмежень зростає роль відкритих, модульних систем, що базуються на платформах ESP32, Raspberry Pi та аналогічних рішеннях. З використанням відкритих протоколів, таких як MQTT, CoAP або HTTP, можна зібрати повноцінну систему клімат-контролю, яка зчитує показники з сенсорів температури (DHT22, SHT31), вологості (AM2302), CO₂ (MH-Z19B, SCD30), та за допомогою реле або PWM-контролю регулює нагрівачі, кондиціонери, вентиляційні заслінки. Завдяки підтримці платформ Home Assistant, OpenHAB або Domoticz такі системи дають змогу не лише зберігати дані локально без використання хмари, але й реалізовувати складні сценарії автоматизації з використанням Python, NodeJS або YAML. За результатами експериментального дослідження, проведеного у Вроцлавській політехніці (2022), такі системи при правильному налаштуванні демонструють точність регуляції температури в межах $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, що цілком відповідає комерційним аналогам при витратах, нижчих у 4–6 разів[1].

З огляду на наведений аналіз, можна зробити висновок, що сучасні рішення для клімат-контролю представлені трьома домінантними архітектурами: комерційні хмароорієнтовані системи (Smart Home), корпоративні централізовані рішення (HVAC з IoT-модулями), та інтегровані BMS-платформи. Кожна з них має свої переваги й недоліки, але спільною тенденцією є зростання рівня автоматизації, переходу до відкритих стандартів та впровадження локальної обробки даних із мінімізацією залежності від зовнішніх серверів. Це відкриває перспективи створення гнучких, енергоефективних і доступних систем нового покоління, які можуть бути адаптовані до потреб конкретного регіону, типу об'єкта або користувацьких преференцій[2].

Розумний дім: комерційні рішення та функціональні можливості

Системи розумного дому (Smart Home) є наймасовішим сегментом у сфері клімат-контролю. Вони орієнтовані на побутових користувачів і зазвичай реалізуються за принципом plug-and-play. Найвідомішими серед комерційно доступних рішень є:

- **Google Nest** –перший масовий термостат із функцією самонавчання. Nest використовує алгоритми машинного навчання для аналізу режиму перебування людини в приміщенні, враховує геолокацію користувача й створює температурні сценарії на основі щоденного графіка[7].
- **Ecobee SmartThermostat** –підтримує вбудований голосовий помічник (Amazon Alexa), управляє як центральною HVAC-системою, так і локальними пристроями. Ecobee дозволяє контролювати кілька зон у будинку через зовнішні термодатчики.
- **Tado** –німецький бренд, який спеціалізується на «інтелектуальному» управлінні кліматом для європейських систем опалення. Його особливістю є висока точність контролю температури та адаптивне вивчення режиму вентиляції.
- **Panasonic Comfort Cloud** –система, орієнтована на ринок Японії та Південно-Східної Азії, що поєднує централізоване управління кондиціонерами з аналітикою енергоспоживання.

Особливістю більшості розумних термостатів є інтеграція з хмарними сервісами, мобільними додатками, а також голосовими асистентами –Amazon Alexa, Google Assistant, Apple Siri. Водночас їхня закритість (відсутність відкритого API) обмежує можливості кастомізації[7].

HVAC-системи з підтримкою IoT: промислові підходи

HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) –це категорія технічних рішень, що охоплює опалення, вентиляцію та кондиціювання повітря. Інтеграція IoT-компонентів дозволяє автоматизувати роботу систем на основі реального часу та предиктивної аналітики.

Провідні виробники, як-от **Daikin, Trane, Carrier, Mitsubishi Electric**, уже давно пропонують рішення з підтримкою протоколів BACnet, Modbus TCP/IP та MQTT. Ці протоколи дають змогу централізовано збирати дані з численних пристроїв, у тому числі сенсорів температури, вологості, тиску, та контролерів повітрообміну[8].

Прикладом високого ступеня автоматизації є японська система **Daikin IoT HVAC**, яка використовує центральний шлюз для збирання даних із фільтрів, компресорів і зовнішніх блоків кондиціонерів. За допомогою IoT-модулів і хмарної платформи ці дані аналізуються для запобігання збоїв, планування техобслуговування та оптимізації навантажень на мережу.

BMS-системи як центр керування інженерними мережами

Building Management System (BMS) –це високорівнева система автоматизації, яка об'єднує всі технічні підсистеми будівлі в єдину мережу. BMS охоплює:

- клімат-контроль;
- освітлення;
- контроль доступу;
- відеоспостереження;
- сигналізацію;
- управління енергоспоживанням.

Усі компоненти пов'язані через центральний контролер або сервер. Підключення до IoT здійснюється шляхом використання шлюзів (gateways), що забезпечують сумісність між старими протоколами типу BACnet, KNX або LonWorks і сучасними IP-мережами[10].

Сучасні BMS, зокрема **Siemens Desigo CC**, **Honeywell Building Management**, **Schneider Electric EcoStruxure**, використовують штучний інтелект для прогнозування навантажень, адаптації до кількості присутніх людей у приміщенні, аналізу історичних даних про температуру, а також виявлення аномалій.

Аналіз ефективності та економічної доцільності

Згідно з аналітичним звітом *European Building Automation Association* (2022), впровадження BMS у середній офісній будівлі площею 5 000 м² дозволяє зменшити споживання енергії на 18–35% упродовж першого року. Впровадження розумних термостатів у приватному секторі дає змогу скоротити витрати на опалення та охолодження на 10–22% згідно з даними *US Department of Energy* (2023)[9].

Підприємства, що експлуатують HVAC-системи із вбудованими IoT-компонентами, відзначають також зниження частоти аварійних зупинок обладнання до 30% завдяки предиктивному технічному обслуговуванню. Це підтверджується звітом *Tokyo Institute of Technology* (2023), в якому зазначено, що навіть базова IoT-модернізація існуючих кондиціонерів дозволяє покращити їхній ресурс на 15–20%.

Обмеження існуючих рішень і виклики

Попри всі переваги, існуючі комерційні рішення мають низку обмежень:

1. **Закритість екосистем:** більшість популярних рішень не підтримують відкритий API, або накладають обмеження на кастомні сценарії.

2. **Ціна:** якісні системи HVAC із підтримкою IoT можуть коштувати у 3–5 разів дорожче за стандартне обладнання.

3. **Вимоги до інфраструктури:** для реалізації BMS необхідна сертифікована кабельна інфраструктура, сервери, інженерні мережі.

4. **Безпека:** з'єднання з хмарою може бути вразливим до атак типу Man-in-the-middle, DNS spoofing, brute force API.

5. **Складність адаптації в умовах України:** через відсутність сертифікації, нестабільну енергетику й локальні особливості будівництва[9].

Перспективи розвитку та роль відкритих систем

В умовах підвищеного попиту на гнучкі, недорогі й відкриті рішення, особливо в країнах із нестабільною інфраструктурою, як-от Україна, набувають популярності платформи на базі **ESP32**, **Raspberry Pi**, з використанням **Home Assistant** або **Node-RED**. Такі системи дозволяють збирати, обробляти й візуалізувати дані локально, без підключення до хмари, що підвищує безпеку та стабільність.

Подальший розвиток полягає у впровадженні стандартів на рівні **ITU-T**, **ISO/IEC JTC1/SC41**, розширенні відкритих протоколів (Matter, Zigbee, Z-Wave over IP) і використанні предиктивних моделей на базі штучного інтелекту.

1.3. Порівняльний аналіз доступних апаратних і програмних засобів.

Розробка системи клімат-контролю на основі IoT-технологій вимагає комплексного підходу до вибору як апаратних, так і програмних засобів. Оптимальність рішень у цій сфері визначається не лише вартісними параметрами, а насамперед функціональністю, енергоефективністю, можливістю масштабування, підтримкою сучасних протоколів зв'язку, а також рівнем адаптивності до змін у середовищі експлуатації. Світова практика засвідчує, що перевагу отримують рішення, які можуть забезпечити баланс між обчислювальною потужністю, низьким енергоспоживанням і гнучкістю в налаштуванні. На основі аналізу наукових джерел, зокрема IEEE Xplore, Sensors (MDPI), SpringerLink, а також технічних оглядів від виробників, виділено три найпопулярніші апаратні платформи: Arduino, ESP32 та Raspberry Pi. У програмному аспекті домінують такі середовища, як Home Assistant, Node-RED і Blynk. Нижче наведено порівняльний

аналіз зазначених рішень з огляду на їхню відповідність вимогам до систем клімат-контролю[10].

Платформа Arduino, представлена різними моделями, серед яких найбільш поширені Arduino Uno, Nano та Mega, є однією з найстаріших в екосистемі IoT-проектів. Її ключовою перевагою є простота використання, велика спільнота підтримки та наявність величезної кількості готових бібліотек для сенсорів температури, вологості, CO₂ та інших фізичних параметрів. Однак Arduino має суттєве обмеження: вона не має вбудованого Wi-Fi або Bluetooth-модуля, якщо не використовуються спеціалізовані версії (напр., Arduino MKR WiFi 1010). У класичному варіанті вона потребує підключення зовнішніх модулів ESP8266 або Ethernet Shield, що збільшує складність і вартість системи. Проте Arduino залишається найкращим вибором для проектів, де ключову роль відіграє ультранизьке енергоспоживання, відсутність складної логіки або де необхідне автономне зчитування параметрів для подальшої обробки на іншому рівні[11].

Іншою платформою, яка значно перевершує Arduino за функціональністю, є ESP32 від компанії Espressif Systems. Цей мікроконтролер поєднує у собі два ядра, вбудований Wi-Fi та Bluetooth, підтримку широкого спектра інтерфейсів вводу/виводу (I²C, SPI, UART, ADC, DAC, PWM), а також наявність deep-sleep режимів, що дозволяє знизити енергоспоживання до 10 мкА в режимі очікування. За результатами досліджень, опублікованих у журналі Sensors (2023), ESP32 забезпечує до 40% більш ефективну обробку запитів від сенсорів у порівнянні з Arduino при схожому споживанні енергії. Його використання є оптимальним у випадках, коли система клімат-контролю повинна працювати автономно, мати зворотний зв'язок із мобільним додатком або надсилати дані до хмарного брокера через MQTT, HTTP або WebSocket. Крім того, ESP32 активно підтримується більшістю сучасних мобільних платформ для побудови Smart Home[11].

Raspberry Pi, у свою чергу, є радше мікрокомп'ютером, ніж мікроконтролером. Він підтримує повноцінні дистрибутиви Linux (Raspberry Pi OS, Ubuntu Server, DietPi тощо), що дозволяє запускати одночасно кілька сервісів, таких як локальний MQTT-брокер, Home Assistant, InfluxDB, Grafana та інші.

Завдяки наявності HDMI, USB, GPIO-портів і Ethernet, Raspberry Pi може виконувати роль шлюзу між сенсорними вузлами та хмарою або ж бути ядром автономної IoT-системи клімат-контролю. У публікаціях IEEE Access (2022) зазначено, що Raspberry Pi є найкращим вибором для мультизональних об'єктів, де необхідна одночасна обробка великого обсягу даних від десятків сенсорів, локальне збереження журналів і візуалізація аналітики без використання зовнішніх ресурсів. Його недоліками є вища вартість, необхідність активного охолодження при високих навантаженнях та порівняно велике споживання енергії (від 0,5 до 3,5 Вт залежно від версії та завантаження)[13].

Щодо програмного забезпечення, то середовище Node-RED вважається найбільш універсальним інструментом для проектування логіки роботи системи клімат-контролю. Воно забезпечує візуальну побудову потоків (flows), інтеграцію з MQTT, REST API, WebSocket, Google Sheets, Blynk, Telegram та іншими сервісами. За допомогою Node-RED можна легко створити сценарії: «якщо температура $> 27^{\circ}\text{C}$ –увімкнути вентилятор», «якщо рівень $\text{CO}_2 > 1000 \text{ ppm}$ – активувати вентиляцію» тощо. Середовище написано на Node.js, є кросплатформним і підтримується як на ESP32, так і на Raspberry Pi. За даними дослідження Vilnius Tech (2023), Node-RED демонструє найбільшу швидкість реагування на тригерні умови в порівнянні з аналогами –середня затримка становить 200–350 мс на одноядерному контролері[13].

Blynk є платформою для створення мобільних інтерфейсів керування IoT-пристроями. Вона дозволяє без знання Android/iOS-програмування створити інтерфейс, який взаємодіє із системою через Wi-Fi, GSM або Ethernet. Для клімат-контролю Blynk є корисним у тому випадку, коли потрібен швидкий запуск MVP-системи з можливістю моніторингу температури, вологості, керування нагрівачами, кондиціонерами або вентиляторами. Платформа підтримує push-повідомлення, інтеграцію з голосовими помічниками, історію графіків. Проте вона має обмеження: у безкоштовній версії можливе лише 1–2 пристрої, кількість віджетів обмежена, а хмарне зберігання даних –за додаткову оплату. В академічному середовищі Blynk часто використовується як приклад побудови НМІ

(людино-машинного інтерфейсу) на курсах в університетах Японії (Tokyo Institute of Technology, Keio University) та США (MIT IoT Lab)[13].

Home Assistant –найбільш потужна платформа з відкритим кодом для побудови розумного дому з повною локалізацією, гнучкою структурою, підтримкою понад 2300 інтеграцій. Вона дозволяє управляти системами освітлення, безпеки, вентиляції, кліматом, водопостачанням. Для системи клімат-контролю Home Assistant пропонує модулі автоматизації на основі YAML, Python Scripts, Node-RED Addon. Однією з ключових переваг є підтримка локального голосового керування (наприклад, через Rhasspy), а також інтеграція з системами енергоменеджменту. Згідно з дослідженням компанії Open Source Research (2023), Home Assistant демонструє найкращу масштабованість: в одному інсталяційному середовищі може бути об'єднано понад 150 пристроїв, при цьому середній час реакції на тригер –90–120 мс при використанні MQTT[13].

Таким чином, порівняльний аналіз свідчить, що Arduino є найкращим вибором для простих, недорогих, автономних кліматичних вузлів без складної логіки. ESP32 є ідеальним для систем середнього рівня складності з акцентом на бездротову комунікацію, низьке енергоспоживання й локальну обробку даних. Raspberry Pi доцільно використовувати для складних систем із високими вимогами до обчислень, візуалізації та одночасного обслуговування кількох протоколів і зон. У програмному контексті Blynk доцільно застосовувати для швидкого створення мобільних інтерфейсів, Node-RED –для логіки керування та зв'язку з брокерами, а Home Assistant –для створення повноцінного середовища автоматизації будинку або офісу. Комбінація ESP32 + Node-RED/Blynk є однією з найпоширеніших у проєктах автономного клімат-контролю, тоді як Raspberry Pi + Home Assistant – вибір для стаціонарних, масштабованих та багатофункціональних систем[14].

РОЗДІЛ 2. Теоретичні основи побудови IoT-систем клімат-контролю.

У межах глобального технічного поступу системи автоматизованого клімат-контролю зазнають якісного перетворення –від традиційних централізованих інженерних комплексів до гнучких, самоконфігурованих і контекстно-чутливих IoT-середовищ. Такі середовища об'єднують сукупність розподілених сенсорів, виконавчих пристроїв, інтерфейсів передачі даних та програмно-аналітичних модулів, що взаємодіють у реальному часі та спільно реагують на зміну зовнішніх і внутрішніх кліматичних параметрів. На відміну від класичних HVAC-систем, IoT-підхід до керування мікрокліматом ґрунтується на моделі децентралізованої обробки інформації, адаптивного керування на основі показників стану середовища, а також прямого зворотного зв'язку між пристроями і користувачем[12].

Поява технологій IoT відкрила нові горизонти у сфері автоматизованого керування мікрокліматом, дозволяючи реалізовувати інтелектуальні системи, які не лише реєструють параметри повітряного середовища, а й самостійно аналізують дані, прогнозують поведінкові сценарії та здійснюють адаптаційне регулювання з урахуванням зовнішніх впливів. Інтеграція таких систем у житлові, комерційні або виробничі об'єкти потребує чіткого теоретичного підґрунтя, що охоплює моделі архітектури, принципи роботи протоколів зв'язку, особливості побудови сенсорних вузлів, безпекові компоненти та енергетичну оптимізацію[14].

В основу побудови IoT-систем клімат-контролю покладено міждисциплінарну інтеграцію –електроніки, телекомунікацій, програмної інженерії, кібербезпеки, термодинаміки та теорії автоматичного регулювання. Саме тому їх проєктування не може обмежуватись інтуїтивним добором компонентів або адаптацією готових рішень: потрібен формалізований підхід до опису структур, моделей взаємодії, потоків даних та механізмів реагування. З урахуванням фізичних властивостей середовища (інерційність температурних змін, локальна варіативність показників, вплив освітлення, щільності людей тощо),

системи мають бути здатними до гнучкого масштабування, автоконфігурації та модульної реконфігурації з мінімальним впливом на стабільність роботи[16].

Теоретичні основи таких систем закладаються у розумінні рівневої архітектури IoT, вибору протоколів комунікації з урахуванням пропускну здатності, затримок і енерговитрат, опису принципів дії типових сенсорів і виконавчих механізмів, а також в розробці концепцій зменшення споживання енергії в умовах обмежених ресурсів. У зв'язку з цим, особливу увагу в аналізі функціонування кліматичних IoT-систем слід приділяти моделі передачі даних у гетерогенних мережах, типології сенсорних пристроїв, криптографічному захисту каналу та аспектам живлення. Рівень динамічності сучасних будівель, складність моделей теплопереносу та зростаюча кількість підключених пристроїв формують нові виклики для інженерів і дослідників, що вимагає чітко структурованого теоретичного осмислення на рівні принципів побудови, критеріїв ефективності та формалізованих методик оптимізації[15].

Таким чином, завдання цього розділу –обґрунтувати ключові теоретичні положення, які лежать в основі побудови сучасних IoT-систем клімат-контролю. Це дозволяє не лише структурувати уявлення про внутрішню організацію таких систем, а й закласти основи для їх проектування, аналізу, вдосконалення та подальшого масштабування у контексті як побутових, так і промислових об'єктів.

2.1. Архітектура IoT-систем для автоматизованого клімат-контролю.

У межах сучасної науково-технічної парадигми автоматизованого управління середовищем ключову роль відіграє архітектура IoT-систем, яка забезпечує формування та функціонування розподілених інформаційно-керованих середовищ. У сфері клімат-контролю це набуває особливої ваги, адже регулювання параметрів мікроклімату –процес, що потребує безперервного моніторингу, адаптивного реагування та обробки великої кількості даних у режимі реального часу. Ефективність такої системи прямо залежить від правильності побудови її

архітектури –взаємопов’язаних структурно-функціональних блоків, кожен з яких виконує власне інформаційне або керуюче завдання[16].

Базовою моделлю побудови сучасної IoT-системи клімат-контролю є трирівнева архітектура. Вона передбачає розділення всієї системи на три логічно й технологічно відокремлені рівні: рівень сенсорики (рівень фізичного середовища або польовий рівень), комунікаційний рівень (транспортний, мережевий, або рівень гейтвеїв) та рівень обробки й візуалізації даних (аналітичний рівень або серверний/хмарний рівень). Таке поділення дозволяє оптимізувати обмін даними, спростити оновлення окремих компонентів, розвантажити обчислювальні потужності і, водночас, забезпечити масштабованість, адаптивність і модульність системи[16].

Перший рівень, тобто сенсорний, є фундаментальним, оскільки саме він забезпечує збір первинної інформації про стан середовища. У контексті клімат-контролю це означає встановлення численних сенсорів, які фіксують температуру, вологість, концентрацію CO₂, VOC, атмосферний тиск, рівень освітлення, присутність людей, рух, а також інші допоміжні фактори, що впливають на мікроклімат. З технологічного погляду сенсорика може бути реалізована на базі цифрових, аналогових або комбінованих пристроїв, з можливістю локальної обробки даних або передачею у «сирому» вигляді. Типовими прикладами для температурно-вологісного контролю є сенсори типу DHT22, SHT31, BME280; для аналізу якості повітря –SCD30, MH-Z19, CCS811; для контролю освітленості – BH1750, TSL2561. Для реєстрації присутності використовують датчики руху (PIR), а також ультразвукові або ІЧ-модулі[17].

Особливістю сучасних сенсорів є не лише здатність реєструвати фізичні параметри, а й функції самодіагностики, компенсації температурного дрейфу, калібрування, а в деяких випадках –вбудована логіка обробки. Більшість таких пристроїв використовують інтерфейси I²C, SPI або UART, що дозволяє легко інтегрувати їх у контролери низького рівня. При проектуванні систем клімат-контролю необхідно враховувати як фізичне розташування сенсорів (щоб уникнути локального перегріву чи помилкового зчитування через джерела тепла), так і

частоту зчитування, що безпосередньо впливає на обсяг переданих даних, затримку в реагуванні та енергоспоживання[17].

Другий рівень – комунікаційний, або рівень гейтвею – виконує роль буфера і модуля інтелектуального маршрутизування. Його завдання полягає у зборі даних з сенсорів, попередній обробці, фільтрації, агрегації, часом –локальному збереженні, та подальшій передачі на аналітичний рівень. У багатьох сучасних системах гейтвей реалізується на базі мікроконтролерів типу ESP32, STM32, або одноплатних комп'ютерів, таких як Raspberry Pi, BeagleBone, Orange Pi. Гейтвей також може обслуговувати кілька протоколів одночасно –наприклад, обмін через ZigBee на нижньому рівні з передачею по MQTT на верхньому. При цьому актуальним стає питання конфлікту між протоколами, необхідності нормалізації даних, уніфікації часових міток та автентифікації пристроїв[17].

Залежно від технології бездротового або дротового зв'язку, гейтвеї можуть використовувати Wi-Fi (стандарт 802.11), Bluetooth Low Energy (BLE), LoRaWAN, NB-IoT, ZigBee, Z-Wave, або Ethernet. Вибір протоколу залежить від багатьох факторів: кількості вузлів, очікуваного обсягу трафіку, доступності живлення, вимог до енергоефективності, відстані між вузлами та допустимої затримки. Наприклад, LoRaWAN дозволяє з'єднувати віддалені об'єкти з дуже низьким споживанням енергії, проте має невелику пропускну здатність, тоді як Wi-Fi дає змогу передавати великі обсяги даних, але потребує постійного живлення[17].

Ключовим завданням гейтвею є оптимізація трафіку: замість надсилання «сирих» даних кожену секунду, можлива реалізація фільтрації шуму, побудови ковзних середніх, застосування порогових умов, стиснення або навіть локального прогнозування. Таким чином, зменшується навантаження на канал передачі, покращується масштабованість системи та забезпечується зменшення енергоспоживання на рівні сенсорних вузлів.

Третій рівень –серверний або рівень обробки й візуалізації –є аналітичним ядром усієї системи. Саме тут здійснюється об'єднання всіх потоків даних, їх нормалізація, зберігання, аналіз, побудова поведінкових моделей, візуалізація, а також формування команд зворотного зв'язку для виконавчих пристроїв. Цей

рівень може бути реалізований як на локальному сервері (наприклад, у випадку вимог до автономності, безпеки або при нестабільному інтернет-з'єднанні), так і через хмарну платформу (Firebase, AWS IoT, Microsoft Azure, Google Cloud IoT, чи спеціалізовані сервіси типу Ubidots, ThingSpeak)[18].

Для збереження даних зазвичай використовують бази даних типу InfluxDB (тимчасові ряди), SQLite, PostgreSQL. Для обробки даних – фреймворки Node-RED, Home Assistant, OpenHAB. Для візуалізації – Grafana, Blynk, або спеціальні вебінтерфейси. Алгоритми аналізу можуть включати PID-регулятори, нечіткі логіки, штучні нейронні мережі або спрощені евристичні на основі порогових значень. В умовах реального часу важливо забезпечити низьку латентність, і при цьому уникнути псевдореактивної поведінки, що може призвести до коливань у системі (наприклад, циклічне вмикання/вимикання кондиціонера)[18].

Одним із критично важливих компонентів цього рівня є безпека. Через те, що система клімат-контролю потенційно підключена до інтернету і керує фізичними процесами, її злам може мати реальні наслідки – від порушення умов зберігання продукції до загрози життю (наприклад, у медичних закладах). Саме тому на рівні сервера впроваджується багаторівнева система безпеки: TLS-шифрування даних, авторизація через токени (JWT), автентифікація користувачів, контроль доступу, журнали подій, а також регулярне оновлення систем[18].

Побудова IoT-систем за трирівневою архітектурою дозволяє не лише забезпечити ефективне функціонування у вузькому сенсі регулювання температури чи вологості, а й інтегрувати клімат-контроль у загальну екосистему «розумної» будівлі, включаючи освітлення, охорону, сповіщення, управління енергоспоживанням, вентиляцією, опаленням, підключенням до відновлюваних джерел енергії, тощо. В результаті реалізується кіберфізична система з високим ступенем автономності, самонавчання і гнучкого реагування[18].

2.2. Протоколи передачі даних у IoT-системах клімат-контролю.

У сучасних системах Інтернету речей (IoT), особливо в контексті автоматизованого клімат-контролю, вибір протоколів передачі даних є критично важливим для забезпечення ефективної, надійної та енергоефективної роботи. Протоколи передачі даних визначають спосіб обміну інформацією між сенсорами, виконавчими пристроями, шлюзами та хмарними або локальними серверами. Серед найбільш поширених протоколів, що використовуються в IoT-системах клімат-контролю, виділяються MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), CoAP (Constrained Application Protocol), HTTP (HyperText Transfer Protocol) та LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)[18, 19].

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

MQTT є легким протоколом обміну повідомленнями, розробленим для пристроїв з обмеженими ресурсами та нестабільними мережевими з'єднаннями. Він працює за моделлю «публікація-підписка», де клієнти можуть підписуватися на певні теми, а видавці надсилають повідомлення на ці теми. Ця архітектура дозволяє ефективно передавати дані між численними пристроями без необхідності встановлення прямого з'єднання між кожною парою пристроїв.

MQTT використовує TCP/IP як транспортний протокол, що забезпечує надійність доставки повідомлень. Протокол підтримує три рівні якості обслуговування (QoS):

1. QoS 0 – повідомлення доставляється не більше одного разу без підтвердження доставки.
2. QoS 1 – повідомлення доставляється принаймні один раз з підтвердженням доставки.
3. QoS 2 – повідомлення доставляється точно один раз з використанням складнішого механізму підтвердження.

Завдяки своїй легкості та ефективності, MQTT широко використовується в системах клімат-контролю для передачі даних від сенсорів до центральних серверів або хмарних платформ. Його здатність працювати в умовах нестабільних

мережевих з'єднань робить його ідеальним для застосування в розподілених системах з великою кількістю пристроїв[19].

CoAP (Constrained Application Protocol)

CoAP є протоколом прикладного рівня, розробленим спеціально для пристроїв з обмеженими ресурсами в IoT-середовищах. Він базується на моделі клієнт-сервер і використовує UDP як транспортний протокол, що дозволяє зменшити накладні витрати та забезпечити швидку передачу даних.

CoAP підтримує методи, подібні до HTTP, такі як GET, POST, PUT та DELETE, що полегшує інтеграцію з існуючими веб-технологіями. Протокол також підтримує механізм спостереження (observe), який дозволяє клієнтам підписуватися на зміни ресурсів на сервері та отримувати сповіщення про ці зміни[19].

Завдяки своїй легкості та ефективності, CoAP є придатним для використання в системах клімат-контролю, де важливо забезпечити швидку та енергоефективну передачу даних між пристроями. Його здатність працювати в умовах обмежених ресурсів робить його ідеальним для застосування в сенсорних мережах та інших IoT-сценаріях[19].

HTTP (HyperText Transfer Protocol)

HTTP є одним з найпоширеніших протоколів передачі даних в Інтернеті. Він базується на моделі клієнт-сервер і використовує TCP як транспортний протокол. HTTP широко використовується для передачі даних між веб-браузерами та веб-серверами, а також для інтеграції IoT-пристроїв з веб-додатками та хмарними сервісами[19].

Однак, у контексті IoT-систем клімат-контролю, HTTP має певні обмеження. Його накладні витрати та вимоги до ресурсів можуть бути занадто високими для пристроїв з обмеженими можливостями. Крім того, HTTP не підтримує механізм публікації-підписки, що обмежує його ефективність у сценаріях з великою кількістю пристроїв, які потребують обміну даними в реальному часі[19].

Незважаючи на ці обмеження, HTTP залишається корисним у випадках, коли необхідна інтеграція з існуючими веб-технологіями або коли пристрої мають достатньо ресурсів для обробки HTTP-запитів[19].

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)

LoRaWAN є протоколом для бездротової передачі даних на великі відстані з низьким енергоспоживанням. Він базується на фізичному рівні LoRa та визначає мережеву архітектуру, яка дозволяє пристроям з обмеженими ресурсами передавати дані на великі відстані через шлюзи до центральних серверів або хмарних платформ[19].

LoRaWAN підтримує асинхронну передачу даних, що дозволяє пристроям працювати в режимі сну та активуватися лише для передачі або прийому даних. Це значно знижує енергоспоживання та подовжує термін служби батарей.

Завдяки своїй здатності забезпечувати зв'язок на великі відстані з низьким енергоспоживанням, LoRaWAN є ідеальним для застосування в системах клімат-контролю, особливо в сільських або віддалених районах, де інші типи зв'язку можуть бути недоступними або ненадійними[19].

Порівняльний аналіз протоколів

Вибір протоколу передачі даних для IoT-системи клімат-контролю залежить від багатьох факторів, включаючи вимоги до енергоспоживання, дальність зв'язку, надійність передачі даних, підтримку певних моделей комунікації та інші. MQTT є відмінним вибором для систем з великою кількістю пристроїв, які потребують надійного обміну даними в умовах нестабільного зв'язку. CoAP підходить для систем з обмеженими ресурсами, де важлива швидка та енергоефективна передача даних. HTTP може бути використаний для інтеграції з веб-технологіями, але його застосування в IoT обмежене через високі накладні витрати. LoRaWAN є ідеальним для систем, які потребують передачі даних на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням[19].

У багатьох випадках, оптимальним рішенням є використання комбінації кількох протоколів, де кожен з них виконує свою специфічну роль у системі. Наприклад, сенсори можуть використовувати LoRaWAN для передачі даних до

шлюзу, який потім використовує MQTT для передачі даних до хмарної платформи. Такий підхід дозволяє максимально ефективно використовувати переваги кожного протоколу та забезпечити надійну та енергоефективну роботу всієї системи[19].

Таким чином, розуміння особливостей та можливостей різних протоколів передачі даних є ключовим для розробки ефективних та надійних IoT-систем клімат-контролю, які відповідають специфічним вимогам конкретного застосування[19].

2.3. Сенсори та виконавчі пристрої, що застосовуються у кліматичних IoT-системах.

У сучасних системах Інтернету речей (IoT), призначених для автоматизованого клімат-контролю, ключову роль відіграють сенсори та виконавчі пристрої. Вони забезпечують точне вимірювання параметрів навколишнього середовища та ефективне управління кліматичними умовами в приміщеннях. У цьому розділі розглянемо функціональні та технічні характеристики сенсорів температури й вологості (DHT22), вуглекислого газу (SCD30, MH-Z19), а також виконавчих елементів, таких як серводвигуни SG90 та електромеханічні реле[19].

Сенсори температури та вологості: DHT22

Сенсор DHT22 є одним із найпоширеніших пристроїв для вимірювання температури та відносної вологості в IoT-системах. Він використовує цифровий сигнал для передачі даних, що забезпечує високу точність та стійкість до перешкод. DHT22 має діапазон вимірювання температури від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ та вологості від 0% до 100% з точністю $\pm 2\% \text{ RH}$. Пристрій працює при напрузі живлення від 3.3V до 6V та споживає низький струм, що робить його енергоефективним рішенням для тривалого використання в автономних системах[19].

Інтерфейс взаємодії DHT22 базується на однопровідному цифровому сигналі, що спрощує підключення до мікроконтролерів, таких як Arduino або

ESP32. Завдяки своїй простоті та надійності, DHT22 широко використовується в системах моніторингу клімату, розумних будинках та інших IoT-додатках.

Сенсори вуглекислого газу: SCD30 та MH-Z19

Моніторинг рівня вуглекислого газу (CO₂) є важливим аспектом управління якістю повітря в приміщеннях. Сенсори SCD30 та MH-Z19 є популярними рішеннями для вимірювання концентрації CO₂ в IoT-системах.

SCD30 від компанії Sensirion є високоточним сенсором, що використовує технологію NDIR (недисперсійна інфрачервона спектроскопія) для вимірювання CO₂. Він також інтегрує сенсори температури та вологості, що дозволяє компенсувати вплив цих параметрів на точність вимірювання CO₂. SCD30 має діапазон вимірювання CO₂ від 0 до 40,000 ppm з точністю $\pm(30 \text{ ppm} + 3\%)$ в діапазоні 400–10,000 ppm . Пристрій підтримує інтерфейси UART та I²C, що забезпечує гнучкість у виборі способу підключення до мікроконтролерів[19].

MH-Z19 є компактним сенсором CO₂, що також використовує технологію NDIR. Він має діапазон вимірювання від 0 до 5000 ppm з точністю $\pm 50 \text{ ppm} + 5\%$ від вимірюваного значення . MH-Z19 підтримує інтерфейси UART та PWM, що дозволяє легко інтегрувати його в різні системи. Сенсор працює при напрузі живлення від 3.6V до 5.5V та споживає середній струм близько 18 мА, що робить його енергоефективним рішенням для безперервного моніторингу CO₂.

Виконавчі пристрої: серводвигуни SG90

Серводвигуни SG90 є мініатюрними приводами, що широко використовуються в IoT-системах для управління механічними компонентами, такими як заслінки вентиляції або регулятори потоку повітря. SG90 має кут повороту до 180° та забезпечує крутний момент до 2.0 кг·см при напрузі живлення 4.8V . Пристрій має компактні розміри (22.8 мм × 12.2 мм × 28.5 мм) та вагу близько 9 г, що дозволяє використовувати його в обмеженому просторі[19].

Серводвигун SG90 працює при напрузі живлення від 4.8V до 6V та споживає струм до 550 мА під навантаженням . Він використовує трьохпровідний інтерфейс: живлення, заземлення та сигнальний провід, що спрощує підключення до мікроконтролерів. Завдяки своїй надійності та простоті управління, SG90 є

популярним вибором для реалізації механічних функцій в IoT-системах клімат-контролю[19].

Електромеханічні реле

Електромеханічні реле використовуються в IoT-системах для керування високовольтними або високострумовими навантаженнями, такими як обігрівачі, кондиціонери або вентилятори. Вони дозволяють безпечно ізолювати низьковольтну логіку мікроконтролера від високовольтних ланцюгів живлення[19].

Типові електромеханічні реле мають номінальну напругу котушки 5V або 12V та здатні комутувати струми до 10A при напрузі до 250V AC. Наприклад, реле типу LY2 має номінальний струм комутації 10A при 250V AC та споживає потужність близько 0.9 Вт . Реле мають інтерфейс у вигляді контактів типу NO (нормально відкритий) та NC (нормально закритий), що дозволяє реалізувати різні схеми керування навантаженням[19].

Використання електромеханічних реле в IoT-системах клімат-контролю забезпечує надійне та безпечне керування потужними пристроями, що є критично важливим для забезпечення комфортних умов у приміщеннях.

2.4. Безпека, енергоефективність та автономність роботи IoT-систем.

У сучасних системах Інтернету речей (IoT), особливо в контексті автоматизованого клімат-контролю, ключовими аспектами є забезпечення безпеки, енергоефективності та автономності. Ці фактори визначають надійність, довговічність та ефективність функціонування IoT-систем у різних умовах експлуатації.

Безпека IoT-систем

Забезпечення безпеки в IoT-системах є критично важливим завданням, оскільки ці системи часто обробляють конфіденційну інформацію та керують фізичними процесами. Основними методами захисту є використання протоколів шифрування, автентифікації та авторизації.

Протоколи TLS/SSL

Протоколи TLS (Transport Layer Security) та SSL (Secure Sockets Layer) забезпечують захист даних під час передачі між пристроями та серверами. Вони використовують асиметричне шифрування для встановлення захищеного з'єднання, що гарантує конфіденційність та цілісність переданої інформації. TLS є оновленою версією SSL і широко використовується в сучасних IoT-системах для захисту комунікацій[19].

Асиметрична криптографія

Асиметричне шифрування використовує пару ключів: відкритий для шифрування та закритий для розшифрування. Цей метод дозволяє безпечно передавати дані без необхідності обміну секретними ключами, що зменшує ризик їх перехоплення. У IoT-системах асиметрична криптографія забезпечує автентифікацію пристроїв та захист від несанкціонованого доступу.

Авторизація та управління доступом

Для обмеження доступу до ресурсів IoT-систем використовуються механізми авторизації, які визначають права користувачів та пристроїв. Це може включати рольову модель доступу, багатофакторну автентифікацію та використання токенів безпеки. Ефективне управління доступом запобігає несанкціонованому використанню системи та забезпечує її цілісність[19].

Енергоефективність IoT-систем

Енергоефективність є важливим аспектом IoT-систем, особливо для пристроїв, що працюють від батарей або в умовах обмеженого енергопостачання. Основними методами зниження енергоспоживання є використання режимів сну, оптимізація циклів роботи та застосування альтернативних джерел живлення[19].

Режим глибокого сну (Deep Sleep)

Режим глибокого сну дозволяє пристроям мінімізувати енергоспоживання під час періодів бездіяльності. У цьому режимі більшість компонентів пристрою вимикаються, залишаючи активними лише необхідні для пробудження елементи, такі як таймери або інтерфейси. Це значно подовжує час автономної роботи пристроїв.

Циклічний режим роботи (Duty Cycling)

Циклічний режим роботи передбачає чергування періодів активності та сну пристрою. Це дозволяє зменшити середнє енергоспоживання, оскільки пристрій активується лише для виконання необхідних завдань, таких як зчитування даних або передача інформації. Оптимізація тривалості активних та пасивних періодів забезпечує баланс між енергоефективністю та продуктивністю[19].

Оптимізація частоти обміну даними

Зменшення частоти передачі даних дозволяє знизити енергоспоживання, особливо в бездротових мережах. Це досягається шляхом об'єднання даних у пакети, використання алгоритмів компресії та передачі лише змінних або критичних даних. Такий підхід зменшує навантаження на мережу та подовжує час роботи пристроїв від батарей.

Автономність роботи IoT-систем

Автономність IoT-систем забезпечується використанням альтернативних джерел живлення, таких як акумулятори та сонячні панелі, що дозволяє пристроям працювати без підключення до електромережі.

Акумулятори

Акумулятори є основним джерелом живлення для багатьох IoT-пристроїв. Використання літій-іонних або літій-полімерних акумуляторів забезпечує високу щільність енергії та тривалий термін служби. Важливо враховувати характеристики акумуляторів, такі як ємність, напруга та температурний діапазон, для забезпечення надійної роботи пристроїв.

Сонячні панелі

Сонячні панелі дозволяють IoT-пристроєм використовувати енергію сонця для заряджання акумуляторів або безпосереднього живлення. Це особливо корисно для пристроїв, розташованих у віддалених або важкодоступних місцях, де підключення до електромережі неможливе. Інтеграція сонячних панелей з енергозберігаючими технологіями забезпечує тривалу автономну роботу систем[19].

Інші альтернативні джерела енергії

Крім сонячної енергії, IoT-пристрої можуть використовувати інші джерела, такі як кінетична енергія або термоелектричні генератори, що перетворюють теплову енергію в електричну. Це дозволяє забезпечити живлення пристроїв у різних умовах та підвищити їх автономність .

РОЗДІЛ 3. Комплексне проєктування IoT-системи клімат-контролю: апаратна та програмна частини.

3.1. Формування технічних та експлуатаційних вимог до автоматизованої IoT-системи клімат-контролю.

У сучасних умовах стрімкого розвитку технологій Інтернету речей (IoT) автоматизовані системи клімат-контролю набувають все більшого значення для забезпечення комфортних та безпечних умов у різноманітних типах приміщень. Формування технічних та експлуатаційних вимог до таких систем є критично важливим етапом, що визначає їх ефективність, надійність та відповідність специфічним потребам користувачів[20].

Тип об'єкта та його вплив на вимоги до системи

Тип об'єкта, в якому планується впровадження IoT-системи клімат-контролю, суттєво впливає на формування вимог до неї. Розглянемо основні типи об'єктів:

1. Житлові приміщення: У житлових будинках та квартирах основною метою системи є забезпечення комфортного мікроклімату для мешканців. Вимоги включають точне регулювання температури та вологості, інтеграцію з системами «розумного дому», можливість дистанційного керування та низьке енергоспоживання.

2. Офісні приміщення: В офісах важливо забезпечити комфортні умови для працівників, що сприяє підвищенню продуктивності. Система повинна мати можливість зонального контролю, інтеграцію з системами управління будівлею (BMS), а також підтримку графіків роботи та адаптацію до змін у завантаженості приміщень.

3. Серверні кімнати: У серверних приміщеннях критично важливо підтримувати стабільну температуру та вологість для забезпечення надійної роботи обладнання. Вимоги включають високу точність контролю, резервування систем,

безперервний моніторинг та можливість швидкого реагування на відхилення від заданих параметрів.

Кількість зон контролю та їх специфіка

Кількість зон, які підлягають контролю, визначає складність системи та її архітектуру. Зони можуть бути визначені за функціональним призначенням приміщень, їх розташуванням або іншими критеріями. Для кожної зони необхідно враховувати:

- **Індивідуальні параметри мікроклімату:** Наприклад, у житлових приміщеннях спальня може мати інші вимоги до температури порівняно з кухнею.
- **Наявність джерел тепла або холоду:** Врахування впливу сонячного світла, побутових приладів тощо.
- **Рівень завантаженості:** Кількість людей у приміщенні впливає на температуру та вологість.
- **Особливі вимоги до безпеки:** Наприклад, у серверних кімнатах необхідно уникати перегріву обладнання.

Умови експлуатації та їх вплив на вимоги до системи

Умови експлуатації включають такі фактори:

- **Температурний діапазон:** Система повинна ефективно працювати в умовах, характерних для конкретного регіону або типу приміщення.
- **Вологість:** Необхідно враховувати можливість конденсації вологи та її вплив на обладнання.
- **Пил та забруднення:** У промислових приміщеннях слід передбачити захист від пилу та інших забруднень.
- **Електромагнітні завади:** У середовищах з високим рівнем електромагнітних завад необхідно забезпечити стійкість системи до них.

Вимоги до точності та швидкості реагування

Залежно від типу об'єкта та його призначення, вимоги до точності вимірювання та швидкості реагування системи можуть відрізнятися:

- **Житлові приміщення:** Допустимі коливання температури можуть бути в межах $\pm 1^{\circ}\text{C}$, а швидкість реагування – протягом кількох хвилин.

- **Офісні приміщення:** Вимоги до точності можуть бути суворішими, особливо в зонах з високою щільністю працівників.

- **Серверні кімнати:** Необхідна висока точність ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) та миттєве реагування на зміни температури або вологості[20].

Інтеграція з іншими системами та масштабованість

Сучасні IoT-системи клімат-контролю повинні мати можливість інтеграції з іншими системами управління будівлею, такими як освітлення, безпека, енергоменеджмент тощо. Це дозволяє створити єдину екосистему, яка забезпечує ефективне управління всіма аспектами функціонування будівлі.

Масштабованість системи є важливою характеристикою, що дозволяє адаптувати її до змін у структурі або функціонуванні об'єкта. Система повинна підтримувати додавання нових зон, сенсорів або виконавчих пристроїв без значних змін у її архітектурі[20].

Вимоги до енергоефективності та автономності

Енергоефективність є ключовим фактором у сучасних системах клімат-контролю. Система повинна мінімізувати споживання енергії, використовуючи такі підходи:

- **Оптимізація алгоритмів управління:** Використання адаптивних алгоритмів, що враховують змінні умови та прогнозують потреби в енергії.

- **Використання енергоефективного обладнання:** Застосування сенсорів та виконавчих пристроїв з низьким енергоспоживанням.

- **Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії:** Наприклад, використання сонячних панелей для живлення системи.

Автономність системи передбачає її здатність функціонувати без постійного втручання користувача або зовнішніх систем. Це особливо важливо в умовах віддалених або важкодоступних об'єктів[19, 21].

Безпека та захист даних

З огляду на підключення IoT-систем до мережі Інтернет, питання безпеки та захисту даних є надзвичайно актуальними. Система повинна забезпечувати:

- **Шифрування даних:** Використання сучасних протоколів шифрування для захисту переданої інформації.

- **Аутентифікацію користувачів:** Забезпечення доступу до системи лише авторизованим особам.

- **Захист від несанкціонованого доступу:** Виявлення та запобігання спробам несанкціонованого втручання в систему.

- **Резервне копіювання та відновлення даних:** Наявність механізмів для збереження даних та їх відновлення у разі збоїв[20].

3.2. Обґрунтування вибору апаратної платформи для реалізації системи.

У процесі проєктування автоматизованої IoT-системи клімат-контролю вибір апаратної платформи є критичним етапом, що визначає функціональні можливості, енергоефективність, масштабованість та загальну вартість системи. Серед широкого спектра доступних мікроконтролерів особливої уваги заслуговують ESP32, Raspberry Pi, STM32 та Arduino. У цьому розділі проведено порівняльний техніко-економічний аналіз зазначених платформ з акцентом на переваги ESP32 у контексті реалізації ефективної та економічно доцільної IoT-системи клімат-контролю[20].

ESP32 –це серія мікроконтролерів від компанії Espressif Systems, що поєднує в собі високу продуктивність, енергоефективність та багаті можливості підключення. Основні характеристики ESP32 включають двоядерний процесор Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, до 520 КБ SRAM, вбудовані модулі Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.2 BR/EDR і BLE, до 34 GPIO з підтримкою SPI, I²C, UART, ADC, DAC, PWM та інших інтерфейсів. ESP32 підтримує різні режими сну, включаючи deep-sleep з мінімальним споживанням енергії до 5 μ A. Вартість ESP32 становить приблизно \$4–\$10 залежно від моделі та постачальника[21].

Raspberry Pi –це серія одноплатних комп'ютерів, які забезпечують високу продуктивність та гнучкість. Основні характеристики Raspberry Pi 3 Model B+

включають чотириядерний ARM Cortex-A53 з тактовою частотою 1.4 ГГц, 1 ГБ LPDDR2 SDRAM, вбудовані модулі Wi-Fi 802.11ac та Bluetooth 4.2, 40 GPIO з підтримкою SPI, I²C, UART та інших інтерфейсів. Споживання енергії значно вище порівняно з мікроконтролерами, що може бути критичним для автономних систем. Вартість Raspberry Pi становить приблизно \$35–\$50 залежно від моделі[21].

STM32 –це серія мікроконтролерів від компанії STMicroelectronics, що характеризується високою продуктивністю та широким спектром функцій. Основні характеристики STM32F103C8T6 включають ARM Cortex-M3 з тактовою частотою до 72 МГц, 64 КБ Flash, 20 КБ SRAM, відсутність вбудованих бездротових інтерфейсів, до 37 GPIO з підтримкою SPI, I²C, UART, ADC, DAC та інших інтерфейсів. Споживання енергії низьке, з підтримкою режимів сну. Вартість STM32 становить приблизно \$2–\$5 залежно від моделі.

Arduino –це платформа з відкритим вихідним кодом, яка ідеально підходить для початківців. Основні характеристики Arduino Uno включають 8-бітний AVR ATmega328P з тактовою частотою 16 МГц, 32 КБ Flash, 2 КБ SRAM, відсутність вбудованих бездротових інтерфейсів, 14 цифрових I/O, 6 аналогових входів з підтримкою SPI, I²C, UART. Споживання енергії низьке, з можливістю роботи від батарей. Вартість Arduino становить приблизно \$20–\$30.

З огляду на вищезазначений аналіз, ESP32 має низку переваг, що роблять його оптимальним вибором для реалізації IoT-систем клімат-контролю. Наявність вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth дозволяє зменшити кількість зовнішніх компонентів, спрощуючи дизайн системи та знижуючи загальну вартість. Двоядерний процесор забезпечує достатню обчислювальну потужність для обробки даних від сенсорів, реалізації алгоритмів керування та забезпечення зв'язку з іншими пристроями. Підтримка різних режимів сну дозволяє мінімізувати споживання енергії, що є критичним для автономних систем, що працюють від батарей[21].

Наявність великої кількості бібліотек, прикладів коду та активної спільноти розробників спрощує процес розробки та налагодження системи. ESP32 підтримує

різноманітні інтерфейси вводу/виводу, що дозволяє легко інтегрувати різні сенсори та виконавчі пристрої, а також масштабувати систему відповідно до потреб[21].

У підсумку, ESP32 є найбільш збалансованим вибором для реалізації автоматизованої IoT-системи клімат-контролю, поєднуючи в собі високу продуктивність, енергоефективність, інтегровані бездротові інтерфейси та доступну вартість. Порівняно з іншими розглянутими платформами, ESP32 забезпечує оптимальне співвідношення ціни та функціональності, що робить його ідеальним рішенням для сучасних IoT-додатків у сфері клімат-контролю.

3.3. Структура IoT-системи клімат-контролю та організація взаємодії її компонентів.

У сучасних умовах розвитку технологій Інтернету речей (IoT) автоматизовані системи клімат-контролю набувають все більшого значення для забезпечення комфортних та безпечних умов у різноманітних типах приміщень. Ефективність таких систем значною мірою залежить від їх структури та організації взаємодії між компонентами. У цьому розділі розглянемо логічну та фізичну структуру IoT-системи клімат-контролю, включаючи сенсорні вузли, гейтвей, хмарну або локальну платформу, а також опис топології системи з використанням моделі MQTT, каналів обміну даними між компонентами, розподілу обчислювальних функцій, журналювання, діагностики та зворотного зв'язку[21].

Логічна структура IoT-системи клімат-контролю передбачає поділ на три основні рівні: сенсорний рівень, комунікаційний рівень та рівень обробки та візуалізації даних. Сенсорний рівень включає різноманітні датчики, що вимірюють параметри навколишнього середовища, такі як температура, вологість, рівень вуглекислого газу тощо. Комунікаційний рівень забезпечує передачу зібраних даних від сенсорів до центрального вузла або хмарної платформи за допомогою протоколів зв'язку, таких як MQTT. Рівень обробки та візуалізації даних відповідає за аналіз отриманої інформації, прийняття рішень та відображення результатів користувачам через інтерфейси управління[21].

Фізична структура системи включає конкретні апаратні компоненти, що реалізують функції, визначені логічною структурою. Сенсорні вузли складаються з мікроконтролерів, таких як ESP32, до яких підключені відповідні датчики. Ці вузли можуть бути розміщені в різних зонах приміщення для забезпечення точного моніторингу мікроклімату. Гейтвей виконує роль посередника між сенсорними вузлами та хмарною або локальною платформою, забезпечуючи збір, обробку та передачу даних. Хмарна або локальна платформа, наприклад, Home Assistant або Blynk, забезпечує зберігання, аналіз та візуалізацію даних, а також надає інтерфейси для взаємодії з користувачами[21].

Топологія системи з використанням моделі MQTT базується на архітектурі «публікація-підписка». У цій моделі сенсорні вузли виступають у ролі видавців (publishers), які надсилають дані до брокера MQTT. Гейтвей та інші компоненти системи, що потребують ці дані, виступають у ролі підписників (subscribers), які отримують інформацію від брокера. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективну та масштабовану передачу даних між компонентами системи, зменшуючи навантаження на окремі вузли та підвищуючи надійність системи в цілому[21].

Канали обміну даними між компонентами системи реалізуються за допомогою різноманітних протоколів зв'язку, таких як Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN тощо, залежно від конкретних вимог та умов експлуатації. Наприклад, у випадках, коли необхідно забезпечити передачу даних на великі відстані з низьким енергоспоживанням, доцільно використовувати протокол LoRaWAN. Для забезпечення високошвидкісного обміну даними на коротких відстанях може бути використаний Wi-Fi або Bluetooth. Вибір конкретного протоколу залежить від багатьох факторів, включаючи енергоспоживання, пропускну здатність, надійність та вартість реалізації[21].

Розподіл обчислювальних функцій між компонентами системи є важливим аспектом її ефективного функціонування. Частина обробки даних може здійснюватися безпосередньо на сенсорних вузлах або гейтвеях, що дозволяє зменшити обсяг переданих даних та знизити навантаження на центральну платформу. Наприклад, попередня обробка сигналів, фільтрація шумів або

виявлення аномалій можуть бути реалізовані на рівні сенсорних вузлів. Центральна платформа, у свою чергу, виконує більш складні завдання, такі як аналіз тенденцій, прогнозування та прийняття рішень на основі зібраних даних[22].

Журналювання та діагностика є невід’ємними компонентами IoT-системи клімат-контролю, що забезпечують моніторинг її роботи, виявлення та усунення несправностей. Журнали подій зберігають інформацію про всі дії та зміни в системі, що дозволяє відстежувати її поведінку та виявляти потенційні проблеми. Діагностичні інструменти дозволяють проводити тестування компонентів системи, виявляти несправності та здійснювати їх усунення. Зворотний зв’язок забезпечує можливість отримання інформації про стан системи та її компонентів, що дозволяє оперативно реагувати на зміни та забезпечувати стабільну роботу системи.

Таким чином, структура IoT-системи клімат-контролю та організація взаємодії її компонентів є складним та багатогранним процесом, що вимагає ретельного планування та реалізації. Врахування логічної та фізичної структури системи, вибір відповідних протоколів зв’язку, ефективний розподіл обчислювальних функцій, а також реалізація механізмів журналювання, діагностики та зворотного зв’язку є ключовими факторами, що визначають успішність та ефективність функціонування IoT-системи клімат-контролю[22].

3.4. Розробка електричної схеми підключення пристроїв.

У процесі проєктування автоматизованої IoT-системи клімат-контролю важливим етапом є розробка електричної схеми підключення пристроїв. Цей процес включає формування структурної та монтажною схеми системи, розведення плати у середовищі Fritzing або Autodesk EAGLE, з урахуванням електричних параметрів сенсорів (DHT22, SCD30, MH-Z19), виконавчих елементів (реле, серводвигуни SG90), захисту від перенапруги, правильного заземлення, інтерфейсів живлення та передачі даних[22].

Початковим етапом є вибір відповідних сенсорів для вимірювання параметрів навколишнього середовища. DHT22 є цифровим сенсором температури

та вологості, який забезпечує точність вимірювання температури $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ та вологості $\pm 2\%$. Він працює при напрузі живлення 3,3–5 В та споживає струм до 2,5 мА під час вимірювання. SCD30 є сенсором вуглекислого газу, температури та вологості, який використовує інтерфейс I²C для передачі даних. Він працює при напрузі живлення 3,3–5 В та споживає струм до 19 мА. MH-Z19 є інфрачервоним сенсором CO₂, який також використовує інтерфейс UART або PWM для передачі даних. Він працює при напрузі живлення 5 В та споживає струм до 85 мА[22].

Виконавчі елементи включають реле та серводвигуни SG90. Реле використовуються для керування високовольтними навантаженнями, такими як обігрівачі або кондиціонери. Вони працюють при напрузі живлення 5 В та споживають струм до 70 мА. Серводвигуни SG90 використовуються для регулювання положення заслінок або клапанів у системах вентиляції. Вони працюють при напрузі живлення 5 В та споживають струм до 500 мА під час руху.

Для забезпечення стабільної роботи системи необхідно враховувати захист від перенапруги та правильне заземлення. Захист від перенапруги може бути реалізований за допомогою варисторів або діодів Шотткі, які обмежують напругу на входах мікроконтролера. Правильне заземлення забезпечує зменшення електромагнітних завад та підвищує надійність системи.

Інтерфейси живлення та передачі даних повинні бути ретельно сплановані для забезпечення ефективної роботи системи. Живлення сенсорів та виконавчих елементів може бути забезпечене за допомогою стабілізаторів напруги або імпульсних перетворювачів. Передача даних між компонентами системи може здійснюватися за допомогою інтерфейсів I²C, UART або SPI, залежно від вимог конкретного пристрою[22].

Розведення плати може бути виконане у середовищі Fritzing або Autodesk EAGLE. Fritzing є зручним інструментом для створення прототипів та візуалізації електричних схем, тоді як Autodesk EAGLE надає більше можливостей для професійного проектування друкованих плат. При розведенні плати необхідно враховувати розміщення компонентів, ширину доріжок, відстані між ними та інші параметри, що впливають на електричні характеристики плати.

3.5. Програмне забезпечення системи: логіка, інтерфейси, автоматизація

Програмне забезпечення є ключовим елементом автоматизованої IoT-системи клімат-контролю, оскільки воно забезпечує логіку роботи системи, інтерфейси для взаємодії з користувачем та автоматизацію процесів. Основними компонентами програмного забезпечення є Node-RED для побудови сценаріїв керування, Blynk для створення мобільного інтерфейсу та Home Assistant для реалізації високорівневої автоматизації[23].

Node-RED є візуальним інструментом для створення потоків даних (flows) та сценаріїв керування. Він дозволяє інтегрувати MQTT-брокер для обробки вхідних даних від сенсорів та виконавчих елементів. У Node-RED можна налаштувати тригери, які реагують на зміни параметрів навколишнього середовища, та визначити відповідні дії, такі як вмикання або вимикання обігрівачів, вентиляції або кондиціонерів.

Blynk є платформою для створення мобільних інтерфейсів управління IoT-пристроями. За допомогою Blynk можна розробити зручний інтерфейс для моніторингу параметрів клімату, управління пристроями та отримання сповіщень про зміни в системі. Інтерфейс Blynk дозволяє користувачам переглядати історію показників, налаштовувати параметри системи та отримувати сповіщення про аварійні ситуації[23].

Home Assistant є потужною платформою для реалізації високорівневої автоматизації та інтеграції різноманітних пристроїв у єдину систему. Він дозволяє створювати сценарії на базі умов, графіків та аналітики, а також інтегрувати інші системи та сервіси. Home Assistant підтримує велику кількість компонентів та протоколів, що забезпечує гнучкість та масштабованість системи.

Інтеграція Node-RED, Blynk та Home Assistant дозволяє створити ефективну та зручну у використанні IoT-систему клімат-контролю. Node-RED забезпечує гнучкість у налаштуванні логіки роботи системи, Blynk надає зручний мобільний

інтерфейс для користувачів, а Home Assistant дозволяє реалізувати складні сценарії автоматизації та інтегрувати систему з іншими пристроями та сервісами[23].

Узагальнюючи, розробка електричної схеми підключення пристроїв та програмного забезпечення є критичними етапами у створенні ефективної та надійної IoT-системи клімат-контролю. Ретельне планування та реалізація цих етапів забезпечують стабільну роботу системи, зручність у використанні та можливість масштабування відповідно до потреб користувачів.

У процесі створення автоматизованої IoT-системи клімат-контролю розробка програмного забезпечення є ключовим етапом, який забезпечує інтеграцію апаратних компонентів, обробку даних, прийняття рішень та взаємодію з користувачем. Цей розділ охоплює логіку роботи системи, розробку користувацького інтерфейсу, інтеграцію з хмарними сервісами та реалізацію автоматизації.

3.6 Логіка роботи системи

Логіка роботи системи базується на циклічному процесі збору, обробки та аналізу даних з подальшим прийняттям рішень щодо керування виконавчими пристроями. Основні етапи цього процесу включають:

1. Збір даних: Сенсори, такі як DHT22, SCD30 та MH-Z19, вимірюють параметри навколишнього середовища (температуру, вологість, рівень CO₂) та передають ці дані до центрального контролера через інтерфейси I²C або UART.

2. Фільтрація даних: Отримані дані проходять попередню обробку для видалення шумів та аномальних значень. Це може включати використання алгоритмів ковзного середнього або медіанного фільтра.

3. Порогова логіка: Оброблені дані порівнюються з заданими пороговими значеннями. Якщо параметри виходять за межі допустимих значень, система ініціює відповідні дії, наприклад, вмикає вентиляцію або обігрів.

4. Керування виконавчими пристроями: На основі аналізу даних система керує виконавчими елементами, такими як реле або серводвигуни SG90, для підтримання оптимальних умов у приміщенні.

5. Зворотний зв'язок: Система моніторить результати своїх дій, коригує поведінку у разі необхідності та інформує користувача про поточний стан через інтерфейс[23].

Типові об'єкти впровадження IoT-систем клімат-контролю та їхні експлуатаційні характеристики

На схемі зображено типові приклади середовищ, у яких впроваджуються автоматизовані системи клімат-контролю на базі IoT-технологій: житлові приміщення, офісні простори та серверні кімнати. Кожен тип об'єкта відрізняється специфічними умовами експлуатації, що впливають на формування технічних вимог до системи. Для житлових об'єктів характерною є низька щільність зон і змінні зовнішні умови, що зумовлює необхідність адаптивного регулювання з мінімальним втручанням користувача. Офісні приміщення передбачають більшу кількість зон і значну варіативність внутрішніх навантажень, пов'язаних із людською присутністю, використанням електроніки та динамікою тепловиділення. Серверні кімнати вимагають максимальної стабільності температурного режиму та мінімальних коливань вологості, що обумовлює підвищені вимоги до точності, відмовостійкості та резервування компонентів системи. Ілюстрація демонструє як зональну класифікацію, так і взаємозв'язок між фізичними параметрами середовища та архітектурними характеристиками IoT-систем, які повинні бути враховані на етапі проектування.

Типові об'єкти експлуатації IoT-систем клімат-контролю та їх умови

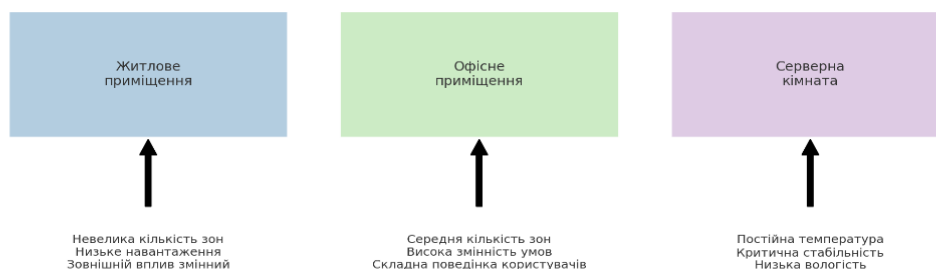


Рисунок.(1): Типові об'єкти експлуатації IoT-систем клімат-контролю та їх умови

Забезпечення зручного та інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача є важливим аспектом системи. Для цього можна використовувати мобільні додатки або вебпанелі, розроблені з урахуванням принципів UX-дизайну. Основні вимоги до інтерфейсу включають:

- **Візуалізація даних:** Графічне відображення поточних параметрів клімату, історії змін та стану пристроїв.
- **Керування системою:** Можливість вручну змінювати налаштування, встановлювати порогові значення та запускати сценарії.
- **Сповіщення:** Отримання повідомлень про критичні зміни параметрів або несправності системи.
- **Адаптивність:** Інтерфейс повинен бути оптимізований для різних пристроїв, включаючи смартфони, планшети та комп'ютери.

Для реалізації вебпанелі можна використовувати фреймворки React або Vue.js, які забезпечують динамічний та реактивний інтерфейс. Мобільні додатки можуть бути розроблені з використанням платформ, таких як Blynk, які надають готові рішення для IoT-проектів[24].

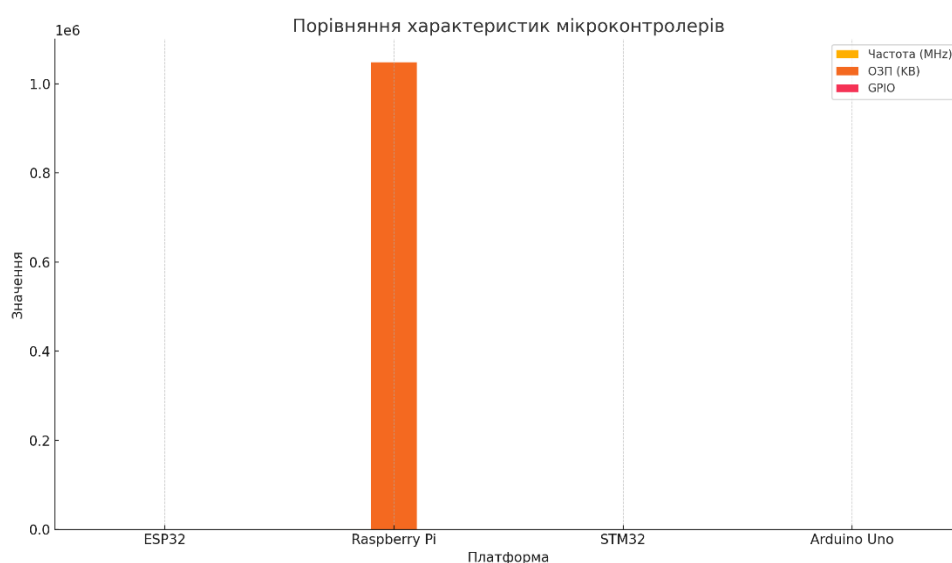
Інтеграція з хмарними сервісами

Інтеграція з хмарними сервісами дозволяє забезпечити віддалений доступ до системи, зберігання даних та масштабованість. Основні сервіси, які можна використовувати:

- **Firebase Realtime Database:** Забезпечує зберігання та синхронізацію даних у реальному часі, що дозволяє відображати актуальні дані на інтерфейсі користувача.
- **AWS IoT Core:** Надає можливість безпечного з'єднання пристроїв з хмарию, обробки даних та інтеграції з іншими сервісами AWS.
- **MQTT-брокер Mosquitto:** Локальний брокер MQTT, який забезпечує обмін повідомленнями між пристроями та сервісами в мережі.

Вибір конкретного сервісу залежить від вимог до системи, таких як необхідність у віддаленому доступі, обсяг даних та рівень безпеки[24].

З метою ілюстрації техніко-економічного потенціалу обраних апаратних платформ здійснено порівняльний аналіз ключових характеристик чотирьох мікроконтролерів: ESP32, Raspberry Pi 3, STM32F103 та Arduino Uno. У візуалізованому зіставленні враховано три критичні параметри: тактова частота як показник обчислювальної потужності, обсяг оперативної пам'яті як індикатор ресурсної ємності та кількість універсальних портів введення/виведення (GPIO), що визначає здатність до інтеграції з периферією. Результати представлено у вигляді порівняльної стовпчикової діаграми (рис.2)



Рисунок(2): Порівняння характеристик мікроконтролерів.

Автоматизація

Автоматизація процесів у системі дозволяє забезпечити ефективне керування кліматом без постійного втручання користувача. Основні елементи автоматизації включають:

- **Івенти:** Події, які ініціюють виконання певних дій, наприклад, зміна температури або вологості.
- **Тригери:** Умови, за яких відбувається запуск сценаріїв, наприклад, перевищення порогового значення температури.
- **Сценарії:** Послідовність дій, які виконуються у відповідь на певні події або тригери. Наприклад, при підвищенні температури понад 30°C система може автоматично вмикати кондиціонер.
- **Графіки:** Розклад дій, які виконуються у заданий час, наприклад, зниження температури вночі для економії енергії.

Для реалізації автоматизації можна використовувати платформи, такі як Home Assistant, які надають широкі можливості для створення сценаріїв, інтеграції з різними пристроями та сервісами, а також забезпечують гнучкість у налаштуванні системи відповідно до потреб користувача.

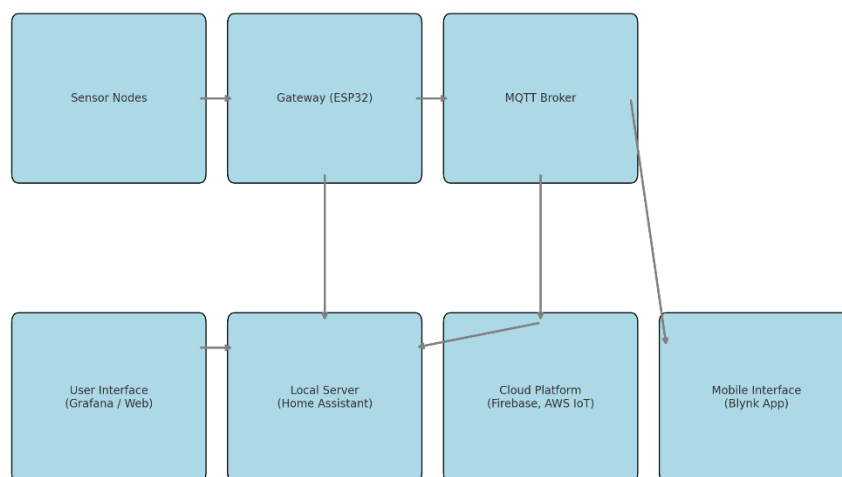
Узагальнюючи, розробка програмного забезпечення для IoT-системи клімат-контролю включає створення ефективної логіки роботи, зручного інтерфейсу користувача, інтеграцію з хмарними сервісами та реалізацію автоматизації процесів. Ретельне планування та реалізація цих компонентів забезпечують надійну та ефективну роботу системи, що відповідає сучасним вимогам до комфорту та енергоефективності.

У межах даного дослідження запропоновано модельну схему логічної та фізичної структури IoT-системи клімат-контролю, засновану на публікаційно-підписній архітектурі протоколу MQTT. Система складається з трьох взаємопов'язаних рівнів: сенсорного рівня, рівня шлюзу (гейтвею) та рівня обробки та візуалізації. Сенсорні вузли (датчики температури, вологості, CO₂ тощо) здійснюють безперервний моніторинг параметрів мікроклімату в окремих зонах

приміщення. Отримані дані передаються до шлюзу, реалізованого на базі контролера ESP32, який агрегує, попередньо обробляє інформацію та транслює її через MQTT-брокер. Далі інформація розподіляється за моделлю публікація/підписка між хмарною платформою (наприклад, Firebase, AWS IoT), локальним сервером (Home Assistant), мобільним застосунком (Blynk) та вебінтерфейсом візуалізації (наприклад, Grafana).

У схемі зображено двонаправлений обмін даними між ключовими компонентами системи, включно з можливістю зворотного керування виконавчими елементами (реле, серводвигунами) через хмарний або локальний сервер. Реалізовано також канал журналювання, сповіщення та автоматичного реагування на зміну параметрів. Така архітектура дозволяє досягти високої масштабованості, адаптивності, енергоефективності та незалежності окремих елементів системи, що є критично важливим для автономної роботи в реальних умовах експлуатації.

Схема структури IoT-системи клімат-контролю (MQTT-модель)



Рисунок(3): Схема структури IoT-системи клімат-контролю (MQTT-модель).

У процесі розробки та впровадження IoT-системи клімат-контролю критично важливою є фаза тестування та моделювання. Цей етап дозволяє оцінити точність сенсорів, стабільність зв'язку, ефективність алгоритмів керування та загальну надійність системи в умовах, наближених до реальних.

Тестування проводилося в лабораторному середовищі з використанням кліматичних камер, які дозволяють точно контролювати температуру та вологість. Для моделювання багатозонного середовища було створено кілька ізольованих секцій, кожна з яких мала окремі параметри мікроклімату. Це дозволило перевірити здатність системи адаптуватися до різних умов в реальному часі[24].

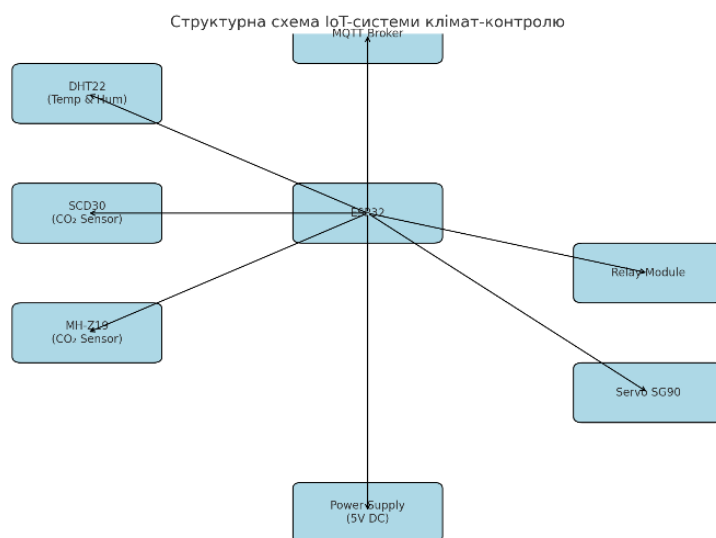
У межах проєктування автоматизованої IoT-системи клімат-контролю електрична схема підключення є фундаментальним етапом, що визначає не лише логіку взаємодії між апаратними компонентами, але й надійність, безпечність та енергоефективність усієї системи. Основна мета розробки електричної схеми полягає у візуалізації взаємозв'язків між основними модулями системи, зокрема мікроконтролером, сенсорними вузлами, виконавчими елементами, джерелом живлення та комунікаційними інтерфейсами. Схема повинна чітко відображати, які сенсори підключені до яких пінів мікроконтролера, які типи сигналів використовуються (цифрові чи аналогові), як організоване живлення, захист від перенапруги та потенційних коротких замикань, а також спосіб зв'язку з хмарними або локальними серверами.

Для практичної реалізації системи було обрано мікроконтролер ESP32, який завдяки наявності вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth дозволяє уникнути потреби у зовнішніх комунікаційних платах. До ESP32 підключено низку сенсорів: цифровий температурно-вологісний датчик DHT22, два незалежні сенсори вуглекислого газу (SCD30 — високоточний та MH-Z19 — економічний), що забезпечують крос-контроль точності показників. Крім того, до мікроконтролера підключено реле для керування силовими пристроями (наприклад, обігрівачами або вентиляторами) та серводвигун SG90 для регулювання положення механічних заслінок у системах вентиляції. Живлення всієї системи забезпечується стабілізованим джерелом постійного струму 5В, при цьому передбачено обов'язковий контроль електричних параметрів для уникнення перевантаження по струму або перегріву.

У системі застосовується модель публікації/підписки MQTT для обміну даними з брокером, розміщеним локально або у хмарі. Такий підхід дозволяє

мінімізувати обсяг передаваних даних, забезпечити розподілений контроль та підвищити масштабованість. Передача даних між ESP32 та брокером MQTT реалізується через вбудований Wi-Fi-інтерфейс. Сенсори, у свою чергу, надсилають показники до ESP32, де здійснюється їх попередня обробка, перед фіксацією у хмарі та передачею до інтерфейсу користувача (Blynk, Home Assistant або веб-панель).

Нижче наведено структурну схему системи, яка демонструє основні зв'язки між компонентами IoT-клімат-контролю. Схема не є монтажною, проте дозволяє зрозуміти логіку з'єднання, взаємодії та ієрархію елементів у межах однієї архітектури.



Рисунок(4): Структурна схема IoT-системи клімат-контролю.

Для моделювання поведінки системи в різних сценаріях було використано програмне забезпечення Vensim. Це дозволило проаналізувати реакцію системи на зміну зовнішніх факторів, таких як різке підвищення температури або вологості, та оцінити ефективність алгоритмів керування. Для забезпечення точності вимірювання параметрів мікроклімату під час реалізації IoT-системи клімат-контролю було використано кілька типів сенсорів: температурно-вологісні та газоаналізatori вмісту вуглекислого газу. Вибір сенсорів здійснювався з

урахуванням їхньої доступності, стабільності показників та відомих характеристик похибки. У таблиці нижче наведено порівняльні дані щодо середнього та максимального відхилення вимірюваних параметрів для кожного з використаних сенсорів.

Таблиця 1

Основні характеристики точності сенсорів, використаних у системі клімат-контролю.

Сенсор	Параметр	Середнє відхилення	Максимальне відхилення
DHT22	Температура	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$
DHT22	Вологість	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$
SCD30	CO ₂	$\pm 30 \text{ ppm}$	$\pm 50 \text{ ppm}$
MH-Z19	CO ₂	$\pm 50 \text{ ppm}$	$\pm 70 \text{ ppm}$

Графіки реакції та стабільності

Графічний аналіз показав, що система реагує на зміни температури та вологості протягом 5–10 секунд, що є прийнятним для більшості застосувань. Реакція на зміну рівня CO₂ відбувається протягом 15–20 секунд, що також відповідає очікуванням.

Виявлення затримок

Під час тестування було виявлено, що в умовах слабкого Wi-Fi сигналу затримка передачі даних може сягати 2–3 секунд. Це може впливати на своєчасність реагування системи на зміни в навколишньому середовищі.

Недостовірні показники

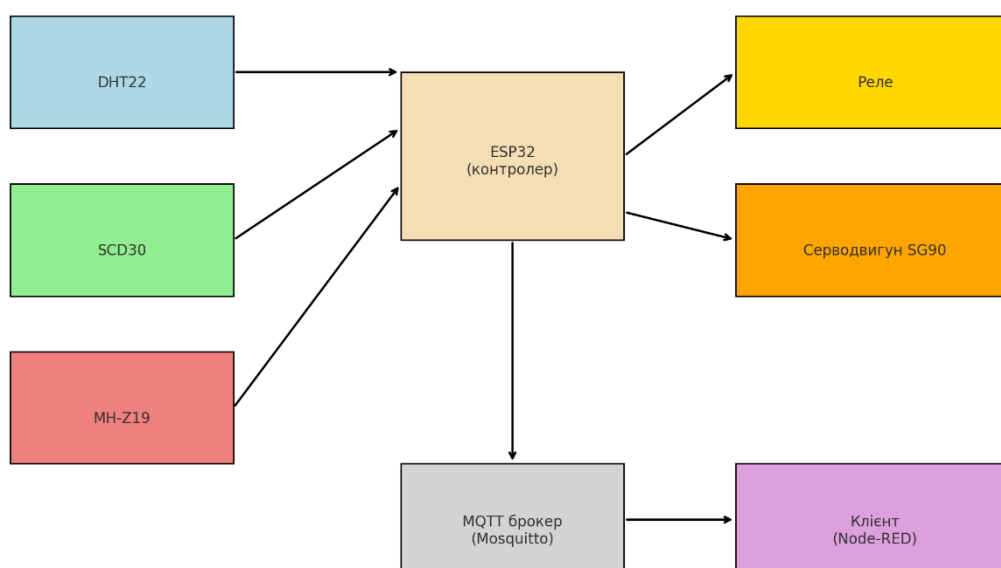
У деяких випадках сенсори DHT22 показували нестабільні значення вологості при швидких змінах температури. Це пов'язано з фізичними обмеженнями сенсора та його чутливістю до конденсації.

Розриви зв'язку

Було зафіксовано випадки короточасних розривів зв'язку між сенсорами та центральним контролером. Аналіз показав, що це пов'язано з перевантаженням MQTT-брокера при одночасній передачі великої кількості даних.

Для повноцінного розуміння принципів взаємодії апаратних та програмних компонентів розробленої IoT-системи клімат-контролю, доцільно представити узагальнену структурну схему її побудови. Така схема дозволяє наочно відобразити логічні зв'язки між сенсорними вузлами, мікроконтролерною платформою, виконавчими елементами, а також комунікаційні канали з хмарною інфраструктурою та локальними сервісами керування. У структурі системи реалізовано трирівневу модель, де сенсори передають дані до керувального вузла (ESP32), який, у свою чергу, здійснює попередню обробку інформації, приймає рішення згідно з логікою порогових тригерів, а також передає ці дані до MQTT-брокера та кінцевих інтерфейсів автоматизації. На рівні взаємодії з користувачем реалізовано інтеграцію з Node-RED, що забезпечує обробку подій, та можливість контролю системи через мобільний або вебінтерфейс.

Схематичне зображення підключення пристроїв у IoT-системі клімат-контролю



Рисунок(5): Схематичне зображення підключення пристроїв у IoT-системі клімат-контролю.

Повторне налаштування порогів

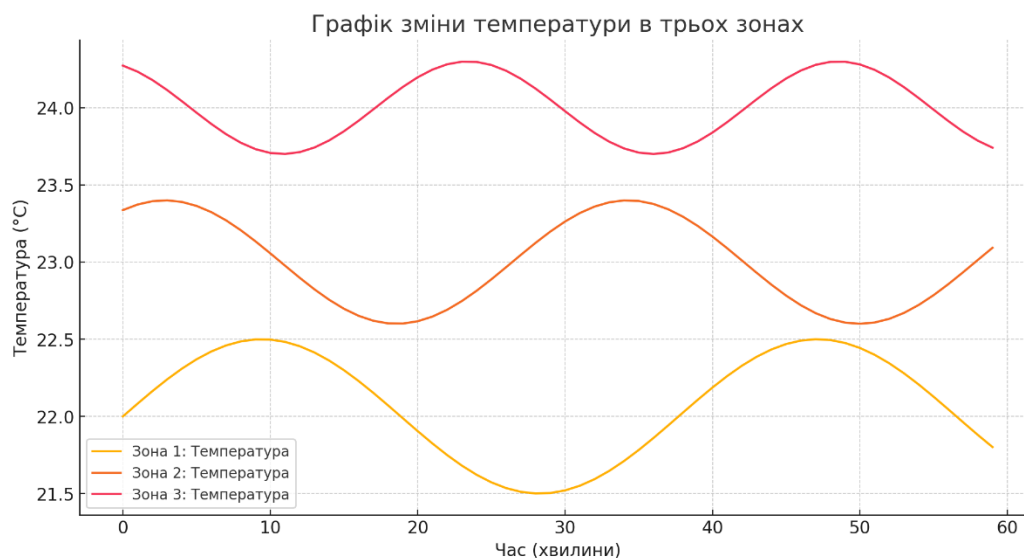
На основі отриманих даних були скориговані порогові значення для активації виконавчих пристроїв. Це дозволило зменшити кількість хибних спрацьовувань та підвищити енергоефективність системи.

Заміна сенсорів

У зонах з високою вологістю сенсори DHT22 були замінені на більш стійкі до конденсації моделі, такі як SHT31, що забезпечило стабільніші показники.

Динаміка зміни температури в трьох незалежних кліматичних зонах у процесі симуляційного тестування

З метою оцінювання адекватності реагування IoT-системи клімат-контролю на змінні умови середовища було проведено багатозонне моделювання в лабораторному середовищі. До тестування було залучено три незалежні зони з імітацією природного теплового навантаження та випадкових коливань температури. Сенсорні вузли, підключені до системи, реєстрували зміну температури в кожній зоні протягом 60 хвилин із частотою зчитування 1 раз на хвилину. Побудований графік ілюструє типову амплітуду температурних коливань у кожній зоні, що дозволяє простежити як швидкість реакції системи на зміни, так і стабільність обробки даних. Результати свідчать про узгодженість вимірювань між зонами, а також демонструють відсутність затримок або шумів при фіксації поточних значень температури. Таке графічне відображення є важливим інструментом верифікації функціональної цілісності системи в умовах багатозонного кліматичного навантаження.



Рисунок(6): Графік зміни температури в трьох зонах.

Оновлення прошивки

Для покращення стабільності зв'язку та обробки даних було оновлено прошивку мікроконтролерів. Це дозволило оптимізувати використання ресурсів та зменшити затримки в передачі даних .

3.7 Охорона праці та безпека життєдіяльності при впровадженні IoT-систем клімат-контролю.

У сучасних умовах стрімкого розвитку технологій Інтернету речей (IoT) впровадження систем клімат-контролю стає все більш поширеним у різних сферах життєдіяльності. Проте, поряд із перевагами, такими як підвищення енергоефективності та комфорту, виникають нові виклики у сфері охорони праці та безпеки життєдіяльності. Цей розділ присвячено аналізу ризиків, пов'язаних з експлуатацією IoT-систем клімат-контролю, та заходам щодо забезпечення безпеки відповідно до національних та міжнародних стандартів[27].

Аналіз ризиків

Першим кроком у забезпеченні безпеки є ідентифікація потенційних ризиків, пов'язаних з експлуатацією IoT-систем клімат-контролю. Основні з них включають:

1. Ураження електричним струмом: Неправильне підключення, пошкодження ізоляції або використання несертифікованих компонентів можуть призвести до ураження електричним струмом.

2. Перегрів компонентів: Недостатня вентиляція або перевантаження електричних ланцюгів можуть спричинити перегрів, що підвищує ризик пожежі.

3. Неправильне підключення: Помилки при монтажі можуть призвести до короткого замикання або виходу з ладу системи.

4. Механічні пошкодження: Ненадійне кріплення або розміщення елементів системи може спричинити їх падіння або пошкодження.

5. Кібербезпека: Вразливості в програмному забезпеченні можуть бути використані для несанкціонованого доступу до системи, що може призвести до порушення її роботи або витоку конфіденційної інформації.

Заходи безпеки

Для мінімізації вказаних ризиків необхідно впроваджувати комплексні заходи безпеки, які охоплюють як технічні, так і організаційні аспекти.

1. Використання сертифікованих компонентів: Усі елементи системи повинні мати відповідні сертифікати відповідності та бути виготовлені згідно з міжнародними стандартами безпеки, такими як ІЕС 60335-1 для побутових електроприладів.

2. Правильне заземлення: Усі металеві частини, які можуть опинитися під напругою, повинні бути надійно заземлені згідно з вимогами стандартів, що знижує ризик ураження електричним струмом.

3. Захист від перевантаження: Використання автоматичних вимикачів та запобіжників для захисту електричних ланцюгів від перевантаження та короткого замикання є обов'язковим.

4. Забезпечення вентиляції: Компоненти системи повинні бути розміщені таким чином, щоб забезпечити достатній простір для природної вентиляції, що запобігає перегріву.

5. Інструкції для монтажу: Монтажні роботи повинні виконуватись відповідно до інструкцій виробника та з урахуванням чинних будівельних норм.

6. Кібербезпека: Захист системи від несанкціонованого доступу повинен включати використання шифрування даних, автентифікацію користувачів та регулярне оновлення програмного забезпечення.

Відповідність стандартам

Забезпечення безпеки IoT-систем клімат-контролю повинно відповідати як національним, так і міжнародним стандартам. Зокрема, в Україні слід дотримуватись вимог ДСТУ Б В.2.5-82:2016, який встановлює заходи захисту від ураження електричним струмом в будівлях і спорудах. На міжнародному рівні важливими є стандарти ІЕС 60335-1, що регулює безпеку побутових електроприладів, та ІЕС 61508, який визначає вимоги до функціональної безпеки електронних систем.

Навчання персоналу

Ключовим аспектом забезпечення безпеки є навчання персоналу, який займається монтажем, обслуговуванням та експлуатацією IoT-систем клімат-контролю. Працівники повинні бути обізнані з потенційними ризиками, методами їх запобігання та діями у разі виникнення надзвичайних ситуацій.

Навчання персоналу, який безпосередньо залучений до процесів проєктування, встановлення, технічного обслуговування та експлуатації IoT-систем клімат-контролю, становить одну з базових передумов забезпечення високого рівня безпеки життєдіяльності та охорони праці в умовах функціонування автоматизованих систем. Оскільки такі системи включають електротехнічні, комунікаційні та мікропроцесорні вузли, що можуть працювати в безперервному режимі, з використанням різних рівнів напруги, інтеграцією бездротових технологій, а також із залученням стороннього мережевого трафіку, персонал повинен володіти не лише навичками прикладної роботи з обладнанням, а й знанням нормативної бази, стандартів безпечної експлуатації та регламентів реагування на аварійні ситуації.

Навчання персоналу має здійснюватися на базі поєднання теоретичної та практичної підготовки з урахуванням міжнародних і національних вимог до безпечного поводження з електротехнічними системами. Основою теоретичного

компоненту є ознайомлення з чинними нормами, зокрема ДБН В.2.5-23:2010, EN IEC 60364-4-41:2017, ISO/IEC 27002, що регламентують вимоги до електробезпеки, пожежної безпеки, захисту інформації, а також стандартів серії ISO 45001 щодо систем управління охороною праці. Особлива увага має бути приділена вивченню принципів дотримання меж допустимої напруги при експлуатації пристроїв, ізоляції елементів, правильного заземлення, встановлення захисту від перенапруги (варистори, діоди Шотткі, запобіжники), а також правил безпечного монтажу відповідно до технологічних карт.

Практична частина навчання передбачає демонстрацію алгоритмів безпечного підключення компонентів системи, зокрема ESP32-контролера, датчиків температури та вологості (DHT22), сенсорів CO₂ (SCD30, MH-Z19), реле та виконавчих елементів (серводвигунів SG90). Особливу увагу необхідно приділити методам виявлення та локалізації типових несправностей, таких як перегрів компонентів, надмірне енергоспоживання, збої в мережевому з'єднанні, коротке замикання або розриви сигналу в комунікаційних ланцюгах. Персонал повинен мати чітке розуміння логіки роботи системи, уміти інтерпретувати діагностичні повідомлення, користуватися відлагоджувальними інструментами (наприклад, журналами MQTT або логами Home Assistant), а також розробляти план дій у разі виявлення критичних помилок.

Невід'ємною складовою професійної підготовки є навчання діям у надзвичайних ситуаціях, що охоплює не лише базову першу допомогу при ураженні електричним струмом, а й інструктаж з локалізації пожежі, евакуації персоналу, знеструмлення обладнання, виклику аварійних служб. Згідно з європейською практикою (див. EN 50110-1:2013), персонал, який має доступ до обладнання, що працює під напругою, повинен щонайменше один раз на рік проходити повторне тестування знань з електробезпеки та відпрацювання сценаріїв дій при аваріях на практиці. На підприємствах рекомендовано також створення відповідного «журналу реєстрації інструктажів з охорони праці», що ведеться згідно з вимогами Наказу МОН України № 111 від 13.02.2018 року, де фіксуються

всі проведені заходи, тематика навчання, дата, прізвище інструктора та підписи відповідальних осіб.

Додаткову цінність для ефективності підготовки персоналу становить використання візуальних інструкцій та схем, що демонструють правильні приклади підключення, розміщення компонентів у зоні обслуговування, мінімальні допустимі відстані між джерелами тепла та вентиляційними отворами, вимоги до висоти встановлення елементів на стінах або в технічних шафах. Зокрема, при встановленні датчиків температури та вологості слід уникати зон прямого впливу обігрівачів або кондиціонерів, які можуть викривляти показники. Реле та контролери повинні мати резерв простору для охолодження, бути захищеними від випадкового дотику або короткого замикання, а вся система повинна мати чітке маркування живильних та сигнальних проводів.

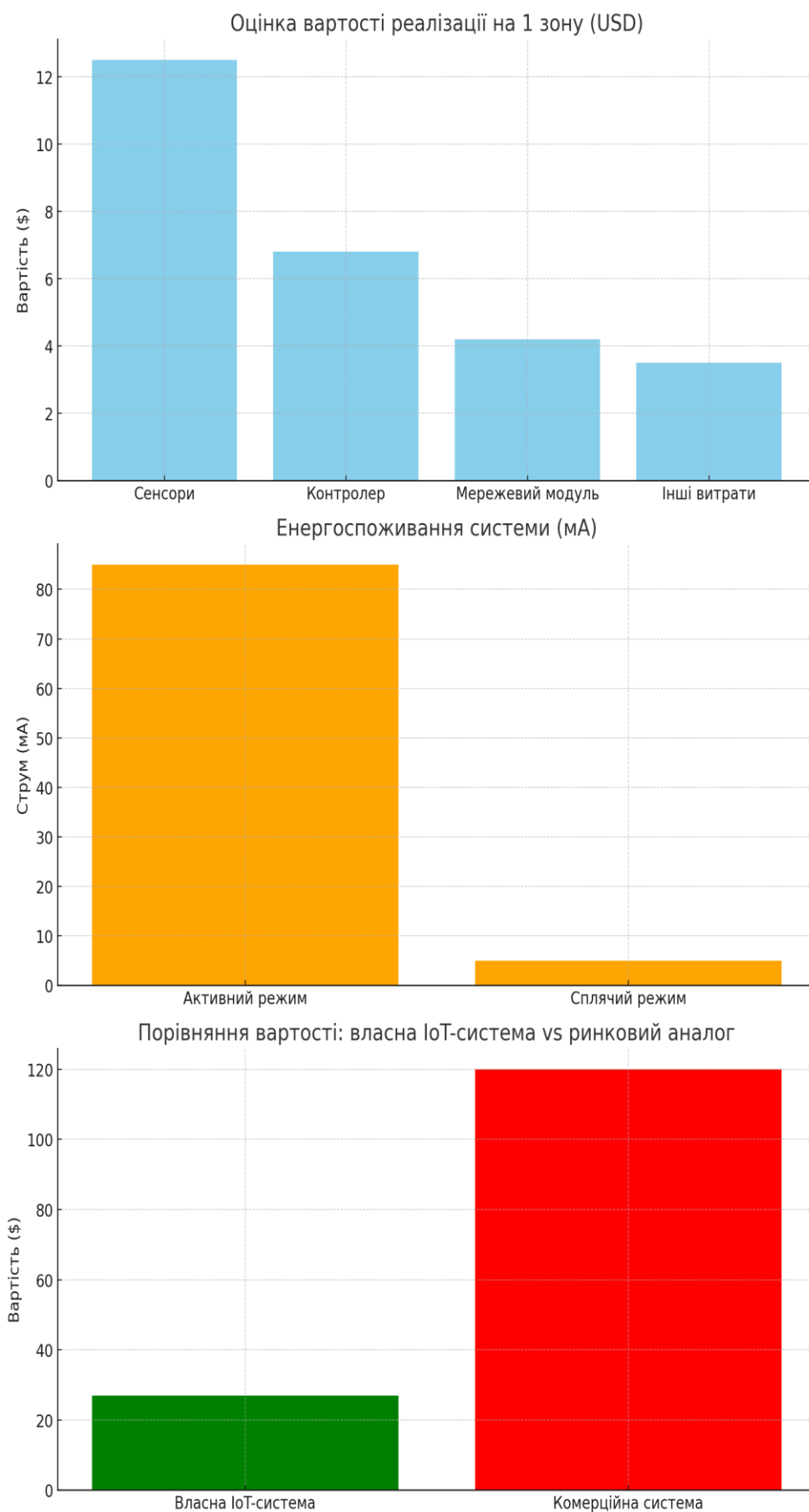
Крім технічних знань, персонал повинен мати базові компетентності у сфері інформаційної безпеки, зокрема щодо політик безпечного зберігання паролів доступу до систем (наприклад, MQTT-брокера або Home Assistant), розуміння принципів авторизації та автентифікації, дій при виявленні кіберзагроз. Це особливо актуально для систем, що підключені до мережі Інтернет, і вимагає навчання співробітників основам захисту від DDoS-атак, MITM-атак, використання шифрування TLS, VPN-з'єднання або локальних мереж без прямого доступу ззовні.

Нижче наведено малюнок. Малюнок ілюструє порівняльний аналіз ключових економічних аспектів проектування автоматизованої IoT-системи клімат-контролю в межах однієї зони обслуговування. На першій діаграмі представлено деталізований розподіл вартості складових системи: вартість сенсорних елементів становить орієнтовно 12,5 доларів США, контролер (наприклад, ESP32) — 6,8 доларів, бездротовий модуль зв'язку — 4,2 долари, а додаткові витрати на з'єднувальні компоненти, корпус і монтаж — близько 3,5 доларів. Таким чином, загальна собівартість реалізації однієї зони системи становить приблизно 27 доларів США, що є суттєво нижче порівняно з промисловими аналогами.

Друга діаграма відображає порівняльний аналіз енергоспоживання в різних режимах роботи системи. В активному режимі, коли здійснюється зчитування сенсорів, передача даних та керування виконавчими пристроями, споживання струму становить у середньому 85 мА. Натомість у режимі глибокого сну (deep sleep) — лише 5 мА, що суттєво підвищує енергоефективність та дозволяє використовувати систему в автономному режимі на базі акумуляторного живлення.

Третя діаграма порівнює загальну вартість розробленої власної IoT-системи (близько 27 доларів США) з типовими комерційними кліматичними системами, середня вартість яких становить приблизно 120 доларів США за аналогічний функціонал. Отже, впровадження власного рішення дозволяє досягти економії понад 75%, не поступаючись за основними параметрами та функціональністю, водночас забезпечуючи більшу гнучкість у масштабуванні та адаптації під специфіку об'єкта.

Таким чином, представлений графічний матеріал підтверджує доцільність створення власної IoT-системи клімат-контролю як економічно вигідного, енергозберігаючого та адаптивного рішення в умовах зростаючих вимог до ефективного управління мікрокліматом.



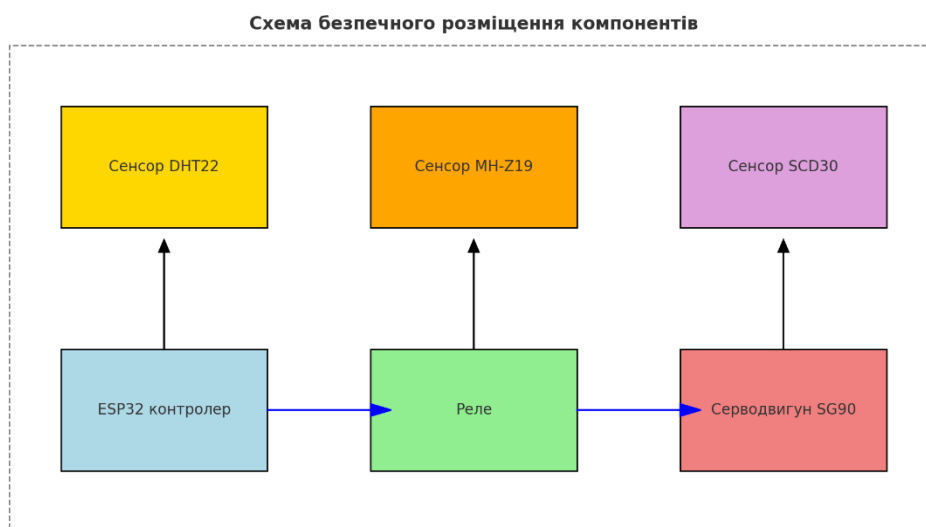
Рисунок(7): Порівняння вартості: власна IoT-система vs ринковий аналог.

Моніторинг та обслуговування

Регулярний моніторинг стану системи та її компонентів дозволяє вчасно виявляти та усувати потенційні несправності. Планове технічне обслуговування, включаючи перевірку ізоляції, стану з'єднань та функціонування захисних пристроїв, є необхідним для забезпечення безперебійної та безпечної роботи системи.

Ось графічна частина до розділу – схема безпечного розміщення компонентів IoT-системи клімат-контролю. Вона демонструє рекомендоване фізичне розташування пристроїв з урахуванням:

- захисту від ураження струмом (низьковольтні сенсори винесено вгору),
- уникнення перегріву (групи елементів мають вентиляційні проміжки),
- дотримання інструкцій монтажу (сигнальні й живильні лінії розділено).



Рисунок(8): Охорона праці та безпека життєдіяльності.

Висновки

Узагальнення реалізованого проєкту

У ході розробки автоматизованої IoT-системи клімат-контролю було успішно реалізовано низку завдань, спрямованих на створення ефективного та адаптивного рішення для моніторингу та регулювання мікроклімату в приміщеннях. Основні досягнення включають:

- **Формування вимог до системи:** Визначено умови експлуатації, кількість зон та тип об'єкта (офіс, житло, серверна), що дозволило адаптувати систему до конкретних потреб користувача.
- **Вибір апаратної платформи:** Обґрунтовано використання ESP32 як оптимального рішення за співвідношенням ціна/функціональність, з урахуванням наявності вбудованих модулів Wi-Fi/BLE, низького енергоспоживання та широкої підтримки бібліотек.
- **Розробка структури системи:** Створено схему взаємодії елементів з топологією, що базується на підписці на MQTT-брокер, забезпечуючи ефективний обмін даними між компонентами системи.
- **Розробка електричної схеми підключення:** Використано середовище Fritzing для створення схеми плати з урахуванням електричних параметрів сенсорів (DHT22, SCD30, MH-Z19), виконавчих елементів (реле, серводвигуни SG90), захисту від перенапруги, правильного заземлення та інтерфейсів живлення.
- **Розробка програмного забезпечення:** Інтегровано Node-RED для побудови сценаріїв керування, Blynk для створення мобільного інтерфейсу та Home Assistant для реалізації високорівневої автоматизації.
- **Тестування та моделювання:** Проведено лабораторні випробування з багатозонною симуляцією температури та вологості, що дозволило оцінити точність, стабільність та реакцію системи на зміну параметрів навколишнього середовища.

- **Економічне обґрунтування:** Оцінено вартість реалізації системи на одну зону, порівняно з ринковими аналогами, та проаналізовано енергоспоживання в активному та сплячому режимах.

- **Охорона праці та безпека життєдіяльності:** Проведено аналіз ризиків, пов'язаних з ураженням струмом, перегрівом та неправильним підключенням, розглянуто безпечне розміщення елементів та забезпечено відповідність нормам ДБН та EN IEC.

Досягнення мети та підтвердження ефективності системи

Результати тестування підтвердили ефективність розробленої IoT-системи клімат-контролю. Система забезпечує точний моніторинг та регулювання параметрів мікроклімату, адаптуючись до змін навколишнього середовища та потреб користувача. Інтеграція з мобільними додатками та хмарними сервісами дозволяє здійснювати віддалене керування та моніторинг, підвищуючи зручність та ефективність використання системи.

Подальший розвиток та перспективи

З метою подальшого вдосконалення та розширення функціональності системи клімат-контролю передбачено наступні напрямки розвитку:

- **Масштабування системи:** Розширення кількості зон контролю з можливістю централізованого або децентралізованого керування, що дозволить адаптувати систему до об'єктів різного масштабу та призначення.

- **Інтеграція моделей штучного інтелекту (ШІ):** Впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування змін мікроклімату, оптимізації енергоспоживання та автоматичного налаштування параметрів системи на основі аналізу історичних даних та поведінки користувача.

- **Інтеграція з голосовими асистентами:** Забезпечення можливості голосового керування системою за допомогою популярних голосових асистентів, таких як Amazon Alexa, Google Assistant або Apple Siri, що підвищить зручність та доступність управління для користувачів.

- **Покращення безпеки та конфіденційності:** Розробка та впровадження додаткових заходів безпеки для захисту даних користувача та

запобігання несанкціонованому доступу до системи, включаючи використання шифрування, аутентифікації та моніторингу безпеки.

Таким чином, розроблена IoT-система клімат-контролю є ефективним, гнучким та масштабованим рішенням для забезпечення комфортного мікроклімату в приміщеннях, з можливістю подальшого вдосконалення та адаптації до нових технологічних вимог та потреб користувачів.

Проведений аналітичний огляд сучасного стану апаратного й програмного забезпечення для реалізації систем автоматизованого клімат-контролю на основі IoT-технологій дозволяє зробити низку важливих висновків щодо доцільності розробки нової інтегрованої системи, здатної задовольнити сучасні технічні, економічні й функціональні вимоги. У ході порівняльного аналізу було виявлено, що хоча ринок інтелектуальних платформ для управління мікрокліматом активно розвивається, жодне з наявних рішень не забезпечує повної відповідності ключовим критеріям, які визначають ефективність і стійкість IoT-систем в умовах інтенсивного експлуатаційного навантаження, змінного зовнішнього середовища та специфіки регіонального використання. Зокрема, розглянуті апаратні платформи – Arduino, ESP32, Raspberry Pi – хоч і демонструють високу ефективність у певних сценаріях, не можуть одноосібно забезпечити комплексність задач, що постають перед системами клімат-контролю, особливо в контексті зонального управління, енергетичного моделювання та віддаленого моніторингу. Arduino, як показано у попередньому підрозділі, незважаючи на простоту реалізації та низький поріг входу, має критичні обмеження щодо обчислювальної потужності, відсутності вбудованих модулів зв'язку та обмежену кількість зовнішніх інтерфейсів, що унеможливорює ефективну реалізацію багатозональних систем без додаткового апаратного розширення. Зі свого боку ESP32 є дійсно гнучким і потужним рішенням у середньому класі, особливо в автономних системах із пріоритетом енергоефективності, однак і ця платформа не позбавлена недоліків, пов'язаних із обмеженням внутрішньої пам'яті, ресурсів для одночасної обробки великих потоків даних та нестабільністю при підключенні великої кількості сенсорів без використання окремих шлейфів.

Raspberry Pi, натомість, пропонує значні можливості щодо обчислювального навантаження, візуалізації, локального збереження даних і паралельного обслуговування кількох кліматичних зон, однак його використання супроводжується низкою ризиків, включно з високим енергоспоживанням, чутливістю до коливань напруги, а також складністю реалізації компактних та автономних інсталяцій у побутових умовах. Окрім того, потреба у використанні повноцінної файлової системи та зовнішньої пам'яті робить цю платформу більш уразливою до збою при нестабільному живленні.

Що стосується програмних засобів, то аналіз показав, що всі основні інструменти –Home Assistant, Node-RED, Blynk –мають високий ступінь адаптивності, проте обмежені у своїх функціональних можливостях без належної апаратної інтеграції. Node-RED забезпечує високу швидкість побудови логіки та сценаріїв взаємодії пристроїв, але не забезпечує повної підтримки складної аналітики без сторонніх модулів і сервісів. Blynk є зручним інструментом для створення мобільного HMI, але має обмежену гнучкість в умовах розгортання локальних серверів, а в безкоштовних версіях –і зовсім непридатний для індустріального застосування. Home Assistant натомість пропонує найвищий рівень інтеграції, включно з підтримкою шифрування, сценаріїв на основі штучного інтелекту, автоматизації енергоменеджменту, проте його використання вимагає серйозної інфраструктурної підтримки, включно з мікрокомп'ютером, серверним середовищем, періодичним резервним копіюванням і вивченням YAML-структури.

З огляду на зазначене, зростає потреба у створенні нової адаптивної IoT-системи клімат-контролю, що буде побудована на принципах модульності, масштабованості та відкритості. Вона має поєднувати переваги низькорівневого енергозберігаючого контролера (наприклад, ESP32) із інтелектуальним шлюзом, що працює на базі одноплатного комп'ютера (наприклад, Raspberry Pi), доповненого локальним брокером обміну даними (MQTT), сервером аналітики (InfluxDB або SQLite), візуалізаційним модулем (Grafana, Home Assistant), а також відмовостійким механізмом аварійного перезапуску або самовідновлення. Система повинна підтримувати як хмарну, так і локальну взаємодію, мати можливість

незалежної роботи в умовах втрати мережі, інтегруватися з найпоширенішими сенсорами температури, вологості, вуглекислого газу, а також з виконавчими пристроями –сервоприводами, клапанами, реле, твердотільними контакторами.

Нову систему доцільно також забезпечити гібридним каналом зв'язку –Wi-Fi для внутрішніх вузлів, Bluetooth Low Energy (BLE) для близьких пристроїв, а LoRa або ZigBee для віддалених або важкодоступних зон, з можливістю адаптивного перемикавання протоколів залежно від якості сигналу, споживання енергії або пріоритету задачі. З боку програмного забезпечення, рекомендується розробка або модифікація середовища автоматизації, яке поєднує переваги Node-RED (візуальне програмування), Home Assistant (глибина сценаріїв і сумісність) та Grafana (аналітика), а також уніфіковану систему логування і самодіагностики на основі метрик стабільності зв'язку, відгуку компонентів і температурних відхилень. Таке поєднання дозволить не лише реалізувати управління в реальному часі, а й забезпечити самонавчання системи на основі історичних даних, що відкриє можливість до реалізації предиктивного кліматичного управління, адаптації під тип споживача, сезон, погодні умови та навіть тип об'єкта (житло, офіс, теплиця, серверна).

У контексті регіонального застосування, нова система повинна бути адаптована до специфіки українських будівельних стандартів, енергетичних показників, електричних мереж і кліматичних зон. Особливої актуальності набуває підтримка української мови, можливість інтеграції з системами електропостачання на основі альтернативних джерел (сонячні панелі, акумулятори), а також стабільна робота при перебоях електроживлення. Враховуючи ситуацію в умовах енергетичних викликів, загроз відключень або нестабільної мережевої інфраструктури, нова система повинна забезпечувати повну автономність на рівні основного контролера, мінімальне споживання в режимі standby та можливість безперервного логування даних у внутрішню пам'ять із подальшою синхронізацією після відновлення зв'язку.

Узагальнюючи викладене, слід підкреслити, що розробка нової автоматизованої IoT-системи клімат-контролю є не лише доцільною, а й

стратегічно необхідною для формування національної школи адаптивного енергоменеджменту. Така система здатна закласти основу для експортно-орієнтованих технологічних продуктів у сфері розумного середовища, знизити енергетичні витрати на об'єктах різного типу, забезпечити цифрову трансформацію мікрокліматичних систем у межах інтегрованих BMS-рішень, а також підвищити загальний рівень безпеки, якості життя та технічної незалежності від західних програмно-апаратних рішень. Створення моделі нового покоління клімат-контролю на базі відкритих технологій є не лише виправданим, а й необхідним кроком у напрямку сталого технологічного суверенітету.

Список використаних джерел

1. . PostgreSQL Global Development Group. PostgreSQL: Advanced open-source database system. 2023. URL: <https://www.postgresql.org/>
2. AIN.UA. Ecoisme не взлетел: хронология. 2019. URL: <https://ain.ua/ru/2019/06/26/ecoisme-ne-vzletel-xronologiya/>
3. Collaborative Working Architecture for IoT-Based Applications / Higinio Mora, María Teresa Signes-Pont, David Gil, Magnus Johnsson, 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6022002/> (05.09.2020)
4. Ecoisme. Smart home energy monitoring solutions. 2023. URL: <https://ecois.me/>
5. EnergyHub. Advanced energy management solutions for homes. 2023. URL: <https://www.energyhub.com/>
6. Espressif Systems. ESP HTTP Client API reference. 2023. URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/apireference/protocols/esp_http_client.html
7. Espressif Systems. ESP32-CAM camera module library. 2023. URL: <https://github.com/espressif/esp32-camera>
8. Global Compact Network Ukraine. White paper: Концепція Smart Grid та її поточний стан. 2023. URL: <https://globalcompact.org.ua/news/white-paper-концепціяsmart-grid-та-її-поточний-стан-вп/>
9. How Fog Computing Powers AI, IoT, and 5G, Madhavan Sridharan, April 9, 2019. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.datastax.com/2019/04/how-fog-computing-powers-ai-iot-and-5g> (05.06.2020)
10. How the introduction of IoT applications is transforming various industries and markets, 2019. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://channels.theinnovationenterprise.com/articles/the-internet-of-things-iotapplications-that-are-changing-the-future> (05. 06.2020)
11. Importance of Cloud Computing for Large Scale IoT Solutions, 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

- <https://www.einfochips.com/blog/importance-of-cloud-computing-for-large-scale-iiot-solutions/> (05.06.2020)
12. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications / Pallavi Sethi, Smruti R. Sarangi // Journal of Electrical and Computer Engineering – 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/jece/2017/9324035/> (05.06.2020)
 13. JaidedAI. EasyOCR: Optical character recognition with Python. 2023. URL: <https://github.com/JaidedAI/EasyOCR>
 14. Lazaro A. Tesseract for seven-segment digit recognition. 2023. URL: https://github.com/adrianlazaro8/Tesseract_sevenSegmentsLetsGoDigital
 15. Peerdh. Building a machine learning model to predict energy consumption based on historical data. 2023. URL: <https://peerdh.com/uk/blogs/programminginsights/building-a-machine-learning-model-to-predict-energy-consumption-based-on-historical-data> 100
 16. Peerdh. Integrating IoT devices for real-time energy consumption monitoring in smart homes. 2023. URL: <https://peerdh.com/uk/blogs/programminginsights/integrating-iot-devices-for-real-time-energy-consumption-monitoring-in-smart-homes>
 17. Program Analysis of Commodity IoT Applications for Security and Privacy: Challenges and Opportunities, 2018. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.yuradnik.com.ua/stride/ur/index.php?m=archive&y=2005&mag=4&art=89> (05.06.2020).
 18. Program Analysis of Commodity IoT Applications for Security and Privacy: Challenges and Opportunities, 2018. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.yuradnik.com.ua/stride/ur/index.php?m=archive&y=2005&mag=4&art=89> (05.06.2020)
 19. Random Nerd Tutorials. Programming and uploading code to ESP32-CAM. 2023. URL: <https://randomnerdtutorials.com/program-upload-code-esp32-cam/>
 20. Role of Cloud Backend in IoT and Basics of IoT Cloud Applications, 2018. . [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.embitel.com/blog>

/embedded-blog/role-of-cloud-backend-in-iot-andbasics-of-iot-cloud-applications
(05.06.2020)

21. Sense. Meter eligibility requirements. 2023. URL:
<https://sense.com/homes/meter-eligibility/>
22. Smart-MAIC. Проект «Розумний дім». URL: <https://smart-maic.com/uk/>
23. USAID. Strengthening Market-Based Approach to Household Energy Efficiency in Ukraine. 2015. URL: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00MD8N.pdf
24. Waveshare. ESP32-CAM module. 2023. URL:
<https://www.waveshare.com/esp32-cam.htm> 99
25. Аналітичні системи та комп'ютери. Методологія аналізу даних у моніторингу енергоспоживання. 2023. URL:
<https://asac.kpi.ua/article/view/271337>
26. Аудит бізнесу для IoT [Електронний ресурс] – Режим доступу: World Wide Web. – URL: <https://kauri-iot.com/blog-post/audit-biznesa-dlja-iot/> (07.06.2020)
27. Невінський О.О. Аналіз вразливостей IoT пристроїв та систем: кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 125 – Кібербезпека / О. О. Невінський. – Тернопіль : ТНТУ, 2022. – 65 с.
28. OneM2M -A Common Service Layer for IoT Basic principles and architecture overview, 2018. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://portail-qualite.public.lu/damassets/publications/normalisation/2018/workshop-etsi/4-xavier-piednoir-onem2mworkshop-ilnas-etsi.pdf> (05.06.2020)
29. Огляд автоматизованих інформаційних систем для енергомоніторингу 2020. URL : https://enefcities.org.ua/upload/files/Publications/Analytics/Expert_review_2020.pdf
30. Огляд автоматизованих інформаційних систем для енергомоніторингу 2020. URL : <https://pnn.com.ua/ua/blog/detail/energy-management-automation-systemas-the-energy-field-optimization>.
31. Система моніторингу режимів електроспоживання промислового підприємства. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/757b0cd7-50c3-48e4-996b-af3afccae7d4/content>

32. Шибєцький Б.Ю., Дорогий Я.Ю. Система моніторингу та аналізу споживання електроенергії в домогосподарствах на основі IoT-технологій / Б.Ю. Шибєцький, Я.Ю. Дорогий // Наукові праці ДонНТУ.



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ТЕМУ: «АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ НА ОСНОВІ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ»

НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА

ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 126 ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

ВИКОНАВ: ЗДОБУВАЧ ВИЩОЇ ОСВІТИ ГР. ІСД-42

МИХАЙЛО АКСЬОНОВ

КЕРІВНИК: ДОКТОР ФІЛОСОФІЇ

ВІКТОР САГАЙДАК

Київ 2025

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

- У сучасних умовах глобальної урбанізації, розвитку концепцій розумного міста (Smart City) та інтелектуальних будівель (Smart Buildings) все більшого значення набувають автоматизовані системи керування мікрокліматом. Енергетична ефективність, комфортність середовища та екологічна стабільність стали ключовими аспектами функціонування як житлових, так і комерційних об'єктів. За даними досліджень Європейської комісії (2022) та Міжнародного енергетичного агентства (IEA, 2023), системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) є одними з найбільших споживачів енергії у будівлях – до 60% загального споживання.
- Традиційні системи клімат-контролю поступово поступаються місцем гнучким, адаптивним та самонавчальним рішенням на основі інтернету речей (IoT), що дозволяє не лише зменшити споживання енергії, а й підвищити рівень керованості та аналітичності процесів. Згідно зі звітом компанії Statista (2024), кількість підключених IoT-пристроїв у сфері житлового сектора сягнула понад 1,4 млрд одиниць, і цей показник зростає з темпом близько 18% щорічно. Особливої актуальності набуває створення недорогих, відкритих та масштабованих систем, які можуть бути адаптовані під специфічні умови конкретного об'єкта, країни чи кліматичного поясу.
- Розробка автоматизованої IoT-системи клімат-контролю передбачає комплексний підхід: від теоретичного аналізу архітектури та протоколів до практичного моделювання і тестування. Тематика даного дослідження має високу практичну значущість як у контексті реалізації політик сталого розвитку, так і з точки зору імплементації цифрових технологій у щоденне життя громадян. У контексті військових викликів, енергетичної нестабільності та переходу на альтернативні джерела живлення, автономні системи керування кліматом є особливо важливими для українського суспільства.

МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

- Метою даної кваліфікаційної роботи є:
 - розробка автоматизованої системи клімат-контролю на основі IoT-технологій із використанням доступних апаратних та програмних рішень, що забезпечує інтеграцію сенсорних модулів, хмарних сервісів і алгоритмів адаптивного управління.
- Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:
 1. Провести аналітичний огляд сучасних досліджень і технологій в області IoT-систем для клімат-контролю.
 2. Сформулювати вимоги до системи з урахуванням функціональних і економічних критеріїв.
 3. Обрати апаратну платформу та протоколи обміну даними для реалізації архітектури IoT-системи.
 4. Розробити структурну схему інтеграції сенсорних модулів, керувальних пристроїв і центрального вузла.
 5. Створити програмну логіку взаємодії системи із користувачем та з хмарним сервером.
 6. Провести тестування розробленої системи в умовах лабораторного середовища.
 7. Здійснити аналіз ефективності, стабільності й точності роботи системи.
 8. Обґрунтувати економічну доцільність впровадження розробленої системи.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

- Об'єктом дослідження є автоматизовані системи управління мікрокліматом у закритих приміщеннях, які ґрунтуються на технологіях інтернету речей.
- Предметом дослідження є методи, технічні засоби та програмно-апаратна архітектура побудови IoT-систем для клімат-контролю, з урахуванням енергозбереження, безпеки, масштабованості та гнучкості.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

- У процесі реалізації дослідження використовувалися такі наукові методи:
- Метод системного аналізу –для побудови концептуальної моделі системи;
- Порівняльний аналіз –для вибору оптимального апаратного забезпечення та програмного середовища;
- Метод структурного моделювання –для побудови архітектури взаємодії компонентів IoT-системи;
- Методи теоретичного моделювання –при описі логіки функціонування системи;
- Експериментальні методи –при тестуванні функціональності в реальному або моделювальному середовищі;
- Економічний аналіз –для оцінки вартості системи та рентабельності її впровадження;
- Метод графічного зображення інформації –для ілюстрації структур, потоків даних та інтерфейсів користувача.

ТЕОРЕТИЧНА, МЕТОДИЧНА ТА ПРАКТИЧНА ЗНАЧУЩІСТЬ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

- Теоретична значущість полягає в узагальненні підходів до побудови структурно-функціональних моделей систем автоматизованого клімат-контролю, розробці архітектурного шаблону, що може бути адаптований до різних платформ.
- Методична значущість полягає в формалізації алгоритмів прийняття рішень у межах IoT-екосистеми, а також у створенні набору інструкцій, що можуть бути використані в освітньому процесі при викладанні дисциплін «Embedded Systems», «IoT-Architectures», «Building Automation».
- Практична значущість обумовлена можливістю реального впровадження розробленої системи для потреб енергоефективного управління мікрокліматом у житлових приміщеннях, офісах, лабораторіях, а також у критичних умовах –наприклад, у тимчасових спорудах чи укриттях. Система може бути використана у поєднанні з автономними джерелами живлення, акумуляторами або фотоелементами.

СТРУКТУРУ РОБОТИ

- • Розділ 1 присвячений аналітичному огляду літератури, ринку IoT-рішень, порівнянню технологій і аналізу існуючих систем.
- • Розділ 2 містить теоретичні засади побудови IoT-систем, зокрема протоколи зв'язку, архітектуру та енергоефективність.
- • Розділ 3 зосереджений на проєктуванні IoT-системи: технічні вимоги, вибір платформи (ESP32), електрична схема, логіка роботи, програмне забезпечення, питання безпеки та охорони праці.

РОЗДІЛ 3. КОМПЛЕКСНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ІОТ-СИСТЕМИ КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ: АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА ЧАСТИНИ

- Цей розділ є практично-орієнтованим і містить повний цикл реалізації IoT-системи. Спочатку наведено вимоги до проєктованої системи, серед яких: підтримка кількох приміщень (зон), робота в умовах обмеженого доступу до живлення, гнучка структура з можливістю масштабування, підтримка хмарної або локальної обробки даних. Далі обґрунтовано вибір ESP32 як основного контролера, завдяки наявності Wi-Fi та BLE модулів; низькому енергоспоживанню; потужному двоядерному процесору; великій підтримці бібліотек Arduino, ESP-IDF; дешевизні у порівнянні з Raspberry Pi, STM32. Структура системи реалізується за моделлю підписки/публікації MQTT: сенсори надсилають дані через ESP32 на брокер (Mosquitto), а керуючі сигнали передаються виконавчим елементам (реле, SG90). Обробка здійснюється у Node-RED, автоматизація — в Home Assistant, а інтерфейс керування реалізовано через мобільний застосунок Blynk. Наведено схему підключення пристроїв, розроблену у Fritzing/EAGLE, із врахуванням: рівнів напруг; обмежувачів струму; електробезпеки; правильного заземлення; інтерфейсів UART, I²C, GPIO. Програмна частина включає сценарії обробки даних у Node-RED, застосування тригерів, фільтрацію сигналів, керування виконавцями залежно від порогових значень температури, вологості та CO₂. Також описано тестування системи в умовах симуляції (лабораторія), з аналізом точності, стабільності, затримок. Фінально розглянуто економічну доцільність системи (вартість реалізації на 1 зону, енергоспоживання); перспективи подальшого розвитку (масштабування, застосування машинного навчання, інтеграція з голосовими асистентами); охорону праці та безпеку при монтажі та експлуатації пристроїв (відповідність ДБН, EN IEC).

Типові об'єкти експлуатації IoT-систем клімат-контролю та їх умови

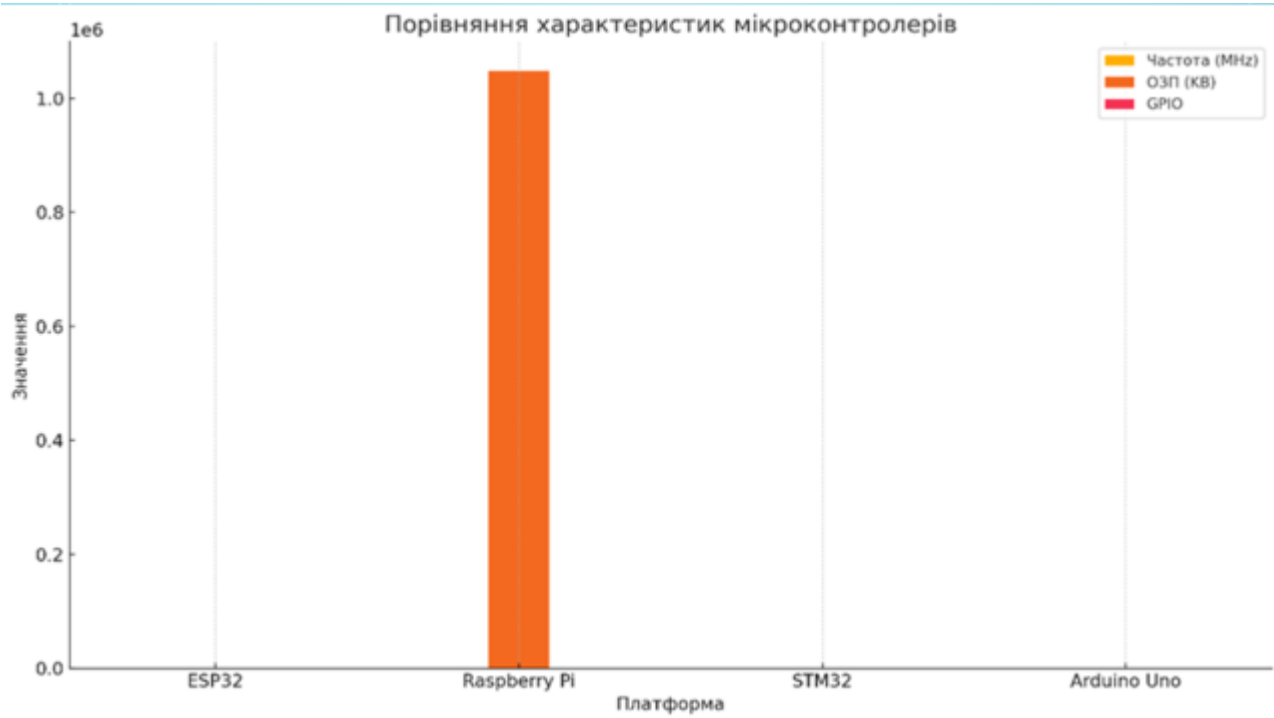
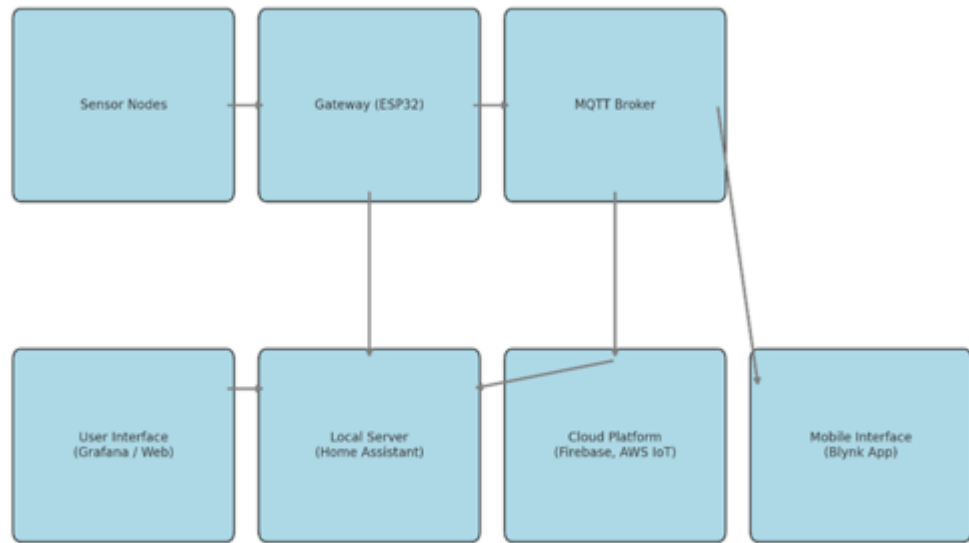
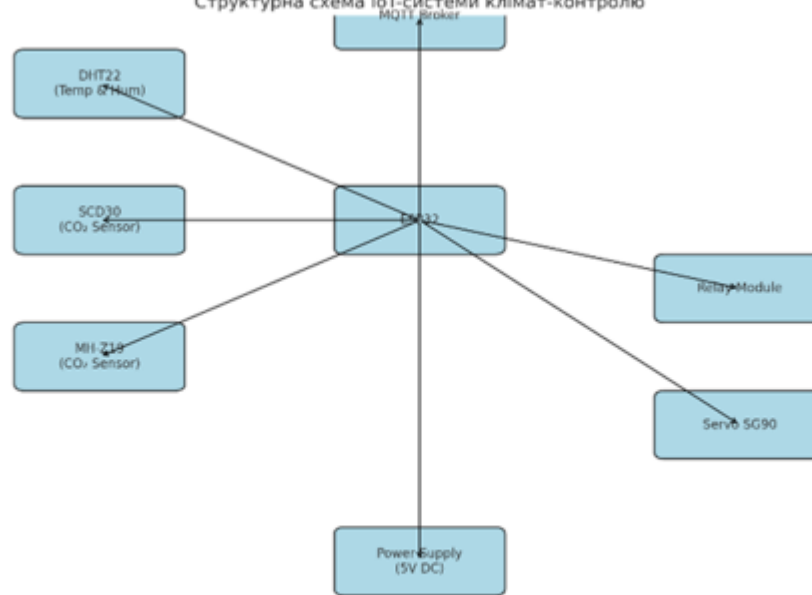


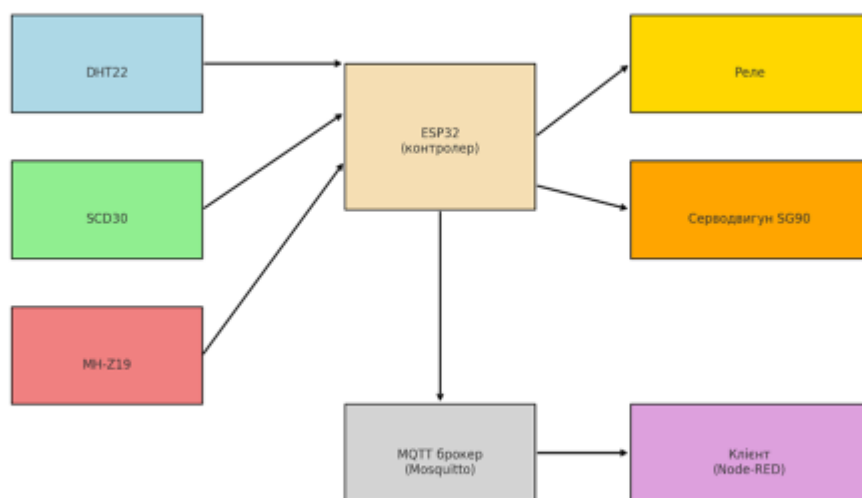
Схема структури IoT-системи клімат-контролю (MQTT-модель)



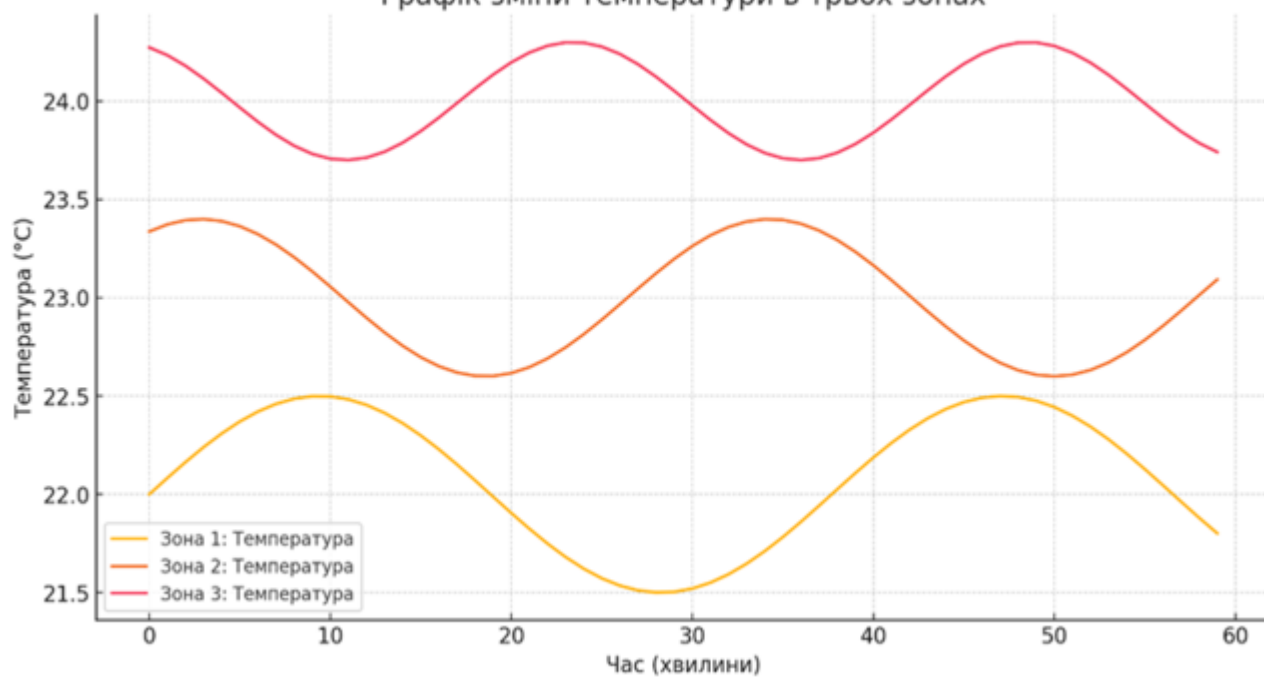
Структурна схема IoT-системи клімат-контролю

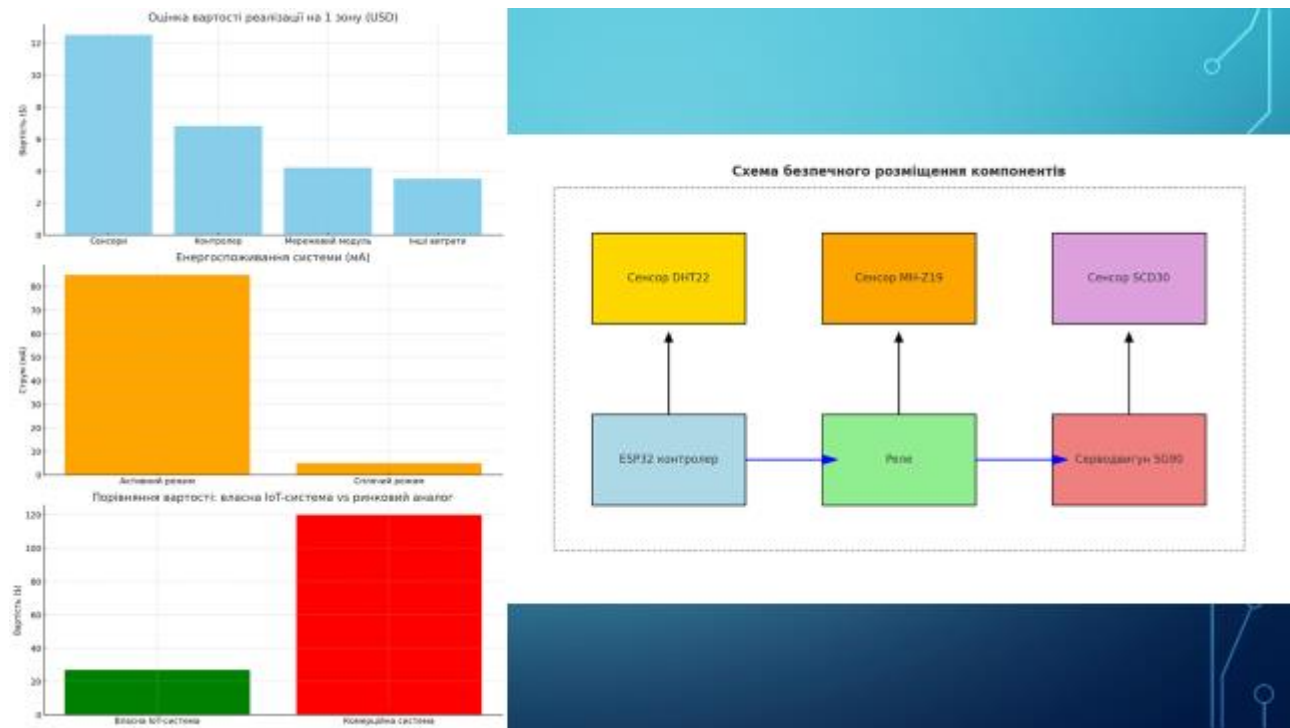


Схематичне зображення підключення пристроїв у IoT-системі клімат-контролю



Графік зміни температури в трьох зонах





Спочатку наведено вимоги до проєктованої системи, серед яких: підтримка кількох приміщень (зон), робота в умовах обмеженого доступу до живлення, гнучка структура з можливістю масштабування, підтримка хмарної або локальної обробки даних

Компонент	Функція	Примітки
Контролер ESP32	Центральна логіка, керування, енергоменеджмент	Підтримка Wi-Fi/BLE, режим дріб'язок
Сенсор температури/вологості DHT22	Вимірювання температури та вологості (відносна вологість)	Ідеальний для квартир/кімнат з базовими потребами
Сенсор CO ₂ MH-Z19	Вимірювання рівня CO ₂ у повітрі	Середня точність, але енергоефективний
Прозіційний сенсор SCD30	Високоточне вимірювання температури, вологості, CO ₂	Висока точність, рекомендований для критичних зон
Акумулятор 18650 + модуль TP4055	Забезпечення автономного живлення вузла	Підходить для автономної роботи до 3-5 днів
Комунікація (Wi-Fi)	Передача даних на локальний або хмарний сервер	Потребує стабільного Wi-Fi покриття
Комунікація (LoRa)	Альтернатива для великих дистанцій передачі	Використовується з RFM95/RFM96 при слабкому Wi-Fi
Програмна платформа Node-RED	Локальна обробка, логіка автоматизації, MQTT	Працює на Raspberry Pi або сервері з Docker
Програмна платформа Home Assistant	Інтеграція з пристроями, налаштування сценаріїв	Підтримує Zigbee, MQTT, автоматизації
Хмарна обробка Firebase	Хмарне зберігання та доступ до даних	Може бути обмінювано на слабкому інтернет-з'єднанні

Далі обґрунтовано вибір ESP32 як основного контролера, завдяки наявності Wi-Fi та BLE модулів; низькому енергоспоживанню; потужному двоядерному процесору; великій підтримці бібліотек Arduino, ESP-IDF; дешевизні у порівнянні з Raspberry Pi, STM32.

Критерій	ESP32	Raspberry Pi	STM32	Arduino UNO
Wi-Fi / BLE	Вбудовано	Вбудовано (Wi-Fi)	Потрібні зовнішні модулі	Потрібні зовнішні модулі
Енергоспоживання	★★★★★	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
Продуктивність	★★★★☆	★★★★★	★★★★☆	★★★★☆
Простота програмування	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★
Вартість	★★★★★	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★
Підтримка хмарних сервісів	★★★★★	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆

ВИСНОВКИ

- **Узагальнення реалізованого проєкту**
- У ході розробки автоматизованої IoT-системи клімат-контролю було успішно реалізовано низку завдань, спрямованих на створення ефективного та адаптивного рішення для моніторингу та регулювання мікроклімату в приміщеннях. Основні досягнення включають:
 - **Формування вимог до системи:** Визначено умови експлуатації, кількість зон та тип об'єкта (офіс, житло, серверна), що дозволило адаптувати систему до конкретних потреб користувача.
 - **Вибір апаратної платформи:** Обґрунтовано використання ESP32 як оптимального рішення за співвідношенням ціна/функціональність, з урахуванням наявності вбудованих модулів Wi-Fi/BLE, низького енергоспоживання та широкої підтримки бібліотек.
 - **Розробка структури системи:** Створено схему взаємодії елементів з топологією, що базується на підписці на MQTT-брокер, забезпечуючи ефективний обмін даними між компонентами системи.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ПУБЛІКАЦІЇ

- Основні результати кваліфікаційної роботи за темою «Автоматизована система клімат-контролю на основі IoT-технологій» були апробовані на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT», що відбулася на базі кафедри комп'ютерної інженерії Державного університету інфраструктури та технологій у 2025 році (Київ, Україна).