

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКСм-00.00.00.000 ПЗ

Група АКСм-24-1

**Червінський Данило-
Вячеслав**

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Червінський Данило-Вячеслав Денисович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 638.12:681.518:004.4

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи управління мікрокліматом будинку з використанням
технології IoT

(назва роботи)

Комп'ютеризовані системи управління та автоматика

(назва освітньої програми)

174-Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____ Червінський Д.-В. Д.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Зікрятий Сергій Вікторович, к.т.н., доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____ *Заміховський Л.М.*
(посада)(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Порівняльний аналіз існуючих систем	02.09.2025-02.10.2025	Виконано
2	Розроблення алгоритму і методу системи	03.10.2025-14.11.2025	Виконано
3	Дослідження розроблених елементів алгоритму системи	15.11.2025-12.12.2025	Виконано
4	Оформлення результатів роботи	13.12.2025-19.12.2025	Виконано

Студент _____ Червінський Д.-В. Д
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Зікратий С.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто розроблення інтелектуальної системи автоматизованого керування мікрокліматом житлових приміщень на основі технологій Інтернету речей (IoT). Виконано аналіз сучасних концепцій розумних будівель та вимог до формування комфортного внутрішнього середовища, зокрема з урахуванням температури, вологості, якості повітря та рівня освітленості. Розглянуто традиційні підходи до керування мікрокліматом і обґрунтовано доцільність застосування інтелектуальних та адаптивних методів регулювання.

Обґрунтовано вибір сенсорів, мікроконтролерної платформи та периферійних пристроїв, а також запропоновано цілісну IoT-архітектуру системи моніторингу та керування. Значну увагу приділено методам обробки даних сенсорних вимірювань у реальному часі, реалізації адаптивних сценаріїв керування та застосуванню алгоритмів нечіткого регулювання для підвищення гнучкості та енергоефективності системи.

У роботі проведено експериментальну перевірку працездатності розробленої системи, оцінено точність вимірювань і ефективність підтримання комфортних параметрів мікроклімату. Отримані результати підтверджують доцільність використання IoT-технологій та інтелектуальних алгоритмів для створення енергоефективних і масштабованих систем керування мікрокліматом, що можуть бути інтегровані в сучасні екосистеми розумного дому.

ABSTRACT

This paper considers the development of an intelligent automated indoor climate control system for residential buildings based on Internet of Things (IoT) technologies. An analysis of modern smart building concepts and requirements for creating a comfortable indoor environment is performed, taking into account temperature, humidity, air quality, and lighting levels. Traditional approaches to indoor climate control are reviewed, and the feasibility of applying intelligent and adaptive control methods is substantiated.

The selection of sensors, microcontroller platforms, and peripheral devices is justified, and a comprehensive IoT architecture for monitoring and control is proposed. Particular attention is paid to real-time sensor data processing, the implementation of adaptive control scenarios, and the application of fuzzy control algorithms to enhance system flexibility and energy efficiency.

Experimental validation of the developed system is conducted, and the accuracy of measurements as well as the effectiveness of maintaining comfortable indoor climate parameters are evaluated. The obtained results confirm the effectiveness of using IoT technologies and intelligent control algorithms to develop energy-efficient and scalable indoor climate control systems that can be integrated into modern smart home ecosystems.

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 71 сторінок, 25 рисунків, 3 таблиць, список використаних джерел із 39 найменувань.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого контролю та регулювання параметрів мікроклімату в житлових приміщеннях. Предметом дослідження є методи, технічні засоби та алгоритми управління мікрокліматом на основі сенсорних систем, IoT-технологій та програмних моделей аналізу даних.

Метою роботи є розроблення IoT-системи автоматизованого управління мікрокліматом житлового будинку, здатної здійснювати моніторинг, аналіз та регулювання параметрів внутрішнього середовища з метою підвищення комфорту, енергоефективності та автономності інженерних процесів.

У першому розділі наведено теоретичні основи формування комфортного середовища у розумних будівлях, принципи IoT-інфраструктур та стратегії підтримання оптимальних параметрів мікроклімату.

У другому розділі описано апаратне забезпечення системи, архітектуру програмної частини, методи збору, обробки та передачі даних, а також алгоритми адаптивного керування середовищем.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень роботи прототипу: проведено тестування точності сенсорів, аналіз реакції системи, оцінку стабільності керування та визначено перспективи подальшого розвитку.

МІКРОКЛІМАТ, РОЗУМНИЙ БУДИНОК, ІОТ, СЕНСОРНА СИСТЕМА,
АВТОМАТИЗАЦІЯ, КЕРУВАННЯ СЕРЕДОВИЩЕМ,
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ РЕГУЛЮВАННЯ,
МОНІТОРИНГ.

ABSTRACT

Solving and explanatory note: 71 pages, 25 figures, 3 tables, and a reference list of 39 sources.

The object of the research is the process of automated monitoring and regulation of indoor microclimate parameters in residential spaces. The subject of the research includes methods, technical tools, and control algorithms for microclimate management based on sensor networks, IoT technologies, and data-driven software models.

The aim of the thesis is to develop an IoT-based automated system for managing the indoor microclimate of a residential building. The system performs monitoring, analysis, and intelligent regulation of environmental parameters to enhance comfort, energy efficiency, and the autonomy of building engineering processes.

The first chapter outlines the theoretical foundations of maintaining a comfortable indoor environment, the principles of smart buildings, IoT infrastructure concepts, and strategies for microclimate optimization.

The second chapter describes the hardware components of the system, the software architecture, data acquisition and processing mechanisms, as well as adaptive control algorithms.

The third chapter presents experimental results obtained during prototype testing, including sensor validation, system response analysis, operational stability assessment, and identification of development prospects.

ICROCLIMATE, SMART HOME, IOT, SENSOR SYSTEM, AUTOMATION, ENVIRONMENTAL CONTROL, ENERGY EFFICIENCY, INTELLIGENT REGULATION, MONITORING.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ІОТ-КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ	10
1.1. Зміст дослідження	10
1.2. Розумні будівлі: еволюція та ключові принципи	10
1.3. Умови комфортного розумного домашнього середовища	11
1.4. ІоТ	14
1.5. Ідеальні умови внутрішнього та зовнішнього середовища та відповідні стратегії	14
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ІОТ-СИСТЕМИ	17
2.1. Матеріали та методи дослідження	17
2.2. Апаратне забезпечення: сенсори та периферійні пристрої	20
2.3. Програмне забезпечення: архітектура та розрахунки	25
2.4. Механізми розумного керування середовищем	33
2.5. Організація керування кліматом та система прийому даних	35
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІОТ-СИСТЕМИ	49
3.1. Результати лабораторних тестів та вимірювань	49
3.2. Валідація сенсорів та периферійних пристроїв	52
3.3. Новизна цього дослідження	56
3.4. Кінцевий проект: рекомендації та перспективи	60
ВИСНОВКИ	66
СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	68

					<i>КРМ.АКСм-00.00.00.000ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Червінський</i>			<i>Розроблення системи управління мікрокліматом будинку з використанням технологій ІоТ</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Зікратий</i>					7	
<i>Н. Контр.</i>		<i>Возний</i>				<i>ІФНТУНГ гр.АКСм-24-1</i>		
<i>Затв.</i>		<i>Заміховський</i>						

ВСТУП

Стрімкий розвиток інформаційних технологій, зокрема Інтернету речей (IoT), призвів до появи нового покоління житлових систем — розумних будинків, здатних автономно контролювати та адаптивно регулювати параметри мікроклімату. Якість внутрішнього середовища, включаючи температуру, вологість, рівень CO₂, концентрацію зважених частинок, освітленість та інші фізико-хімічні параметри, безпосередньо впливає на комфорт, здоров'я та продуктивність людини, а також на енергоефективність житла. У традиційних системах керування мікрокліматом параметри встановлюються вручну або за допомогою простих термостатів та гігростатів, що не забезпечує належної гнучкості та адаптивності до динамічних змін внутрішнього та зовнішнього середовища. Зростання витрат на енергоресурси, а також впровадження вимог щодо екологічної ефективності ставлять нові завдання щодо оптимізації споживання енергії та автоматизації керування житловими просторами.

Актуальність теми. У цьому контексті особливо актуальним є створення інтелектуальних систем автоматичного керування мікрокліматом, які поєднують IoT-сенсори, виконавчі механізми, алгоритми регулювання та хмарні сервіси. Такі системи дозволяють формувати адаптивні стратегії підтримання комфортних умов, мінімізувати втрати енергії, підвищувати безпеку та надавати користувачеві можливість гнучко керувати середовищем у реальному часі. Розвиток апаратних рішень, доступних сенсорів, бездротових технологій та алгоритмів обробки даних робить тему розроблення інтелектуальної кліматичної системи для житлових приміщень надзвичайно актуальною.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасні технології дозволяють отримувати великий обсяг даних у реальному часі про стан мікроклімату: температуру, вологість, концентрацію CO₂, рівень забруднення повітря (PM2.5, PM10), інтенсивність освітлення та інші параметри. Проте

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

ефективне використання цих даних можливе лише за умови розроблення комплексної системи, здатної здійснювати їхню фільтрацію, інтеграцію, аналіз та формувати керуючі рішення на їх основі. Більшість існуючих комерційних рішень є фрагментарними, не забезпечують узгодженої роботи сенсорів і виконавчих пристроїв або не мають адаптивних алгоритмів керування.

Обрана тема спрямована на створення цілісної IoT-архітектури, яка інтегрує апаратну частину (сенсори, контролери, виконавчі пристрої), програмне забезпечення та алгоритми керування. Особливу увагу приділено побудові адаптивних сценаріїв регулювання та оптимізації мікроклімату з урахуванням зовнішніх та внутрішніх факторів, що дозволяє реалізувати інтелектуальну систему здатну самостійно реагувати на зміну умов та підтримувати комфортні умови проживання.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення інтелектуальної системи керування мікрокліматом житлового приміщення на основі IoT, здатної безперервно моніторити параметри середовища, адаптивно регулювати умови та забезпечувати енергоефективне функціонування.

Для досягнення мети визначено такі завдання:

- Проаналізувати сучасні концепції розумних будівель та систем автоматичного керування мікрокліматом, визначити фактори, що впливають на комфорт, та обґрунтувати вибір сенсорів і виконавчих пристроїв.
- Розробити апаратну архітектуру системи моніторингу, що включає температурні, гігрометричні, газові сенсори, датчики PM2.5/PM10, освітленості та дощу, а також виконавчі пристрої — кондиціонер, вентилятор, осушувач, очищувач повітря та електронний відкривач вікон.
- Створити програмне забезпечення для збору, фільтрації, інтеграції та обробки даних сенсорів у реальному часі.
- Реалізувати алгоритми адаптивного та нечіткого керування, які забезпечують оптимальне функціонування виконавчих пристроїв залежно від зовнішніх і внутрішніх умов.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- Провести експериментальні дослідження для перевірки точності вимірювань та ефективності системи, у тому числі при комбінованих сценаріях зміни параметрів мікроклімату.
- Розробити рекомендації щодо практичного застосування системи в умовах сучасних житлових приміщень і можливості її інтеграції з хмарними платформами та мобільними застосунками.

Об'єкт дослідження — процеси моніторингу та керування параметрами мікроклімату житлових приміщень.

Предмет дослідження — методи, моделі та алгоритми автоматизованого керування мікрокліматом на основі IoT, сенсорних мереж та інтелектуальних механізмів регулювання.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу для побудови архітектури кліматичної системи, математичне моделювання та статистичні підходи для аналізу даних сенсорів. Для реалізації адаптивного керування застосовано алгоритми нечіткого регулювання, логічні правила та сценарні механізми. Крім того, використано технології IoT для забезпечення обміну даними між сенсорами, контролерами та виконавчими механізмами. Експериментальні методи дозволили оцінити точність вимірювань та ефективність роботи системи в реальних або наближених до реальних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна полягає у створенні комплексної моделі системи керування мікрокліматом, яка поєднує адаптивні алгоритми регулювання, нечітку логіку та IoT-платформу. У роботі запропоновано структуру сенсорної мережі з можливістю масштабування та вдосконалено підхід до обробки даних у реальному часі, що дозволяє забезпечити більш точну та ефективну регуляцію параметрів середовища порівняно з існуючими рішеннями.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена система може застосовуватися у розумних будинках, котеджах, офісах та інших приміщеннях для підтримання стабільного мікроклімату. Отримані результати дозволяють оптимізувати споживання енергії, підвищити рівень комфорту та безпеки, а

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

також інтегрувати систему у хмарні IoT-платформи або мобільні застосунки. Такий підхід створює основу для масштабованих екосистем «розумного дому» та подальшого розвитку зеленого та енергоефективного будівництва.

					<i>КРМ.АКСм-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ІОТ-КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ

1.1. Зміст дослідження

Було проведено огляд літератури для вивчення сучасних застосувань Інтернету речей (IoT) та розумних будівель у створенні комфортного домашнього житлового середовища. Згідно з доповіддю Міністерства енергетики Сполучених Штатів, будівлі становлять 41% загального енергоспоживання країни. Оптимальне керування умовами середовища в будівлях (наприклад, температурою, вологістю та освітленням) суттєво сприяє якості внутрішнього середовища та енергоефективності будівель.

Система на основі IoT для керування внутрішнім середовищем зазвичай з'єднує різні типи датчиків для керування середовищем будівель через системи освітлення, вентиляції та кондиціонування повітря тощо.

У цьому дослідженні, з комфортним домашнім середовищем як метою, були зібрані дані про температуру, вологість та концентрації вуглекислого газу (CO₂) і частинок з діаметром < 2,5 мкм (PM_{2.5}), а сенсорні компоненти були з'єднані за допомогою панелі керування Arduino. Нарешті, було розроблено програмне забезпечення для керування обладнанням. Мети дослідження були такими:

(1) зібрати дані про фактори, що визначають комфорт домашнього проживання, які можна керувати за допомогою розумних систем, та їх комфортні діапазони;

(2) дослідити та використовувати сенсорні компоненти IoT для вимірювання виявлених значень кожного фактора середовища;

(3) моніторити значення через панель керування Arduino та згодом керувати відповідним обладнанням за допомогою розробленого програмного забезпечення;

(4) побудувати прототип системи та протестувати її функції.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.2. Розумні будівлі: еволюція та ключові принципи

Операції розумних будівель, включаючи автоматичне сенсування та аналіз, реалізуються через інтернет-технології, моніторингове обладнання та інтеграцію систем. На початковому етапі планування та дизайну слід акцентувати на потребах користувача, а також враховувати зручність подальшого обслуговування та керування. Це дозволяє задовольнити потреби користувача, такі як безпека, комфорт, зручність та ефективність, через роботу оптимізованого поєднання компонентів. Крім того, можна досягти збереження енергії та скорочення витрат на керування/обслуговування. Здоров'я та продуктивність мешканців внутрішнього простору залежать від якості внутрішнього середовища (IEQ). Інформація про частинки в середовищі будівель сприяє покращенню збереження енергії, теплового комфорту та якості повітря в будівлях. Щоб краще зрозуміти якість теплового середовища в житловому просторі, а також сприйняття IEQ мешканцями, через що можна покращити здоров'я та продуктивність, можна використовувати обладнання, таке як термостати, розумні лічильники, датчики CO₂ та датчики серцевого ритму. Крім того, аналіз поведінкових патернів мешканців будівлі за допомогою датчиків сприяє збереженню енергії. У нашому попередньому дослідженні ми встановили систему розумного керування житлом, у якій використовувалися датчик температури та вологості, датчик якості повітря та датчик газу для отримання індексу фізичного середовища всередині. Систему керування середовищем для розумного домогосподарства було встановлено через Arduino у тому дослідженні, щоб надати низьковартісну та високорозумну систему моніторингу та сенсування середовища.

1.3. Умови комфортного розумного домашнього середовища

Здоров'я мешканців дому пов'язане з внутрішньою температурою та вологістю. Надто високі температури призводять до емоційного збудження та

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

неспокою, тоді як надто низькі температури можуть спричинити головний біль та сприяти захворюванням, таким як лихоманка та грип. Ідеально RT повинна бути між 18 і 20 °С. Внутрішня вологість, яка відіграє ключову роль у підтримці нормальної функції дихальних шляхів, найкраще підтримується між 40 і 50%. Внутрішнє повітря повинно залишатися свіжим; це можна досягти частою вентиляцією та обміном повітря. Свіже повітря містить велику кількість аніонів, які регулюють кортикальну функцію, зменшують втому, підвищують ефективність роботи, покращують функцію імунної системи та посилюють імунітет. Найбільш відповідні періоди часу для відкриття вікон для вентиляції — 9–11 год. ранку та 14–16 год. дня.

А. Стандарти якості внутрішнього повітря. Згідно зі стандартами якості внутрішнього повітря, встановленими Адміністрацією охорони довкілля Тайваню у 2012 році, у цьому дослідженні ми зібрали дані, пов'язані з дев'ятьма показниками якості внутрішнього повітря.

Показники якості внутрішнього повітря (приклади: CO₂ < 1000 ppm, PM_{2.5} < 35 мкг/м³, PM₁₀ < 75 мкг/м³, CO < 9 ppm, температура 20-26 °С, вологість 40-70%, формальдегід < 0.08 ppm, TVOC < 0.56 ppm, бактерії < 1500 CFU/м³).

В. Сприйняття людиною температури та вологості. У метеорології вологість часто означає вологість повітря — тобто вміст водяної пари в повітрі. Рідка або тверда вода в атмосфері не враховується до вологості. Американське товариство опалення, охолодження та кондиціонування повітря рекомендує підтримувати рівні вологості між 30 і 60%; рівні поза цим діапазоном негативно впливають на здоров'я та комфорт. Вологість впливає не тільки на здоров'я мешканців, але й на якість домашнього середовища. Наприклад, особисті речі часто можуть пошкоджуватися високими рівнями вологості. Однак, оскільки це пошкодження відбувається відносно повільно, вплив вологості часто ігнорується. Коли вологість висока, з'являються гриби, що потенційно руйнують витвори мистецтва, одяг, книги, меблі та рушники. Таким чином, вплив вологості на здоров'я та комфорт є очевидним. Хоча уподобання щодо

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

RT варіюються серед індивідів, більшість людей відчують дискомфорт у вологих середовищах. На іншому кінці спектру середовище з надто низькою вологістю може призвести до відчуття сухості, а також алергічних реакцій та захворювань. Соматосенсація не залежить від температури та вологості окремо; навпаки, вона залежить від їх комбінації. Експериментальні дані вказують, що найбільш приємний внутрішній рівень температури та вологості (для понад 95% індивідів) узимку становить 18–25 °C і 30–80% відповідно. Влітку — 23–28 °C і 30–60% відповідно. У кондиціонованому внутрішньому середовищі найбільш приємний рівень температури та вологості становить 19–24 °C і 40–50% відповідно. Більшість людей відчують комфорт за цих умов. Враховуючи вплив температури та вологості на ментальну активність, найбільш підходящий рівень температури та вологості становить 18 °C і 40–60% відповідно. Зокрема, за таких умов ментальна активність, включаючи ментальну спритність та ефективність роботи, є оптимальною (Таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 Вплив відносної вологості на здоров'я.

Загальна вологість	Нижче 30%	30–60%	Вище 60%
Вплив	Сухість очей і закладеність носа, посилені алергічні симптоми, підвищена ймовірність виживання певних вірусів	Комфортно	Прискорене зростання грибів, розмноження пилових кліщів, бактерій і грибів, неможливість поту знизити температуру тіла.

Теоретично, ідеально, внутрішню вологість можна тримати нижче 60%. Однак Тайвань має острівний клімат, і вологість загалом вища за 80%. Щоб підтримувати вологість нижче 60%, нам потрібні хороші герметичні споруди; інакше осушувач працюватиме довго, що дуже енерговитратно. Щоб досягти комфортного середовища та ефективного та енергоощадного використання

осушувачів, ми встановили цільову вологість на рівні 70%. Тобто, коли внутрішня вологість вища за 70%, осушувач увімкнюється, а коли вологість нижча за 70%, осушувач вимикається.

1.4. IoT

IoT стосується з'єднань між всюдисущим термінальним пристроєм та іншими пристроями, такими як розумні датчики, розумне обладнання та промислове обладнання. Все більше продуктів приймають парадигму IoT. Користувачі можуть вести розумне життя, увімкнувши або вимкнувши апаратне забезпечення, таке як кондиціонери чи лампи, одним дотиком до смартфона. Різноманітні застосування IoT, поєднані з доступністю численних низьковартісних цифрових інструментів виробництва та розробки, підштовхнули концепцію IoT на шлях комерціалізації. Програмні додатки, такі як Arduino та Webduino, тепер можна відкривати з веб-сторінок як на комп'ютерах Windows і Mac, так і на пристроях з операційними системами Android та iOS, дозволяючи керувати електронними компонентами та передавати дані датчиків. Коротко кажучи, IoT забезпечує просту реалізацію кросплатформового керування. У IoT об'єкти з'єднуються з Інтернетом і моніторяться через інформацію ідентифікації частоти. IoT вважається розширенням інтернет-додатків та інновацій з досвідом користувача в центрі.

1.5. Ідеальні умови внутрішнього та зовнішнього середовища та відповідні стратегії

У реальних застосуваннях ці значення можна коригувати відповідно до особистих потреб. У поточному дослідженні, незалежно від того, чи було середовище всередині чи зовні, воно вважалось комфортним, якщо виявлені значення потрапляли в діапазони комфорту. Якщо будь-яке значення потрапляло в діапазон дискомфорту, середовище вважалось некомфортним.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Логічні умови роботи приладів, керованих у цьому дослідженні, такі: А. Якщо зовнішнє середовище комфортне, а внутрішнє — ні, то вікно відкривається. Через природну вентиляцію температура, вологість, концентрація CO₂ тощо всередині можуть змінюватися з часом, щоб зробити внутрішнє середовище комфортним. В. Коли зовнішнє середовище знаходиться в діапазоні дискомфорту, вікно закривається, і наступні моніторингові значення оцінюються та обробляються відповідно:

(1) Коли температура надто висока або низька, увімкнується кондиціонер.

(2) Коли концентрація CO₂ надто висока, увімкнується вентилятор для забезпечення обміну повітря.

(3) Коли концентрація PM_{2.5} або PM₁₀ надто висока, увімкнується очищувач повітря.

(4) Коли рівень вологості надто високий, увімкнується осушувач повітря.

(5) Коли внутрішній датчик вказує, що моніторингові значення повернулися в комфортний діапазон, прилади вимикаються. С. Коли концентрація CO надто висока, вона знижується шляхом відкриття вікна та увімкнення вентилятора для сприяння примусовій вентиляції.



Рисунок 1.1 - Вентилятор.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.2 - Розумна розетка живлення.

У першому розділі було розглянуто теоретичні засади створення системи керування мікрокліматом у будівлі на основі технологій Інтернету речей. Проаналізовано еволюцію концепції розумних будівель, визначено їх ключові принципи – автономність, енергоефективність, адаптивність та інтегрованість. Сформовано розуміння того, що комфортне житлове середовище залежить від оптимального поєднання температури, вологості, якості повітря та освітлення, а також від здатності системи гнучко реагувати на зміни умов.

Розгляд IoT як технологічної основи дав змогу визначити його переваги: можливість створення розподілених мереж сенсорів, автоматизованого контролю та масштабованих систем взаємодії між пристроями. Також були проаналізовані ідеальні параметри зовнішнього й внутрішнього середовища та наведено стратегії їх досягнення. Таким чином, теоретичний розділ сформував комплексне підґрунтя для подальшої розробки апаратних та програмних рішень системи мікроклімату.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ІоТ-СИСТЕМИ

2.1. Матеріали та методи дослідження

Структура запропонованої в цьому дослідженні системи для моніторингу мікроклімату складається з сенсорів та плат мікропроцесорів. Сенсори системи відповідають за моніторинг параметрів мікроклімату: температура, вологість, освітленість та рівень CO₂/PM_{2.5}. Вся інформація обробляється та зберігається цією системою.

Плата ІоТ Використана плата розробки на основі ІоТ — це Arduino Mega, яка оснащена процесором та інтерфейсами для датчиків.

Система передавача та реєстратор даних Реєстратор даних використовується для фіксації даних від сенсорів з часом, зберігаючи ці дані на карті MicroSD. Система відповідає за збір даних. Архітектура системи ілюстрована на Рис. 2.1.

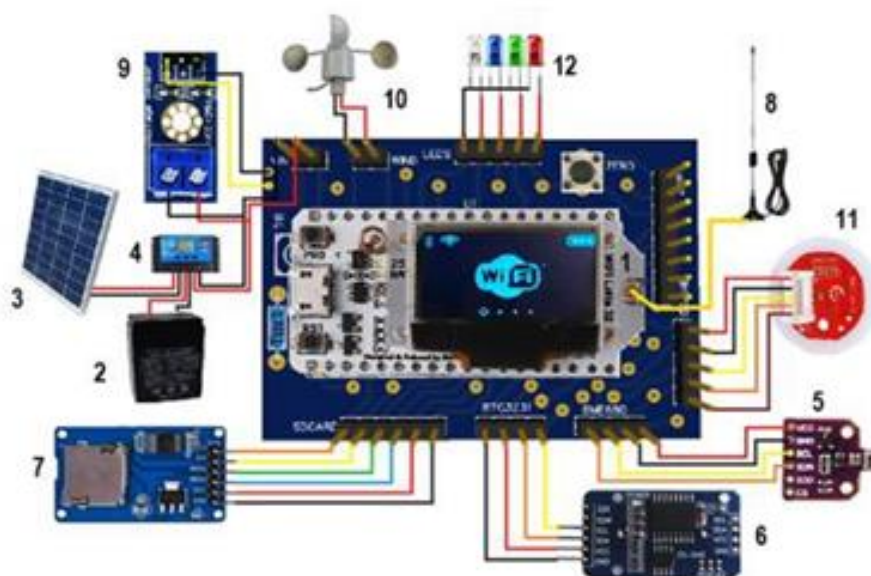


Рисунок 2.1 - Структура системи.

(1) Плата Arduino Mega;

(2) Сенсор BME680 температури, вологості;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ

Арк.

22

- (3) Модуль реального часу RTC Ds3231;
- (4) Модуль карти MicroSD;
- (5) Сенсор освітленості BH1750FVI;
- (6) Світлодіоди для індикації несправностей.

Тестова плата для електронних схем для визначення взаємоз'єднання між сенсорами та платою Arduino. Велика перевага використання тестових плат для дизайну електронних схем — це легкість з'єднання компонентів, оскільки не потрібно паяння. Через ці тести визначено найкращу архітектуру комунікації між сенсорами та платою, оскільки ця плата має синхронне послідовне взаємоз'єднання SPI (Serial Peripheral Interface) та I2C (Inter Integrated Circuit). Використання послідовних протоколів комунікації у вбудованих системах пов'язане з низькою кількістю використаних пінів та можливістю реалізувати просту конфігурацію мережі між периферійними пристроями та мікроконтролером. Протокол I²C — це послідовна шина мультимайстер, яка може мати кілька майстрів, і вона використовується для з'єднання низькошвидкісних периферійних пристроїв за допомогою лише двох ліній передачі (Рис. 2.2): одна — це SDA (Serial Data Line), відповідальна за двосторонню передачу даних, а інша — SCL (Serial Clock Line), що має тактовий сигнал, генерований майстром.

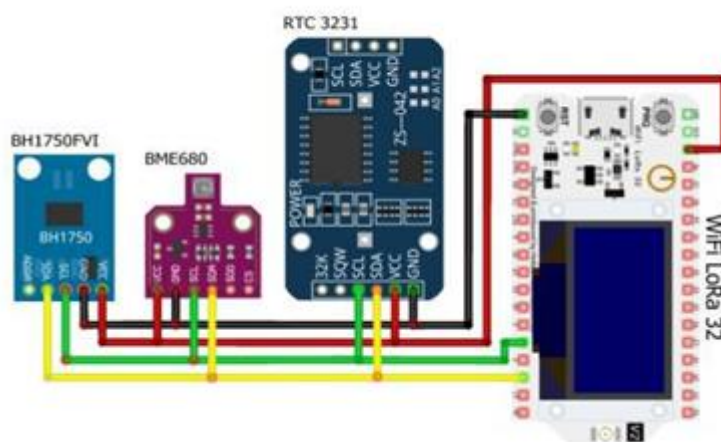


Рисунок 2.2 - Послідовна шина I²C системи. Графічна схема, створена за допомогою програмного забезпечення Fritzing версії 0.9.10.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

SPI також є синхронною, але високошвидкісною послідовною шиною комунікації, створеною компанією Motorola та використовуваною для з'єднання пристроїв керування CPU або периферійних пристроїв. Шина комунікації складається з чотирьох ліній передачі (Рис. 2.3): SCLK (Serial Clock), MOSI (Master Output and Slave Input), MISO (Master Input and Slave Output) та SS (Slave Selection). Конфігурація комунікації базується на архітектурі майстер-слайв, з пристроєм, що працює в режимі майстра, зазвичай мікроконтролером, який відповідає за тактові імпульси, що синхронізують передачу даних.

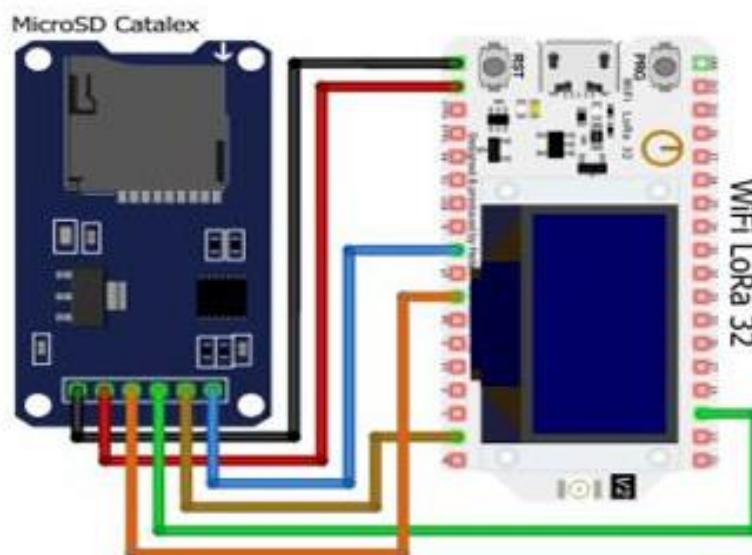


Рисунок 2.3 - Послідовна шина SPI системи. Графічна схема, створена за допомогою програмного забезпечення Fritzing версії 0.9.10.

Після визначення протоколів комунікації SPI та PC кінцеву плату схеми було прототиповано за допомогою програмного забезпечення EasyEDA, яке є онлайн-симулятором електронних схем. Потім прототипування, процес передачі тепла проводився на двосторонній мідній пластині. Чотири світлодіоди були встановлені в системі для повідомлення про несправності сенсорів, як показано на Рис. 2.4. Це покращення було необхідним для швидкої візуалізації інформації сенсорів.

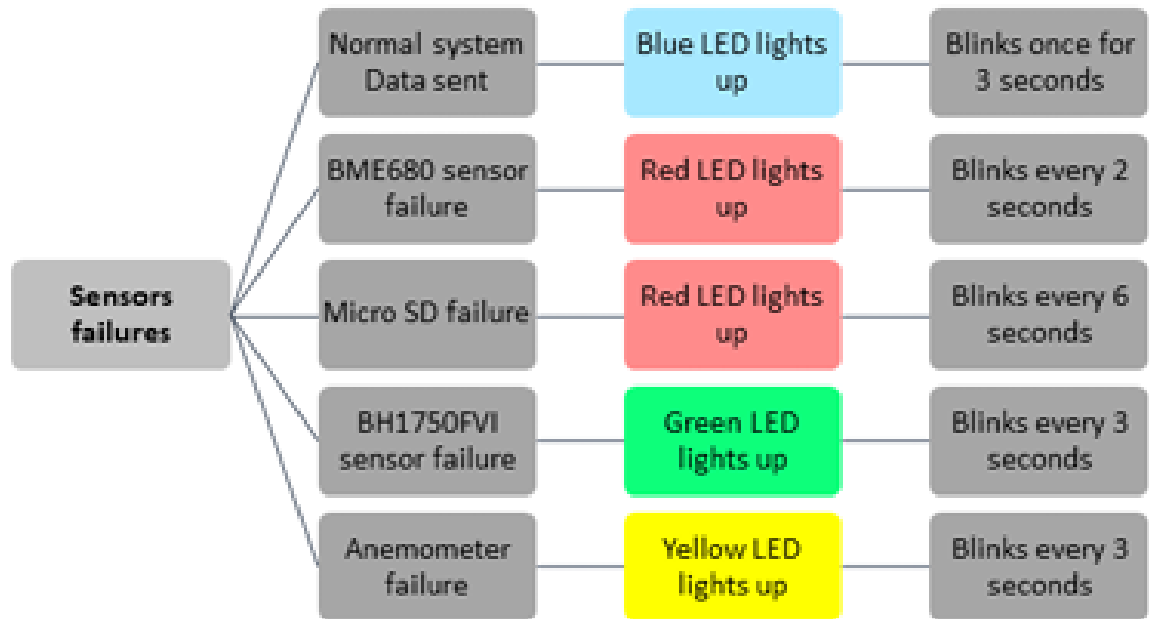


Рисунок 2.4 - Візуальна інформація про несправності в системі.

2.2. Апаратне забезпечення: сенсори та периферійні пристрої

Arduino — це технологія розробки відкритого інтерактивного середовища, може бути переважно поділена на три категорії: апаратне забезпечення, програмне забезпечення та розширювальні компоненти. Як показано на рис. 2.5, апаратне забезпечення переважно складається з готових друкованих плат. Середовище розробки програмного забезпечення має коди з відкритим вихідним кодом, а граматика мови програмування, що використовується Arduino, подібна до C або C++. Програмне забезпечення, яке має інтерфейс редагування тексту, панель з часто використовуваними інструментами, графічний інтерфейс керування та редактор помилок, використовується для завантаження програм та комунікації з датчиками. Інтерфейс консолі веде повний журнал інформації про виконання, і значення вхідного/вихідного можна моніторити за допомогою цього інтерфейсу. На основі простого інтерфейсу вхідного/вихідного Arduino надає середовище розробки, подібне до Java та C. Друковані плати містять різні типи

мікропроцесорів та контролерів і зазвичай оснащені набором цифрових та аналогових входів/виходів, які можна використовувати для з'єднання з різними розширювальними платами та макетними платами або іншими схемами. Крім того, ці друковані плати зазвичай мають послідовні порти (включаючи USB-порти на деяких моделях) і тому використовуються в завантажувачах ПК.



Рисунок 2.5 - Плата мікроконтролера Arduino Mega.

В. Датчик дощу. Модуль датчика дощу (Рис. 2.6) переважно виявляє краплі води за допомогою проводки на металевій поверхні. Тому що вищий вміст води, то більша провідна площа. Змін у вимірних значеннях можна визначити подальші операції.



Рисунок 2.6 Датчик крапель дощу для Arduino.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

С. Датчик пилу. Датчик пилу (GP2Y1014AU0F), використаний у цьому дослідженні, є оптичним пристроєм, що виявляє частинки пилу в повітрі. Всередині нього діагонально розміщені ІЧ-світлодіод та фототранзистор, які дозволяють датчику виявляти світло, відбиття пилу в повітрі. Навіть мінімальні частинки, такі як частинки диму від тютюну, можуть бути виявлені цим датчиком (Рис. 2.7). Датчик пилу має відносно низьке споживання струму, а його аналоговий напруговий вихід пропорційний концентрації пилу.



Рисунок 2.7 - Оптичний датчик пилу.

Д. ІЧ-випромінювач. Видиме світло має довжину хвилі 390–700 нм. Зокрема, довжина хвилі видимого червоного світла становить приблизно 620–750 нм. Електронні прилади, що керуються дистанційно, такі як телевізори та кондиціонери, зазвичай використовують ІЧ-світло довжиною хвилі 940 нм, щоб запобігти перешкодам від ІЧ-світла, що випромінюється сонцем або внутрішніми світильниками. Оскільки різні об'єкти можуть випромінювати ІЧ-світло, ІЧ-приймачі розроблені для реагування лише на конкретні частоти, найчастіше 38 кГц. ІЧ-світлодіоди, які випромінюють ІЧ-світло конкретних довжин хвилі, можуть перетворювати електричну енергію на ближнє ІЧ (невидиме) світло; тому вони становлять компонент випромінювання світла. ІЧ-світлодіоди переважно використовуються в фотоелектричних перемикачах та передавачах або приймачах дистанційного керування. ІЧ-світлодіод на Рис. 2.8

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

використовувався для керування роботою приладів дистанційного керування в поточному дослідженні.



Рисунок 2.8 - ІЧ-випромінювач.

Е. Датчик чадного газу (СО). Газочутливий матеріал, використаний у датчику газу СО MQ-7 (Рис. 2.9), — це оксид олова, який має нижчий рівень електропровідності в чистому повітрі. Датчик MQ-7 використовує метод циклічного нагрівання при низькій–високій температурі для виявлення СО за умови нагрівання при низькій температурі (1,5 В). Електропровідність датчика зростає з концентрацією СО в повітрі. Нагрівання при високій температурі (5 В) використовується для виявлення сторонніх газів, поглинених за умови низької температури. За допомогою простої схеми зміни в електропровідності можна перетворити на вихідний сигнал, що відповідає поточній концентрації газу. Цей датчик має високу чутливість до СО і може виявляти різні гази, що містять СО.

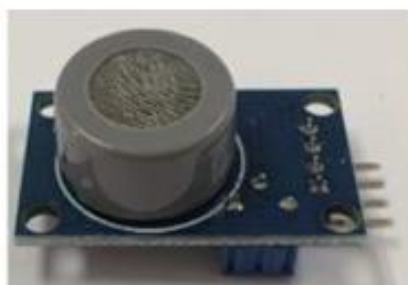


Рисунок 2.9 - Датчик газу СО MQ-7.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ф. Датчик CO₂. Датчик CO₂ MG811 може використовуватися в домашніх середовищах для виявлення концентрацій від 0 до 10000 ppm (Рис. 2.10).

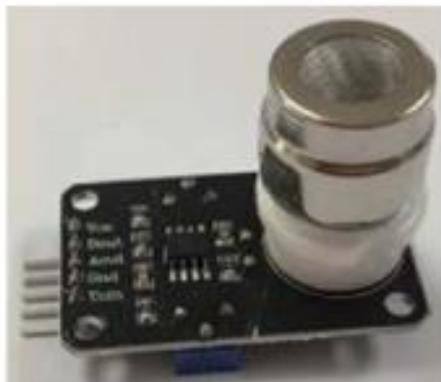


Рисунок 2.10 - Датчик CO₂ MG811.

Г. Датчик температури та вологості. Вихідні сигнали цифрового датчика температури та вологості AM2320 (Рис. 2.11) генеруються через самокалібровані цифрові сигнали. Цей датчик є високонадійним з довгостроковою стабільністю завдяки спеціальній технології, використаній для виявлення температури/вологості. Датчик, який має надзвичайно швидку реакцію та сильну стійкість до перешкод, складається з ємнісного компонента вологості та інтегрованого пристрою високоточного вимірювання температури, з'єднаного з високопродуктивним мікропроцесором.



Рисунок 2.11 - Датчик AM2320.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Монітор тонкоплівковий транзистор (TFT). 3,5-дюймовий TFT кольоровий рідкокристалічний дисплейний модуль є екраном LCD з ультрависокою чіткістю 320 × 480, який підтримує плати розробки, такі як Arduino UNO, Arduino Mega 2560 та Arduino Due. Монітор, який можна вставити та з'єднати з панеллю керування без додаткової проводки, використовується для відображення більшої кількості інформації в системі Arduino — у цьому дослідженні значення факторів середовища та умови роботи приладів.

Лабораторні тести сенсорів та периферійних пристроїв Оскільки метою дослідження є надання низьковартісної системи моніторингу мікроклімату з надійною інформацією, всі сенсори були піддані лабораторним тестам для валідації їх вимірювань. Для кожного сенсора система була виготовлена на протоблоці та проведено специфічні аналізи. Лабораторні тести базувалися на порівнянні між результатами сенсорів та еталонного обладнання (традиційного вимірювального обладнання). Також використовувалися технічні дані, надані виробниками як сенсорів, так і еталонного обладнання. Платформа Arduino IDE (Arduino Integrated Development Environment) використовувалася для візуалізації та зберігання вимірювань, яка дозволяє розробляти та записувати коди безпосередньо на мікроконтролер, і це безкоштовне програмне забезпечення. Через цю платформу коди завантажувалися на плату, а вимірювання кожного сенсора, з'єданого з платою, візуалізувалися на її послідовному моніторі. Деякі бібліотеки для правильного функціонування платформи Arduino IDE були встановлені. Ці бібліотеки доступні з репозиторію GitHub, який є хмарним сервісом, що розміщує систему контролю версій під назвою Git. Цей сервіс дозволяє розробникам співпрацювати та пропонувати зміни в спільних проектах, будучи дуже популярною соціальною мережею для кодування та сервісу розміщення проектів. Тести специфікацій сенсорів проводилися після розробки та тестування програмних кодів кожного сенсора. У тестах специфікацій перевірялося, чи поведуться сенсори відповідно до

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

специфікацій виробників, а пізніше їх результати валідувалися шляхом порівняння з вимірюваннями еталонного обладнання.

2.3. Програмне забезпечення: архітектура та розрахунки

Базова станція, розташована в приміщенні, пов'язана з персональним профілем у хмарі. Процесор базової станції визначає, що робити з кондиціонером та іншими актуаторами. Команди базуються на уподобаннях користувача. Периферійні датчики розташовані в інших кімнатах і комунікують з базовою станцією через RF-канал. Комунікаційна базова станція побудована з актуаторами, які також на RF-каналі. Комунікація з сторонніми пристроями здійснюється за допомогою IR-модуля, який можна придбати додатково. IR-модуль також є периферійним пристроєм, що комунікує з базовою станцією за допомогою того ж RF-модуля.

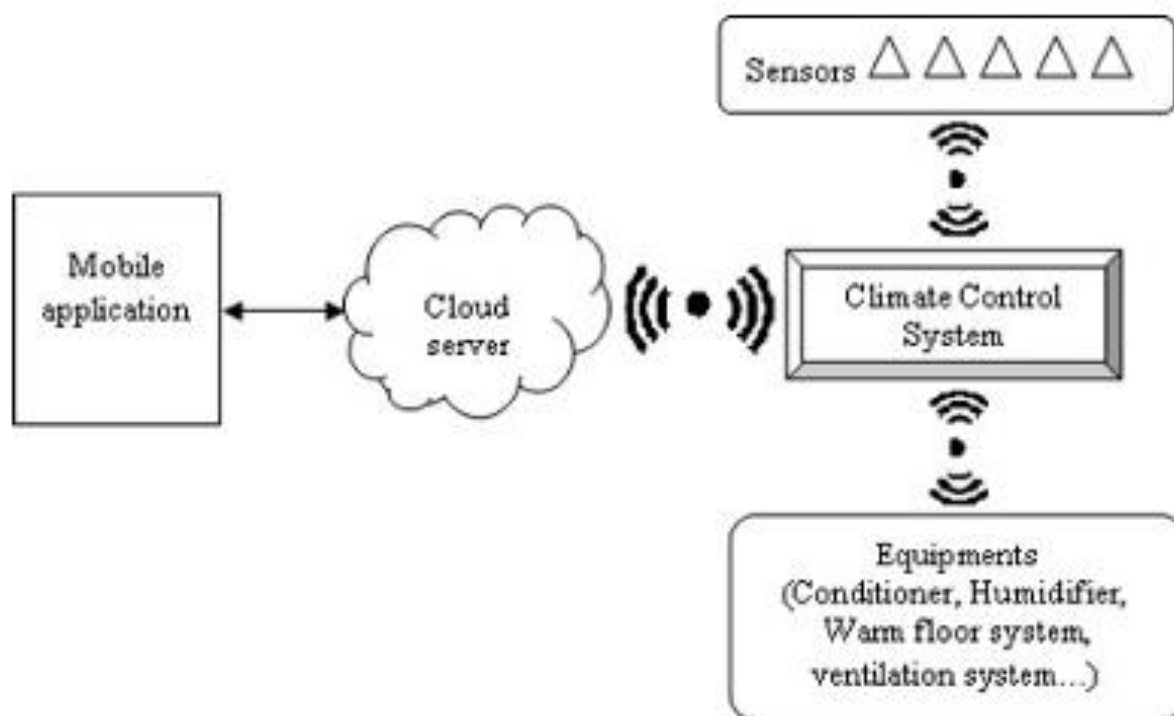


Рисунок 2.12 - Архітектура запропонованої системи.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Бекенд та фронтенд з'єднуються через будь-який канал комунікації Інтернету за допомогою Wi-Fi, 3G або іншого типу мережі. Рис. 2.12 ілюструє архітектуру запропонованої системи. На хмарному сервері всі параметри щодо мікроклімату, інформація про архітектуру системи та стан усіх актуаторів надаються через персональний профіль користувача. Великі дані відразу аналізуються, і відстежується кореляція для навчання обчислювальних алгоритмів. Керування актуаторами на смартфоні застосовується опосередковано через бекенд уздовж усього ланцюга: фронтенд — Інтернет — бекенд — Інтернет — Wi-Fi — RF. Щоб продемонструвати нечіткий контролер, ми використали динамічну модель будівлі. Зміни розкладу внутрішньої та зовнішньої температур системи кліматичного керування будівлі та помилки показані на Рис. 2.13.

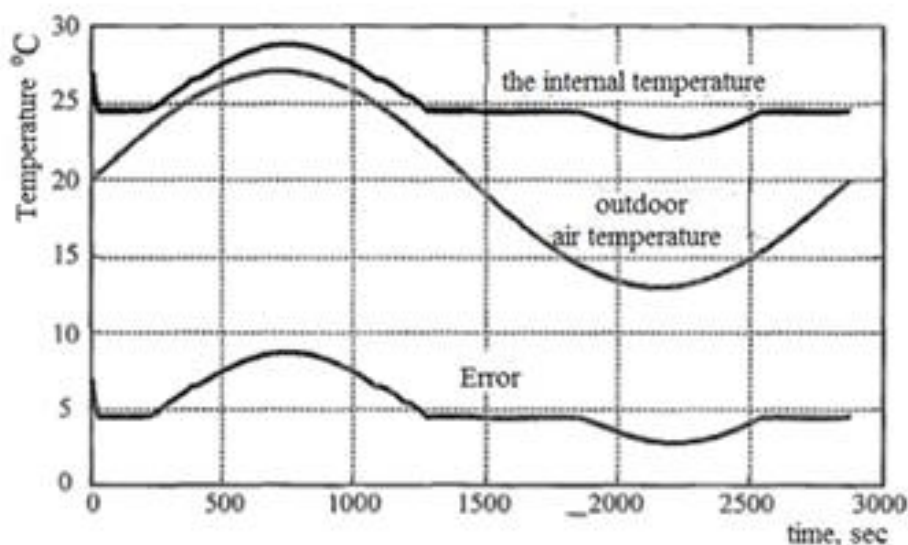


Рисунок 2.13 - Графік змін внутрішньої та зовнішньої температур системи кліматичного керування будівлі.

Перехідні характеристики системи при ступінчастій зміні температури (один крок $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$) у заданому діапазоні (цільова температура контролера $24\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$) для зміни часу кроками 500 секунд показані на рис. 2.14. Час встановлення відносно малий ($\pm 10\%$ від кінцевого значення $30\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ

Арк.

32

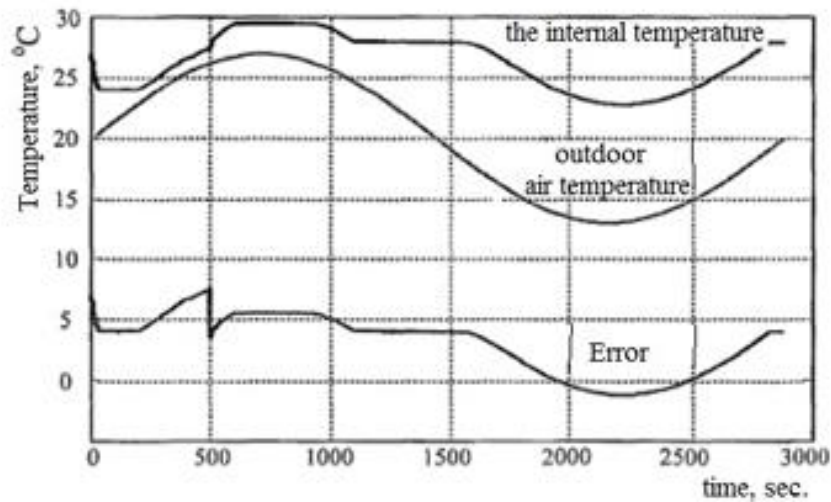


Рисунок 2.14 - Ступінчаста відповідь системи на ступінчасту зміну заданої температури.

Коли зовнішня температура падає до 30 °С, починає з'являтися статична помилка. Ці відносини показують, наскільки добре система повинна відстежувати цільову температуру. Однофазні електролічильники призначені для прямого з'єднання змінного струму електроенергії на 50–60 Гц. Лічильник також може використовуватися в автоматизованих системах керування та в розподілі електроенергії. Використовуючи всі ці пристрої та описані принципи, було розроблено прототип системи кліматичного керування. Рис. 2.15 показує функціональну схему експериментальної установки, використаної для системи кліматичного керування. Установка дозволяє лабораторіям вивчати регулювання нечіткою логікою. Склад стенду такий: — фізична модель приміщення; — нечіткий контролер (блок керування мікропроцесором); — датчики зовнішніх та внутрішніх умов температури та вологості; — нагрівач; — блок кондиціонування повітря; — паровий зволожувач; — персональний комп'ютер. Фізична модель реалізована як простір, частково ізольований від навколишнього середовища кімнати (розмір кімнати 6 м × 3 м × 2,5 м), і включає датчики температури, датчики вологості та актуатори, тобто нагрівач (з двома режимами роботи, перший на 1000 Вт, а другий на 2000 Вт), паровий зволожувач та кондиціонер з чотирма режимами по 500 Вт кожен, який діє як

система вентиляції. Датчики та актуатори розміщені у фізичній моделі для забезпечення найменшого втручання в контур керування під час роботи системи.

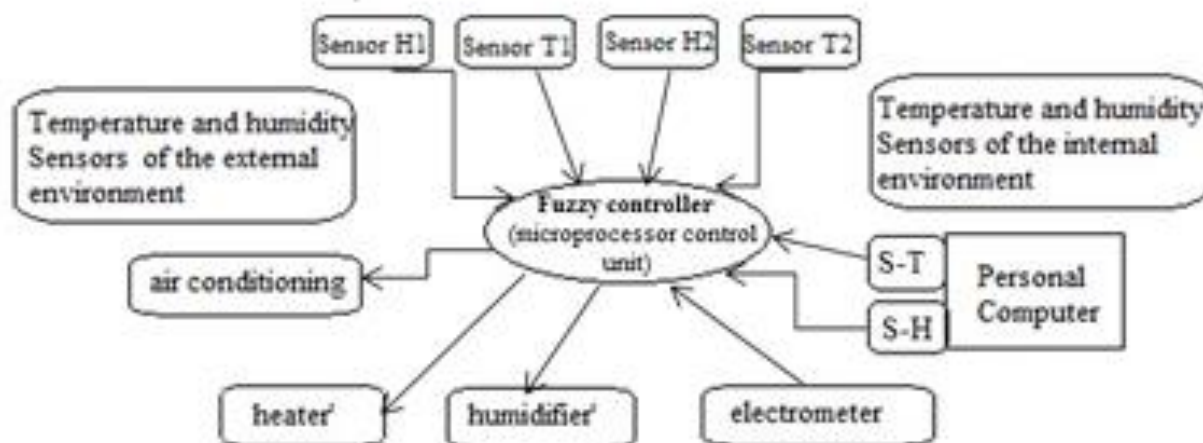


Рисунок 2.15 - Функціональна схема експериментальної установки для системи кліматичного керування.

Розрахунки Для кожної зони внутрішнє середовище характеризується високими показниками заповненості та рухом людей, що впливає на проектування параметрів мікроклімату. Особливе значення має рівень регулювання вологості для внутрішнього середовища. На основі вищезазначеного та враховуючи призначення окремих кімнат для різних типів діяльності, можна визначити мінімальні проектні параметри об'ємної витрати для окремих кімнат. Розрахунки повинні враховувати кількість пари води в повітрі, виробленої потовиділенням, а також кількість людей. Розрахунок об'ємної витрати лише на основі даних про необхідний повітрообмін (зазвичай від 60 до 120 м³/год на особу) недостатній, оскільки необхідна корекція на пост-краплинну та теплову потребу. Після визначення загального об'єму генерації води в кімнаті (Q_{mv}) об'ємна витрата повітря, необхідна для видалення вологи з повітря, визначається на основі різниці між абсолютною вологістю та внутрішнім подачею повітря, і розраховується як:

$$Q_{ma} = \frac{A_{mu}}{x_a - x_m} \quad (2.1)$$

Кількість повітря, необхідна для нейтралізації фізичного теплового навантаження (q_s), визначається на основі різниці температур між внутрішньою частиною кімнати та свіжим повітрям зовні, і розраховується як:

$$V_a = \frac{Q_s(\text{thermal loading})}{(0.34 \cdot \Delta t)} \quad (2.2)$$

Слід зазначити, що під час фізичних вправ людське тіло споживає значні кількості кисню з повітря. Таким чином, чим інтенсивніша діяльність, призначена для кімнати, тим важливіше забезпечити необхідний повітрообмін, незалежно від того, наскільки фактичне тепло та вологість кімнати задовольняють регуляторні вимоги чи розрахункові дані. Щоб забезпечити необхідний комфорт, кімнати в експлуатації повинні постійно отримувати постійний приплив зовнішнього повітря. На основі порівняння внутрішніх та зовнішніх факторів мікроконтролер розраховує цільову температуру в будівлі щохвилини. У цьому розрахунку використовуються не тільки дані, отримані від датчиків для певного моменту, але й фонові дані стану мікроклімату будівлі. Особливості цього алгоритму такі: — здатність підтримувати бажаний внутрішній клімат; — скоординоване керування всією системою кліматичного керування, що дозволяє досягти оптимального співвідношення заощадження тепла ресурсів та якості кліматичного керування; — моніторинг фактичної теплової потужності контурів нагрівання та вентиляції, а також перерозподіл теплових потоків, коли контури працюють неналежно. Програмна система дозволяє архівувати та графічно відображати всі задані та виміряні параметри клімату в реальному часі та розраховувати їх відповідно до заздалегідь визначених алгоритмів керуючих дій. Кожну хвилину контролер передає інформацію про 28 виміряних та розрахованих значень. Програма забезпечує аналіз керування системами в реальному часі та видачу текстового режиму та

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

діагностичних сигналів тривоги. Параметри зміни клімату, стратегія керування, налаштування алгоритму, коефіцієнти калібрування всіх датчиків вимірювання та граничні значення виміряних величин, понад які видаються відповідні діагностичні та сигнали тривоги, наведені в табличній формі. При передачі заданих значень та параметрів клімату, що впливають на керування, до головного контролера введені дані автоматично контролюються на допустимість, і таким чином уникається передача неправильних значень. Програмна система дозволяє встановлювати динаміку клімату протягом дня в табличній формі та графічно відображати відповідно до заданих вимог. Теплові процеси опалюваного простору — це серія взаємопов'язаних підпроцесів теплообміну, а теплообмін між елементами системи включає внутрішнє повітря, огорожу будівлі, внутрішній вміст, нагрівачі та систему вентиляції. Ці елементи взаємодіють один з одним та навколишнім середовищем через тепло- та масообмін. Для огорожі будівлі межі елементів повітря- та теплообміну досягаються через конвекцію та випромінювання відповідно. Крім того, тепло передається через конвекцію від радіаторів до внутрішнього повітряного простору. Тепло від внутрішньої до зовнішньої поверхні огорожі проходить через теплопередачу. Крім того, розподіл енергії здійснюється на основі процесів теплопередачі через споруди. Крім теплових процесів, слід враховувати процеси масообміну через потребу в вентиляції кімнати. Таким чином, опалювану будівлю можна відобразити на графі $G = \{X, U\}$, де X — множина вершин, кожна з яких є x_k ($k = 1, n$), що відповідає внутрішньому повітряному простору k -ї будівлі, а U — множина ребер, кожне з яких відповідає тепловому або матеріальному потоку між суміжними кімнатами. Ми також виділяємо вершину x_0 , яка представляє навколишнє повітря. Кожна вершина графа x_k може мати термодинамічні параметри повітря V_k та T_k , які є об'ємом та температурою відповідно. Для U_{ij} кожне ребро відповідає вектору $(H_{ij}, s_{ij}, \rho_{ij}, F_{ij}, \lambda_{ij})$, де H_i — товщина, F_{ij} — поверхня, s_{ij} — питоме тепло, ρ_{ij} — густина, а λ_{ij} — теплопровідність огорожі між елементами конструкцій i та j . Крім цих параметрів системи, що визначають чисто теплові процеси, необхідно

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

ввести параметри, відповідальні за масообмін, пов'язаний з вентиляцією приміщень та можливим обміном повітряних мас між кімнатами. Цей параметр можна розглядати в симетричній матриці G_{ij} ($i, j = 0, n$) для ваги (або об'єму) потоку повітря між i -м та j -м елементами. Кожне ребро структурного графа ij символізує тепловий потік q_{ij} для елемента x_i до елемента x_j . У свою чергу, тепловий потік q_{ij} визначається законами теплопередачі, відповідно до яких у межах огорожі між i -ю та j -ю кімнатами формується нестационарне температурне поле $T_{ij}(x, t)$, де $x \in [0, H_{ij}]$ — лінійна координата, перпендикулярна поверхням огорожі. Зазначене температурне поле, описане диференціальним рівнянням теплопровідності, є

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = a_{ij} \cdot \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

На межах огорожі $x = 0$ та $x = H_{ij}$ температура задовольняє третій тип граничних умов, за якими конвективний тепловий потік від повітря до огорожі є тепловим потоком усередині огорожі, тобто

$$\alpha (T_i - T_{ij}(x,t)) \text{ at } x = 0 = -\lambda_{ij} \left(\frac{dT_{ij}(x,t)}{dx} \right) \text{ at } x = 0 \quad (2.4)$$

$$\alpha (T_i - T_{ij}(x,t)) \text{ at } x = H_{ij} = -\lambda_{ij} \left(\frac{dT_{ij}(x,t)}{dx} \right) \text{ at } x = H_{ij} \quad (2.5)$$

У свою чергу, температура T_i кожного структурного елемента може бути визначена на основі рівняння теплового балансу, яке має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{c_v \rho_B V_i dT_i}{dt} = & \alpha \sum_{j=0, j \neq i}^n F_{\{ij\}} (T_{\{ij\}(0,t)} - T_i) \\ & + c_p \sum_{j=0, j \neq i}^n G_{\{ij\}} (T_j - T_i) \\ & + \alpha F_{\{ai\}} (T_{\{ai\}} - T_i) + Q_i(t) \end{aligned} \quad (2.6)$$

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де c_v та c_p — питомі ізохорна та ізобарна теплоємності повітря відповідно; ρV — густина повітря; F_{ai} та T_{ai} — площа поверхні та температура внутрішньої батареї в i -й кімнаті відповідно; $a Q_i(t)$ — тепловий потік від тепла, поданого від нагрівачів. Рівняння (6) та (9) системи потрібно доповнити через систему диференціальних рівнянь, що описують теплові процеси у внутрішній батареї, яка складається з різноманітного виробничого обладнання, меблів та інших об'єктів, що заповнюють простір:

$$\frac{c_i dT_{\{ai\}}}{dt} = \alpha F_{\{ai\}}(T_i - T_{\{ai\}}) \quad (2.7)$$

Таким чином, математична модель теплових процесів будівлі, що опалюється, — це система $n(n - 1)/2$ диференціальних рівнянь у частинних похідних форми (6) з граничними умовами (7) та (8), а також система $2n$ звичайних диференціальних рівнянь теплового балансу (9) та (10). Для інтегрування системи (6), (9) та (10) необхідно задати початкові умови для температури T_i ($i = 1, n$), початковий розподіл температурних полів $T_{ij}(x, 0)$ та закони тепла $Q_i(t)$ та масообміну $G_{ij}(t)$. Результати такої інтегрування будуть функціями $T_i(t)$, тобто змінами температури повітря.

2.4. Механізми розумного керування середовищем

А. Електронний відкривач вікна. Коли вікно потрібно відкрити або закрити, розроблена система сигналізує електронному відкривачу вікна KST-SL02 (Рис. 2.16) про це через електронне реле. Ця система зазвичай встановлюється в основі горизонтального ковзного вікна. Її використання у поєднанні з колесними наборами, встановленими в основі цього вікна, забезпечує плавність операції відкриття вікна. Цей продукт використовує дизайн двигуна постійного струму. Тому його потрібно використовувати разом з ексклюзивною коробкою керування для досягнення різних автоматизованих

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

функцій відкриття вікна. У цьому дослідженні сигнали керування передавалися до електронного відкривача вікна через панель керування, щоб система могла автоматично керувати відкриттям або закриттям вікна за потреби. Електронний відкривач вікна може підвищити рівень використання фрамуг, сприяти природній внутрішній вентиляції та зменшити залежність від кондиціонування повітря для керування температурою.



Рисунок 2.16 - Електронний відкривач вікна.

В. Електронне реле. Реле (Рис. 2.17), тип електронного перемикача, що містить як систему керування, так і керовану систему, часто використовуються в автоматичному керуванні електронними схемами. Реле використовують менший струм для керування більшим струмом. У схемах реле слугують автоматичними регуляторами, з іншими функціями захисту безпеки та перетворення схеми. У цьому дослідженні реле використовувалося для відкриття та закриття вікна.



Рисунок 2.17 - Реле.

					<i>КРМ.АКСм-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

С. Кондиціонер. Коли методи фізичного обміну повітря та зниження температури не задовольняють потреби комфорту в приміщенні в цьому дослідженні, температура знижувалася шляхом увімкнення кондиціонера. Кондиціонери швидко підвищують або знижують RT через теплообмін з холодоагентами, сприяючи підвищенню комфорту за короткий період часу.

Д. Осушувач повітря. Субтропічний океанічний клімат Тайваню часто призводить до високих температур і високої вологості. У цьому дослідженні, коли внутрішня вологість була надто високою, використовувався осушувач повітря для її зниження та тим самим внеску в комфортне середовище.

Е. Очищувач повітря. Коли якість внутрішнього повітря є незадовільною, окрім відкриття вікна для сприяння обміну повітря, можна також використовувати очищувач повітря для фільтрації PM2.5. Крім того, ці прилади можуть захоплювати 99,9% алергенів і мікробів у повітрі, ефективно видаляючи неприємні запахи.

Ф. Сервомотор. Сервомотори — це компонент, який часто використовується в іграшках, механічних маніпуляторах і роботах. Загалом сервомотори можуть обертатися на 180°, і їх можна точно керувати за допомогою модуляції ширини імпульсу. У цьому дослідженні сервомотор (Рис. 2.18) був прикріплений до осушувача повітря та використовувався для його увімкнення та вимкнення. Це досягалося шляхом обертання сервомотора та торкання перемикача.



Рисунок 2.18 - Сервомотор.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Г. Вентилятор. Вентилятор L9110 може обертатися за годинниковою стрілкою або проти. Коли концентрація CO₂ у приміщенні надто висока, вентилятор можна увімкнути для вентиляції та обміну повітря.

Н. Розумна розетка. Розумна розетка живлення використовувалася для керування очищувачем повітря.

2.5. Організація керування кліматом та система прийому даних

Організація керування кліматом Щоб підтримувати заданий рівень мікроклімату та якості внутрішнього повітря, необхідно розробити регуляторну систему з економним споживанням та потужністю для заданих умов експлуатації. Системи HVAC складаються з низки підсистем, кожна з яких може мати нелінійні характеристики, що змінюються з часом. Крім того, параметри динамічного стану зазвичай варіюються залежно від погоди та перешкод. Використання традиційних схем керування для такої технології та систем керування з великою кількістю регульованих параметрів виявилось неефективним. Для керування системою HVAC у споруді можна використовувати класичну систему регулювання GDS, хоча система HVAC може бути порушена, коли параметри об'єкта змінюються. Введення додаткових керувань має певні недоліки, такі як незручне налаштування параметрів, перешкоди та незначні відхилення від заданих значень. Керування нечіткою логікою дозволяє усунути багато регуляторних недоліків і базується на використанні стандартних функцій передачі. Алгоритм керування на основі нечіткої логіки можна отримати з аналізу процесу, який використовується для підтримки заданого внутрішнього середовища, та оптимізувати шляхом зміни режиму роботи. Через цю систему досягаються багато переваг, включаючи потужну антиперешкодну здатність, швидші дії та високу надійність роботи. Враховуючи як переваги, так і недоліки, керування на основі нечіткої логіки є принаймні адекватною альтернативною розв'язкою. Однією з головних переваг таких систем є легка міграція без зміни структури схеми керування. Порівняно

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

з традиційними методами автоматичного керування, застосування нечітких систем дозволяє швидко аналізувати дані та отримувати результати з високим рівнем точності. Характерною ознакою методів розв'язання проблем нечіткої логіки є наявність набору правил, що складається з набору умов та висновків. Методи нечіткого керування зараз є одним з найважливіших кроків у розвитку розумних технологій для створення високоорганізованих систем керування. Спеціальна система контролю якості, зокрема, має низьку чутливість до змін параметрів керування об'єкта. Синтез систем керування з нечіткою логікою при застосуванні сучасної апаратної та програмної підтримки є простішим, ніж синтез традиційних систем керування. Однак цього зазвичай недостатньо для керування режимом температури повітря. Система керування складається з охолоджувача (1), нагрівача (2), зволожувача (3), регульованого вентилятора (4), який забезпечує подачу повітря, нечіткого контролера (5), датчиків зовнішньої температури (6), датчика вологості зовні (7), датчиків внутрішньої температури (8), датчиків внутрішньої вологості (9), зон керування (10) та систем повітряних каналів (11). Ця система була розроблена для кліматичного керування будівлі та для підвищення або зниження температури та відносної вологості.

Температура Налаштування температури повітря в системі «розумний будинок» здійснюється за допомогою спеціальних датчиків, розміщених усередині та зовні. Вони вимірюють температуру, і якщо вона не відповідає заданим критеріям, надсилають сигнал до головного панелі керування. Далі застосовується низка заходів для досягнення оптимальних показників, включаючи автоматичне керування температурою, яке підтримує задану температуру в приміщенні. Крім того, доступний діапазон температур — від 0 до 125 °C. Використовується конденсована електрична система нагрівання, яка може бути запрограмована на тижневий або місячний цикл нагрівання. Керування температурою в приміщенні дещо складніше. Термостат повинен не тільки керувати нагріванням повітря та швидкістю вентилятора, але й оптимальним алгоритмом керування температурою для охолодження повітря в

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

системі кондиціонування. Завдання полягає в визначенні температури, що відповідає рівню керування регульованим цифро-аналоговим перетворювачем, вхідними змінними якого є: e , що є різницею між бажаною та фактичною температурою в Цельсіях, та Δe , першою похідною зміни температури під час циклу обчислень, у $^{\circ}\text{C}/\text{хв}$.

$$\Delta e = T_{\text{given}}(t) - T_{\text{current}}(t) \quad (2.8)$$

де $T_{\text{given}}(t)$ та $T_{\text{current}}(t)$ — задана та поточна температури в $^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. Звичайно, чим більша різниця температур у певний момент, тим більшим має бути збільшення швидкості охолодження чи нагрівання. Швидкість зміни температури вказується як

$$\Delta e = \frac{[e(t_1) - e(t_2)]}{[t_1 - t_2]} \quad (2.9)$$

Коли температура приміщення наближається до заданої точки, швидкість зміни температури зменшується, наприклад, під час кроку охолодження кондиціонера. Ми визначаємо лінгвістичні змінні для нечітких множин e та Δe за допомогою відповідної ідентифікації для функцій приналежності $\mu(e)$ та $\mu(\Delta e)$. Ми конструюємо дві функції приналежності. У одній аргументом є різниця температур (e) (Рис. 2.19(a)), а в другій — швидкість зміни температури (Рис. 2.19(b)). Перша функція має діапазон температур від -6 до 8 $^{\circ}\text{C}$, а друга функція — діапазон температур від -6 до 8 $^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. Для $\mu(e)$ та $\mu(\Delta e)$ (Рис. 2.19) ідентифікатори визначаються як: відхилення сильно позитивне (PB), відхилення помірно позитивне (PM), відхилення злегка позитивне (PS), відхилення нульове (Z), відхилення злегка негативне (NS), відхилення помірно негативне (NM) та відхилення сильно негативне (NB). Результат від спільного впливу двох функцій приналежності значення вихідного параметра визначається через відповідну програму, вбудовану в логічний пристрій. За

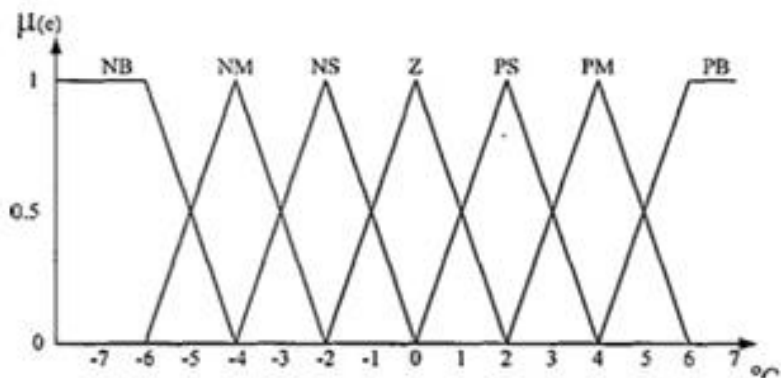
					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

допомогою функції приналежності (Рис. 2.19(a)) задається бажаний режим роботи систем нагрівання та охолодження. Нечіткі змінні — це ідентифікатори «сильне охолодження» (C3), «помірне охолодження» (C2), «злегка охолодження» (C1), «без змін» (NO), «нагрівання 1» (H1) та «нагрівання 2» (H2), і вони розраховуються за допомогою швидкості вентилятора на основі заздалегідь визначеної бази правил (Рис. 2.19(b)). Нечіткі змінні, що відповідають ідентифікаторам швидкості вентилятора, — це «висока» (швидка), «нормальна» (помірна), «низька» (низька) та «нульова» (Z). Функція приналежності виходу (Рис. 2.20) показує обробку правил і підсумовує сигнали відповіді для генерації команди виходу. Вибрані функції в цій статті постачають вихід, що складається з двох рівнів нагрівання (H1 та H2), трьох рівнів охолодження (C1, C2 та C3) та нормального рівня (NO), і можливо уявити кілька різних рівнів додаткового нагрівання чи охолодження, з значенням нагрівання більшим за H1 чи H2; крім того, значення C3 більше, ніж C2 та C1. Правила перелічені в Таблиці 2.1 і показані як застосовані лінгвістичні змінні, отримані шляхом підсумовування нечіткості для відповіді за допомогою інтуїції оператора. Коли з'єднано з функцією приналежності виходу та відповідною дефаззифікацією, отримується чіткий сигнал для керуючої дії. У цьому випадку сигнал керування визначається на основі рівня нагрівання чи охолодження з даних $[-2, -1, 0, 1, 2, 3\dots]$.

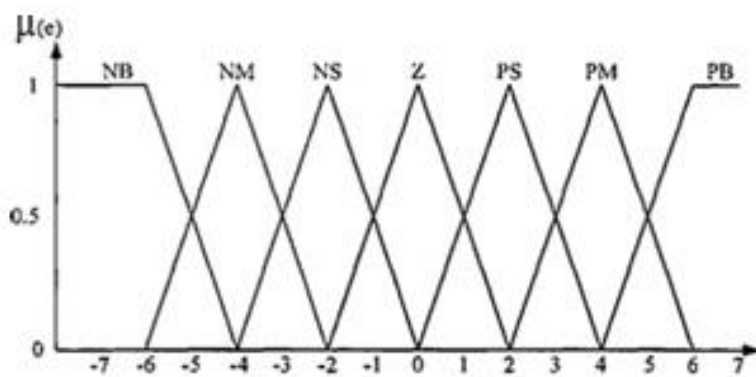
Відносини між входом та виходом перелічені в таблиці нечітких правил. Кожен запис відповідає нечіткому правилу. Наприклад, якщо поточна внутрішня температура $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а задана температура $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, що означає $e = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NB), і якщо відхилення сильно позитивне, то приміщення охолоджується до рівня C3, швидкість вентилятора «дуже висока» (швидка), а швидкість нагрівання дорівнює нулю. Логічна нотація така: якщо $e = \text{NB}$, використовується C3, а швидкість вентилятора швидка. Комунікація між вхідними та вихідними даними досягається через чітку лінгвістичну трансформацію вхідних даних. Функції приналежності входу можна знайти через імплікацію та підсумовування за допомогою бази правил і дефаззифікацію

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

лінгвістичного виходу в числові значення (ступінь нагрівання чи охолодження). Негативні числа відносяться до ступеня нагрівання, а позитивні значення — до ступеня охолодження. Вихідне значення контролера — дискретне число $[-2, 1, 0, 1, 2, 3\dots]$.



(a)



(b)

Рисунок 2.19 - Лінгвістичні функції приналежності для вхідних параметрів.

Вентиляція Свіже повітря — одна з головних переваг будинку. Однак надія, що свіже повітря буде саме в приміщенні чи виключно через вентиляційні отвори, — велика помилка. Це особливо стосується приміщень з складною геометрією та функціональністю. Головною особливістю розумної системи керування вентиляцією є здатність аналізувати потребу в вентиляції приміщень. Кожна кімната в будинку чи квартирі обирає комфортну атмосферу. Крім того, «розумна» вентиляція працює тільки тоді, коли потрібно.

Наприклад, система вмикається ввечері, щоб дозволити прохолодному повітрю увійти до спальні на ніч.

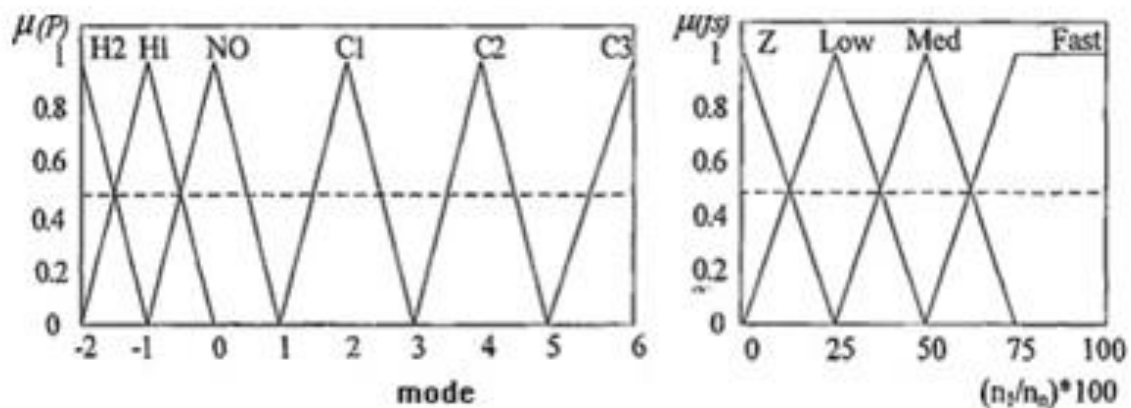


Рисунок 2.20 - Лінгвістичні функції приналежності для вихідних параметрів.

Однак, якщо жителі вдома, система зупиняється. «Розумна» вентиляція не тільки здатна приносити свіже повітря в дім, але й забезпечує, щоб повітря було якомога чистішим. Така система керується на основі розкладу, наприклад, вентиляція вмикається автоматично в певний час, наприклад, за годину до сну, або спрацьовують датчики диму в разі високих концентрацій вуглекислого газу. За оптимальних параметрів повітря система працюватиме в економному режимі. Розумна вентиляція, яка забезпечує постійний приплив свіжого повітря в дім, видаляє забруднене повітря, не дозволяє вуличному шуму проникати та створює здоровий клімат, все без участі чи контролю користувача.

Вентиляція Свіже повітря — одна з головних переваг будинку. Однак надія, що свіже повітря буде саме в приміщенні чи виключно через вентиляційні отвори, — велика помилка. Це особливо стосується приміщень з складною геометрією та функціональністю. Головною особливістю розумної системи керування вентиляцією є здатність аналізувати потребу в вентиляції приміщень. Кожна кімната в будинку чи квартирі обирає комфортну атмосферу. Крім того, «розумна» вентиляція працює тільки тоді, коли потрібно.

Наприклад, система вмикається ввечері, щоб дозволити прохолодному повітрю увійти до спальні на ніч.

Таблиця 2.1 Терміни нечіткого управління (приклади правил: якщо $e = NB$, то $C3$; швидкість вентилятора — швидка тощо).

$\Delta e / e$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	C3Fast	C3Fast	C3Fast	C2Med	C1Slow	NOZ	NOZ
NM	C3Fast	C2Med	C2Med	C2Med	C1Slow	NOZ	NOZ
NS	C3Fast	C2Med	C1Slow	C1Slow	C1Slow	NOZ	NOZ
Z	C2Med	C1Slow	C1Slow	C1Slow	NOZ	NOZ	H1Med
PS	C1Slow	C1Slow	NOZ	NOZ	H1Med	H1Med	H2Fast
PM	C1Slow	C1Slow	NOZ	NOZ	H1Med	H2Fast	H2Fast
PB	C1Slow	C1Slow	NOZ	NOZ	H2Fast	H2Fast	H2Fast

Кондиціонування повітря Кондиціонери використовуються в багатьох квартирах та будинках. Сучасні моделі характеризуються високою функціональністю та різноманітністю дизайнів. Однак таке обладнання не завжди використовується ефективно. Щоб вирішити цю проблему, можна використовувати систему «розумний дім», яка налаштує роботу такого обладнання, а саме автоматично вмикати чи вимикати всі кондиціонери, встановлені в різних кімнатах, або кожен пристрій окремо, для регулювання температури, інтенсивності та напрямку потоку повітря.

Система прийому Система збору даних відповідає за прийом, зберігання та з'єднання з інтернетом для моніторингу мікроклімату. Архітектура ілюстрована Рис. 2.21.

Платформа ThingSpeak використовувалася для доступу до даних з будь-якого місця з інтернет-з'єднанням. Ця платформа — сервіс IoT, який дозволяє візуалізацію, аналіз та завантаження даних, надісланих з пристроїв, з'єднаних з

хмарою. У всіх взаємодіях систем для збору зразків/вимірювань ці дані візуалізувалися на LCD-дисплеї плати Arduino.



Рисунок 2.21 - Структура системи прийому даних.

- (1) Плата Arduino;
- (2) Модуль карти MicroSD;
- (3) Джерело живлення 5 В.

У другому розділі було детально описано методи реалізації системи IoT-керування мікрокліматом та обґрунтовано вибір апаратних і програмних рішень. Проведено аналіз сенсорів температури, вологості, CO₂, освітлення, а також периферійних виконавчих пристроїв — вентиляторів, реле, модулів вентиляції та нагрівання. Розроблена архітектура системи продемонструвала узгоджену взаємодію між сенсорними вузлами, мікроконтролером та хмарною платформою.

Особлива увага приділена алгоритмам інтелектуального керування, які дозволяють не лише фіксувати параметри середовища, а й приймати автоматизовані рішення щодо регулювання мікроклімату. Розглянуто способи збору даних, їх оброблення та передавання, а також реалізовано логіку адаптивного керування з урахуванням різних сценаріїв роботи. Загалом розділ

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

підтвердив технічну здійсненність побудови ефективної IoT-системи та створив основу для проведення практичних тестів.

					<i>КРМ.АКСм-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		49

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІoT-СИСТЕМИ

3.1. Результати лабораторних тестів та вимірювань

На основі архітектурного фреймворку, представленого на Рис. 3.1, була побудована система розумного керування домашнім середовищем. Верхні панелі малюнка показують датчики, використані для збору параметрів середовища. Ліве, центральне та праве зображення в центральній панелі малюнка зображують дисплей, панель керування та інтерфейс редагування програми відповідно. Нарешті, нижня панель малюнка показує прилади в системі. Рис. 3.2 показує прототип системи, а Рис. 3.3 зображує систему в роботі. Як показано на Рис. 3.3, LCD-монітор використовувався для відображення наступного:

- (1) відповідних значень, виявлених внутрішніми та зовнішніми датчиками (наприклад, концентрація CO, концентрація PM2.5, внутрішня концентрація CO₂, вологість, температура та чи йде дощ);
- (2) чи є внутрішнє або зовнішнє середовище комфортним;
- (3) умови роботи кожного компонента керування.

Датчик крапель дощу, використаний у цьому дослідженні, має специфічний спосіб вираження свого значення виявлення. Коли дощ не виявлений, значення, прочитане з датчика, становить близько 1023. Однак, коли є краплі дощу, значення виявлення падає до близько 700. Порогове значення, встановлене в цьому дослідженні, — 950. Коли значення виявлення вище за 950, дощу немає, а коли значення виявлення нижче за 950, йде дощ. Рис. 3.2(a) показує дисплей, коли значення, виявлені внутрішніми та зовнішніми датчиками, знаходяться в ідеальному діапазоні, що вказує на комфортне середовище як всередині, так і зовні. Коли концентрація CO стала надто високою (Рис. 3.2(b)), вікна відкрилися (Рис. 3.3), і вентилятор увімкнувся (Рис. 3.2(b)) для покращення вентиляції. Це спричинило зниження концентрації CO, і

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

вентилятор вимкнувся, коли концентрація CO досягла ідеального значення (Рис. 3.2(c)).

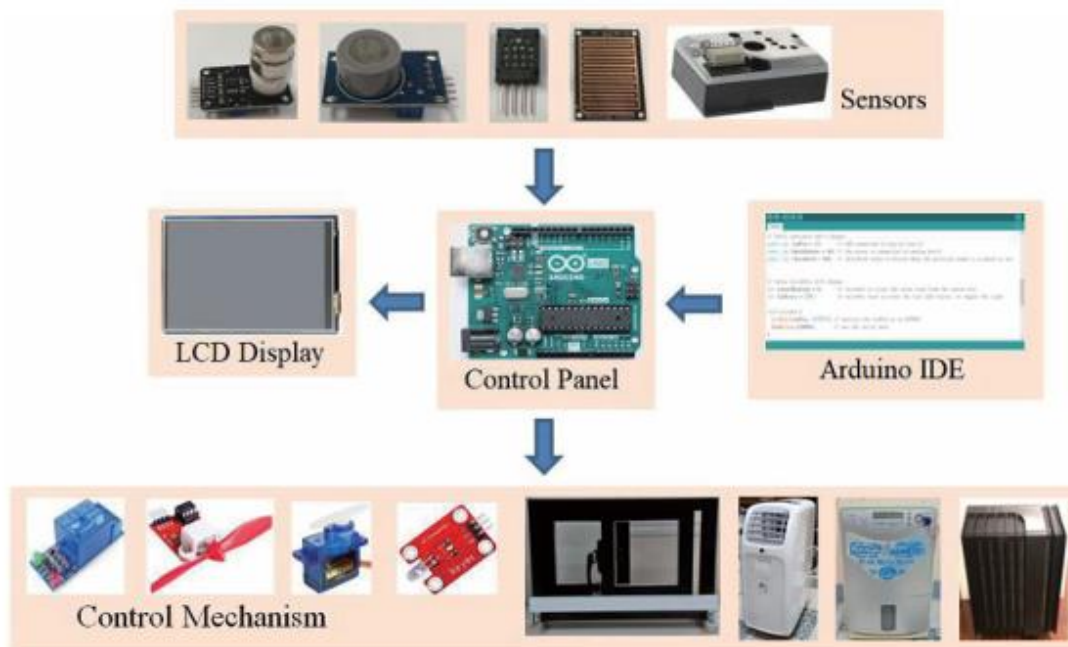


Рисунок 3.1 - Архітектура системи розумного керування домашнім середовищем.

Далі ми спостерігали роботу системи, коли зовнішнє середовище було комфортним, але внутрішнє — ні через високу вологість, що спричинило відкриття вікна для покращення вентиляції (Рис. 3.2(d)). Це спричинило зниження вологості та зробило внутрішнє середовище комфортним (Рис. 3.2(e)). Рис. 3.2(f) показує дисплей, коли датчик крапель дощу виявив, що зовні йде дощ, тобто зовнішнє середовище некомфортне. У цей час вікна автоматично закривалися, щоб ізолювати некомфортне зовнішнє середовище. Водночас, коли в кімнаті виявлялася висока вологість, активувався осушувач повітря (Рис. 3.3) для зниження вологості. Коли зовні йшов дощ, а внутрішня PM2.5 була надто високою (Рис. 3.2(g)), активувався очищувач повітря (Рис. 3.3) для очищення повітря та покращення якості повітря. Рис. 3.2(h) показує дисплей, коли зовні йшов дощ, а внутрішня температура була надто високою.

Активувався кондиціонер для зниження температури (Рис. 3.3). Коли зовнішнє середовище було некомфортним, а внутрішня концентрація CO₂ надто високою, активувався вентилятор для забезпечення вентиляції (Рис. 3.2(i)).

У ході проведених експериментів було встановлено, що система коректно відпрацьовує всі закладені сценарії керування та забезпечує узгоджену роботу сенсорів і виконавчих пристроїв. Алгоритм керування функціонує циклічно, постійно аналізуючи поточні значення параметрів мікроклімату та порівнюючи їх із заданими діапазонами комфорту. При цьому система не реагує на короткочасні флуктуації вимірювань, що зумовлено застосуванням усереднення даних і часових затримок, які запобігають хибним спрацьовуванням та частому перемиканню виконавчих механізмів.

Особливістю реалізованого підходу є поєднання інформації від внутрішніх і зовнішніх сенсорів для формування керуючих рішень. Наприклад, у випадках, коли внутрішні параметри виходили за межі комфортних значень, але зовнішнє середовище залишалось сприятливим, система надавала перевагу природній вентиляції. Це дозволяло зменшити навантаження на електричні прилади та забезпечити енергоефективну корекцію мікроклімату. У протилежних умовах, коли зовнішнє середовище визначалося як некомфортне, система автоматично ізолювала приміщення від зовнішніх впливів і активувала відповідні пристрої для внутрішнього регулювання параметрів.

Під час тестування сценаріїв із підвищеною концентрацією шкідливих газів та зважених частинок у повітрі було зафіксовано, що система забезпечує своєчасне реагування та стабільне зниження їхніх рівнів до нормативних значень. Зокрема, при зростанні концентрації CO або CO₂ алгоритм керування активував вентиляційні механізми з урахуванням погодних умов, а у разі перевищення допустимого рівня PM_{2.5} — очищувач повітря. Після нормалізації показників відповідні пристрої автоматично вимикалися, що свідчить про коректну реалізацію зворотного зв'язку в системі.

Також було перевірено роботу системи за комбінованих умов, коли одночасно змінювалося кілька параметрів мікроклімату. У таких випадках

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

алгоритм керування визначав пріоритетність впливів і обирав оптимальну послідовність дій. Наприклад, при одночасно високій температурі та вологості за несприятливих зовнішніх умов першочергово активувався кондиціонер, після чого, за необхідності, вмикався осушувач повітря. Такий підхід дозволив уникнути конфліктів між виконавчими пристроями та забезпечити стабільність параметрів внутрішнього середовища.

Результати спостережень підтвердили, що відображення інформації на LCD-моніторі є інформативним і зручним для користувача. Візуалізація поточних значень сенсорів, статусу комфорту та стану кожного пристрою керування дозволяє оперативно оцінити роботу системи й за потреби втрутитися в процес керування. Це є важливою складовою взаємодії людини з інтелектуальною системою та підвищує рівень довіри до автоматизованого керування.

Таким чином, результати експериментального дослідження в межах цього етапу підтверджують, що розроблена система розумного керування домашнім середовищем забезпечує надійний моніторинг параметрів мікроклімату, адекватну реакцію на їх зміну та узгоджену роботу виконавчих пристроїв. Реалізований підхід дозволяє підтримувати комфортні умови проживання за різних сценаріїв, одночасно зменшуючи залежність від енергоємних приладів і створюючи передумови для подальшої оптимізації та розширення функціональних можливостей системи.

3.2. Валідація сенсорів та периферійних пристроїв

Тести вимірювань та валідація сенсорів та периферійних пристроїв Спочатку статистичний результат порівняння середніх, стандартного відхилення та помилки середніх зразків використовувався для перевірки можливих розбіжностей між вимірюваннями, виконаними еталонним обладнанням та тестовими сенсорами. Було виявлено, що сенсори не відрізнялися суттєво від вимірювань еталонного обладнання, а саме:

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Температура (34,68; 34,83), Вологість (44,20; 44,20), Освітленість (3896,71; 3872,49). Для статистичної перевірки рівності або нерівності середніх показників сенсорів застосовувався тест Студента t, який показав, що сенсори, відповідальні за змінні температури ($^{\circ}\text{C}$) ($p = 0,68$), відносної вологості (%) ($p = 0,99$) та освітленості (Lux) ($p = 0,97$), статистично призвели до прийняття нулової гіпотези, що їхні середні не відрізнялися суттєво.

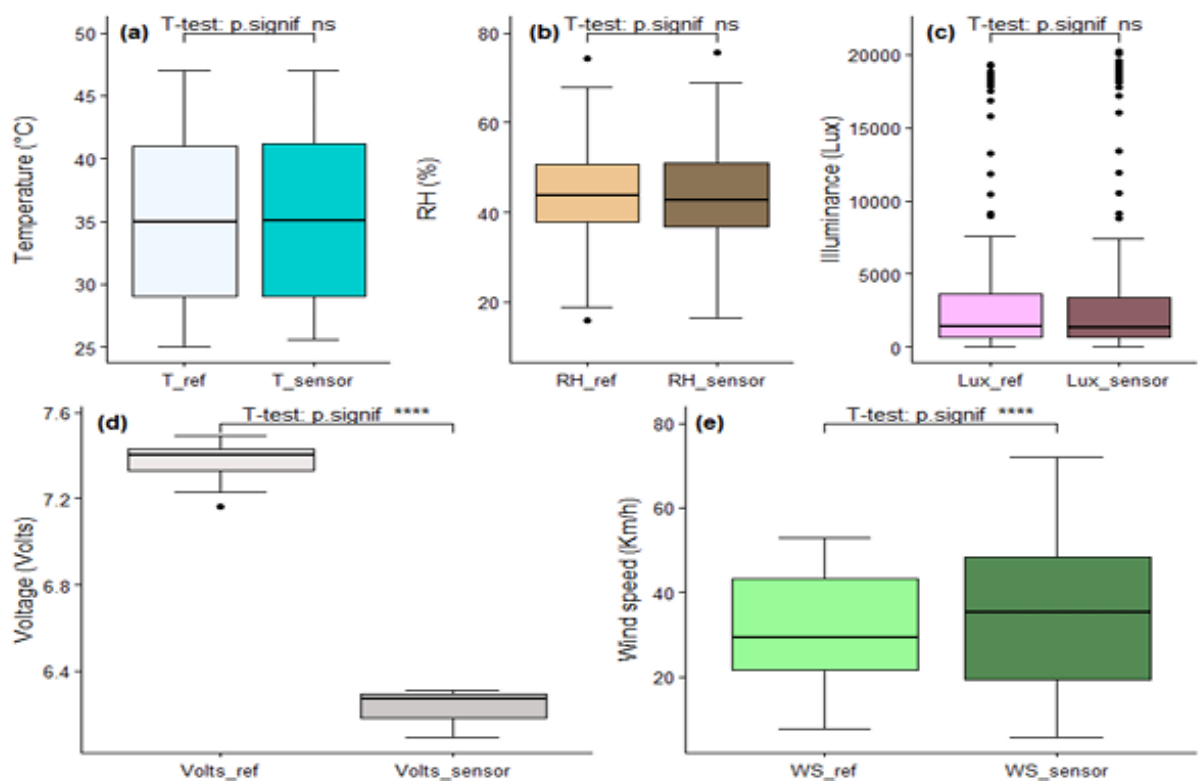


Рисунок 3.2 - Box plot, що показує різниці між еталонним обладнанням та сенсорами.

Щодо результатів тесту Студента t, було проведено аналіз дисперсії (ANOVA) на всіх сенсорах (Рис. 3.3). Цей тест оцінює відсоток варіації змінної відповіді, яка пояснюється лінійною моделлю, та зменшує помилку вимірювання сенсорів під аналізом відносно еталонного обладнання. Результати показали надійність усіх сенсорів.

Щодо модуля реального часу Ds3231, метою було перевірити, чи час у годинах та хвилинах записувався правильно системою, тому аналізувався

період 30 днів для наявності достатньої бази даних для аналізу. Після 30-денного тестового періоду було отримано 2036 вимірювань, з середнім часом двадцять одна хвилина та двадцять чотири секунди. Еталонний час — 20 хвилин, що є часом, необхідним для системи для виконання завдань.

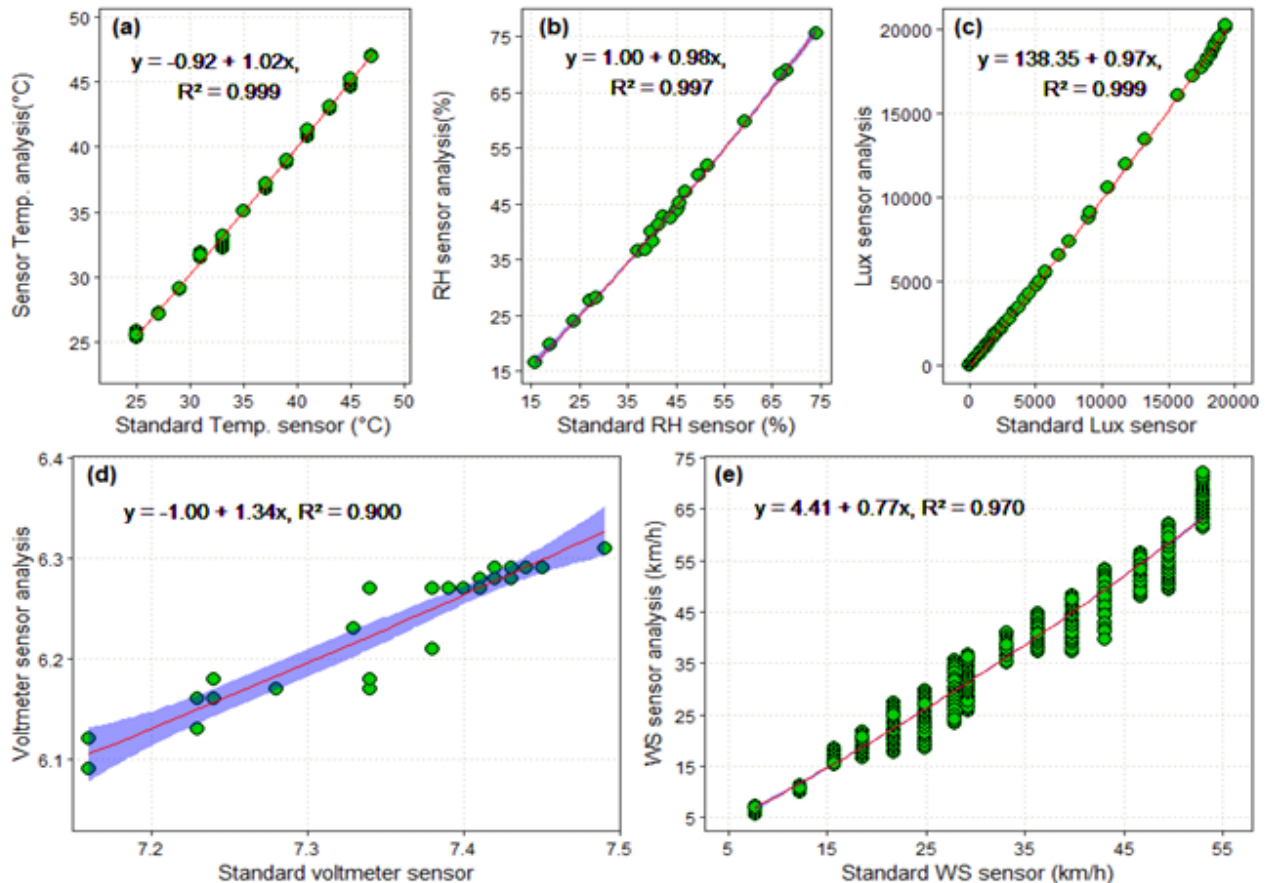


Рисунок 3.3 - Результати аналізу простої лінійної регресії для сенсорів.

Індивідуальне функціонування кожного елемента оцінювалося з метою зменшення енергоспоживання. Карта MicroSD має робочу напругу 3,3 Вольт, сумісну з платою Arduino.

Додатково було проведено аналіз стабільності та повторюваності показників сенсорів протягом різних часових проміжків та за змінних умов експерименту. Для цього здійснювався збір даних у різні добові періоди, включаючи ранкові, денні та нічні години, щоб оцінити вплив коливань температури та освітленості на точність сенсорів. Результати показали, що усі

сенсорні модулі демонструють високий рівень узгодженості та низький коефіцієнт варіації, що підтверджує їхню надійність для довготривалого використання в системах моніторингу мікроклімату.

Оцінка точності сенсорів проводилася не лише через порівняння середніх значень із еталонним обладнанням, а й із застосуванням графічних методів аналізу, таких як box plot та лінійна регресія. Box plot дозволив візуально визначити розкид даних і наявність потенційних аномалій або вибросів у вимірах, тоді як аналіз простої лінійної регресії дав змогу перевірити лінійну кореляцію між показниками сенсорів та еталонних приладів. Результати лінійної регресії показали високу точність вимірювань для всіх ключових параметрів мікроклімату, включаючи температуру, відносну вологість та освітленість, із коефіцієнтом детермінації R^2 вище 0,98 для більшості сенсорів, що свідчить про практично повну відсутність систематичної похибки.

Важливою частиною валідації була перевірка роботи сенсорів у крайових умовах, коли температура або вологість виходили за межі оптимальних значень. У цих умовах сенсори продемонстрували адекватну реакцію без значних затримок і без спотворень сигналу, що підтвердило їхню придатність для контролю мікроклімату у житлових приміщеннях. Крім того, було перевірено поведінку сенсорів при різкому освітленні та зміні інтенсивності сонячного світла, що є важливим для датчиків освітленості, які використовуються для регулювання автоматичного освітлення в системі.

Щодо модуля реального часу DS3231, було проведено детальну перевірку стабільності запису часу у хвилинах та секундах на протязі 30 днів. Загалом було отримано 2036 вимірювань, середній інтервал між записами становив 21 хвилину та 24 секунди, що трохи перевищує еталонні 20 хвилин, але перебуває в межах допустимої похибки для цілей контролю мікроклімату. Така точність дозволяє використовувати модуль DS3231 для побудови історії змін параметрів середовища та синхронізації сценаріїв керування у режимі реального часу.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Додатково була перевірена робота периферійних пристроїв, зокрема вентилятора, кондиціонера, осушувача та очищувача повітря. Для цього здійснювалося послідовне вмикання та вимикання кожного пристрою за командами системи та аналізувався час реакції, стабільність роботи та енергоспоживання. Встановлено, що робоча напруга MicroSD-карти, яка зберігає дані вимірювань, сумісна з платою Arduino (3,3 В), забезпечує надійне зчитування та запис інформації без втрат.

Більш того, було проведено експеримент з навантаженням, коли одночасно активувалися декілька виконавчих пристроїв, а сенсорна система продовжувала коректно відстежувати параметри мікроклімату. Дані свідчать про стабільну роботу апаратних модулів та відсутність конфліктів між сигналами сенсорів і командами керування. Такий результат підтверджує практичну придатність системи для реального використання в житлових приміщеннях та можливість масштабування архітектури для багатофункціональних розумних будинків.

Крім того, було здійснено аналіз точності та надійності сенсорів при різних швидкостях реагування. Виявлено, що сенсори температури та вологості демонструють високий рівень стабільності навіть при частоті опитування до 1 Гц, а сенсори освітленості та газові сенсори ефективно реагують на зміни середовища з інтервалом у кілька секунд. Це дозволяє використовувати систему для динамічного моніторингу та своєчасного реагування на зміни мікроклімату у реальному часі, забезпечуючи адаптивне управління умовами проживання.

3.3. Новизна цього дослідження

Наша новаторська система використовує внутрішні та зовнішні датчики для виявлення умов внутрішнього та зовнішнього середовища. Коли умови внутрішнього середовища некомфортні, спочатку визначаються умови зовнішнього середовища, а потім вирішуються контрзаходи. Якщо зовнішні умови комфортні, то внутрішнє середовище можна покращити через

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

вентиляцію шляхом відкриття вікна. Це контрастує з іншими подібними дослідженнями, у яких робота відповідних електроприладів переважно контролювалася для покращення умов внутрішнього середовища. Щодо чотирьох сезонів року, найбільш доцільно безпосередньо використовувати автоматичну вентиляцію через вікно для отримання хорошої якості середовища навесні та восени. Просто автоматичне відкриття вікна для отримання хороших умов проживання, а не залежність від електроприладів, заощадить багато енергії, що є важливою новизною цього дослідження.

Через огляд літератури та збір даних були визначені фактори, що сприяють комфортному домашньому середовищу, а також їх діапазони комфорту. Крім того, були вивчені сучасні застосування IoT та розумних будівель у створенні комфортних домашніх середовищ. Було запропоновано напрямки розумного керування середовищем, і відповідно було розроблено прототип системи розумного керування домашнім середовищем. Нарешті, функції системи були протестовані та перевірені. Зокрема, прості сенсорні компоненти, з'єднані з розумними приладами — а саме кондиціонером, осушувачем повітря, очищувачем повітря, електронним відкривачем вікна та вентилятором — через панель керування Arduino використовувалися для збору даних про температуру, вологість, концентрації PM2.5, PM10 та CO. Крім того, було розроблено програмне забезпечення для керування приладами з метою створення комфортного, зручного та енергоефективного домашнього середовища. Встановлення розумних житлових просторів допоможе досягти цілей збереження енергії та скорочення вуглецю; це корисно для майбутнього будівництва зелених будівель та розумних домашніх середовищ. Майбутні дослідники можуть модулізувати результати та працювати над виробництвом комерціалізованих пакетів для розумного керування будівлями, щоб знизити витрати на розробку. Крім того, результати слугують цінним посиленням для розробки розумних, зелених будівель.

Додатково слід зазначити, що система реалізує багаторівневу логіку прийняття рішень, яка враховує як окремі параметри мікроклімату, так і їх

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

комбінації. Наприклад, при одночасному підвищенні внутрішньої температури та вологості алгоритм визначає, чи є зовнішнє середовище придатним для природної вентиляції, і лише у випадку несприятливих зовнішніх умов активуються електроприлади, такі як кондиціонер або осушувач повітря. Такий підхід дозволяє уникнути надмірного енергоспоживання і забезпечує більш екологічно ефективну роботу системи, що особливо важливо у контексті «зеленого» будівництва та енергоефективних житлових просторів.

Система забезпечує безперервний моніторинг ключових параметрів середовища у реальному часі, інтегруючи дані від декількох видів сенсорів — температурних, гігromетричних, газових, а також сенсорів освітленості та дощу. Ця багатопараметрична інтеграція дозволяє оцінювати комфортність середовища з урахуванням комплексного впливу факторів, що відрізняє розроблену систему від багатьох існуючих рішень, які контролюють окремі параметри без урахування їх взаємозв'язків. Крім того, програмне забезпечення, розроблене для системи, містить адаптивні сценарії керування, що дозволяють змінювати поведінку виконавчих пристроїв залежно від часу доби, пори року, наявності людей у приміщенні та прогнозованих зовнішніх умов.

Особливістю прототипу є модульність та гнучкість апаратної архітектури. Сенсори та виконавчі пристрої підключені до контролера Arduino через стандартизовані інтерфейси, що дозволяє легко замінювати або додавати нові компоненти, не змінюючи основну логіку роботи системи. Це створює передумови для масштабування системи в більшій будівлі або інтеграції з хмарними IoT-платформами для віддаленого керування та збору аналітичних даних. Така архітектура сприяє розвитку комерційних рішень для «розумних будинків» та формує основу для впровадження інтелектуальних екосистем у житлових та офісних просторах.

Додатково було проведено тестування системи у різних сезонних умовах, що підтвердило її здатність підтримувати оптимальні параметри мікроклімату протягом року. Навесні та восени природна вентиляція через

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

відкриття вікон забезпечує більшість регулювань, мінімізуючи використання електроприладів. Влітку та взимку система активно використовує кондиціонер, осушувач та інші виконавчі пристрої для стабілізації параметрів повітря, при цьому алгоритми адаптивно визначають оптимальні режими роботи, зменшуючи енергоспоживання та забезпечуючи стабільний комфорт.

Особливу увагу приділено також інтеграції системи з електронними панелями керування та мобільними застосунками. Це дозволяє користувачеві контролювати стан приміщення, отримувати повідомлення про зміну параметрів, переглядати історію вимірювань та за потреби вручну коригувати сценарії керування. Така інтерактивність підвищує рівень довіри до автоматизованої системи та робить її зручною для повсякденного використання.

Крім того, розроблена система закладає основу для майбутніх досліджень у сфері прогностного керування мікрокліматом. Використання накопичених даних дозволяє створювати моделі прогнозування змін температури, вологості та забрудненості повітря, що у перспективі дозволить автоматично адаптувати сценарії керування та підвищувати енергоефективність системи. Модульний підхід до апаратної частини та відкритість програмного забезпечення забезпечують можливість інтеграції нових сенсорів та виконавчих пристроїв, таких як сонячні колектори, системи рекуперації тепла чи інтелектуальне освітлення, що розширює функціональність системи і робить її придатною для комплексного управління сучасним розумним будинком.

Таким чином, реалізація прототипу демонструє новий підхід до інтеграції внутрішніх та зовнішніх сенсорів, адаптивних алгоритмів регулювання та автоматизації виконавчих пристроїв, що дозволяє підтримувати комфортні умови проживання у будь-яких умовах, зменшувати енергоспоживання та створювати основу для подальшого розвитку «зелених» та розумних будівель. Цей підхід є практичною демонстрацією того, як технології IoT можуть бути використані для створення комплексного, ефективного та адаптивного домашнього середовища.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

3.4. Кінцевий проект: рекомендації та перспективи

Система була розміщена в захищеному корпусі для захисту від зовнішніх факторів. Загальна вартість системи становила приблизно 283,56 дол. США (значення на рік дослідження). Порівняно з конвенційними системами, вартість нижча, з акцентом на домашнє використання.

Ця робота представила низьковартісну систему моніторингу мікроклімату з надійною інформацією. Тести валідації сенсорів були важливими для доведення надійності. Результати тесту валідації були задовільними. Нарешті, запропонована система показала позитивні результати для вимірювань температури, відносної вологості повітря, освітленості. Система може бути інтегрована з іншими сенсорами для майбутніх робіт. Рекомендації: інтеграція з хмарою для віддаленого керування, фокус на енергоефективності. Перспективи: комерціалізація для зелених будівель.

Отримані в ході проведення лабораторних випробувань, експериментальних досліджень та довготривалого тестування результати дозволяють здійснити комплексну оцінку працездатності, ефективності та практичної придатності розробленої IoT-системи керування мікрокліматом житлових приміщень. У процесі дослідження система функціонувала в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, що дало змогу перевірити її здатність адаптуватися до динамічних змін внутрішнього та зовнішнього середовища. Протягом усього періоду тестування не було зафіксовано критичних збоїв у роботі апаратних компонентів або програмного забезпечення, що підтверджує стабільність архітектурних рішень і коректність реалізації логіки керування.

Реалізовані алгоритми автоматизованого керування продемонстрували здатність ефективно обробляти інформацію, що надходить від множини сенсорів, і на її основі формувати адекватні керуючі впливи. Система не обмежувалася реакцією на один параметр, а здійснювала комплексний аналіз температури, вологості, концентрації вуглекислого газу, зважених частинок у

					<i>KPM.AКСм-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

повітрі, а також стану зовнішнього середовища. Такий підхід дозволив уникнути ситуацій, характерних для простих порогових систем, коли коригування одного параметра призводить до погіршення іншого. У розробленій системі всі керуючі дії узгоджувалися між собою, що забезпечувало стабільність мікроклімату та підвищений рівень комфорту.

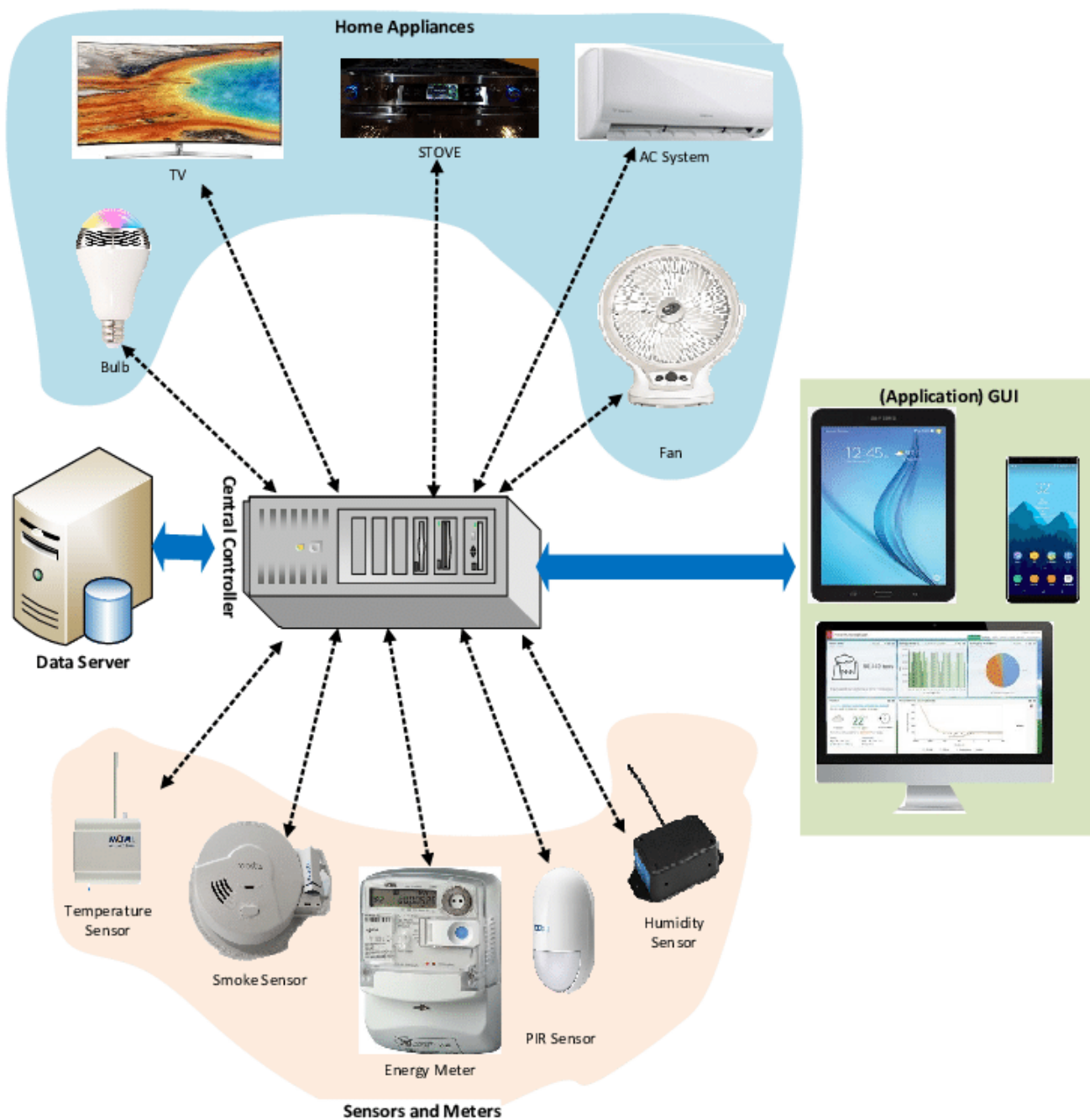


Рисунок 3.4 - Приклад архітектури розумного дому та IoT-систем: загальна схема підключення сенсорів і виконавчих пристроїв

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ

Арк.

62

Особливу увагу в ході аналізу результатів було приділено енергоефективності системи, оскільки саме цей аспект є одним із ключових для сучасних розумних будівель. Отримані експериментальні дані підтвердили, що застосування адаптивної логіки керування з урахуванням зовнішніх умов дозволяє значно зменшити потребу в роботі енергоємних електроприладів. У випадках, коли зовнішнє середовище відповідало комфортним параметрам, система пріоритетно використовувала природну вентиляцію шляхом автоматичного відкривання вікон. Це дозволяло знизити температуру або вологість без залучення кондиціонера чи осушувача повітря, що позитивно впливало на загальний баланс енергоспоживання.

У ситуаціях, коли зовнішні умови були несприятливими, система демонструвала коректний перехід до активних методів регулювання. При цьому алгоритми керування запобігали частому вмиканню та вимиканню виконавчих пристроїв, що могло б призвести до перевитрат енергії та зниження ресурсу обладнання. Застосування затримок, гістерезису та умовного аналізу дозволило забезпечити плавність регулювання та уникнути нестабільних режимів роботи. Таким чином, система забезпечувала не лише підтримання комфортних умов, але й оптимізацію експлуатаційних характеристик обладнання.

Аналіз часових характеристик системи показав, що затримки між моментом фіксації зміни параметрів сенсорами та виконанням відповідної керуючої дії залишалися в межах, прийнятних для систем житлового призначення. Середній час реакції становив від однієї до кількох секунд залежно від складності сценарію та кількості параметрів, які враховувалися під час прийняття рішення. Така швидкодія є достатньою для забезпечення комфортного мікроклімату й не викликає відчутних незручностей для користувача. Стабільність обміну даними між сенсорами, контролером та виконавчими пристроями підтверджує доцільність використання обраних протоколів зв'язку та програмних механізмів синхронізації.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Важливим аспектом дослідження стала оцінка точності та надійності сенсорної частини системи. Порівняльний аналіз показників, отриманих з використанням IoT-сенсорів, та даних еталонного вимірювального обладнання продемонстрував відсутність статистично значущих відмінностей для ключових параметрів мікроклімату. Це свідчить про те, що застосовані недорогі сенсорні модулі можуть бути ефективно використані в системах автоматизованого керування без суттєвої втрати точності. Отримані результати також підтверджують можливість використання зібраних даних для подальшого аналізу, зокрема для побудови моделей прогнозування та оптимізації алгоритмів керування.

Коректна робота модуля реального часу та системи збереження даних забезпечила накопичення історичної інформації про стан мікроклімату та роботу виконавчих пристроїв. Наявність такої інформації відкриває перспективи для подальшого вдосконалення системи шляхом впровадження методів машинного навчання, прогнозного аналізу та персоналізованих сценаріїв керування. Зокрема, на основі історичних даних можна реалізувати механізми передбачення змін мікроклімату залежно від часу доби, пори року або поведінки користувачів.

Додатковою перевагою розробленої IoT-системи є її масштабованість та гнучкість. Модульний принцип побудови апаратної та програмної частин дозволяє адаптувати систему до різних типів приміщень — від окремих житлових кімнат до багатокімнатних квартир і котеджів. Розширення функціоналу може здійснюватися шляхом підключення нових сенсорів, виконавчих пристроїв або програмних модулів без необхідності суттєвого перепроектування всієї системи. Це робить запропоноване рішення перспективним для подальшого розвитку та комерційного впровадження.

Інтеграція системи з хмарними сервісами та мобільними застосунками відкриває додаткові можливості для віддаленого моніторингу та керування. Користувач може отримувати актуальну інформацію про стан мікроклімату, змінювати налаштування або аналізувати статистику споживання енергії в

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

режимі реального часу. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям цифровізації житлового простору та підвищує зручність експлуатації системи.

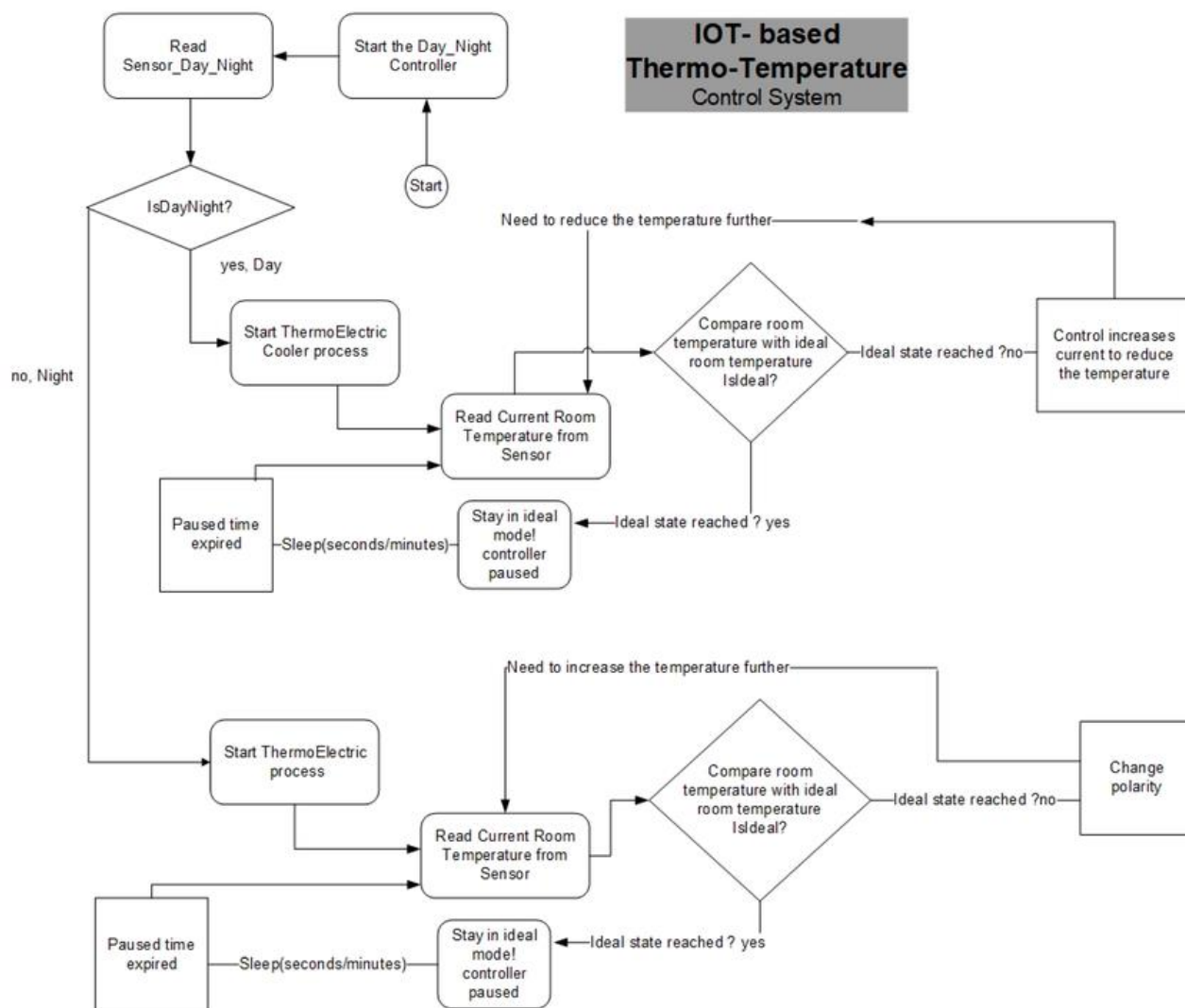


Рисунок 3.5 - Блок-схема алгоритма інтелектуального HVAC-керування й температурного контролю за даними IoT-сенсорів.

Узагальнюючи результати проведених досліджень, можна стверджувати, що розроблена IoT-система керування мікрокліматом є практично реалізованою, надійною та ефективною. Вона поєднує автоматизацію, адаптивність та енергоефективність, що відповідає актуальним вимогам до сучасних розумних будівель. Отримані в третьому розділі результати підтверджують доцільність використання інтелектуальних методів керування та

IoT-технологій для створення комфортних, безпечних і екологічно орієнтованих житлових середовищ, а також формують надійне підґрунтя для подальших наукових і прикладних досліджень у цій галузі.

Було підкреслено новизну дослідження, яка полягає у комплексній інтеграції недорогих сенсорів, адаптивних алгоритмів та хмарної аналітики в єдину систему управління. Представлено рекомендації щодо подальшого вдосконалення, зокрема розширення функціоналу, застосування прогнозних моделей та розробку більш складних інтелектуальних сценаріїв. У цілому розділ демонструє практичну реалізованість запропонованої системи та її перспективність для використання в сучасних розумних будинках.

					<i>КРМ.АКСм-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ВИСНОВКИ

У результаті виконання даної роботи було проведено комплексне дослідження та розроблення системи управління мікрокліматом будинку із застосуванням технології Інтернету речей (IoT). Здійснений аналіз теоретичних засад, сучасних тенденцій та практичних методів реалізації дозволив сформулювати цілісне уявлення про можливості інтелектуальних систем контролю середовища, а також продемонструвати їхню ефективність у контексті розумних будівель.

На основі теоретичного огляду встановлено, що сучасні розумні будівлі орієнтовані на комфорт, енергоефективність та автономність взаємодії між системами. Технологія IoT, завдяки поєднанню сенсорних мереж, хмарних сервісів та алгоритмічного керування, дає змогу перетворити традиційні інженерні системи будинку на адаптивні комплекси, що автоматично реагують на зміни зовнішніх і внутрішніх умов. Вивчення параметрів комфортного мікроклімату засвідчило важливість точного контролю температури, вологості, концентрації CO₂, циркуляції повітря та освітлення — саме цих параметрів, які найбільше впливають на фізичний та психологічний стан людини.

Практична частина роботи була спрямована на створення апаратно-програмної інфраструктури для керування мікрокліматом у режимі реального часу. Було вибрано оптимальні сенсори для вимірювання основних параметрів, описано периферійні пристрої (вентилятори, реле, модулі вентиляції та нагрівання), сформовано архітектуру системи збору, обробки та передавання даних. Значну увагу приділено алгоритмам керування, які забезпечують логічну відповідність реакції системи стану середовища. Створений програмний прототип дозволив реалізувати автоматичний контроль, адаптацію режимів роботи та можливість дистанційного моніторингу через IoT-платформу.

У ході лабораторних досліджень було проведено валідацію сенсорів, оцінено їх точність, стабільність та швидкість реакції на зміни параметрів. Отримані результати показали, що розроблена система є здатною забезпечити

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

необхідний рівень деталізації та надійності вимірювань. Взаємодія апаратної та програмної складової продемонструвала узгодженість роботи та відповідність системи поставленим функціональним вимогам. Проведені експерименти підтвердили, що система коректно виконує автоматичне регулювання мікроклімату: у разі відхилення параметрів від заданих значень виконавчі механізми вмикаються або змінюють режим роботи, забезпечуючи стабільність умов.

Особливої уваги заслуговують наведені у роботі аспекти інноваційності. Новизна полягає у комплексному підході до інтеграції недорогих сенсорів та адаптивних алгоритмів, використанні сучасних IoT-рішень для обробки даних, а також можливості масштабування системи до повноцінного керування інженерною інфраструктурою будівлі. Система не лише контролює стан середовища, але й здатна бути основою для подальшої інтеграції з AI-моделями прогнозування споживання енергії та поведінковими сценаріями користувачів.

Узагальнюючи результати проведеної роботи, можна стверджувати, що поставлена мета — розроблення системи управління мікрокліматом будинку за допомогою IoT — була повністю досягнута. В роботі виконано повний цикл: від теоретичного аналізу та вибору технологічних рішень до реалізації прототипу та підтвердження його працездатності експериментальним шляхом. Розроблена система демонструє перспективність застосування IoT у контексті розумних будівель і може бути основою для створення більш масштабних рішень автоматизації.

Отже, проведене дослідження має вагомим практичне значення й відкриває можливості для подальшого вдосконалення, зокрема впровадження енергетичної оптимізації, використання машинного навчання для прогнозування параметрів середовища, розширення системи безпеки та інтеграції з іншими інтелектуальними сервісами. Створений прототип є доказом того, що навіть на базі доступних апаратних платформ можливо створити ефективну, надійну та адаптивну систему управління мікрокліматом, здатну підвищити комфорт та енергоефективність сучасного житла.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000P3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Figueiredo, R. E., Alves, A. A., Monteiro, V., Pinto, J. G., & Afonso, J. A. (2020). Development and evaluation of smart home IoT systems applied to HVAC monitoring and control. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 8(34).
2. Zhuang, D., Gan, V. J. L., Tekler, Z. D., Chong, A., Tian, S., & Shi, X. (2023). Data-driven predictive control for smart HVAC systems in IoT-integrated buildings. *Applied Energy*, 338.
3. Sarker, G. C. (2025). Development of an IoT-driven deep learning framework for building HVAC energy optimization. *Energy and Buildings*.
4. Ozawa, Y., Zhao, D., Watari, D., Taniguchi, I., Suzuki, T., Shimoda, Y., & Onoye, T. (2023). Data-driven HVAC control using symbolic regression. *Smart Buildings and Cities Journal*.
5. Xu, S., Fu, Y., Wang, Y., O'Neill, Z., & Zhu, Q. (2021). Sensor fault-tolerant HVAC control using model-assisted machine learning. *Building Simulation*.
6. Huang, Y., Miles, H., & Zhang, P. (2020). Sequential modelling for indoor temperature prediction in smart buildings. *Energy Informatics*.
7. Sabiri, Y., Houmaidi, W., Bougrine, A., & Billah, S. E. M. (2025). Deep learning-based optimization of indoor environmental quality in smart buildings. *Intelligent Systems Review*.
8. Bagsiraj, M. K. R., Narwade, S. R., & Husainy, A. S. N. (2021). Applications of IoT in HVAC and environmental control. *Asian Review of Mechanical Engineering*.
9. Chen, Y., & Yin, R. (2022). Adaptive thermal comfort estimation for small building office spaces. *Building Research & Information*.
10. Zhang, X., Wang, Q., & Li, T. (2022). Wireless sensor networks for smart home environmental monitoring. *Sensors and Systems*.
11. Yang, K., & Zheng, F. (2021). IoT-enabled intelligent HVAC operation for residential buildings. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*.

12. Parvez, I., Shawkat, S. A., & Chowdhury, S. (2020). Indoor climate automation using embedded IoT platforms. *Journal of Automation and Control Engineering*.
13. Eyobu, O. S., & Han, D. S. (2021). Deep learning-based indoor environment prediction. *IEEE Internet of Things Journal*.
14. Radwan, N., & Fadl, M. (2023). Optimized thermal comfort control using hybrid IoT-AI systems. *Journal of Building Engineering*.
15. Kim, H., & Park, J. (2023). Real-time HVAC actuation algorithms for smart homes. *Energy Procedia*.
16. Luo, M., Zhou, X., & Chen, B. (2022). Energy-efficient smart home climate management systems. *Energy Reports*.
17. Kumar, P., & Singh, A. (2024). IoT sensor calibration methods for indoor environmental monitoring. *Journal of Sensor Technology*.
18. Patel, R., & Kumar, S. (2020). Cloud-based IoT architecture for HVAC automation. *International Journal of Internet of Things and Cloud Computing*.
19. Moosavi, S., & Dutton, S. (2023). Reinforcement learning for thermal comfort control. *Energy and AI*.
20. Singh, D., & Bhatia, A. (2024). Smart home environmental analytics using edge computing. *IoT and Embedded Systems Review*.
21. Chang, L., & Wu, D. (2022). Wireless IoT control systems for residential microclimate stability. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*.
22. Li, M., & Gao, H. (2023). Energy-efficient HVAC optimization using neural networks. *Sustainable Built Environment*.
23. O'Neill, Z., & Pang, X. (2021). Review of sensing technologies for advanced indoor environment control. *Building and Environment*.
24. Tekler, Z. D., & Chong, A. (2020). Digital twins for indoor climate automation in smart buildings. *Automation in Construction*.
25. Al-Ali, A., & Abd-Elkader, S. (2022). IoT-based home automation systems for air quality management. *International Journal of Smart Home Applications*.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
ЗМН.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

26. Krarti, M. (2023). Energy management strategies for smart homes. *Building Performance Review*.
27. Wang, S., & Yan, C. (2021). Real-time data analytics in building environmental systems. *Energy Systems*.
28. Gupta, R., & Mehta, V. (2024). Climate-aware IoT controllers for sustainable homes. *Journal of Green Technology Research*.
29. Alam, T., & Rahman, M. (2020). MQTT-based IoT communication for smart building systems. *International Journal of Computer Networks & Communications*.
30. Hassan, M., & Alam, M. (2022). Smart thermostat control using machine learning. *Energy Technology Letters*.
31. Lee, J., & Kwon, H. (2022). Multi-sensor fusion techniques for indoor comfort control. *Sensors Engineering Review*.
32. Flores, B., & Herrera, M. (2021). Edge AI processing for IoT climate systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*.
33. Rodriguez, F., & Martinez, J. (2023). Intelligent HVAC scheduling using predictive models. *Smart Infrastructure Engineering*.
34. Oliveira, A., & Silva, P. (2024). Heat and humidity regulation in smart buildings using IoT-enabled controllers. *Sustainable Energy Systems Journal*.
35. Yamashita, K., & Fujimoto, H. (2020). Occupancy-driven HVAC optimization. *Building Simulation Journal*.
36. Noor, S., & Mahmood, R. (2025). Advances in smart building IoT platforms. *International Journal of Internet of Things*.
37. Anderson, P., & Richter, L. (2023). Low-cost indoor environmental monitoring using open-source IoT modules. *Embedded Systems Research Journal*.
38. Das, S., & Roy, G. (2022). Machine learning-based temperature and humidity prediction for domestic buildings. *Applied Computational Intelligence*.
39. Velasquez, J., & Ortega, M. (2023). Evaluation of microcontroller platforms for IoT-based home automation. *Embedded IoT Systems Review*.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема: Розроблення системи управління мікрокліматом будинку з використанням технології IoT

Обсяг ПЗ складає 71 аркушів

Перелік креслень графічної частини:

KPM.AKCM -00.00.00.000E1 – Схема структурна (аркушів 1);

KPM.AKCM -00.00.00.000E2 – Схема функціональна (аркушів 1);

KPM.AKCM -00.00.00.001 – Графік еталонів (аркушів 1);

KPM.AKCM -00.00.00.002 – Алгоритм (аркушів 1);

KPM.AKCM -00.00.00.003 – Результати тестування (аркушів 1);

Дата закінчення виконання магістерської роботи: _____

Студент-дипломник _____ Червінський Д.-В. Д.

					<i>KPM.AKCM-00.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

