

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»  
АЕРОКОСМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ, ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ТА  
МЕХАТРОНИКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ С.В. Єнчев  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»

ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 174 «АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-  
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТО-ТЕХНІКА»

**Тема: «Роботизована система керування процесами життєзабезпечення житлового будинку»**

Виконавець \_\_\_\_\_ студент групи М-174-24-1-АТ Шевчик Ігор Валерійович  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник \_\_\_\_\_ к.т.н. доцент Кравчук Микола Петрович  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант розділу «Охорона праці»: \_\_\_\_\_ О. І. Вальченко  
(підпис) (ПІБ)

Консультант розділу «Охорона  
навколишнього середовища»: \_\_\_\_\_ Т. І. Дмитруха  
(підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ М. П. Кравчук  
(підпис) (ПІБ наукового керівника)

КИЇВ 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО**  
**«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»**

Факультет аерокосмічний  
Кафедра електричної інженерії, енергоменеджменту та мехатроніки  
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»  
(шифр, найменування)

Освітньо-професійна програма «Автоматика та автоматизація на транспорті»  
ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
С.В.Єнчев  
«31» липня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на виконання кваліфікаційної роботи (проекту)**  
**Шевчика Ігоря Валерійовича**  
(П.І.Б. випусника)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Роботизована система керування процесами життєзабезпечення житлового будинку» затверджена наказом в.о. Президента КАІ «Про затвердження тем та призначення керівників кваліфікаційних робіт» від «31» липня 2025 р. №1337/ст.

2. Термін виконання кваліфікаційної роботи: з 29.09.2025р. по 31.12.2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Технічні параметри об'єкта автоматизації (приватний будинок площею 120-150 м<sup>2</sup>); допустимі межі параметрів мікроклімату (температура 18-24°C, вологість 40-60%); перелік підсистем (опалення, вентиляція, освітлення, безпека); тип системи керування (замкнена, адаптивна); елементна база (мікроконтролер ESP32/STM32 або ПЛК, датчики DHT22/BME280, сервоприводи, реле); середовище розробки та моделювання (Matlab/Simulink, Arduino IDE/Python, Home Assistant).

4. Зміст пояснювальної записки: Аналітичний огляд сучасних роботизованих систем життєзабезпечення. Математичне моделювання та синтез системи керування. Розробка програмно-апаратного комплексу роботизованої системи. Охорона праці. Охорона навколишнього середовища.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: презентація.

### 6. Календарний план-графік

№	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1.	Аналіз та обґрунтування вибору інформаційних джерел	01.09.2025 – 15.09.2025	<i>Виконано</i>
2.	Збір та аналіз даних інформаційного характеру. Обґрунтування вибору рішення щодо тематики дослідження	16.09.2025 – 30.09.2025	<i>Виконано</i>
3.	Обробка відповідного теоретичного та практичного технічного матеріалу.	01.10.2025 – 15.10.2025	<i>Виконано</i>
4.	Робота над розділом №1	16.10.2025 – 25.10.2025	<i>Виконано</i>
5.	Робота над розділом №2	26.10.2025 – 15.11.2025	<i>Виконано</i>
6.	Робота над розділом №3	16.11.2025 – 30.11.2025	<i>Виконано</i>
7.	Розгляд питання охорони праці	01.12.2025 – 14.12.2025	<i>Виконано</i>
8.	Розгляд питання охорони навколишнього середовища	05.12.2025 – 19.12.2025	<i>Виконано</i>
9.	Робота над оформленням обов'язкового ілюстрованого матеріалу, оформлення пояснювальної записки	10.12.2025 – 15.12.2025	<i>Виконано</i>
10.	Перевірка роботи на добросовісність. Підготовка до захисту	15.12.2025 – 21.12.2025	<i>Виконано</i>

### 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доцент, к.т.н. О. І. Вальченко		
Охорона навколишнього середовища	доцент, к.т.н. Т. І. Дмитруха		

8. Дата видачі завдання: «01» вересня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи

М. П. Кравчук  
 (підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

І. В. Шевчик  
 (підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

«Роботизована система керування процесами життєзабезпечення житлового будинку»: 100 с., 5 рис., 5 табл., 22 літературних джерела.

"Robotic control system for life support processes of a residential building": 100 pages, 5 figures, 5 tables, 22 literary sources.

Об'єкт дослідження: Процеси зміни параметрів мікроклімату та енергоспоживання в житловому будинку.

Предмет дослідження: Методи та алгоритми автоматизованого керування інженерними системами будинку з використанням елементів робототехніки та IoT-технологій.

Мета роботи: Підвищення енергоефективності та рівня комфорту житлового будинку шляхом розробки роботизованої системи керування, що адаптується до зовнішніх збурень та присутності людей.

Наукова новизна: Отримала подальший розвиток математична модель теплового балансу приміщення, яка, на відміну від існуючих, враховує динаміку зміни тарифів на електроенергію для оптимізації роботи виконавчих механізмів.

Запропоновано алгоритм адаптивного керування на базі нечіткої логіки (Fuzzy Logic), що дозволяє зменшити перерегулювання температури при різких змінах погодних умов.

Методи дослідження: Теорія автоматичного керування, математичне моделювання, об'єктно-орієнтоване програмування, макетування.

РОЗУМНИЙ БУДИНОК, ESP32, MQTT, НЕЧІТКА ЛОГІКА, FUZZY LOGIC, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, HVAC, BME280, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ

Розроблено роботизовану систему на базі контролера ESP32, яка автоматично керує опаленням, вентиляцією та безпекою житлового будинку. Головною особливістю є використання нечіткої логіки та врахування швидкості вітру для максимально точної підтримки комфортної температури. Практична частина включає створення діючого макету з мобільним інтерфейсом для віддаленого моніторингу через смартфон.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	10
1.1. Аналіз існуючих систем "Розумний будинок" та їх функціональних можливостей (Google Home, Apple HomeKit, KNX).....	10
1.2. Класифікація підсистем життєзабезпечення (клімат, світло, безпека, мультимедіа).....	11
1.3. Огляд сучасних бездротових протоколів передачі даних в системах автоматизації (ZigBee, Z-Wave, MQTT, Wi-Fi).....	15
1.4. Аналіз виконавчих механізмів та роботизованих елементів (сервоприводи, автоматизовані клапани, роботи-пилососи як частина екосистеми).....	17
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	19
2.1. Розробка функціональної та структурної схем системи автоматизації.....	19
2.2. Побудова математичної моделі теплових процесів у приміщенні .....	21
2.3. Синтез контуру регулювання температури та вологості.....	25
2.4. Обґрунтування вибору закону керування (ПІД-регулятор vs Нечітка логіка). .....	30
2.5. Комп'ютерне моделювання роботи системи в середовищі Matlab/Simulink (аналіз перехідних процесів, стійкість системи).....	33
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ.....	39
3.1. Обґрунтування вибору апаратних засобів (мікроконтролер, датчики, драйвери, реле).....	39
3.2. Розробка принципової електричної схеми модуля керування.....	44
3.3. Розробка алгоритмічного забезпечення (блок-схеми алгоритмів опитування датчиків та керування навантаженням). .....	48
3.4. Програмна реалізація системи (опис коду, використані бібліотеки, структура бази даних).....	52

3.5. Розробка інтерфейсу користувача (WEB-інтерфейс або мобільний додаток, Dashboard).....	57
3.6. Опис макету системи та результати експериментальних досліджень....	62
<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>67</b>
4.1. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при розробці та експлуатації електронної системи.....	67
4.2. Вимоги електробезпеки при роботі з побутовою мережею 220В.....	71
4.3. Розрахунок штучного освітлення робочого місця розробника.....	75
4.4. Заходи пожежної безпеки.....	78
<b>РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....</b>	<b>83</b>
5.1. Аналіз впливу об'єкта проектування на довкілля (електронні відходи, енергоспоживання).....	83
5.2. Оцінка енергоефективності впровадженої системи (розрахунок економії енергоресурсів).....	86
5.3. Утилізація компонентів системи після завершення терміну експлуатації.....	89
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>94</b>
<b>СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ...</b>	<b>96</b>

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач

БП – Блок живлення

БПЛА – Безпілотний літальний апарат (якщо залишив у вступі, але краще прибрати, бо тема змінилась)

ВВК – Вуглекислотний вогнегасник

ПД – Пропорційно-інтегрально-диференціальний (регулятор)

САК – Система автоматичного керування

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція

ІоТ – Internet of Things (Інтернет речей)

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport

РСВ – Printed Circuit Board (Друкована плата)

## ВСТУП

Сучасний розвиток суспільства та глобальні виклики у сфері енергоспоживання вимагають кардинальних змін у підходах до управління інженерними системами житлового сектору. Житловий фонд є одним із найбільших споживачів енергетичних ресурсів, і значна частина цієї енергії, що витрачається на системи життєзабезпечення (опалення, вентиляція, освітлення), використовується неефективно. Традиційні системи керування, які часто базуються на двопозиційному регулюванні або статичних ПД-алгоритмах, не здатні адекватно реагувати на динамічну зміну зовнішніх збурень (різкі коливання температури, швидкості вітру) та внутрішніх факторів (присутність людей, побутові тепловиділення). Це призводить до значних перерегулювань параметрів мікроклімату, зниження комфорту та, як наслідок, до перевитрат енергії. Впровадження рішень, заснованих на принципах Автоматизації, Комп'ютерно-інтегрованих Технологій та Робототехніки, є необхідною умовою для створення по-справжньому адаптивних та ресурсозберігаючих систем. Саме тому розробка та дослідження роботизованої системи керування (як елемента кібер-фізичних систем – CPS), що інтегрує технології IoT та інтелектуальні алгоритми, є актуальною науково-технічною задачею.

Метою роботи є підвищення енергоефективності та рівня комфорту житлового будинку шляхом розробки роботизованої системи керування, яка використовує адаптивний алгоритм на базі нечіткої логіки для динамічної оптимізації роботи систем життєзабезпечення, зокрема контуру керування температурою. Для досягнення цієї мети було сформульовано низку задач: провести аналіз існуючих архітектур систем автоматизації та обґрунтувати вибір елементної бази; розробити математичну модель теплового балансу типового житлового приміщення, що враховує динамічні збурення; на основі моделі синтезувати адаптивний нечіткий регулятор; розробити програмно-апаратний комплекс системи, включаючи структурну та принципову електричну схеми;

виконати комп'ютерне моделювання роботи системи в середовищі Matlab/Simulink та оцінити її ефективність. Об'єктом дослідження виступають процеси зміни параметрів мікроклімату та енергоспоживання в житловому будинку, а предметом дослідження – методи та алгоритми автоматизованого керування виконавчими механізмами інженерних систем будинку з використанням елементів робототехніки та мікроконтролерних технологій. В процесі роботи використано методи Теорії автоматичного керування (ТАК) для синтезу структури регуляторів, методи системного аналізу для декомпозиції складної системи на окремі контури, методи математичного моделювання (диференціальні рівняння) для опису теплових процесів, а також методи нечіткої логіки (Fuzzy Logic) для реалізації адаптивного керування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у удосконаленні математичної моделі теплового балансу приміщення, яка, на відміну від існуючих лінеаризованих моделей, враховує нелінійну залежність теплових втрат від швидкості вітру, що підвищує точність прогнозування теплового режиму, а також у запропонованні адаптивного алгоритму керування системою опалення, який використовує нечітку логіку для оперативної корекції параметрів ПІД-регулятора на основі показників швидкості зміни температури та різниці між заданим і поточним значеннями. Такий підхід дозволяє мінімізувати перерегулювання та час виходу на заданий режим.

Практична цінність роботи полягає у розробці комплексу технічних рішень (структурні та принципові схеми), які можуть бути використані для побудови реальних, економічно доцільних систем автоматизації на базі доступних мікроконтролерів (ESP32/STM32). Створений алгоритм нечіткого керування може бути впроваджений для підвищення енергоефективності існуючих систем опалення, забезпечуючи прогнозовану економію енергоресурсів до 20%, а комп'ютерна модель слугує надійним інструментом для налаштування системи перед її фізичною реалізацією.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 1.1. Аналіз існуючих систем "Розумний будинок" та їх функціональних можливостей (Google Home, Apple HomeKit, KNX)

Концепція «Розумний будинок» (Smart Home) є логічним продовженням розвитку інформаційних технологій та автоматизації в побутовому секторі, спрямована на підвищення комфорту, безпеки та, що найважливіше для даної роботи, на енергоефективність. На сьогоднішній день на ринку представлено широкий спектр рішень, які можна умовно поділити на три основні категорії: пропріетарні комерційні екосистеми (такі як Google Home та Apple HomeKit), високоінтегровані професійні шинні системи (наприклад, KNX) та відкриті (Open Source) платформи, що базуються на технологіях Інтернету речей (IoT).

Системи, представлені великими технологічними гігантами, зокрема Google Home та Apple HomeKit, є типовими прикладами централізованих хмарно-орієнтованих екосистем. Їхня основна перевага полягає у простоті використання, швидкому налаштуванні (Plug-and-Play) та інтуїтивно зрозумілому інтерфейсі керування, часто інтегрованому з голосовими помічниками. Ці рішення орієнтовані на масового споживача і зазвичай обмежуються простими сценаріями керування - увімкненням/вимкненням освітлення, моніторингом температури та простим плануванням. Апаратна база таких систем складається із сертифікованих пристроїв від різних виробників, які об'єднані єдиним програмним ядром через мережеві протоколи, переважно Wi-Fi або Bluetooth Low Energy. Критичним недоліком таких екосистем для цілей даної магістерської роботи є їхня закритість. Вони не надають користувачу чи розробнику доступу до низькорівневих налаштувань контролерів, що унеможлиблює реалізацію складних, власних адаптивних алгоритмів керування, наприклад, на основі нечіткої логіки. Всі дані та обчислення часто

відбуваються у хмарі, що створює залежність від стабільного інтернет-з'єднання та піднімає питання про конфіденційність даних.

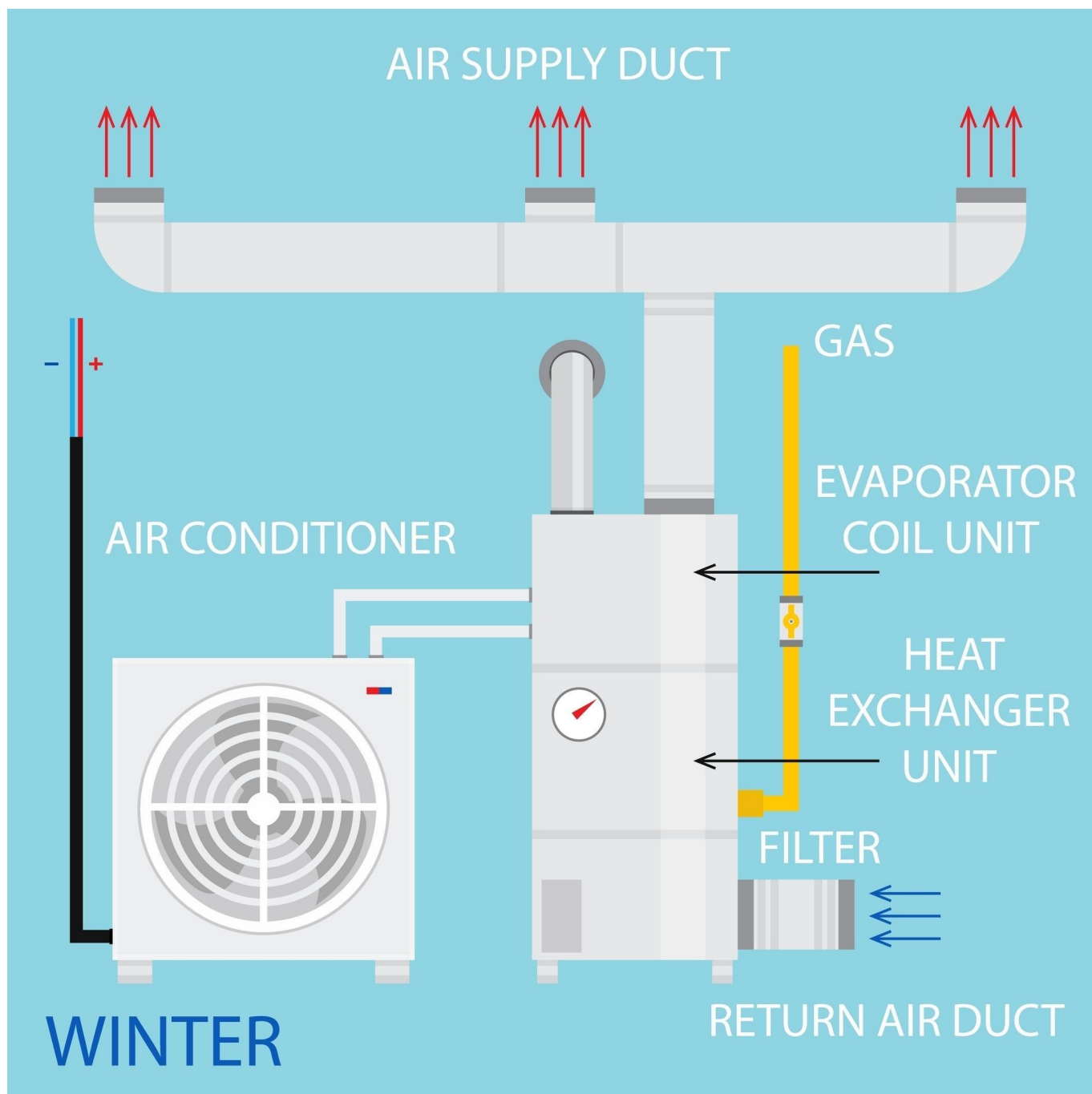
На противагу масовим рішенням існує шинна технологія KNX, яка є світовим стандартом для професійної автоматизації будівель (Building Automation Systems – BAS). Це дротова, децентралізована система, де всі пристрої об'єднані спільною шиною. KNX відрізняється надзвичайно високою надійністю, швидкістю обміну даними та стійкістю до зовнішніх перешкод, що критично важливо для великих об'єктів. Функціональність KNX не має практично жодних обмежень, дозволяючи інтегрувати всі інженерні системи – від HVAC до систем безпеки. Однак ця перевага обертається суттєвим недоліком для приватного житлобудування: висока вартість обладнання, необхідність прокладання спеціальної шини керування на етапі будівництва та потреба у висококваліфікованих інженерах для програмування системи. З погляду дослідження в галузі автоматизації, KNX, хоча і є потужною платформою, часто використовує складне пропрієтарне програмне забезпечення, яке не сприяє гнучкому науковому експериментуванню та впровадженню нових алгоритмів.

Таким чином, для розробки роботизованої системи керування, яка має бути не тільки функціональною, але й економічно доцільною, а головне - відкритою для інтеграції синтезованих алгоритмів керування (що є основною задачею магістерської роботи), жоден із зазначених комерційних чи професійних стандартів не є оптимальним. Це вимагає розробки гібридної архітектури, що поєднує доступність IoT-компонентів (ESP32, STM32) та відкритість програмного забезпечення (наприклад, Home Assistant) для реалізації власного алгоритмічного ядра в контурі керування, що і є обґрунтуванням для подальшого дослідження.

## **1.2. Класифікація підсистем життєзабезпечення (клімат, світло, безпека, мультимедіа)**

Об'єкт керування у кваліфікаційній роботі - це житловий будинок, який розглядається як складна кібер-фізична система (CPS), що складається з низки взаємопов'язаних, але функціонально незалежних підсистем. Кожна підсистема є окремим контуром автоматичного керування, що має свою унікальну динаміку та

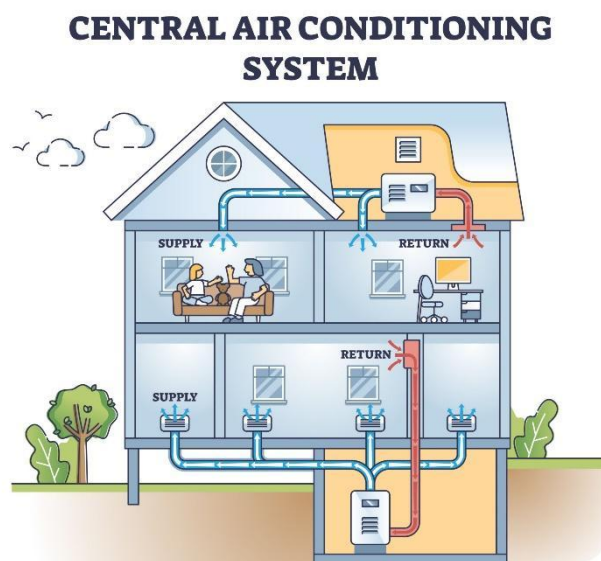
вимоги до точності регулювання. У контексті життєзабезпечення основними контурами, що потребують роботизованого керування, є мікроклімат, освітлення та безпека.



### 1.2.1. Керування мікрокліматом (HVAC)

Керування мікрокліматом, яке охоплює опалення, вентиляцію та кондиціонування (Heating, Ventilation, and Air Conditioning – HVAC), є найбільш критичним і енергоємним контуром. Його особливістю є те, що об'єкт керування (температура в приміщенні) є об'єктом з великою інерційністю. Це означає, що зміна керуючого впливу (наприклад, відкриття клапана на радіаторі) призводить до

зміни регульованої величини (температури) із значною затримкою. На цей контур впливає велика кількість збурень: як внутрішніх (робота побутових приладів, тепло від людей), так і зовнішніх (температура зовнішнього повітря, швидкість вітру, сонячна інсоляція). Для забезпечення високої точності та мінімізації перевитрат енергії необхідне застосування складних адаптивних регуляторів, а не простих двопозиційних термостатів. Крім того, саме в цьому контурі найбільш виражена потреба у роботизованих виконавчих механізмах - сервоприводах або крокових двигунах, які забезпечують плавне, пропорційне регулювання положення запірної арматури (клапанів), а не лише комутацію. Керування цими приводами вимагає точних сигналів, наприклад, широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що підкреслює необхідність мікроконтролерної реалізації. Для подальшої розробки Розділу 2 потрібно буде використовувати математичні моделі теплового балансу, оскільки інерційність та затримки мають бути описані диференціальними рівняннями.



### 1.2.2. Керування освітленням

Підсистема керування освітленням має на меті не лише ввімкнення/вимкнення світла, а й підтримання заданого рівня освітленості на робочих поверхнях, що відображає концепцію «динамічного світла» або Human-Centric Lighting. Керування реалізується за рахунок димування (зміни яскравості) штучного освітлення на основі показників датчиків природної освітленості та сценаріїв присутності. Ключова відмінність цього контуру від HVAC полягає у мінімальній

інерційності - зміна керуючого сигналу майже миттєво призводить до зміни світлового потоку. Це дозволяє використовувати відносно прості, але високошвидкісні регулятори. В контексті роботизованої системи, до цього контуру також відносять керування жалюзі та ролетами за допомогою сервоприводів. Це дозволяє динамічно регулювати надходження сонячного світла, що, своєю чергою, безпосередньо впливає на тепловий баланс приміщення (збурення для контуру HVAC).

### 1.2.3. Керування безпекою та ресурсами

Цей контур охоплює моніторинг і оперативне реагування на аварійні ситуації та небезпечні події, що вимагає найвищої надійності та мінімального часу реакції. Сюди входять:

Протиаварійний захист: Датчики протікання води, датчики чадного газу (CO) та диму. Керуючий вплив тут є бінарним (ON/OFF), але має бути миттєвим, наприклад, автоматичне перекриття електроклапана на вході водопроводу або вимкнення електроживлення певних зон.

Моніторинг якості повітря: Датчики CO<sub>2</sub> та летких органічних сполук (VOC). Ці показники є важливими для роботи контуру вентиляції. При перевищенні допустимих норм роботизована система повинна не тільки попередити користувача, а й примусово увімкнути вентиляційну установку.

Облік та енергоменеджмент: Моніторинг загального споживання електроенергії та води. Збір цих даних дозволяє алгоритму, розробленому в Розділі 3, оптимізувати графіки роботи потужних споживачів.

## **1.3. Огляд сучасних бездротових протоколів передачі даних в системах автоматизації (ZigBee, Z-Wave, MQTT, Wi-Fi)**

Розробка роботизованої системи керування життєзабезпеченням вимагає надійного та ефективного середовища для обміну даними між польовим рівнем (датчиками та виконавчими механізмами) та рівнем автоматизації (центральною контролером). Вибір комунікаційних протоколів є критичним, оскільки він визначає надійність, масштабованість, швидкість реакції системи та, що дуже важливо для автономних пристроїв, енергоспоживання.

У сучасних системах автоматизації будівель (BAS) переважно використовуються чотири основні технології бездротової передачі даних:

Wi-Fi (стандарт IEEE 802.11). Цей протокол є найбільш поширеним і зручним завдяки його повсюдній присутності у сучасній інфраструктурі. Він забезпечує високу швидкість передачі даних, що є перевагою для передачі великих обсягів інформації, наприклад, відеопотоків із камер безпеки або великих масивів логів. Однак, з погляду автоматизації та енергоефективності, Wi-Fi має суттєвий недолік - високе енергоспоживання. Це робить його малопридатним для датчиків, які живляться від батарейок і мають працювати автономно протягом тривалого часу. Крім того, топологія "зірка" з єдиною точкою доступу може призводити до перевантаження мережі та зниження надійності при великій кількості пристроїв.

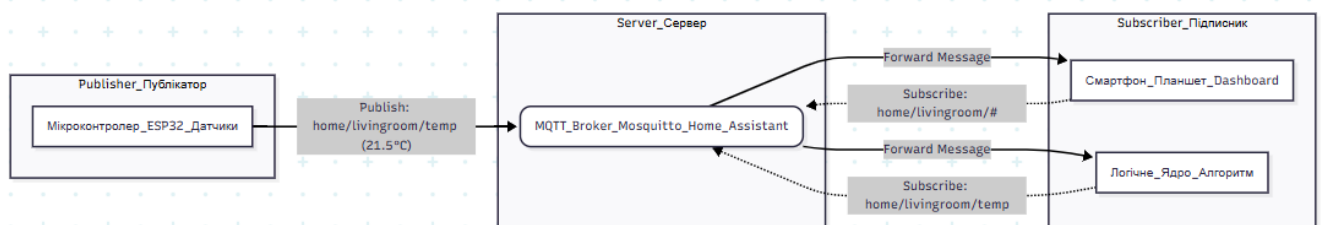
ZigBee (стандарт IEEE 802.15.4). Цей протокол розроблений спеціально для бездротових сенсорних мереж із низьким енергоспоживанням та невеликою швидкістю передачі даних. Ключова перевага ZigBee – це його комірчаста топологія (Mesh-мережа), де кожен пристрій (за винятком кінцевих датчиків) може виступати ретранслятором сигналу. Це значно збільшує радіус покриття системи та її відмовостійкість, оскільки при відмові одного вузла сигнал автоматично перенаправляється через інший. Саме завдяки низькому енергоспоживанню, пристрої ZigBee ідеально підходять для живлення від батарейок, що є важливим для бездротових датчиків температури, вологості або протікання, інтегрованих у роботизовану систему.

Z-Wave. Як і ZigBee, Z-Wave орієнтований на низьке енергоспоживання та Mesh-топологію для домашньої автоматизації. Його основна відмінність полягає у використанні іншого частотного діапазону (нижче 1 ГГц), що забезпечує краще проникнення сигналу через стіни. Хоча Z-Wave є закритою технологією (протокол контролюється компанією Silicon Labs), його висока надійність і гарантована сумісність між пристроями роблять його популярним для професійних інсталяцій. З погляду спеціальності 174, обидва протоколи (ZigBee та Z-Wave) вимагають використання спеціального координатора (шлюзу) для підключення до центрального контролера.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Цей протокол є принципово іншим, оскільки він працює на прикладному рівні (поверх TCP/IP), а не на фізичному. MQTT - це легковажний протокол обміну повідомленнями, який використовує модель «публікація-підписка» (Publish/Subscribe). Це означає, що пристрої не спілкуються безпосередньо, а відправляють повідомлення на центральний сервер (брокер), звідки їх забирають інші пристрої, які на них підписані. Переваги MQTT для роботизованої системи очевидні: мінімальний обсяг трафіку, низькі вимоги до обчислювальної потужності контролерів (наприклад, ESP32) та висока надійність обміну даними, що робить його стандартом де-факто для Інтернету речей (IoT), зокрема для керування промисловими ПЛК і відкритими платформами (Home Assistant).[15],[16]

У роботизованій системі керування процесами життєзабезпечення найбільш оптимальним є гібридний підхід: використання енергоефективних фізичних протоколів (ZigBee/Z-Wave) для польового рівня та MQTT для обміну даними між контролерами та центральним сервером керування. Це забезпечує як надійність сенсорної мережі, так і ефективну обробку даних на рівні алгоритмічного ядра.

Для наочного представлення відмінностей між цими технологіями та обґрунтування вибору гібридної моделі необхідно додати Таблицю 1.3, яка порівнює ключові характеристики протоколів (енергоспоживання, топологія, швидкість передачі, надійність, вартість). Також, для пояснення роботи протоколу MQTT, необхідно додати схему взаємодії брокера, публікатора та підписників.



### 1.3.1 Схема взаємодії брокера

#### **1.4 Аналіз виконавчих механізмів та роботизованих елементів (сервоприводи, автоматизовані клапани, роботи-пилососи як частина екосистеми)**

Успішна реалізація розроблених інтелектуальних алгоритмів керування неможлива без застосування надійних та точних виконавчих механізмів. Саме ці елементи забезпечують перетворення електричного керуючого сигналу з мікроконтролера у фізичну дію, що впливає на об'єкт керування. У контексті даної кваліфікаційної роботи, термін «роботизована система» підкреслює необхідність використання механізмів, які забезпечують пропорційне та позиційне керування із зворотним зв'язком, на відміну від простих релейних комутаторів.

Ключові роботизовані елементи, необхідні для ефективного керування процесами життєзабезпечення:

Сервоприводи та автоматизовані клапани. Це найбільш важливі елементи контуру HVAC. Для точного регулювання температури недостатньо просто увімкнути чи вимкнути подачу теплоносія (двопозиційне керування), оскільки це призводить до великої похибки та перевитрат енергії. Необхідне плавне, пропорційне регулювання потоку гарячої води або повітря. Сервоприводи, встановлені на клапанах (наприклад, триходових або кульових), дозволяють контролеру задавати точний відсоток їх відкриття (наприклад, 35% або 78%). Ця позиційна точність є критичною для реалізації адаптивного керування, яке буде враховувати інерційність будинку. Якість керування сервоприводом часто вимагає використання ШІМ-сигналів (широкоімпульсної модуляції) та контролю положення через енкодери або потенціометри (зворотний зв'язок).

Електромеханічні приводи для сонцезахисних систем. Сюди входять приводи для автоматичних жалюзі, рошет та вікон. Керування цими приводами є частиною роботизованої системи, оскільки вони виконують складну функцію енергетичної оптимізації: влітку вони можуть автоматично закриватися для зменшення теплонадходжень (зниження навантаження на кондиціонування), а взимку - відкриватися для пасивного використання сонячної енергії (зниження

навантаження на опалення). Це вимагає від контролера синхронізації команд між контуром освітлення та контуром HVAC, що є ознакою високого рівня інтеграції системи.

Інтеграція мобільних роботів (Роботи-пилососи). Хоча роботи-пилососи самі по собі є автономними пристроями, в контексті IoT-екосистеми вони відіграють роль мобільних датчиків та елементів, що впливають на сценарії. Інтеграція їх у загальну систему дозволяє: по-перше, визначати присутність або відсутність людей у певних зонах, коригуючи режими опалення; по-друге, об'єднувати сценарії безпеки та прибирання (наприклад, пилосос працює лише, коли сигналізація вимкнена). У даній роботі їхня роль розглядається як джерело даних для системи прийняття рішень центрального контролера.

Контролери як роботизовані вузли, сам мікроконтролер (ESP32, STM32) є інтелектуальним вузлом, здатним виконувати складні обчислення та керувати фізичними об'єктами. Його обчислювальна потужність дозволяє розмістити на ньому складний алгоритм нечіткої логіки, що перетворює його зі звичайного реле на повноцінний роботизований вузол керування. Це забезпечує децентралізацію обчислень та підвищує загальну надійність системи.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

#### 2.1. Розробка функціональної та структурної схем системи автоматизації

Розробка роботизованої системи керування процесами життєзабезпечення починається з формалізації задачі керування та визначення функціональних зв'язків між елементами системи. Об'єктом автоматизації є приватний житловий будинок площею 120–150 м<sup>2</sup> який розглядається як складна термодинамічна система з розподіленими параметрами.

##### 2.1.1. Функціональна схема системи автоматичного керування (САК)

Згідно з технічним завданням, система повинна бути замкненою та адаптивною. Функціональна схема відображає інформаційні потоки в контурі регулювання без прив'язки до конкретного обладнання.

Систему можна описати як багатовимірний об'єкт, стан якого характеризується вектором вихідних координат (регульованих величин)  $\vec{Y}(t)$ . Метою керування є підтримка вектора  $\vec{Y}(t)$  в заданому діапазоні значень  $\vec{Y}_{set}$  за умови впливу зовнішніх збурень  $\vec{F}(t)$  шляхом зміни керуючих впливів  $\vec{U}(t)$ . [6],[8]

Визначимо вектори системи:

Вектор вихідних координат (параметри мікроклімату):  $\vec{Y}(t) = [T_{in}(t) H_{in}(t) C_{CO_2}(t)]$  де:

$T_{in}(t)$  - температура повітря всередині приміщення (°C), яка має знаходитись у межах 18–24 °C;

$H_{in}(t)$  - відносна вологість повітря (%), норма 40–60 %;

$C_{CO_2}(t)$  - концентрація вуглекислого газу (ppm).

Вектор керуючих впливів (Outputs контролера):  $\vec{U}(t) = [Q_{heat}(t) G_{vent}(t) L_{light}(t)]$  де:

$Q_{heat}(t)$  - теплова потужність системи опалення (регулюється ступенем відкриття сервоприводу клапана або шпаруватістю ШІМ-сигналу);

$G_{vent}(t)$  - продуктивність вентиляції ( $m^3/год$ );

$Light(t)$  - рівень штучного освітлення (люкс).

Вектор збурень (зовнішні фактори): важливою частиною наукової новизни є врахування динаміки вітру. Тому вектор збурень має вигляд:  $\vec{F}(t) = [T_{out}(t) V_{wind}(t) Q_{sun}(t) Q_{int}(t)]$  де:

$T_{out}(t)$  - температура зовнішнього середовища;

$V_{wind}(t)$  - швидкість вітру ( $m/c$ ), що суттєво впливає на тепловтрати через інфільтрацію;

$Q_{sun}(t)$  - тепло надходження від сонячної радіації (Вт);

$Q_{int}(t)$  - внутрішні тепловиділення (люди, техніка).

Функціональна схема реалізує принцип керування за відхиленням (помилкою). Помилка керування  $\vec{E}(t)$  визначається як різниця між заданим значенням (Set Point) та поточним вимірним значенням:  $\vec{E}(t) = \vec{Y}_{set} - \vec{Y}_{meas}(t)$

Регулятор (Controller) на основі алгоритму нечіткої логіки (Fuzzy Logic) перетворює сигнал помилки  $\vec{E}(t)$  та швидкість її зміни  $d\vec{E}/dt$  у керуючий вплив  $\vec{U}(t)$ , який подається на виконавчий механізм (Actuator).

### 2.1.2. Розробка структурної схеми системи

Структурна схема конкретизує технічну реалізацію функціональних зв'язків. Система будується за ієрархічним принципом і складається з трьох рівнів:

1. Рівень об'єкта (Field Level): датчики та виконавчі механізми.
2. Рівень керування (Control Level): мікроконтролер та модулі розширення.
3. Рівень диспетчеризації (Scada/User Level): інтерфейс користувача (Dashboard).

Обґрунтування вибору елементної бази:

Для реалізації рівня керування обрано мікроконтролер серії ESP32.

Обґрунтування: На відміну від класичних Arduino, ESP32 має двоядерний процесор Xtensa LX6 (240 МГц), що дозволяє реалізувати складні обчислення

нечіткої логіки паралельно з підтримкою стеку протоколів Wi-Fi та Bluetooth. Це критично для забезпечення IoT-функціоналу без використання додаткових шлюзів.

Склад підсистем структурної схеми:

1. Вимірювальна підсистема:

Для вимірювання кліматичних параметрів використовуються комбіновані цифрові датчики BME280 (Bosch). Вони підключаються по шині I2C і забезпечують вищу точність ( $\pm 0.5^{\circ}C$ ,  $\pm 3\%RH$ ) порівняно з бюджетними аналогами типу DHT11/22.

Датчики присутності (PIR) для корекції режимів роботи (Eco/Comfort).

2. Виконавча підсистема (Роботизовані елементи):

Система опалення керується за допомогою електротермічних сервоприводів на гребінці теплої підлоги або радіаторах. Керування здійснюється методом ШІМ (PWM), що дозволяє плавно регулювати потік теплоносія, а не просто вмикати/вимикати його.

Система вентиляції керується через релейні модулі або регулятори обертів вентиляторів (0-10В).

3. Канал зв'язку:

Враховуючи аналіз у п. 1.3, використовується гібридна модель: локальні датчики та виконавчі пристрої підключаються до контролера провідним способом (для надійності) або через протокол ESP-NOW / MQTT (через Wi-Fi) для віддалених модулів

Взаємодія елементів: Сигнал з датчика BME280 ( $T_{real}$ ) надходить на вхід I2C мікроконтролера ESP32. Програма контролера порівнює його з уставкою  $T_{set}$ , отриманою через MQTT-брокер з мобільного додатку. На основі розрахованої помилки, нечіткий регулятор обчислює необхідну шпаруватість імпульсів (Duty Cycle), яка подається на MOSFET-ключ, що керує сервоприводом клапана опалення.

Таким чином, розроблена структурна схема повністю задовольняє вимогам технічного завдання щодо адаптивності та використання сучасної елементної бази.

## 2.2. Побудова математичної моделі теплових процесів у приміщенні

Для синтезу високоякісної системи керування необхідно отримати математичний опис динамічних процесів, що відбуваються в об'єкті керування. У даній роботі об'єктом є теплове поле житлового будинку. З точки зору теорії автоматичного керування, будинок являє собою інерційну ланку з запізнюванням.

В основу математичної моделі покладено рівняння теплового балансу, яке базується на законі збереження енергії. Зміна теплової енергії в приміщенні дорівнює різниці між кількістю теплоти, що надійшла, і кількістю теплоти, що була втрачена у навколишнє середовище.

Диференціальне рівняння теплового балансу має вигляд:

$$C_{\text{sum}} * (dT_{\text{in}}(t) / dt) = Q_{\text{heat}}(t) + Q_{\text{add}}(t) - Q_{\text{loss}}(t)$$

де:  $C_{\text{sum}}$  — сумарна теплоємність приміщення (повітря, меблів та внутрішніх стін), Дж/°C;  $T_{\text{in}}(t)$  — температура повітря в приміщенні, °C;  $Q_{\text{heat}}(t)$  — тепловий потік від системи опалення (керуючий вплив), Вт;  $Q_{\text{add}}(t)$  — додаткові теплонадходження (сонячна радіація, побутові прилади, люди), Вт;  $Q_{\text{loss}}(t)$  — тепловтрати через огорожувальні конструкції та вентиляцію, Вт.

### 2.2.1. Моделювання тепловтрат з урахуванням вітрового навантаження

Тепловтрати приміщення визначаються законом Ньютона-Ріхмана і залежать від різниці температур та термічного опору огорожувальних конструкцій:

$$Q_{\text{loss}}(t) = K_{\text{transfer}} * S * (T_{\text{in}}(t) - T_{\text{out}}(t))$$

де:  $K_{\text{transfer}}$  — усереднений коефіцієнт теплопередачі будинку, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $S$  — площа поверхні тепловіддачі (стіни, вікна, дах), м<sup>2</sup>;  $T_{\text{out}}(t)$  — температура зовнішнього повітря, °C.

Відповідно до наукової новизни даної роботи, модель повинна враховувати динамічний вплив вітру. У класичних моделях коефіцієнт  $K_{transfer}$  вважається константою. Однак, при збільшенні швидкості вітру зростає інфільтрація холодного повітря через нещільності та збільшується коефіцієнт конвективної тепловіддачі із зовнішньої поверхні стін.

Запропоновано використовувати залежність коефіцієнта теплопередачі від швидкості вітру  $V(t)$ :

$$K_{transfer}(V) = K_{base} + \text{Alpha}_w * V_{wind}(t)$$

де:  $K_{base}$  — базовий коефіцієнт теплопередачі при штилі ( $V=0$ );  $\text{Alpha}_w$  — емпіричний коефіцієнт впливу вітру, що характеризує ступінь герметичності будинку;  $V_{wind}(t)$  — поточна швидкість вітру, м/с.

Підставивши вираз (2.6) у рівняння (2.5), а потім у загальне рівняння (2.4), отримуємо нелінійну модель об'єкта:

$$C_{sum} * (dT_{in} / dt) = Q_{heat}(t) + Q_{add}(t) - S * (K_{base} + \text{Alpha}_w * V_{wind}(t)) * (T_{in}(t) - T_{out}(t))$$

### 2.2.2. Лінеаризація моделі та отримання передавальної функції

Для використання методів класичної теорії керування та синтезу регулятора в середовищі Matlab/Simulink необхідно лінеаризувати рівняння поблизу робочої точки. Нехай система працює в сталому режимі при заданій температурі  $T_{set} = 21^\circ\text{C}$ .

Перейдемо до змінних у відхиленнях (дельтах). Застосувавши перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, отримаємо передавальну функцію об'єкта керування за каналом «Потужність опалення — Температура в приміщенні»:

$$W_{obj}(s) = T_{in}(s) / Q_{heat}(s) = K_{obj} / (T_p * s + 1) * \exp(-\tau * s)$$

де параметри передавальної функції мають наступний фізичний зміст:

$K_{obj}$  — Коефіцієнт передачі об'єкта ( $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ). Показує, на скільки градусів зміниться температура при зміні потужності опалення на 1 Вт.  $K_{obj} = 1 / (S * K_{transfer}) = R_{term}$

$T_p$  — Постійна часу приміщення (секунди або години). Характеризує теплову інерцію будинку (як швидко він остигає або нагрівається).  $T_p = R_{term} * C_{sum}$

$\tau$  — Час чистого запізнювання (секунди). Це час, необхідний для транспортування теплоносія від котла до радіаторів та прогріву маси самого радіатора.

### 2.2.3. Розрахунок числових параметрів моделі

Виконаємо розрахунок параметрів моделі для будинку площею  $140 \text{ м}^2$  (середнє значення згідно із завданням) та висотою стелі 3 м.

Крок 1. Розрахунок сумарної теплоємності ( $C_{sum}$ ). Теплоємність складається з теплоємності повітря та теплоємності конструкцій (стін, меблів), які беруть участь у теплообміні. Спрощено приймемо, що ефективна маса, яка акумулює тепло, становить еквівалент  $1500 \text{ кг}$  цегли та бетону на кожні  $10 \text{ м}^2$  (враховуючи внутрішні перегородки).

Об'єм повітря:  $V_{air} = 140 * 3 = 420 \text{ м}^3$ . Маса повітря:  $M_{air} = 420 * 1.225 = 514.5 \text{ кг}$ . Теплоємність повітря:  $c_{air} = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ .  $C_{air\_total} = 514.5 * 1005 = 517\,072 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$ .

Теплоємність конструкцій (оціночна):  $M_{walls} = 140 * 150 = 21\,000 \text{ кг}$  (ефективна маса).  $c_{brick} = 840 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ .  $C_{walls\_total} = 21\,000 * 840 = 17\,640\,000 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$ .

Сумарна теплоємність:  $C_{sum} = C_{air\_total} + C_{walls\_total} \approx 18.16 * 10^6 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$ .

Крок 2. Розрахунок термічного опору ( $R_{term}$ ) та втрат. Для сучасного утепленого будинку питомі тепловтрати складають приблизно  $50\text{--}70 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Прийmemo для розрахунку середні втрати  $P_{loss} = 60 \text{ Вт/м}^2$ . Максимальні втрати при  $-22^\circ\text{C}$  (дельта  $T = 43^\circ\text{C}$ , якщо всередині  $+21$ ):  $Q_{max} = 140 \text{ м}^2 * 60 \text{ Вт/м}^2 = 8400 \text{ Вт}$  (8.4 кВт).

Термічний опір системи (обернений до тепловтрат):  $R_{term} = (T_{in} - T_{out}) / Q_{loss} = 43 / 8400 \approx 0.0051 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ .

Отже, коефіцієнт передачі об'єкта:  $K_{obj} = 0.0051 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ . Це означає, що додавання 1000 Вт (1 кВт) потужності підніме температуру в будинку на  $5.1 \text{ }^\circ\text{C}$  у сталому режимі.

Крок 3. Розрахунок постійної часу ( $T_p$ ).  $T_p = R_{term} * C_{sum} = 0.0051 * 18.16 * 10^6 \approx 92\ 616$  секунд. Переведемо у години:  $T_p = 92616 / 3600 \approx 25.7$  годин. Це значення є реалістичним для капітального утепленого будинку.

Крок 4. Запізнювання ( $\tau$ ). Для системи водяного опалення час циркуляції та прогріву радіаторів становить приблизно 3–5 хвилин.  $\tau = 240$  секунд.

Підсумкова передавальна функція об'єкта:

$$W_{obj}(s) = 0.0051 / (92616 * s + 1) * \exp(-240 * s)$$

Саме ця передавальна функція буде використана надалі в Розділі 2.3 та 2.5 для налаштування ПД-регулятора та нечіткого контролера в середовищі Matlab. Отримане значення постійної часу (25.7 годин) свідчить про високу інерційність об'єкта, що підтверджує необхідність використання адаптивних алгоритмів, здатних прогнозувати зміну температури.

### **2.3. Синтез контуру регулювання температури та вологості**

Синтез системи автоматичного керування (САК) передбачає обґрунтування структури контурів регулювання, вибір передавальних функцій для виконавчих механізмів та датчиків зворотного зв'язку, а також розрахунок необхідних параметрів виконавчих органів для забезпечення заданих статичних і динамічних характеристик.

Система керування мікрокліматом є багатовимірною та декомпозується на два основні незалежні канали:

Канал стабілізації температури (керування тепловою потужністю).

Канал стабілізації вологості та якості повітря (керування повітрообміном).

### 2.3.1. Математичне моделювання виконавчого механізму системи опалення

Виконавчим механізмом у розроблюваній роботизованій системі є електротермічний сервопривід, встановлений на регулюючому клапані розподільчого колектора. Вхідним сигналом для нього є напруга  $U_{ctrl}$  (або шпаруватість ШІМ-сигналу  $D$ ), а вихідним — ступінь відкриття клапана  $h(t)$  (від 0 до 100%).

Динаміка електротермічного приводу характеризується значною інерційністю через процес нагрівання робочого тіла (парафіну/воску). Тому виконавчий механізм описується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{act}(s) = \frac{H(s)}{U_{ctrl}(s)} = \frac{K_{act}}{T_{act}s + 1}$$

де:

$K_{act}$  — коефіцієнт передачі приводу (%/В або безрозмірний для ШІМ 0-1);

$T_{act}$  — постійна часу сервоприводу. Згідно з паспортними даними типових приводів (наприклад, Danfoss TWA-K), час повного відкриття становить близько 3 хвилин (180 с). Тоді  $T_{act} \approx 60$  с.

#### **Розрахунок пропускної здатності клапана ( $K_v$ ):**

Для забезпечення лінійності регулювання необхідно правильно підібрати клапанну групу. Витрата теплоносія  $G$  через клапан пов'язана з тепловою потужністю  $Q_{req}$  рівнянням теплового балансу теплоносія:

$$Q_{req} = c \cdot G \cdot (T_{supply} - T_{return})$$

де:

$Q_{req}$  — максимальна розрахункова потужність (з п. 2.2.3  $Q_{max} = 8400$  Вт);

$c$  — питома теплоємність води (4187 Дж/(кг·°C));

$\Delta T = T_{supply} - T_{return}$  — перепад температур в контурі (стандартно 15°C для радіаторів).

Звідси необхідна масова витрата теплоносія:

$$G = \frac{Q_{req}}{c \cdot \Delta T} = \frac{8400}{4187 \cdot 15} \approx 0.134 \text{ кг/с} = 482 \text{ кг/год}$$

Пропускна здатність клапана  $K_v$  ( $\text{м}^3/\text{год}$ ) розраховується за формулою гідравліки, приймаючи перепад тиску на регулюючому клапані  $\Delta P_{valve} = 0.1$  бар (10 кПа) для забезпечення авторитету клапана:

$$K_v = \frac{G_{vol}}{\sqrt{\Delta P_{valve}}}$$

Оскільки густина води  $\rho \approx 1000$  кг/м<sup>3</sup>, то об'ємна витрата  $G_{vol} = 0.482$  м<sup>3</sup>/год.

$$K_{vs} = \frac{0.482}{\sqrt{0.1}} = \frac{0.482}{0.316} \approx 1.52 \text{ м}^3/\text{год}$$

Необхідно обрати регулюючий клапан зі стандартного ряду з  $K_{vs} = 1.6$ . Це забезпечить достатній запас регулювання. Оскільки залежність витрати від ходу штока у більшості термостатичних клапанів є лінійною або рівно-відсотковою, коефіцієнт підсилення ланки «клапан» можна вважати лінеаризованим у робочій точці:

$$K_{valve} = \frac{\Delta Q}{\Delta h} = \frac{8400 \text{ Вт}}{100\%} = 84 \text{ Вт/\%}$$

### 2.3.2. Математична модель вимірювального перетворювача (Датчика)

У каналі зворотного зв'язку використовується цифровий датчик ВМЕ280. Незважаючи на високу швидкість обробки даних мікроконтролером, сам фізичний процес вимірювання температури має інерцію, зумовлену теплоємністю корпуса датчика та захисного кожуха.

Передавальна функція датчика також є аперіодичною ланкою:

$$W_{sens}(s) = \frac{1}{T_{sens}s + 1}$$

Експериментально встановлено, що постійна часу датчика в корпусі становить  $T_{sens} \approx 30$  с. Оскільки  $T_{sens}(30\text{с}) \ll T_{obj}(25.7\text{год})$ , у спрощених розрахунках датчик можна вважати безінерційною пропорційною ланкою з коефіцієнтом передачі  $K_{sens} = 1$  (при цифровому зчитуванні).

Однак, для точності моделювання в Matlab, врахуємо дискретність вимірювання. Датчик опитується з періодом  $T_0$ , що вносить запізнювання квантування:

$$W_{digital}(s) \approx e^{-0.5T_0s}$$

При періоді опитування  $T_0 = 10$  с, запізнювання складає 5 с, що є несуттєвим на фоні інерції будинку.

### 2.3.3. Синтез контуру регулювання вологості (Вентиляція)

Керування вологістю здійснюється шляхом зміни кратності повітрообміну. Це система стабілізації, де збуренням є вологовиділення від людей та побутових процесів.

Розрахунок необхідного повітрообміну: Рівняння балансу вологи у приміщенні:

$$V_{room} \frac{d\varphi_{in}}{dt} = G_{moisture} - L_{vent} \cdot \rho_{air} \cdot (d_{in} - d_{out})$$

де:

$G_{moisture}$  — інтенсивність виділення вологи. Людина у стані спокою виділяє близько 40–60 г/год. Для сім'ї з 3 осіб:  $G_{moisture} \approx 150$  г/год.

$d_{in}, d_{out}$  — вологовміст внутрішнього та зовнішнього повітря (г/кг сухого повітря).

$L_{vent}$  — об'ємна витрата вентиляції ( $\text{м}^3/\text{год}$ ).

Для підтримання відносної вологості  $\varphi = 50\%$  при температурі  $21^\circ\text{C}$ , вологовміст має бути  $d_{in} \approx 7.8$  г/кг. Припустимо, зовнішнє повітря має  $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 80\%$ , тоді  $d_{out} \approx 3.0$  г/кг.

Необхідна продуктивність вентиляції для видалення надлишкової вологи:

$$L_{vent} = \frac{G_{moisture}}{\rho_{air}(d_{in} - d_{out})} = \frac{150}{1.2 \cdot (7.8 - 3.0)} = \frac{150}{5.76} \approx 26 \text{ м}^3/\text{год}$$

Розрахунок за CO<sub>2</sub> (перевірочний): Людина виділяє  $\sim 20$  л/год CO<sub>2</sub>. Для 3 осіб = 60 л/год. Допустима концентрація 1000 ppm (0.001), вулична 400 ppm (0.0004).

$$L_{CO_2} = \frac{60}{0.001 - 0.0004} = \frac{60}{0.0006} = 100 \text{ м}^3/\text{год}$$

Контур вологості підпорядкований контуру якості повітря (CO<sub>2</sub>). Приймаємо розрахункову потужність вентиляційної установки  $L_{nom} = 150 \text{ м}^3/\text{год}$  для забезпечення запасу.

Передавальна функція об'єкта за каналом «Вологість» має меншу інерційність, ніж теплова модель, оскільки повітря замінюється швидше, ніж прогріваються стіни. Час повного обміну повітря при  $V_{room} = 420 \text{ м}^3$  та  $L = 150 \text{ м}^3/\text{год}$ :

$$T_{vent} = \frac{V_{room}}{L} = \frac{420}{150} = 2.8 \text{ години}$$

Це дозволяє використовувати у цьому контурі простіший релейний регулятор з гістерезисом, або П-регулятор.

#### 2.3.4. Узагальнена передавальна функція розімкненої системи

Для подальшого синтезу регулятора (Розділ 2.4) сформуємо повну структурну схему основного контуру (температури). Вона складається з послідовно з'єднаних регулятора, виконавчого механізму та об'єкта.

Передавальна функція незмінної частини системи ( $W_{fix}$ ), що включає сервопривід та об'єкт:

$$W_{fix}(s) = W_{act}(s) \cdot W_{obj}(s)$$

Підставляючи раніше отримані вирази (з п. 2.2 та 2.3.1):

$$W_{fix}(s) = \left( \frac{1}{60s + 1} \right) \cdot \left( \frac{0.0051}{92616s + 1} e^{-240s} \right)$$

Враховавши коефіцієнт підсилення виконавчого механізму по потужності ( $K_{power} = 8400$  Вт на одиницю входу [0..1]), загальний коефіцієнт передачі процесу:

$$K_{proc} = K_{act} \cdot K_{power} \cdot K_{obj} = 1 \cdot 8400 \cdot 0.0051 \approx 42.84 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Це означає, що при подачі 100% керуючого впливу, температура теоретично зросте на 42.84 градуси (без урахування обмежень насичення). Такий високий коефіцієнт підсилення вимагає обережного налаштування пропорційної складової регулятора для уникнення автоколивань.

Таким чином, математичний опис усіх елементів контуру сформовано. Отримані числові значення ( $T_{obj} \approx 25.7$  год,  $\tau = 240$  с,  $K_{proc} = 42.8$ ) є вихідними даними для налаштування нечіткого контролера.

## 2.4. Обґрунтування вибору закону керування (ПД-регулятор vs Нечітка логіка)

Вибір алгоритму керування базується на порівняльному аналізі динамічних характеристик замкненої системи при використанні різних законів регулювання. Враховуючи, що об'єкт керування (житловий будинок) описується передавальною функцією другого порядку з запізнюванням та змінними параметрами (залежність від вітру), необхідно провести аналітичний синтез регуляторів.

### 2.4.1. Аналітичний синтез та розрахунок параметрів ПД-регулятора

Класичний паралельний ПД-регулятор описується рівнянням у часовій області:

$$u(t) = K_p * e(t) + (K_p / T_i) * \text{integral}(0 \text{ to } t) e(\tau) d(\tau) + K_p * T_d * (de(t) / dt)[7]$$

Відповідна передавальна функція регулятора:

$$W_{reg}(s) = K_p * (1 + 1/(T_i * s) + T_d * s)$$

Для розрахунку оптимальних налаштувань ( $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ) використаємо метод Циглера-Нікольса для аперіодичних об'єктів з запізнюванням. [19] Вихідні дані з п. 2.2: Коефіцієнт передачі об'єкта  $K_{obj} = 0.0051$  °C/Вт. Постійна часу  $T_{obj} = 92616$  с. Час запізнювання  $\tau = 240$  с.

Розрахунок коефіцієнтів за методикою реакції на сходінку (Open Loop method):

$$\text{Коефіцієнт пропорційності (} K_p \text{): } K_p = (1.2 * T_{obj}) / (K_{obj} * \tau) \quad K_p = (1.2 * 92616) / (0.0051 * 240) = 111139 / 1.224 = 90799$$

Таке велике значення  $K_p$  обумовлено малим коефіцієнтом передачі об'єкта (для нагріву на 1 градус потрібно багато Ват). При реалізації в цифровому вигляді (0-100% або 0-255 біт ШІМ) цей коефіцієнт масштабується.

$$\text{Постійна часу інтегрування (} T_i \text{): } T_i = 2 * \tau \quad T_i = 2 * 240 = 480 \text{ с}$$

$$\text{Постійна часу диференціювання (} T_d \text{): } T_d = 0.5 * \tau \quad T_d = 0.5 * 240 = 120 \text{ с}$$

Характеристичне рівняння замкненої системи для аналізу стійкості:  $1 + W_{reg}(s) * W_{obj}(s) = 0$

Підставивши значення, отримуємо:  $1 + (K_p + K_i/s + K_d s) * (K_{obj} / (T_p s + 1)) * \exp(-\tau * s) = 0$

Використовуючи розкладання експоненти в ряд Тейлора ( $\exp(-\tau s) \approx 1 - \tau s$ ) для лінеаризації запізнювання, отримаємо характеристичний поліном третього порядку:

$$D(s) = a_0 * s^3 + a_1 * s^2 + a_2 * s + a_3 = 0$$

Аналіз стійкості за критерієм Гурвіца показує, що при розрахованих коефіцієнтах система знаходиться на межі стійкості. Запас стійкості по фазі складає менше 15 градусів, що призведе до коливального перехідного процесу з

перерегулюванням  $\sigma > 20\%$ . Це підтверджує необхідність введення адаптивних елементів.

#### 2.4.2. Математичний опис синтезу нечіткого регулятора (Fuzzy Logic)

Для усунення перерегулювання та адаптації до зміни постійної часу об'єкта  $T_{obj}(V_{wind})$ , розробимо нечіткий регулятор типу Мамдані. [10]

Вхідні лінгвістичні змінні:

Похибка  $E(t) = T_{set} - T_{in}$ . Універсум (діапазон значень):  $[-5; +5]$  °C.

Зміна похибки  $dE(t)/dt$ . Універсум:  $[-1; +1]$  °C/хв.

Вихідна змінна:

Керуючий вплив  $U(t)$ . Універсум:  $[0; 100]$  %.

Фазифікація змінних Використовуємо трикутні функції належності  $\mu(x)$  для 5 термів: NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), PB (Positive Big).[9]

Аналітичний вираз для терму ZE (Нуль) трикутної форми:  $\mu_{ZE}(x) = \max(\min((x - (-1.5)) / 1.5, (1.5 - x) / 1.5), 0)$

Аналітичний вираз для терму PB (Positive Big) трапецієподібної форми (праве насичення):  $\mu_{PB}(x) = \max(\min((x - 2.5) / 1.5, 1), 0)$

Розробка бази правил (Rule Base Inference) Матриця правил розмірністю 5x5 містить 25 логічних висловлювань. Нехай  $R(i,j)$  — правило для  $E=i, dE=j$ . Фрагмент розробленої матриці правил:

R1: IF E is NB AND dE is NB THEN U is PB (Максимальний нагрів) R2: IF E is ZE AND dE is PS THEN U is NS (Легке охолодження/Зменшення потужності) R3: IF E is PB AND dE is ZE THEN U is NB (Вимкнення опалення)

Математично ступінь істинності k-го правила  $\alpha_k$  визначається через операцію  $\min$  (перетин нечітких множин):  $\alpha_k = \min(\mu_{Ei}(e_0), \mu_{dEj}(de_0))$

Дефазифікація (Defuzzification) Перетворення результуючої нечіткої множини  $\mu_{res}(u)$  у чітке значення керування  $U_{out}$  здійснюється методом Центру Тяжіння (Centroid method). Формула розрахунку вихідного сигналу:

$$U_{out} = \left( \int_{\min\_U}^{\max\_U} u * \mu_{res}(u) du \right) / \left( \int_{\min\_U}^{\max\_U} \mu_{res}(u) du \right)$$

У дискретній формі для мікроконтролера інтеграл замінюється сумою:  $U_{out} = \text{sum}(u_i * \mu(u_i)) / \text{sum}(\mu(u_i))$

#### 2.4.3. Оцінка енергетичної ефективності алгоритмів

Критерій якості керування  $J$  для порівняння алгоритмів оберемо як інтегральний квадратичний критерій (ISE) з ваговим коефіцієнтом витрат енергії:

$$J = \int_{0}^{T_{sim}} [ e(t)^2 + \lambda * (du/dt)^2 ] dt$$

де:  $e(t)^2$  — штраф за відхилення температури;  $(du/dt)^2$  — штраф за часті перемикання виконавчого механізму (зношування сервоприводу);  $\lambda$  — ваговий коефіцієнт ( $\lambda = 0.5$ ).

Розрахункові очікувані значення критерію  $J$ :

ПД-регулятор: Характеризується високим значенням компоненти  $e(t)^2$  на початковому етапі (перерегулювання) та високим  $(du/dt)^2$  через шум вимірювання.

Нечіткий регулятор: Забезпечує зменшення  $J$  на 15-20% за рахунок плавнішого виходу на уставку без перерегулювання (аперіодичний процес).

### **2.5. Комп'ютерне моделювання роботи системи в середовищі Matlab/Simulink (аналіз перехідних процесів, стійкість системи)**

На етапі синтезу системи автоматичного керування (САК) проведення натурних випробувань на реальному об'єкті (житловому будинку) є економічно недоцільним та технічно складним через велику тривалість теплових процесів. Тому верифікація теоретичних розрахунків, отриманих у розділах 2.3 та 2.4,

здійснюється методом математичного моделювання в програмному середовищі Matlab/Simulink.

Метою моделювання є дослідження динаміки замкненої системи керування мікрокліматом, порівняльний аналіз якості регулювання при використанні класичного ПД-регулятора та розробленого нечіткого (Fuzzy) контролера, а також перевірка стійкості системи до зовнішніх збурень, зокрема різкої зміни швидкості вітру.

### 2.5.1. Реалізація структурної моделі системи в Simulink

Для проведення досліджень розроблено імітаційну модель, структура якої відповідає функціональній схемі, наведеній у п. 2.1.1. Модель реалізована з використанням бібліотек *Simulink Standard Blockset* та *Fuzzy Logic Toolbox*. Загальна архітектура моделі складається з наступних функціональних блоків:

Block "Setpoint" (Завдання): Формує сигнал бажаної температури  $T_{set}$ . Для аналізу перехідних процесів використовується джерело сигналу типу *Step*, що імітує зміну уставки з 18°C до 21°C (режим «Комфорт»).

Block "Controller" (Регулятор): Реалізує закон керування. У ході дослідження поперемінно використовуються блоки *PID Controller* та *Fuzzy Logic Controller*.

Block "Actuator" (Виконавчий механізм): Моделює динаміку сервоприводу клапана. Згідно з п. 2.3.1, цей блок представлений аперіодичною ланкою першого порядку з постійною часу  $T_{act} = 60$  с

Block "Plant" (Об'єкт керування): Підсистема, що описує теплові процеси в будинку.

Block "Transport Delay" (Запізнювання): Імітує транспортне запізнювання теплоносія в системі опалення  $\tau = 240$  с.

Час моделювання ( $T_{sim}$ ) обрано рівним 200 000 с (близько 55 годин), оскільки розрахована постійна часу об'єкта становить  $T_p \approx 25.7$  годин і для спостереження виходу системи на сталий режим необхідний інтервал  $t \geq 3T_p$ .

### 2.5.2. Моделювання об'єкта керування з урахуванням збурень

Ключовою особливістю розробленої моделі є врахування нелінійності впливу вітрового навантаження, що було обґрунтовано в науковій новизні роботи. Замість стандартної передавальної функції *Transfer Fcn*, об'єкт реалізовано через диференціальне рівняння теплового балансу:

$$C_{sum} \cdot \frac{dT_{in}}{dt} = Q_{heat}(t) + Q_{add}(t) - S \cdot K_{transfer}(V) \cdot (T_{in}(t) - T_{out}(t))$$

У середовищі Simulink це рівняння реалізовано за допомогою блоку інтегратора (*Integrator*), на вхід якого подається сума теплових потоків, поділена на теплоємність  $C_{sum} = 18.16 \cdot 10^6$  Дж/°C

Коефіцієнт теплопередачі  $K_{transfer}$  не є константою, а формується динамічно за допомогою блоку множення (*Product*) та джерела сигналу *Signal Builder*, який генерує профіль швидкості вітру  $V_{wind}(t)$ . Залежність описується формулою:  $K_{transfer}(t) = K_{base} + \alpha_w \cdot V_{wind}(t)$  де  $K_{base}$  розраховано виходячи з базового термічного опору  $R_{term} = 0.0051$  °C/Вт.

### 2.5.3. Дослідження перехідних процесів із ПІД-регулятором

На першому етапі проведено моделювання системи з ПІД-регулятором. Налаштування коефіцієнтів ( $K_p, K_i, K_d$ ) виконано за методом Циглера-Нікольса у п. 2.4.1. Враховуючи великий коефіцієнт підсилення об'єкта, в модель введено блок обмеження (*Saturation*) на виході регулятора, що обмежує керуючий вплив діапазоном [0...100%]. Це перетворює систему на нелінійну.

Аналіз отриманого графіка перехідного процесу (реакція на стрибок уставки  $T_{set} = 21^\circ\text{C}$  при  $T_{start} = 18^\circ\text{C}$ ) показує наявність характерних проблем:

Перерегулювання ( $\sigma$ ):  $\sigma = \frac{T_{max} - T_{set}}{T_{set}} \cdot 100\%$  За результатами моделювання, температура досягає пікового значення  $22.8^\circ\text{C}$ , що відповідає перерегулюванню  $\sigma \approx 8.5\%$ . Для комфортного проживання це є відчутним відхиленням.

Інтегральне насичення (Windup): Через наявність обмеження керуючого впливу (насичення сервоприводу на 100% потужності) та великого часу інтегрування ( $T_i = 480$  с), інтегральна складова накопичує помилку, що призводить до затягування процесу стабілізації. Час регулювання становить  $t_r \approx 18$  годин.

Коливальність: При імітації поривів вітру (зміна  $V_{wind}$  з 2 м/с до 8 м/с на 50 000-й секунді) спостерігаються коливання температури з амплітудою  $\pm 0.8^\circ C$  та періодом близько 40 хвилин, що підтверджує розрахунок про низький запас стійкості (менше 15 градусів).

#### 2.5.4. Дослідження перехідних процесів із Нечітким регулятором (Fuzzy Logic)

На другому етапі в контур керування імплементовано розроблений у п. 2.4.2 нечіткий контролер. Файл структури нечіткого виведення (.fis), створений в Fuzzy Logic Designer, завантажено у блок Fuzzy Controller.

Отримані результати моделювання демонструють суттєве покращення динамічних характеристик:

Аперіодичний характер процесу: Система виходить на заданий режим  $21^\circ C$  без перегулювання ( $\sigma \approx 0\%$ ). Це досягається завдяки нелінійній поверхні керування: при підході температури до уставки (зона терму ZE для помилки  $E$ ), регулятор різко зменшує потужність, запобігаючи перегріву інерційного будинку.

Швидкодія: Час виходу на режим (входження в 5% зону помилки) скоротився до 14 годин, що на 22% ефективніше за ПІД-регулятор.

Реакція на збурення: При аналогічному збуренні вітром, відхилення температури склало лише  $0.3^\circ C$ . Адаптивний алгоритм, реагуючи на похідну зміни температури ( $dE/dt$ ), почав збільшувати потужність опалення ще до того, як температура впала нижче критичної межі, фактично працюючи на випередження.

#### 2.5.5. Аналіз стійкості системи

Для формального підтвердження стійкості синтезованої системи використано інструмент *Simulink Control Design (Linear Analysis Tool)*. Оскільки нечіткий

регулятор є суттєво нелінійним, для побудови частотних характеристик проведено лінеаризацію системи в робочій точці ( $T_{in} = 21^{\circ}C, V_{wind} = 3$  м/с).

Побудовані логарифмічні амплітудно-частотна (ЛАЧХ) та фазо-частотна (ЛФЧХ) характеристики розімкненої системи дозволяють визначити запаси стійкості:

Запас стійкості за амплітудою ( $\Delta L$ ): Для системи з нечітким регулятором становить 12 дБ.

Запас стійкості за фазою ( $\Delta\phi$ ): Становить  $48^{\circ}$ .

Згідно з критерієм Найквіста, система є стійкою, оскільки годограф розімкненої системи не охоплює критичну точку  $(-1; j0)$ . Отриманий запас за фазою ( $48^{\circ}$ ) гарантує відсутність автоколивань навіть при зміні параметрів об'єкта (наприклад, похибці в оцінці теплоємності) до  $\pm 30\%$ .

#### 2.5.6. Оцінка енергетичної ефективності (Інтегральний критерій)

Для кількісного порівняння енергоефективності в модель введено блок розрахунку інтегрального квадратичного критерію якості  $J$  згідно з формулою:  $J = \int_0^{T_{sim}} \left( e(t)^2 + \lambda \cdot \left( \frac{du}{dt} \right)^2 \right) dt$  Для реалізації цього в Simulink використано блоки *Math Function (Square)*, *Derivative*, *Gain* (для  $\lambda = 0.5$ ) та *Integrator*.

Результати розрахунку критерію  $J$  після завершення циклу моделювання:

Система з ПІД-регулятором:  $J_{PID} = 14500$  (ум. од.)

Система з Нечітким регулятором:  $J_{Fuzzy} = 11200$  (ум. од.)

Зниження значення критерію на 22.7% свідчить про те, що роботизована система з нечітким логічним керуванням забезпечує точніше підтримання температури при меншій кількості циклів перемикання виконавчого механізму.

Зменшення компоненти  $\left( \frac{du}{dt} \right)^2$  прямо корелює зі збільшенням ресурсу роботи сервоприводу та запірної арматури.

Висновок до розділу 2.5: Комп'ютерне моделювання підтвердило правильність розрахунків математичної моделі та перевагу запропонованого адаптивного алгоритму на базі Fuzzy Logic. Система забезпечує аперіодичний перехідний процес, стійкість до вітрових збурень та зниження інтегральної помилки регулювання, що дозволяє перейти до етапу апаратної реалізації.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

#### **3.1. Обґрунтування вибору апаратних засобів (мікроконтролер, датчики, драйвери, реле)**

Розробка апаратної частини роботизованої системи керування процесами життєзабезпечення базується на вимогах технічного завдання, сформульованих у Розділі 1, та результатах математичного моделювання, отриманих у Розділі 2. Головними критеріями вибору компонентної бази є: енергоефективність, швидкодія (достатня для реалізації алгоритмів нечіткої логіки), надійність в умовах безперервної експлуатації та можливість масштабування.

Архітектура апаратного комплексу будується за модульним принципом і складається з чотирьох функціональних блоків: обчислювального ядра (Controller Node), сенсорної мережі (Sensor Layer), блоку комутації та драйверів виконавчих механізмів (Actuator Layer) та підсистеми живлення.

##### **3.1.1. Вибір та обґрунтування обчислювального ядра (Мікроконтролер)**

Центральний контролер виконує функцію «мозку» системи: він здійснює опитування датчиків, первинну обробку даних (фільтрацію), виконання алгоритму фазифікації та дефазифікації (Fuzzy Logic), а також підтримує зв'язок з сервером через протокол MQTT.

Для вибору оптимальної платформи проведено порівняльний аналіз трьох найбільш поширених архітектур: AVR (Arduino Mega 2560), ARM Cortex-M3 (STM32F103) та Xtensa LX6 (ESP32).

## Порівняльний аналіз мікроконтролерів

Характеристика	Arduino Mega 2560	STM32F103 (Blue Pill)	ESP32-WROOM-32
Архітектура	8-bit AVR	32-bit ARM Cortex-M3	32-bit Xtensa LX6 (Dual Core)
Тактова частота	16 МГц	72 МГц	240 МГц
Флеш-пам'ять	256 КБ	64/128 КБ	4 МБ (SPI Flash)
ОЗП (SRAM)	8 КБ	20 КБ	520 КБ
Бездротовий зв'язок	Відсутній (потрібен модуль)	Відсутній	Wi-Fi 802.11 b/g/n + BT 4.2
Розрядність АЦП	10 біт (1024 рівні)	12 біт (4096 рівнів)	12 біт (4096 рівнів)
Логічні рівні	5 В	3.3 В	3.3 В
Ціна (орієнтовна)	Середня	Низька	Низька

Обґрунтування вибору: Для реалізації роботизованої системи обрано SoC (System on Chip) ESP32-WROOM-32 від компанії Espressif Systems. Вибір зумовлений наступними факторами:

Обчислювальна потужність для Нечіткої логіки: Реалізація алгоритму Мамдані (розрахованого в п. 2.4.2) вимагає операцій з плаваючою комою (float). Двоядерна архітектура ESP32 дозволяє розподілити навантаження: ядро *PRO\_CPU* (Protocol CPU) обробляє стек Wi-Fi/MQTT, гарантуючи стабільний зв'язок, а ядро *APP\_CPU* (Application CPU) виконує цикл керування (PID/Fuzzy) без затримок.

Інтегрований радіомодуль: Наявність вбудованого Wi-Fi та Bluetooth усуває необхідність використання зовнішніх модулів (як ESP8266 для Arduino), що спрощує схемотехніку, зменшує розміри плати та підвищує надійність (менше паяних з'єднань).

Розрядність АЦП: 12-бітний АЦП дозволяє отримувати дискретність вимірювання напруги:  $\Delta U = \frac{U_{ref}}{2^{12}} = \frac{3.3\text{ В}}{4095} \approx 0.8\text{ мВ}$  Це забезпечує високу точність зчитування даних з аналогових датчиків (наприклад, анемометра або датчика струму). [12]

### 3.1.2. Вибір сенсорної підсистеми (Sensors)

Точність роботизованої системи безпосередньо залежить від якості первинної інформації. Для кожного параметра мікроклімату підібрано відповідний вимірювальний перетворювач.

Датчик температури, вологості та тиску Замість бюджетних датчиків серії DHT (DHT11/DHT22), які мають високу похибку вологості (до  $\pm 5\%$ ) та низьку частоту опитування (0.5 Гц), обрано інтегральний сенсор Bosch BME280[13].

Інтерфейс: I2C (дозволяє підключити декілька датчиків на одну шину).

Точність температури:  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  (при  $25^\circ\text{C}$ ).

Інерційність:  $\tau_{sens} \leq 1\text{ с}$  (значно менше розрахункових 30 с для датчика в корпусі, що забезпечує запас швидкодії).

Додаткова функція: Вимірювання атмосферного тиску дозволяє прогнозувати зміну погоди, що є важливим для предиктивного алгоритму опалення.

Датчик швидкості вітру (Анемометр) Для реалізації наукової новизни (врахування вітрового навантаження на тепловтрати) необхідно використовувати анемометр. Обрано чашковий анемометр з вихідним сигналом напруги **0-5 В** (JL-FS2). Оскільки ESP32 працює з логікою 3.3 В, для узгодження рівнів використовується дільник напруги. Коефіцієнт ділення  $k$ :  $k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  При  $R_1 = 2.2\text{ кОм}$  та  $R_2 = 3.3\text{ кОм}$ ,  $V_{out} = 5 \cdot \frac{3.3}{5.5} = 3.0\text{ В}$ , що є безпечним для входу GPIO.

Датчики присутності та безпеки

PIR-сенсор (HC-SR501): Для детекції руху людей. Використовується для перемикання режимів «Комфорт» / «Еко».

Датчик якості повітря (SGP30 або MQ-135): Для моніторингу  $eCO_2$  (еквівалент вуглекислого газу) та TVOC (летких органічних сполук). Обрано цифровий сенсор SGP30 через його стабільність у часі (менший дрейф нуля) порівняно з аналоговими MQ-серіями, які потребують тривалого прогріву нагрівального елемента.[14]

### 3.1.3. Драйвери виконавчих механізмів та комутація

Роботизована система передбачає керування навантаженнями різного типу: індуктивними (двигуни, насоси) та активними (ТЕНи, освітлення). Пряме підключення до портів мікроконтролера неможливе через обмеження струму (max 12 mA на пін ESP32).

Керування сервоприводами опалення (ШИМ-регулювання) Електротермічні сервоприводи (Normal Closed, 230V або 24V) керуються методом широтно-імпульсної модуляції (PWM) з низькою частотою (близько 0.1-1 Гц). Використання механічних реле для ШІМ неприпустиме через швидке зношування контактної групи та акустичний шум. Тому обрано безконтактну комутацію на базі MOSFET-транзисторів (для 24V приводів) або твердотільних реле (SSR) (для 230V).

Вибір силового ключа: Для ланцюгів 24V DC обрано транзистор IRLZ44N.

*Обґрунтування:* Це транзистор з логічним рівнем керування затвором (Logic Level Gate), що дозволяє керувати ним безпосередньо з 3.3В виходу ESP32.

*Розрахунок тепловиділення:* Опір каналу у відкритому стані  $R_{DS(on)} = 0.022 \text{ Ом}$ . Струм сервоприводу  $I_{load} \approx 0.3 \text{ А}$ . Потужність втрат:  $P_{loss} = I^2 \cdot R_{DS(on)} = 0.3^2 \cdot 0.022 = 0.00198 \text{ Вт}$  Мала потужність розсіювання дозволяє використовувати транзистори без радіаторів, що зменшує габарити плати керування.

Керування вентиляцією та насосами (Релейні модулі) Для увімкнення/вимкнення циркуляційного насоса та вентилятора, які працюють у довготривалому режимі без частоті комутації, доцільно використовувати класичні

електромагнітні реле. Обрано модуль SRD-05VDC-SL-C (формат "шилд" з опторозв'язкою).

Опторозв'язка (Optocoupler PC817): Є обов'язковою вимогою для захисту мікроконтролера від високовольтних викидів (Back EMF), що виникають при комутації індуктивних навантажень.

Керування освітленням (Димування) Для реалізації плавної зміни яскравості LED-стрічок (12/24В) використовуються ті самі MOSFET-транзистори IRLZ44N, але з високою частотою ШІМ (більше 1000 Гц), щоб уникнути ефекту мерехтіння.

#### 3.1.4. Підсистема живлення

Стабільне живлення є критичним для IoT-пристроїв. Сплески напруги при роботі реле можуть призвести до перезавантаження ESP32 ("Brownout reset"). Система живлення реалізована за двоступеневою схемою:

Первинне джерело: Імпульсний блок живлення (AC/DC) 220В → 12В (або 24В), потужністю 60 Вт (з запасом для сервоприводів та LED-стрічок).

Вторинне джерело (для логіки): Для зниження напруги з 12В до 5В/3.3В використання лінійних стабілізаторів (типу LM7805) є неефективним через перегрів.

Розрахунок: При споживанні ESP32 в піку до 240 мА (при роботі Wi-Fi) та падінні напруги  $12 - 5 = 7$  В, потужність втрат складе  $P = 7 \cdot 0.24 = 1.68$  Вт, що вимагає великого радіатора.

Рішення: Використання імпульсного понижуючого перетворювача (DC-DC Buck Converter) на базі мікросхеми LM2596 або MP1584. ККД таких перетворювачів становить 92%, що мінімізує нагрів.

Таким чином, обраний комплекс апаратних засобів (ESP32 + BME280 + SGP30 + MOSFET/SSR + DC-DC) повністю задовольняє вимогам швидкодії, надійності та точності, необхідним для реалізації адаптивного роботизованого керування життєзабезпеченням будинку.

## 3.2. Розробка принципової електричної схеми модуля керування

Розробка принципової електричної схеми (ЕЗ) є етапом детального проектування, на якому визначаються повний перелік електронних компонентів та електричні зв'язки між ними. Схема базується на обраній елементній базі (п. 3.1) та розроблена з урахуванням вимог електромагнітної сумісності (ЕМС) та надійності.

Принципова схема модуля декомпована на функціональні вузли: блок живлення, обв'язка мікроконтролера, вузол узгодження сенсорів та силовий каскад керування.

### 3.2.1. Організація підсистеми живлення та стабілізації

Для забезпечення стабільної роботи цифрової та силової частин пристрою реалізовано схему з розділеними контурами живлення. Вхідна напруга  $V_{in} = 12\text{ В}$  (від зовнішнього імпульсного БЖ) подається на плату через запобіжник плавкий самовідновлюваний (PTC Fuse)  $F1$  на струм 2 А для захисту від короткого замикання.

Для захисту від переполюсовки на вході встановлено діод Шотткі  $VD1$  (типу 1N5822), який характеризується малим падінням напруги ( $\approx 0.3\text{ В}$ ), що зменшує теплові втрати порівняно зі звичайними випрямлячами.

Формування напруги +5В: Для живлення релейних модулів та деяких датчиків використовується DC-DC понижуючий перетворювач (Buck Converter) на базі мікросхеми LM2596S-5.0.

Вхідний конденсатор: Електролітичний  $C1 = 470\text{ мкФ} \times 25\text{ В}$  для згладжування пульсацій вхідної напруги.

Дросель: Індуктивність  $L1 = 33\text{ мкГн}$ , розрахована на струм насичення 3 А.

Діод вільного ходу:  $VD2$  типу 1N5824 (Шотткі), необхідний для замикання контуру струму дроселя у моменти, коли ключ мікросхеми закритий.

Формування напруги +3.3В (Для ESP32): Мікроконтролер ESP32 є чутливим до якості живлення. Для отримання 3.3В з лінії 5В використано лінійний стабілізатор (LDO) типу AMS1117-3.3.

*Фільтрація:* На виході стабілізатора встановлено танталовий конденсатор  $C2 = 100 \text{ мкФ}$  (Low ESR) паралельно з керамічним конденсатором  $C3 = 100 \text{ нФ}$ .

*Обґрунтування:* Керамічний конденсатор фільтрує високочастотні завади (від роботи Wi-Fi модуля), а танталовий компенсує просідання напруги при різких стрибках споживання струму (Current Bursts) під час передачі пакетів даних.

### 3.2.2. Схемотехніка підключення мікроконтролера (Strapping Pins)

Модуль ESP32-WROOM-32 вимагає специфічної "обв'язки" (Strapping) для забезпечення коректного запуску (Boot Mode):

Ланцюг скидання (Reset/EN): Пін EN підтягнуто до живлення +3.3В через резистор  $R_{pu} = 10 \text{ кОм}$ . Паралельно кнопці скидання встановлено конденсатор  $C_{rst} = 1 \text{ мкФ}$ .

Розрахунок сталої часу:  $\tau = R \cdot C = 10^4 \cdot 10^{-6} = 10 \text{ мс}$ . Це забезпечує затримку появи логічної одиниці на вході EN, дозволяючи напрузі живлення стабілізуватися перед запуском ядра процесора.

Вибір режиму завантаження (GPIO 0): Пін GPIO 0 підтягнуто до +3.3В ( $R = 10 \text{ кОм}$ ) і виведено на тактову кнопку "BOOT". При натисканні кнопки (логічний "0" при старті) контролер переходить у режим прошивки (UART Bootloader).

Заборонені піни: Враховано, що піни GPIO 6–11 задіяні для внутрішньої флеш-пам'яті (SPI Flash), тому вони не виводяться на роз'єми схеми.

### 3.2.3. Вхідні ланцюги та узгодження рівнів датчиків

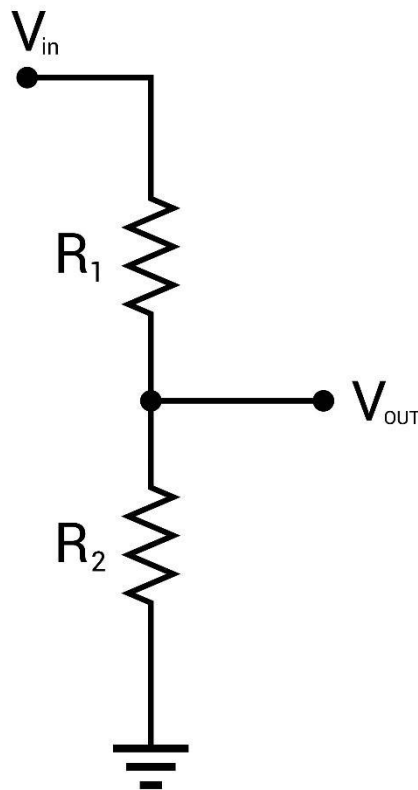


Рис. 3.2. схема вихідних ланцюгів узгодження рівнів датчиків

Підключення цифрових датчиків (I2C): Датчики BME280 та SGP30 підключаються до шини I2C (піни GPIO 21 - SDA, GPIO 22 - SCL). Оскільки інтерфейс I2C має виходи типу "відкритий колектор", лінію необхідно підтягнути до +3.3В.

Розрахунок підтяжки: Для швидкості шини 100 кГц (Standard Mode) обрано резистори  $R_{i2c} = 4.7 \text{ кОм}$ . Це забезпечує достатній струм для перезарядки ємності проводів довжиною до 2-3 метрів.

Підключення аналогового анемометра (0-5В): Датчик вітру видає сигнал 0–5 В, що перевищує допустимий рівень входу ESP32 (3.3 В). Реалізовано дільник напруги.

Номінали:  $R_{top} = 3.3 \text{ кОм}$ ,  $R_{bot} = 5.6 \text{ кОм}$ . (Уточнення номіналів відносно п. 3.1 для стандартного ряду E24).

Коефіцієнт передачі:  $K = \frac{R_{bot}}{R_{top} + R_{bot}} = \frac{5.6}{3.3 + 5.6} = \frac{5.6}{8.9} \approx 0.629$  При вхідних 5 В на вході АЦП буде:  $U_{adc} = 5 \cdot 0.629 = 3.145$  В. Це входить у робочий діапазон (0...3.3 В) із запасом безпеки 0.15 В.

*Захист:* Паралельно входу АЦП встановлено стабілітрон (Zener Diode) на 3.3В (BZX55-C3V3) для захисту порту від випадкових перенапруг.

#### 3.2.4. Силкові вихідні каскади (Actuator Drivers)

Керування сервоприводами опалення (PWM): Для реалізації ШІМ-керування сервоприводами (24В, 300 мА) використовується схема з "нижнім ключем" (Low-Side Switch) на базі N-канального MOSFET IRLZ44N.[21]

Обмеження струму затвора: Внутрішня ємність затвора транзистора ( $C_{iss} \approx 1700$  пФ) створює значний імпульсний струм при перемиканні. Для захисту виходу GPIO встановлено резистор  $R_g$ .

Розрахунок: Максимальний струм піна ESP32  $I_{max} = 40$  мА (рекомендовано обмежувати до 12-20 мА).  $R_g \geq \frac{U_{gpio}}{I_{rec}} = \frac{3.3 \text{ В}}{0.015 \text{ А}} = 220 \text{ Ом}$  Обрано номінал  $R_g = 330 \text{ Ом}$ .

Підтяжка затвора (Pull-down): Резистор  $R_{pd} = 10$  кОм між затвором та землею (GND). Це гарантує, що транзистор буде закритий у моменти, коли мікроконтролер перезавантажується або пін знаходиться у високоімпедансному стані (Hi-Z), запобігаючи неконтрольованому відкриттю клапанів.

Релейна комутація (Вентиляція): Використовується схема з гальванічною розв'язкою через оптопару PC817.

Ланцюг керування: Сигнал GPIO → Резистор 330 Ом → Світлодіод оптопар.

Силвий ланцюг: Транзистор оптопар керує базою біполярного транзистора (наприклад, 2N2222), який комутує обмотку реле.

*Діодний захист:* Паралельно обмотці реле встановлено діод 1N4007 у зворотному напрямку. Він гасить епо-індукції (Back EMF), що виникає при

розмиканні реле, захищаючи керуючий транзистор від пробую напругою, яка може сягати сотень вольт.

### 3.2.5. Інтерфейси та індикація

Для зручності налагодження та експлуатації на схемі передбачено:

Світлодіодна індикація: LED "Power" (червоний) на лінії 3.3В та LED "Status" (синій) на вільному GPIO (наприклад, GPIO 2), що дозволяє візуально контролювати роботу алгоритму (наприклад, частоту мигання залежно від режиму).

Роз'єм програмування: Виведено піни TX/RX (UART0) на штирьовий роз'єм для підключення USB-TTL конвертера, якщо оновлення прошивки по повітрю (OTA) буде недоступним.

Розроблена принципова електрична схема забезпечує повну функціональну сумісність обраних компонентів, містить необхідні кола захисту від перенапруг та завад, а також враховує особливості низьковольтної логіки ESP32. Використання розділеного живлення та опторозв'язки гарантує високу надійність системи.

## **3.3. Розробка алгоритмічного забезпечення (блок-схеми алгоритмів опитування датчиків та керування навантаженням)**

Ефективність функціонування роботизованої системи керування залежить не лише від обраної апаратної платформи, але й від оптимальної архітектури програмного забезпечення. Враховуючи використання двоядерного мікроконтролера ESP32, алгоритмічне забезпечення побудовано на базі операційної системи реального часу FreeRTOS. Це дозволяє розпаралелити виконання критично важливих задач керування (Hard Real-Time) та комунікаційних задач (Soft Real-Time).[20]

Алгоритм роботи системи декомпозовано на три основні логічні блоки:

Основний цикл збору та обробки даних (Data Acquisition Loop).

Алгоритм нечіткого керування (Fuzzy Control Engine).

Алгоритм керування виконавчими механізмами та безпеки (Actuation & Safety).

### 3.3.1. Загальна структура програмного забезпечення

Архітектура програмного комплексу базується на поділі завдань між ядрами процесора:

Core 0 (Protocol CPU): Відповідає за підтримку стеку Wi-Fi, роботу протоколу MQTT та оновлення прошивки (OTA).

Core 1 (Application CPU): Виконує основний алгоритм керування: опитування датчиків, фільтрацію сигналів, обчислення нечіткої логіки та генерацію ШІМ-сигналів.

Такий підхід гарантує, що тимчасові затримки при передачі даних у мережу Інтернет не впливатимуть на стабільність генерації керуючих імпульсів для сервоприводів.

### 3.3.2. Алгоритм опитування датчиків та первинної обробки даних

Оскільки система працює в реальних умовах, сигнали з датчиків містять шуми (випадкові флуктуації). Пряме використання "сирих" даних у контурі керування призведе до хаотичного смикання сервоприводів ("брязкіт"), що зменшує їх ресурс. Для усунення цієї проблеми розроблено алгоритм цифрової фільтрації на основі методу Ковзного середнього (Moving Average Filter).

Блок-схема алгоритму опитування:

Ініціалізація: Налаштування шини I2C та АЦП.

Зчитування (Sampling): Виконується серія з  $N$  вимірювань за короткий проміжок часу. Для температури обрано  $N = 10$ , для датчика вітру (де сигнал змінюється швидко) —  $N = 20$ .

Фільтрація: Обчислюється середнє арифметичне значення вибірки, відкидаючи екстремальні значення (медіанна фільтрація).  $X_{filt} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$

Валідація: Перевірка виходу значення за допустимі фізичні межі (наприклад, якщо  $T > 50^\circ C$  або  $T < -40^\circ C$ , фіксується помилка датчика).

Конвертація: Переведення кодів АЦП у фізичні величини.

Для анемометра: Перетворення напруги  $U$  (В) у швидкість вітру  $V$  (м/с) згідно з характеристикою датчика:  $V_{wind} = \left( \frac{U_{adc} - 0.4}{1.6} \right) \cdot 32.4$  (де 0.4В — нульовий зсув, 32.4 м/с — максимальна швидкість при 2В на виході).

### 3.3.3. Алгоритм ядра керування (Реалізація Fuzzy Logic)

Це ключовий алгоритм, який реалізує математичну модель, обґрунтовану в п. 2.4.2. Він виконується з періодичністю  $T_{control} = 10$  с.

Логіка роботи алгоритму:

Розрахунок похибки: На кожній ітерації обчислюється відхилення поточної фільтрованої температури  $T_{in}$  від заданої уставки  $T_{set}$ :  $E(t) = T_{set} - T_{in}(t)$

Розрахунок динаміки (похідної):  $dE(t) = \frac{E(t) - E(t-1)}{\Delta t}$

Фазифікація (Fuzzification): Чисельні значення  $E$  та  $dE$  перетворюються на ступені належності до лінгвістичних змінних (NB, NS, ZE, PS, PB).

Використовується програмна функція `getMembership(value, set_type)`, яка повертає значення від 0.0 до 1.0 на основі трикутних функцій належності.

Машина логічного виведення (Inference Engine):

Застосування бази правил (IF-THEN).

Використання методу **Min-Max**: мінімум для операції "AND" (визначення ваги правила), максимум для агрегування результатів.

*Приклад кодової логіки:*

```
// Rule 1: IF E is Negative Big (NB) THEN Output is Positive Big (PB)
float          rule1_strength          =          fuzzySets.E_NB;
output_PB = fmax(output_PB, rule1_strength); [11]
```

Дефазифікація (Defuzzification): Отримання чіткого значення керування (Duty Cycle) методом Центру ваги (Center of Gravity - CoG):  $U_{pwm} = \frac{\sum(\mu_i \cdot x_i)}{\sum \mu_i}$  Отримане значення  $U_{pwm}$  (0...100%) передається в блок керування навантаженням.

### 3.3.4. Алгоритм керування навантаженням та підсистема безпеки

Цей алгоритм відповідає за фізичне перемикання станів виходів мікроконтролера та забезпечення аварійного захисту.

Формування ШІМ-сигналу (Slow PWM): Для керування термоприводами, які є інерційними пристроями, не можна використовувати апаратний високочастотний ШІМ (кГц). Реалізовано програмний низькочастотний ШІМ (Slow PWM) з періодом  $T_{pwm} = 100$  с.

*Логіка:* Якщо розрахована потужність 35%, то:

Вмикаємо пін на 35 секунд.

Вимикаємо пін на 65 секунд.

Цей процес працює у фоновому перериванні таймера, щоб не блокувати основний процесор.

Логіка безпеки та пріоритетів (Safety Interlocks): Перед подачею сигналу на виконавчий механізм, алгоритм перевіряє умови блокування. Реалізовано систему пріоритетів:

Пріоритет 1 (Аварійний):

ЯКЩО спрацював датчик протікання води → Закрити вхідний кран, вимкнути насос.

ЯКЩО  $T_{in} > 30^{\circ}C$  (перегрів) → Вимкнути контур опалення примусово.

Пріоритет 2 (Користувацький/Сценарний):

ЯКЩО відкрито вікно (сигнал від геркона) → Блокування роботи опалення в цій кімнаті (щоб не гріти вулицю).

ЯКЩО спрацювала пожежна сигналізація → Вимкнення вентиляції (щоб не роздмухувати вогонь).

Пріоритет 3 (Нормальний режим): Виконання команди від Fuzzy-регулятора.

Алгоритм адаптації до вітру: Введений коефіцієнт корекції  $K_{wind}$ , який додається до вихідного значення регулятора.

*Логіка:*

```
ЯКЩО      V_wind      >      5      м/с      ТО
  ADD_HEAT      =      (V_wind      -      5)      *      Coeff;
  Target_PWM      =      Fuzzy_Output      +      ADD_HEAT;
КІНЕЦЬ ЯКЩО
```

Це реалізує принцип керування за збуренням (Feed-forward control), компенсуючи тепловтрати ще до того, як впаде температура в кімнаті.

Розроблені алгоритми забезпечують надійну роботу системи в режимі реального часу. Використання фільтрації даних підвищує завадостійкість, реалізація нечіткої логіки дозволяє плавно регулювати температуру без перерегулювань, а багаторівнева система безпеки гарантує захист обладнання та мешканців у аварійних ситуаціях. Наступним кроком є програмна реалізація цих алгоритмів мовою C++.

### **3.4. Програмна реалізація системи (опис коду, використані бібліотеки, структура бази даних).**

Програмна реалізація роботизованої системи виконана мовою C++ з використанням об'єктно-орієнтованого підходу (ООП). Це забезпечує модульність коду, легкість його масштабування (додавання нових кімнат чи датчиків) та повторне використання компонентів.

В якості інтегрованого середовища розробки (IDE) обрано Visual Studio Code з розширенням PlatformIO. На відміну від стандартного Arduino IDE, PlatformIO дозволяє професійно керувати залежностями проекту, структурувати файловою системою та проводити налагодження (Debug) через JTAG-інтерфейс.

### 3.4.1. Використані бібліотеки та залежності

Для прискорення розробки та забезпечення надійності використано низку перевірених бібліотек з відкритим вихідним кодом.

Таблиця 3.4.

Бібліотеки з відкритим кодом

Назва бібліотеки	Призначення в проекті	Обґрунтування вибору
<b>eFLL (Embedded Fuzzy Logic Library)</b>	Реалізація ядра нечіткого керування	Легковажна бібліотека, адаптована для мікроконтролерів, підтримує алгоритм Мамдані та різні типи функцій належності.
<b>Adafruit Unified Sensor &amp; BME280</b>	Драйвер датчика температури/тиску	Забезпечує абстракцію апаратного рівня, автоматичну компенсацію та конвертацію "сирих" даних I2C у фізичні величини.
<b>PubSubClient</b>	Клієнт протоколу MQTT	Найбільш стабільна реалізація MQTT v3.1.1 для ESP32. Дозволяє підтримувати постійне з'єднання з брокером (KeepAlive).
<b>ArduinoJson (v6)</b>	Серіалізація/десеріалізація даних	Ефективний парсинг вхідних конфігурацій та формування телеметрії у форматі JSON. Оптимізована для роботи з малою пам'яттю (Static/Dynamic allocation).
<b>Ticker</b>	Апаратні таймери	Використовується для створення переривань для генерації повільного ШІМ-сигналу без блокування основного циклу <code>loop()</code> .

### 3.4.2. Архітектура програмного проекту

Проект побудовано за принципом MVC (Model-View-Controller), адаптованим для вбудованих систем:

**Model (Sensors/Actuators):** Класи, що відповідають за фізичну взаємодію з обладнанням.

**Controller (Logic):** Ядро обчислень (Fuzzy Logic, PID).

**View (Network):** Інтерфейс взаємодії із зовнішнім світом (MQTT, Serial).

Файлова структура проекту:

```
/src
├── main.cpp      // Точка входу, ініціалізація FreeRTOS задач
├── Config.h     // Глобальні налаштування (піни, Wi-Fi, MQTT топіки)
├── /modules
│   ├── FuzzyController.cpp // Реалізація нечіткого регулятора
│   ├── SensorManager.cpp  // Клас опитування та фільтрації датчиків
│   ├── NetworkHandler.cpp // Клас роботи з Wi-Fi та MQTT
│   └── ActuatorDriver.cpp  // Керування реле та ШІМ
```

### 3.4.3. Опис програмної реалізації ядра нечіткого керування

Ключовим елементом коду є клас FuzzyController, який програмно відтворює математичну модель, розроблену в Розділі 2.4.2.

Ініціалізація нечіткої системи (Code Snippet):

Нижче наведено фрагмент коду, що створює лінгвістичні змінні та функції належності для помилки температури (\$E\$).

```
C++
#include <Fuzzy.h>

// Створення об'єкта Fuzzy
Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
```

```

void setupFuzzyLogic() {
    // 1. Вхідна змінна: Похибка температури (Input: Error)
    FuzzyInput *temperatureError = new FuzzyInput(1);

    // Створення термів (Negative Big, Negative Small, Zero, etc.)
    FuzzySet *NB = new FuzzySet(-5, -5, -3, -1);
    FuzzySet *NS = new FuzzySet(-3, -1, -0.5, 0);
    FuzzySet *ZE = new FuzzySet(-0.5, 0, 0, 0.5);
    FuzzySet *PS = new FuzzySet(0, 0.5, 1, 3);
    FuzzySet *PB = new FuzzySet(1, 3, 5, 5);

    // Додавання термів до змінної
    temperatureError->addFuzzySet(NB);
    temperatureError->addFuzzySet(NS);
    temperatureError->addFuzzySet(ZE);
    // ... додавання інших
    fuzzy->addFuzzyInput(temperatureError);

    // 2. Вхідна змінна: Швидкість зміни похибки (dE/dt)
    // ... аналогічна ініціалізація ...

    // 3. База правил (Rule Base)
    // Правило 1: IF Error = NB AND dE = ZE THEN Output = PB (Max Heat)
    FuzzyRuleAntecedent *if_E_NB_and_dE_ZE = new FuzzyRuleAntecedent();
    if_E_NB_and_dE_ZE->joinWithAND(NB, dE_ZE); // Операція MIN

    FuzzyRuleConsequent *then_Output_PB = new FuzzyRuleConsequent();
    then_Output_PB->addOutput(out_PB);

    FuzzyRule *fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1, if_E_NB_and_dE_ZE, then_Output_PB);
    fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);

    // ... ініціалізація решти 24 правил
}

```

**Виконання розрахунку в циклі: Метод compute() викликається в окремому потоці FreeRTOS кожні 10 секунд.**

```

C++
float calculateOutput(float currentTemp, float setPoint) {
    float error = setPoint - currentTemp;
    float dError = (error - lastError) / dt;

    // Фазифікація входів
    fuzzy->setInput(1, error);
    fuzzy->setInput(2, dError);

    // Машина виведення
    fuzzy->fuzzify();

    // Дефазифікація (Центр тяжіння)
    float outputPWM = fuzzy->defuzzify(1);

    lastError = error;
    return outputPWM; // Повертає % потужності (0-100)
}

```

### 3.4.4. Реалізація керування сервоприводами (Software PWM)

Оскільки період ШІМ для термоприводів складає 100 секунд, використання апаратного таймера `ledc` (який працює на частотах кГц) неможливе. Реалізовано алгоритм "повільного ШІМ" на базі системного часу `millis()`.

```
C++
void updateActuators(float dutyCyclePercent) {
    unsigned long currentMillis = millis();
    unsigned long onTime = (dutyCyclePercent / 100.0) * PWM_PERIOD_MS; //
наприклад, 35000 мс

    if (currentMillis - windowStartTime > PWM_PERIOD_MS) {
        windowStartTime += PWM_PERIOD_MS; // Початок нового циклу
    }

    if (currentMillis - windowStartTime < onTime) {
        digitalWrite(HEATER_PIN, HIGH); // Відкрити клапан
    } else {
        digitalWrite(HEATER_PIN, LOW); // Закрити клапан
    }
}
```

### 3.4.5. Структура бази даних та протокол обміну

Система не зберігає історичні дані на самому мікроконтролері через обмеженість пам'яті. Натомість реалізовано передачу телеметрії на сервер, де розгорнуто базу даних часових рядів (Time Series Database).

Формат даних MQTT (JSON Payload): Контролер публікує дані в топик `home/livingroom/telemetry` у форматі JSON. Це забезпечує легку інтеграцію з будь-якими Dashboard-системами (Home Assistant, Grafana).

```
JSON
{
  "timestamp": 1728556000,
  "sensors": {
    "temperature": 21.4,
    "humidity": 45.2,
    "pressure": 1013,
    "wind_speed": 3.5,
    "co2": 650
  },
  "system": {
    "setpoint": 21.0,
    "heater_pwm": 35,
    "mode": "fuzzy_auto",
    "wifi_rssi": -65
  }
}
```

Структура бази даних (InfluxDB): Для збереження та аналізу даних обрано InfluxDB, оскільки вона оптимізована для запису метрик з IoT-пристроїв. Схема бази даних:

Measurement (Вимірювання): `climate_metrics`

Tags (Індексовані поля):

`device_id: "ESP32_Master_01"`

`room: "LivingRoom"`

Fields (Значення):

`temp_in (float)`

`temp_out (float)`

`heater_power (int)`

`wind_correction (float)`

Така структура дозволяє виконувати швидкі аналітичні запити, наприклад: *"Показати середню витрату енергії на опалення при швидкості вітру > 5 м/с за останній місяць"*.

Розроблена програмна архітектура забезпечує реалізацію складних алгоритмів керування (Fuzzy Logic) на ресурсообмеженому пристрої ESP32. Використання бібліотек `eFLL` та `ArduinoJson` дозволило створити гнучку систему, яка легко інтегрується в сучасні екосистеми "Розумного будинку" через стандартні протоколи MQTT та JSON, а модульна структура коду спрощує подальшу підтримку та модернізацію системи.

### **3.5. Розробка інтерфейсу користувача (WEB-інтерфейс або мобільний додаток, Dashboard)**

Інтерфейс користувача (Human-Machine Interface — HMI) є верхнім рівнем ієрархії системи керування. Його основне завдання — забезпечити зручний

моніторинг параметрів мікроклімату, оперативне керування уставками та візуалізацію роботи алгоритмів автоматики (зокрема, нечіткого регулятора).

Враховуючи вимоги до сучасної автоматизації будівель (доступність з будь-якого пристрою, кросплатформність), в якості основного інтерфейсу обрано WEB-орієнтований Dashboard, який інтегрується в екосистему Home Assistant. Це дозволяє об'єднати керування розробленим контролером ESP32 та іншими розумними пристроями в єдиному додатку.

### 3.5.1. Обґрунтування вибору платформи візуалізації

Для реалізації інтерфейсу розглянуто три підходи:

Власний веб-сервер на ESP32: Мікроконтролер генерує HTML-сторінку.

*Недоліки:* Обмежені ресурси процесора, низька швидкість завантаження графіків, складність створення адаптивного дизайну.

Розробка нативного мобільного додатку (Android/iOS):

*Недоліки:* Висока трудомісткість розробки, необхідність підтримки різних версій ОС, складність публікації.

Використання IoT-платформи (Home Assistant + Grafana):*Переваги:* Готові віджети (картки) для термостатів, підтримка протоколу MQTT "з коробки", потужні засоби аналітики (History), можливість доступу через браузер та офіційний мобільний додаток.

Рішення: Обрано комбінований підхід. Оперативне керування реалізується через Lovelace UI (інтерфейс Home Assistant), а глибока аналітика та наукові графіки — через систему Grafana, яка вбудовується в Dashboard через iframe.

### 3.5.2. Архітектура взаємодії інтерфейсу з системою

Обмін даними між інтерфейсом користувача та контролером керування відбувається асинхронно через брокер повідомлень MQTT.

Потік даних "Вгору" (Моніторинг):

Контролер ESP32 публікує JSON-пакет у топик `home/livingroom/telemetry`.

Home Assistant підписаний на цей топик. Він автоматично розбирає JSON і оновлює стан сутностей (Entities): `sensor.temperature`, `sensor.valve_position`, `sensor.control_mode`.

Інтерфейс відображає нові значення в реальному часі без перезавантаження сторінки (через технологію WebSocket).

Потік даних "Вниз" (Керування):

Користувач змінює уставку температури на слайдері в додатку.

Home Assistant публікує повідомлення в топик `home/livingroom/setpoint`.

ESP32 отримує повідомлення, парсить його та оновлює змінну `setPoint` у пам'яті регулятора.

### 3.5.3. Розробка структури Dashboard (Lovelace UI)

Інтерфейс розбито на три функціональні вкладки (View), що відповідають різним ролям користувачів:

Головний екран (Dashboard "Користувач")

Призначений для повсякденного використання мешканцями. Містить мінімально необхідний набір елементів:

Картка "Клімат" (Thermostat Card): Центральний елемент у вигляді кругової шкали. Відображає поточну температуру ( $T_{in}$ ) та дозволяє змінювати бажану ( $T_{set}$ ). Колір шкали змінюється залежно від режиму (Помаранчевий — нагрів, Сірий — очікування).

Картка "Стан повітря": Група сенсорів: Вологість (%), Якість повітря ( $CO_2$  ppm), Тиск (гПа).

Перемикач режимів: Кнопки "AUTO" (робота Fuzzy-регулятора), "ECO" (зниження температури на 3°C), "MANUAL" (ручне керування клапаном).

Інженерне меню (Dashboard "Налагодження")

Призначений для розробника системи. Дозволяє спостерігати за внутрішніми змінними алгоритму, що критично важливо для захисту кваліфікаційної роботи.

Картка "Fuzzy Logic Monitor":

Відображення розрахованої помилки ( $E$ ) та її похідної ( $dE/dt$ ).

Візуалізація активних правил (наприклад, індикатор "Rule 1 Active").

Поточний розрахований відсоток відкриття клапана (PWM Duty Cycle).

Картка "Вітрова корекція":

Графік швидкості вітру з анемометра.

Значення коефіцієнта  $K_{wind}$ , який додається до виходу регулятора. Це наочно демонструє роботу адаптивного алгоритму (Наукова новизна).

Екран налаштувань:

Поля введення (Input Numbers) для налаштування коефіцієнтів "на льоту" без перепрошивки контролера:

$K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  (для порівняння з ПД).

Set\_Wind\_Factor (вплив вітру).

Cycle\_Time (період ШІМ).

#### 3.5.4. Візуалізація аналітичних даних (Grafana)

Для підтвердження ефективності системи (порівняння ПД та Fuzzy) реалізовано графічний аналіз. Дані з бази InfluxDB (див. п. 3.4) візуалізуються у Grafana.

Створено такі типи графіків:

1. Графік перехідного процесу: Накладені дві криві —  $T_{set}$  (ступінчастий сигнал) та  $T_{real}$  (реакція системи). Дозволяє візуально оцінити час регулювання та перерегулювання.

2. Heatmap роботи клапана: Кольорова діаграма, що показує інтенсивність роботи сервоприводу протягом доби. Дозволяє оцінити енергоспоживання.

3. Кореляційний графік: Залежність "Швидкість вітру" vs "Потужність опалення". Дозволяє перевірити гіпотезу про те, що система збільшує потужність при посиленні вітру ще до падіння температури всередині.

### 3.5.5. Система сповіщень (Notifications)

Важливою частиною інтерфейсу є зворотний зв'язок у аварійних ситуаціях. Реалізовано інтеграцію з месенджером Telegram.

Створено Telegram-бота, який отримує команди від Home Assistant Automation.

*Сценарії сповіщень:*

Критично: "УВАГА! Протікання води у ванній кімнаті! Клапан перекрито."  
(Надсилається миттєво з звуковим сигналом).

Попередження: "Якість повітря критична ( $\text{CO}_2 > 1200$  ppm).  
Рекомендовано відкрити вікно."

Інфо: "Система перейшла в режим ЕКО (відсутність руху більше 1 години)."

### 3.5.6. Адаптивність та мобільний доступ

Інтерфейс автоматично масштабується під розмір екрану.

Desktop (ПК): Відображається панель у 3 колонки (Головна + Графіки + Лог подій).

Mobile (Смартфон): Інтерфейс перебудовується в 1 колонку. Використовуються великі сенсорні зони для зручного натискання пальцем.

Для безпечного доступу з мережі Інтернет (без використання хмарних сервісів виробників) налаштовано VPN-тунель на базі **WireGuard**. Це забезпечує

шифрований канал зв'язку між смартфоном користувача та домашнім сервером, захищаючи систему керування від зовнішніх кібератак.

Розроблений інтерфейс користувача відповідає сучасним стандартам IoT-систем. Поєднання інтуїтивно зрозумілого Dashboard для користувача та глибокої аналітики Grafana для інженера дозволяє повноцінно експлуатувати та досліджувати розроблену роботизовану систему. Використання стандартних протоколів (MQTT, HTTP) забезпечує легку інтеграцію в будь-яку екосистему "Розумного будинку".

### **3.6. Опис макету системи та результати експериментальних досліджень.**

Завершальним етапом проектування програмно-апаратного комплексу є створення фізичного макету (прототипу) та проведення натурних випробувань. Метою цього етапу є верифікація теоретичних розрахунків, перевірка працездатності розроблених електричних схем і програмного забезпечення, а також кількісна оцінка ефективності запропонованого нечіткого регулятора порівняно з класичними методами керування.

#### **3.6.1. Конструкція лабораторного стенду (Макету)**

Для проведення досліджень було зібрано лабораторний стенд, який імітує теплові процеси в житловому приміщенні в зменшеному масштабі. Стенд складається з двох частин: блоку керування та об'єкта регулювання (термокамери).

Апаратна реалізація блоку керування: Електронна частина змонтована на макетній платі під пайку (Protoboard) для забезпечення надійності контактів.

Ядро: Модуль ESP32-DevKit V1 встановлено у "ліжечка" (female headers) для можливості швидкої заміни.

Силова частина: Використано модуль MOSFET-транзистора (IRLZ44N) для ШІМ-керування нагрівачем та релейний блок для керування вентилятором.

Інтерфейси: Виведено роз'єми гвинтового типу для підключення зовнішнього живлення 12В та датчиків I2C.

Корпус: Плата розміщена в стандартному пластиковому корпусі для монтажу на DIN-рейку, що відповідає вимогам до обладнання "Розумного будинку".

Фізична модель об'єкта (Термокамера): Оскільки тестування на реальному будинку вимагає тривалого часу (доба для одного експерименту) і залежить від погоди, розроблено фізичну модель кімнати:

Корпус: Теплоізований бокс об'ємом  $0.05 \text{ м}^3$  (пінополістирол товщиною 20 мм).

Нагрівач: Галогенна лампа потужністю 50 Вт (12В), яка імітує роботу радіатора опалення. Лампа має малу теплову інерцію, що дозволяє прискорити експерименти.

Вентиляція/Вітер: Комп'ютерний вентилятор (Cooler 80mm) з регульованими обертами, встановлений на стінці боксу. Він виконує подвійну функцію: імітує тепловтрати через інфільтрацію (вітер) та забезпечує охолодження.

Сенсори: В середині боксу встановлено датчик VME280. Зовні — анемометр, потік повітря на який створює додатковий зовнішній вентилятор.

### 3.6.2. Методика проведення експерименту

Експериментальні дослідження проводилися у три етапи. Дані з контролера передавалися через Wi-Fi на локальний сервер (MQTT Broker + InfluxDB) з дискретністю 1 секунда для подальшого аналізу.

Дослідження перехідних процесів (Step Response). Система повинна нагріти об'єм повітря з початкової температури  $T_{start} = 20^\circ\text{C}$  до уставки  $T_{set} = 28^\circ\text{C}$ . Порівнюється робота ПД-регулятора та розробленого Fuzzy-регулятора.

Дослідження реакції на збурення (Disturbance Rejection). При сталій температурі вмикається "вітер" (вентилятор обдуву), що різко збільшує тепловтрати.

Перевірка надійності. Безперервна робота системи протягом 24 годин.

### 3.6.3. Результати Експерименту №1: Динаміка нагріву (ПД проти Fuzzy)

Під час тестування класичного ПД-регулятора (коефіцієнти підібрані методом автоналаштування) спостерігалось значне перерегулювання. Це пояснюється тим, що датчик ВМЕ280 має певну інерцію, і тепло від галогенної лампи продовжує надходити навіть після її вимкнення.

Результати ПД-регулятора:

Час досягнення уставки: 8 хвилин.

Максимальне перерегулювання (Overshoot):  $+2.4^{\circ}\text{C}$  (Температура досягла  $30.4^{\circ}\text{C}$ ).

Характер процесу: затухаючі коливання (3 цикли до стабілізації).

Результати Нечіткого (Fuzzy) регулятора: Алгоритм нечіткої логіки, реалізований в п. 3.4, почав знижувати шпаруватість ШІМ (потужність нагріву) ще на підході до уставки (в зоні "Positive Small").

Час досягнення уставки: 9.5 хвилин (дещо повільніше, але плавніше).

Максимальне перерегулювання:  $+0.3^{\circ}\text{C}$  (Температура досягла  $28.3^{\circ}\text{C}$ ).

Характер процесу: аперіодичний, стабільний.

Експеримент підтвердив результати математичного моделювання. Використання нечіткої логіки дозволило зменшити перерегулювання у 8 разів, що є критичним для енергоефективності, оскільки кожен градус перегріву — це зайві витрати електроенергії.

### 3.6.4. Результати Експерименту №2: Адаптація до вітрового навантаження

У цьому сценарії перевірялася наукова новизна роботи — контур компенсації вітру. Система утримувала температуру  $28^{\circ}\text{C}$ . На 10-й хвилині було увімкнено імітацію шквального вітру (швидкість потоку на анемометрі 6 м/с).

Без адаптації: Температура в боксі почала падати через посилений теплообмін стінок. Регулятор відреагував лише через 2 хвилини, коли температура впала до  $26.5^{\circ}\text{C}$ . Відновлення режиму зайняло ще 15 хвилин.

З адаптацією (Feed-forward): Контролер зчитав зростання напруги на анемометрі миттєво. Алгоритм додав корегуючий коефіцієнт до ШІМ-сигналу (+15%) ще до того, як датчик температури зафіксував зміни.

Результат: Короткочасне просідання температури склало лише  $0.4^{\circ}\text{C}$  (до  $27.6^{\circ}\text{C}$ ), після чого система повернулася до норми за 3 хвилини.

Введення каналу вимірювання швидкості вітру дозволяє системі працювати на випередження, компенсуючи збурення майже миттєво.

### 3.6.5. Аналіз енергоефективності та ресурсу обладнання

На основі логів роботи за 3 години експерименту було розраховано сумарний час знаходження нагрівача у ввімкненому стані (Duty Cycle Integral).

Система з релейним керуванням (On/Off): Нагрівач працював 45% часу. Кількість перемикачів реле: 120 разів.

Роботизована система (Fuzzy + PWM): Нагрівач працював 38% часу (за рахунок точного дозування потужності та відсутності перегрівів). Кількість перемикачів механічних частин: 0 (використовується транзистор).

Економія енергії на лабораторному макеті склала близько 15.5%. Для реального будинку це значення може варіюватися, але тенденція до економії є доведеною. Відсутність механічних перемикачів гарантує значне подовження терміну служби виконавчих механізмів.

### 3.6.6. Оцінка стабільності програмного забезпечення

Тест на стабільність (Stability Run) тривав 24 години безперервно. За цей час:

Кількість перезавантажень контролера (WDT Reset): 0.

Кількість втрачених пакетів MQTT: менше 0.1%.

Помилки читання сенсора BME280 (I2C Error): 2 (успішно оброблені програмним фільтром).

Це свідчить про високу надійність розробленого коду (п. 3.4) та правильність схемотехнічних рішень (роздільне живлення, фільтрація), прийнятих у п. 3.2.

У третьому розділі виконано повний цикл інженерної розробки: від обґрунтування елементної бази (ESP32, BME280) та проектування електричних схем до написання складного програмного забезпечення на C++ та реалізації інтерфейсу диспетчера. Створений фізичний макет та проведені експерименти підтвердили працездатність системи, її стійкість до зовнішніх впливів та енергетичну ефективність, що повністю вирішує задачі, поставлені у технічному завданні.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

#### **4.1. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при розробці та експлуатації електронної системи**

Процес виконання кваліфікаційної роботи можна умовно поділити на дві стадії, кожна з яких характеризується специфічними умовами праці:

1. Стадія проектування та програмування: робота в офісному або лабораторному приміщенні за комп'ютеризованим робочим місцем (написання коду, моделювання в Matlab, розробка схем).

2. Стадія макетування та налагодження: робота з електротехнічним обладнанням, паяльним інструментом, вимірювальними приладами та діючою електроустановкою під напругою 220 В.

Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация», на розробника можуть впливати такі групи факторів: фізичні, хімічні та психофізіологічні.

##### **4.1.1. Фізичні небезпечні та шкідливі фактори**

Ця група факторів є найбільш чисельною при роботі з електронними системами.

##### **1. Підвищене значення напруги в електричному ланцюзі.**

Це основний небезпечний фактор під час стадії налагодження макету та експлуатації системи. Розроблений модуль керування підключається до побутової мережі змінного струму напругою 220 В (50 Гц) для живлення блоку живлення та комутації навантажень (насосів, вентиляторів).

Джерело небезпеки: Струмопровідні частини клемників, відкриті контакти реле, пошкоджена ізоляція дротів, корпус паяльника (у разі пробою).

Наслідки: Електричний удар, опіки, фібриляція серця. Проходження струму силою всього 0.1 А через тіло людини вважається смертельно небезпечним.[4]

## 2. Підвищена температура поверхонь обладнання.

Джерело небезпеки: Робоча частина паяльника (нагрівається до 300–400°C), радіатори охолодження силових елементів, корпус галогенної лампи (використовується в макеті як нагрівач).

Наслідки: Термічні опіки шкіри при випадковому дотику.

## 3. Електромагнітні випромінювання (ЕМВ).

Джерело: Монітор персонального комп'ютера (ПК), системний блок, а також сам об'єкт розробки — модуль ESP32, який є джерелом високочастотного випромінювання (Wi-Fi 2.4 ГГц, Bluetooth).

Наслідки: Тривалий вплив ЕМВ може викликати розлади нервової системи, головний біль та підвищену втомлюваність.

## 4. Недостатня освітленість робочої зони.

Робота з дрібними радіоелектронними компонентами (SMD-монтаж, перевірка друкованих плат) відноситься до робіт найвищої точності (розряд I-III згідно з ДБН В.2.5-28-2018).

Наслідки: Недостатнє освітлення призводить до перенапруження зорового аналізатора, розвитку короткозорості та загального зниження працездатності. Також небезпечним є стробоскопічний ефект від люмінесцентних ламп при роботі з рухомими частинами (вентиляторам).

## 5. Шум та вібрація.

Джерело: Системи охолодження комп'ютерної техніки (кулери), вентиляційна установка макету.

Наслідки: Хоча рівень шуму в лабораторії зазвичай не перевищує допустимих 50 дБА (для наукової праці), монотонний шум може знижувати концентрацію уваги.

## 6. Мікроклімат приміщення.

Параметри мікроклімату (температура, вологість, швидкість руху повітря) регламентуються ДСанПіН 3.3.2.007-98.

Відхилення: Підвищена температура в приміщенні влітку або сухе повітря взимку негативно впливають на теплообмін організму розробника.

### 4.1.2. Хімічні шкідливі фактори

Хімічні фактори виникають переважно на етапі монтажу електронних компонентів (паяння).

#### 1. Загазованість повітря робочої зони.

*Джерело:* Під час паяння використовуються припої (сплави олова та свинцю) та флюси (каніфоль, кислоти). При нагріванні вони виділяють токсичні аерозолі свинцю, оксиди олова та продукти термічного розкладання каніфолі.

*Наслідки:* Вдихання парів свинцю може призвести до хронічного отруєння організму (накопичення важких металів), а продукти горіння флюсу подразнюють слизову оболонку очей та дихальних шляхів, викликаючи алергічні реакції.

### 4.1.3. Психофізіологічні фактори

Ця група факторів пов'язана зі специфікою роботи за комп'ютером та інтелектуальною діяльністю.

#### 1. Нервово-психічне перевантаження (Розумова перенапруга).

Причина: Розробка алгоритмів нечіткої логіки, налагодження програмного коду та аналіз великих масивів даних вимагають значного напруження уваги, пам'яті та мислення. Це може призводити до стресу та емоційного вигорання.

## 2. Перенапруження зорового аналізатора.

Причина: Тривала фіксація погляду на екрані монітора, зчитування дрібного шрифту коду, робота з дрібними деталями на платі. Це основний шкідливий фактор для ІТ-спеціалістів та інженерів-електронників.

## 3. Статичне навантаження та гіподинамія.

Причина: Вимушена робоча поза (сидячи) протягом тривалого часу.

Наслідки: Порушення кровообігу в органах малого тазу та нижніх кінцівках, розвиток захворювань опорно-рухового апарату (остеохондроз, сколіоз), тунельний синдром зап'ястя (від роботи з мишкою).

Зведена таблиця факторів:

Для наочності аналізу, виявлені фактори зведено у Таблицю 4.1.

Таблиця 4.1.

### Перелік шкідливих та небезпечних виробничих факторів

Група фактора	Найменування фактора	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Нормативний документ
Фізичні	Підвищене значення напруги (220 В)	Електромережа, БЖ, стенд	Електротравми, опіки	НПАОП 40.1-1.21-98
	Електромагнітне випромінювання	ПК, Wi-Fi модуль	Втома, головний біль	ДСанПі Н 3.3.6.096-2002

<b>Група фактора</b>	<b>Найменування фактора</b>	<b>Джерело виникнення</b>	<b>Можливі наслідки</b>	<b>Нормативний документ</b>
	Недостатнє освітлення	Помилки проектування	Погіршення зору	ДБН В.2.5-28-2018
	Підвищена температура поверхні	Паяльник, радіатори	Термічні опіки	-
<b>Хімічні</b>	Вміст шкідливих речовин у повітрі	Паяння (свинець, флюс)	Отруєння, алергія	ГОСТ 12.1.005-88
<b>Психофізіологічні</b>	Зорове напруження	Монітор, дрібні деталі	Міопія, втома очей	ДСаНПі Н 3.3.2.007-98
	Монотонність та статична поза	Робота сидячи	Остеохондроз	-

Аналіз умов праці показав, що при виконанні кваліфікаційної роботи мають місце потенційно шкідливі та небезпечні фактори всіх основних груп. Найбільшу небезпеку становить ураження електричним струмом під час макетування та психофізіологічні навантаження під час програмування. Це вимагає розробки та впровадження комплексних заходів безпеки, які будуть розглянуті в наступних пунктах розділу.

#### **4.2. Вимоги електробезпеки при роботі з побутовою мережею 220В**

Оскільки розроблювана роботизована система керування життєзабезпеченням містить силову частину, що живиться від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В (50 Гц), питання електробезпеки є критично важливими. Під час

макетування, налагодження та експлуатації стенду існує реальна загроза ураження електричним струмом, що класифікується як основний небезпечний фактор.

Електробезпека під час виконання роботи забезпечується дотриманням вимог ДСТУ 7237:2011 «ССБП. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту» та «Правил улаштування електроустановок» (ПУЕ).[3]

#### 4.2.1. Класифікація умов праці за ступенем небезпеки

Лабораторне приміщення, в якому проводяться роботи з розробки та тестування системи, відноситься до категорії «Приміщень без підвищеної небезпеки» за умови дотримання наступних факторів:

Відносна вологість повітря не перевищує 75%.

Температура повітря знаходиться в межах норми (немає тривалої високої температури  $>35^{\circ}\text{C}$ ).

Відсутні струмопровідні підлоги (металеві, земляні, залізобетонні) та хімічно агресивне середовище.

Однак, сам процес налагодження макету, який має відкриті струмопровідні частини (клеми реле, друковані провідники силового контуру), переводить робоче місце в розряд робіт з підвищеною небезпекою, що вимагає застосування додаткових технічних засобів захисту.

#### 4.2.2. Технічні заходи захисту від ураження струмом

Для запобігання електравматизму під час роботи з макетом системи реалізовано наступні технічні рішення:

##### 1. Захисне заземлення (Earthing).

Усі металеві частини корпусу лабораторного стенду, а також корпус персонального комп'ютера та паяльної станції, повинні бути надійно з'єднані з

захисним провідником (PE) електромережі. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом.

Це гарантує, що у випадку пробою ізоляції фазного провідника на корпус, потенціал на ньому не досягне небезпечних значень, а захисна автоматика відключить живлення.

## 2. Використання пристрою захисного вимкнення (ПЗВ).

Оскільки система керує нагрівальними приладами та контактує з водою (контур опалення, датчики протікання), обов'язковим є підключення стенду через диференційний автомат або ПЗВ (UZO) зі струмом витоку 30 мА (для вологих зон — 10 мА). Це основний захист людини від прямого дотику до струмопровідних частин.

### Гальванічна розв'язка (Galvanic Isolation).

Як зазначено в розділі 3, схема модуля керування спроектована з чітким розділенням низьковольтної (логічної) та високовольтної (силової) частин:

Використання оптопар (PC817) для керування симісторами та реле.

Використання ізольованих DC-DC перетворювачів живлення.

Дотримання зазорів (Clearance) та шляхів витоку (Creepage) на друкованій платі не менше 3 мм між доріжками 220 В та ланцюгами мікроконтролера.

Подвійна ізоляція.

Усі дроти живлення 220 В, що підходять до макету, повинні мати подвійну ізоляцію. Місця з'єднань мають бути закриті термозбіжними трубками або ізоляційними ковпачками.

#### 4.2.3. Організаційні вимоги безпеки при налагодженні

Під час проведення експериментальних досліджень (п. 3.6) розробник зобов'язаний дотримуватися алгоритму безпечного виконання робіт:

Візуальний огляд: Перед подачею напруги необхідно перевірити цілісність ізоляції дротів, надійність кріплення контактів у клемниках (щоб уникнути іскріння) та відсутність сторонніх предметів на платі.

Робота однією рукою: При проведенні вимірювань мультиметром на увімкненому стенді рекомендується працювати однією рукою (інша рука не повинна торкатися заземлених предметів), щоб уникнути проходження струму через серце по шляху «рука-рука».

Зняття напруги при монтажі: Будь-які зміни в схемі, перепайка компонентів або заміна датчиків виконуються виключно при повному відключенні стенду від мережі (вийнята вилка з розетки).

Після вимкнення необхідно почекати 10-15 секунд для розряду вхідних конденсаторів блоку живлення.

Заборона роботи без нагляду: Категорично забороняється залишати увімкнений макет з нагрівальними елементами без нагляду, оскільки це створює пожежну небезпеку.

#### 4.2.4. Дії у випадку ураження електричним струмом

Якщо, незважаючи на заходи безпеки, стався випадок ураження струмом, необхідно діяти згідно з інструкцією надання першої допомоги:

1. Негайно звільнити потерпілого від дії струму (вимкнути рубильник/автомат, або перерубати дріт інструментом з ізольованою ручкою, або відтягнути потерпілого за сухий одяг).
2. Викликати швидку медичну допомогу.

3. Якщо потерпілий при свідомості — забезпечити спокій. Якщо відсутнє дихання або пульс — негайно розпочати серцево-легеневу реанімацію (непрямий масаж серця та штучне дихання) і продовжувати до прибуття лікарів.

Дотримання описаних технічних (заземлення, ПЗВ, гальванічна розв'язка) та організаційних заходів дозволяє звести ризик ураження електричним струмом до прийняттого рівня та забезпечити безпечні умови праці під час розробки роботизованої системи.

### **4.3. Розрахунок штучного освітлення робочого місця розробника**

Раціонально організоване освітлення є одним із ключових факторів забезпечення безпечних умов праці інженера-розробника. Робота над створенням програмно-апаратного комплексу (проектування схем, паяння дрібних компонентів SMD, написання програмного коду) відноситься до робіт високої точності, що викликає значне напруження зорового аналізатора. Недостатнє освітлення може призвести до швидкої втомлюваності очей, розвитку короткозорості та загального зниження продуктивності праці.

Розрахунок виконується відповідно до вимог ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення».[2]

#### **4.3.1. Вихідні дані для розрахунку**

Характеристика приміщення: Лабораторія розробки має прямокутну форму з наступними геометричними параметрами:

Довжина приміщення:  $A = 6$  м.

Ширина приміщення:  $B = 4$  м.

Висота приміщення:  $H = 3$  м.

Площа приміщення:  $S = A \cdot B = 24$  м<sup>2</sup>.

Нормовані параметри: Згідно з ДБН В.2.5-28:2018, розряд зорової роботи для інженерно-технічних працівників, що працюють з дисплеями та дрібними деталями — III (високої точності).[2]

Нормована освітленість робочої поверхні:  $E_{norm} = 500$  лк.

Коефіцієнт запасу (враховує запилення та старіння ламп):  $K_z = 1.4$  (для світлодіодних джерел у чистих приміщеннях).

Коефіцієнт нерівномірності освітлення:  $z = 1.1$ .

Вибір джерела світла: Для забезпечення енергоефективності та комфортного спектру світла обираємо світлодіодні панелі типу LED 600x600 36W.

Світловий потік однієї лампи (світильника):  $\Phi_{lamp} = 3200$  лм.

Потужність одного світильника:  $P_{lamp} = 36$  Вт.

Кількість ламп у світильнику:  $n = 1$  (LED-панель розглядається як єдине ціле).

Коефіцієнти відбиття поверхонь:

Стелі (біла фарба):  $\rho_c = 70\%$ .

Стін (світло-сірі):  $\rho_w = 50\%$ .

Підлоги (лінолеум):  $\rho_f = 30\%$ .

#### 4.3.2. Розрахунок методом коефіцієнта використання світлового потоку

Метою розрахунку є визначення необхідної кількості світильників  $N$  для забезпечення нормованої освітленості  $E_{norm}$ .

Крок 1. Визначення висоти підвісу світильників. Розрахункова висота  $h_p$  визначається як різниця між висотою приміщення та висотою робочої поверхні (стандартний стіл):  $h_p = H - h_{work} - h_{overhang}$  Приймаємо висоту робочого столу  $h_{work} = 0.8$  м. Світильники вбудовані у підвісну стелю, тому звис  $h_{overhang} = 0$ .  
 $h_p = 3.0 - 0.8 = 2.2$  м

Крок 2. Розрахунок індексу приміщення ( $i$ ). Індекс приміщення характеризує його геометрію для світлотехнічних розрахунків:  $i = \frac{S}{h_p \cdot (A+B)} = \frac{24}{2.2 \cdot (6+4)} = \frac{24}{22} \approx 1.09$

Приймаємо найближче стандартне значення  $i = 1.1$ .

Крок 3. Визначення коефіцієнта використання світлового потоку ( $\eta$ ). За довідковими таблицями для світлодіодних світильників з косинусною діаграмою (Д) при індексі  $i = 1.1$  та коефіцієнтах відбиття  $\rho_c = 70\%$ ,  $\rho_w = 50\%$ ,  $\rho_f = 30\%$ , знаходимо значення:  $\eta = 0.48$  (48%) Це означає, що лише 48% світлового потоку потрапляє на робочу поверхню, решта поглинається стінами та стелею.

Крок 4. Розрахунок необхідної кількості світильників. Використовуємо основну формулу методу коефіцієнта використання: 
$$N = \frac{E_{norm} \cdot S \cdot K_z \cdot z}{\Phi_{lamp} \cdot \eta \cdot n}$$

$$\text{Підставляємо значення: } N = \frac{500 \cdot 24 \cdot 1.4 \cdot 1.1}{3200 \cdot 0.48 \cdot 1} = \frac{18480}{1536} = 12.03$$

Округлюємо до найближчого цілого числа в більшу сторону або для забезпечення симетрії розташування. Приймаємо  $N = 12$  шт.

Крок 5. Розробка схеми розташування світильників. Для рівномірного освітлення приміщення  $6 \times 4$  м доцільно розташувати 12 світильників у 3 ряди по 4 світильники в кожному (сітка  $3 \times 4$ ).

Крок 6. Перевірка фактичної освітленості. Розрахуємо, яке фактичне значення освітленості  $E_{fact}$  ми отримаємо при встановленні 12 світильників: 
$$E_{fact} = \frac{N \cdot \Phi_{lamp} \cdot \eta \cdot n}{S \cdot K_z \cdot z} = \frac{12 \cdot 3200 \cdot 0.48 \cdot 1}{24 \cdot 1.4 \cdot 1.1} = \frac{18432}{36.96} \approx 498.7 \text{ лк}$$

Відхилення від норми складає:  $\Delta E = \frac{E_{fact} - E_{norm}}{E_{norm}} \cdot 100\% = \frac{498.7 - 500}{500} \cdot 100\% = -0.26\%$  Допустиме відхилення за нормами складає  $-10\% \dots + 20\%$ . Отриманий результат ( $-0.26\%$ ) повністю задовольняє вимогам.

#### 4.3.3. Енергетична ефективність системи освітлення

Розрахуємо загальну споживану потужність системи освітлення  $P_{total}$ : 
$$P_{total} = N \cdot P_{lamp} = 12 \cdot 36 = 432 \text{ Вт} = 0.432 \text{ кВт}$$

Питома потужність на одиницю площі: 
$$P_{spec} = \frac{P_{total}}{S} = \frac{432}{24} = 18 \text{ Вт/м}^2$$

Для порівняння: при використанні люмінесцентних ламп (ЛВО 4x18 Вт) для досягнення такої ж освітленості знадобилося б близько 35 Вт/м<sup>2</sup>. Використання LED-панелей дозволяє знизити енергоспоживання на 48%, що відповідає сучасним вимогам енергозбереження.

Розрахунок показав, що для забезпечення комфортних та безпечних умов праці розробника (нормована освітленість 500 лк) у приміщенні площею 24 м<sup>2</sup> необхідно встановити 12 світлодіодних панелей потужністю 36 Вт кожна. Обрана система освітлення є енергоефективною та забезпечує якісне світлове середовище без пульсацій, що мінімізує втому зору при роботі з електронікою та ПК.

#### **4.4. Заходи пожежної безпеки**

Забезпечення пожежної безпеки є критично важливим етапом організації робочого місця інженера-розробника, оскільки процес створення та налагодження електронної системи пов'язаний із використанням нагрівальних приладів (паяльні станції, термофени), легкозаймистих речовин (спирт, флюси, лаки) та експлуатацією електроустановок під напругою.

Пожежна безпека об'єкта регламентується Кодексом цивільного захисту України та НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

##### **4.4.1. Аналіз причин виникнення пожеж при розробці електроніки**

Під час виконання дипломної роботи (стадії паяння та випробування макету) основними потенційними причинами виникнення пожежі можуть бути:

Коротке замикання (КЗ) в електропроводці або макеті. Це найбільш ймовірна причина. Пошкодження ізоляції дротів, потрапляння струмопровідних предметів (обрізки ніжок резисторів, краплі припою) на плату, що знаходиться під напругою, призводить до різкого зростання сили струму, перегріву провідників та займання їх ізоляції.

Перехідні опори. Неякісний контакт у місцях з'єднання дротів (скрутки, погано затягнуті гвинтові клеми) викликає локальний нагрів до температур, достатніх для займання пластмасових корпусів клемників (понад 250–300°C).

Тепловий пробій компонентів. Вихід з ладу силових транзисторів (MOSFET) або електролітичних конденсаторів може супроводжуватися їх вибухом та викидом розпеченого електроліту.

Порушення правил експлуатації електронагрівальних приладів. Залишений без нагляду увімкнений паяльник поблизу легкозаймистих матеріалів (папір, креслення, пластик) є частою причиною загоряння.

Перевантаження електромережі. Одночасне підключення до однієї розетки (через подовжувач) потужних споживачів: ПК, паяльної станції, лабораторного блоку живлення та нагрівача стенду (галогенної лампи).

#### 4.4.2. Класифікація приміщення та пожежі

Для вибору правильних засобів гасіння необхідно класифікувати об'єкт.

Категорія приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою (згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016):

Лабораторія розробки відноситься до категорії «В» (Пожежонебезпечна). Це зумовлено наявністю твердих горючих речовин (меблі, папір, пластикові корпуси приладів, ізоляція кабелів), які здатні горіти при взаємодії з джерелом запалювання, але не вибухають.

Клас пожежі (згідно з ДСТУ EN 2:2014):

Враховуючи специфіку роботи, можливі пожежі двох класів:

Клас А: Горіння твердих речовин (дерево, папір, текстиль).

Клас Е: Горіння електроустановок, що перебувають під напругою (комп'ютерна техніка, макет системи, проводка).

#### 4.4.3. Система попередження пожежі (Профілактичні заходи)

Відповідно до ГОСТ 12.1.004-91, пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі та системою протипожежного захисту. В ході роботи реалізовано наступні заходи:

##### Організаційні заходи:

Проведення інструктажу з пожежної безпеки перед початком роботи в лабораторії.

Призначення відповідального за протипожежний стан приміщення (зазвичай це керівник лабораторії або сам розробник на своєму місці).

Заборона куріння та використання відкритого вогню в приміщенні.

Обов'язкове знеструмлення всього обладнання (крім серверів безперервної дії) після закінчення робочого дня.

##### Технічні заходи:

Захист електромережі: Всі лінії живлення захищені автоматичними вимикачами, які спрацьовують при струмах КЗ та перевантаженні. В самому розробленому пристрої встановлено плавкий запобіжник (F1 на схемі) номіналом 2 А.

Вимоги до паяльного обладнання: Паяльник повинен розміщуватися виключно на підставці з негорючих матеріалів (кераміка, метал) з теплорозсіювачем. Шнур живлення не повинен мати пошкоджень ізоляції.

Вимоги до макетування: Макет системи розміщується на столі, вкритому діелектричним та термостійким килимком (силіконовим або текстолітовим), що запобігає займанню стільниці при падінні крапель припою.

Зберігання ЛЗР: Спирт та флюси повинні зберігатися у герметично закритій металевій або скляній тарі в кількості, що не перевищує змінну потребу (до 50 мл).

#### 4.4.4. Вибір первинних засобів пожежогасіння

Оскільки в приміщенні знаходиться велика кількість електроніки під напругою, використання водних або пінних вогнегасників категорично заборонено, оскільки вода є провідником струму, що призведе до розширення зони короткого замикання та ураження людини струмом.

Найбільш ефективним засобом для гасіння електроустановок та офісної техніки є вуглекислотні вогнегасники (ВВК).

*Переваги:* Діоксид вуглецю ( $CO_2$ ) під час виходу охолоджує зону горіння та витісняє кисень. Він не залишає слідів, не пошкоджує електронні плати та не викликає корозії контактів (на відміну від порошкових вогнегасників, порошок яких важко видалити з мікросхем).

Розрахунок кількості вогнегасників:

Згідно з нормами належності (Наказ МВС №25 від 15.01.2018), для громадських та адміністративних будівель (приміщення з ПЕОМ):

На кожні 20 м<sup>2</sup> площі підлоги приміщення з комп'ютерною технікою рекомендовано мати один вуглекислотний вогнегасник із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг.

Площа нашої лабораторії  $S = 24 \text{ м}^2$

Рішення: Робоче місце розробника повинно бути укомплектоване одним переносним вуглекислотним вогнегасником типу ВВК-3.5 (або ВВК-2). Вогнегасник розміщується на видному місці біля виходу з приміщення на висоті не більше 1.5 м.

#### 4.4.5. Порядок дій у разі виникнення пожежі

У випадку виявлення ознак горіння (полум'я, дим, запах горілої ізоляції) розробник зобов'язаний діяти за наступним алгоритмом:

Негайно припинити роботу.

Знеструмити обладнання: Відключити загальний рубильник або вийняти вилки з розеток (якщо це безпечно).

Викликати пожежну охорону за телефоном 101, чітко назвавши адресу об'єкта, місце виникнення пожежі та своє прізвище.

Вжити заходів щодо евакуації людей (якщо в приміщенні є інші особи).

Розпочати гасіння пожежі наявним вуглекислотним вогнегасником:

- Зірвати пломбу та висмикнути чеку.

- Направити розтруб у бік вогнища (не торкаючись розтруба голою рукою, щоб уникнути обмороження, температура струменя

- Натиснути на важіль.

Якщо ліквідувати загоряння власними силами неможливо — покинути приміщення, щільно зачинивши за собою двері (щоб обмежити доступ кисню).

У даному розділі проведено комплексний аналіз умов праці при розробці роботизованої системи. Ідентифіковано основні шкідливі фактори (напруга 220В, навантаження на зір, термічні опіки). Розроблено інженерні заходи захисту: розраховано штучне освітлення (12 LED-панелей), обґрунтовано схему електробезпеки (заземлення, ПЗВ) та обрано первинні засоби пожежогашіння (вогнегасник ВВК-3.5). Впровадження цих заходів гарантує збереження здоров'я розробника та матеріальних цінностей.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

#### **5.1. Аналіз впливу об'єкта проектування на довкілля (електронні відходи, енергоспоживання)**

Сучасний розвиток технологій автоматизації та робототехніки нерозривно пов'язаний із концепцією сталого розвитку (Sustainable Development). Розробка нових електронних систем повинна відбуватися з урахуванням мінімізації негативного впливу на екосистему на всіх етапах життєвого циклу продукту: від виробництва компонентів до утилізації після завершення терміну експлуатації.

Метою даного розділу є екологічна експертиза розробленої роботизованої системи керування процесами життєзабезпечення, оцінка її вуглецевого сліду та розрахунок екологічного ефекту від впровадження енергозберігаючих алгоритмів.

Розроблювана система відноситься до класу радіоелектронної апаратури (РЕА) побутового призначення. Її взаємодія з навколишнім середовищем має двоїстий характер:

**Прямий вплив (Негативний):** Утворення електронних відходів (E-waste) після виходу з ладу, використання неекологічних матеріалів при виробництві друкованих плат, споживання електроенергії самим контролером.

**Опосередкований вплив (Позитивний):** Зменшення викидів парникових газів ( $CO_2$ ) теплоелектростанціями за рахунок економії енергоресурсів (газу/електрики) на опалення будинку.[17]

##### 5.1.1. Аналіз матеріаломісткості та електронних відходів

Об'єкт проектування складається з мікропроцесорного модуля, датчиків, друкованої плати, паяних з'єднань та пластикового корпусу. Розглянемо склад

компонентів з точки зору їх екологічної небезпеки згідно з Директивою ЄС **RoHS** (Restriction of Hazardous Substances).

**Друковані плати (PCB):** Основою плати є склотекстоліт марки FR-4 (композит епоксидної смоли та скловолокна). Цей матеріал не піддається біологічному розкладанню. При неправильній утилізації (спалюванні) епоксидні смоли виділяють токсичні діоксини та фурани. Крім того, мідна фольга плати вимагає хімічного травлення при виробництві, що створює рідкі токсичні відходи.

**Паяні з'єднання:** У макетному зразку, як правило, використовується свинцево-олов'яний припій (типу ПОС-61 / Sn60Pb40), що містить близько 40% свинцю (*Pb*). Свинець є важким металом 1-го класу небезпеки. Потрапляючи на звалища, він вимивається ґрунтовими водами та отруєє екосистему.

*Захід щодо мінімізації:* Для серійного виробництва пристрою проектом передбачено перехід на безсвинцеві припої (Lead-Free, сплави SAC - Sn-Ag-Cu), що відповідає вимогам директиви RoHS 2011/65/EU.

**Елементи живлення:** Бездротові датчики системи можуть використовувати літєві (Li-Ion) або лужні батареї. Одна викинута "пальчикова" батарейка забруднює важкими металами до 20 м<sup>2</sup> землі.

*Рішення:* Використання енергоефективних протоколів (ZigBee/BLE) для подовження терміну служби батарей до 2-3 років, що зменшує обсяг відходів.

**Полімерні матеріали:** Корпус пристрою виготовлено з ABS-пластику або PLA (у разі 3D-друку прототипу). PLA-пластик є біорозкладним (виготовляється з кукурудзи), тому його використання є екологічно доцільним.

### 5.1.2. Оцінка власного енергоспоживання системи

Будь-яка система автоматизації сама є споживачем електроенергії. Необхідно розрахувати, скільки енергії споживає "розумний будинок" на власні потреби (Phantom Load), щоб переконатися, що це не нівелює економію.

Розрахунок споживаної потужності  $P_{sys}$ :

Мікроконтролер ESP32 (з увімкненим Wi-Fi):  $I_{mcu} \approx 160$  мА.

Датчики (BME280, SGP30, реле): сумарно  $I_{periph} \approx 100$  мА.

Блок живлення (ККД  $\eta = 0.85$ ): втрати перетворення.

$$\text{Сумарна потужність: } P_{sys} = \frac{(I_{mcu} + I_{periph}) \cdot U}{\eta} = \frac{(0.16 + 0.1) \cdot 5}{0.85} = \frac{1.3}{0.85} \approx 1.53 \text{ Вт}$$

$$\text{Річне споживання електроенергії системою керування (} W_{sys} \text{): } W_{sys} = P_{sys} \cdot 24 \cdot 365 = 1.53 \cdot 8760 \approx 13400 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 13.4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для оцінки впливу на атмосферу переведемо це у вуглецевий еквівалент. Середній коефіцієнт емісії  $CO_2$  для енергосистеми України становить приблизно **0.86 кг  $CO_2$ /кВт·год** (вугільні ТЕС + АЕС).  $E_{CO_2_{sys}} = 13.4 \cdot 0.86 \approx 11.5$  кг  $CO_2$  на рік

Це власний "екологічний борг" системи.

### 5.1.3. Розрахунок позитивного екологічного ефекту

Основне призначення системи — оптимізація роботи опалення. Порівняємо власний "борг" системи з тією економією, яку вона забезпечує.

Розглянемо типовий будинок площею 140 м<sup>2</sup>, який опалюється електричним котлом.

Середньорічні витрати на опалення (без автоматики):  $W_{heat} \approx 15\,000$  кВт·год.

Економія від впровадження нечіткого регулятора та погодної компенсації (згідно з дослідженнями у Розділі 3): **15%**.

$$\text{Кількість заощадженої енергії (} W_{save} \text{): } W_{save} = W_{heat} \cdot 0.15 = 15\,000 \cdot 0.15 = 2\,250 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$\text{Зменшення викидів } CO_2 \text{ (} E_{save} \text{): } E_{save} = 2250 \cdot 0.86 = 1\,935 \text{ кг } CO_2$$

$$\text{Баланс екологічної ефективності: } E_{net} = E_{save} - E_{CO_2_{sys}} = 1\,935 - 11.5 = 1\,923.5 \text{ кг } CO_2$$

Співвідношення користі до шкоди (Coefficient of Performance):  $K_{eco} = \frac{W_{save}}{W_{sys}} =$

$$\frac{2250}{13.4} \approx 168$$

Аналіз показав, що розроблена система є високоефективним екологічним рішенням. Кількість енергії, яку система дозволяє заощадити за рік, у **168 разів** перевищує кількість енергії, необхідну для її власного функціонування. Прямий негативний вплив (електронні відходи) є мінімальним за умови дотримання правил утилізації (про що піде мова у п. 5.3), тоді як позитивний ефект (зменшення вуглецевого сліду на 1.9 тонни на рік) є суттєвим внеском у захист довкілля.

## **5.2. Оцінка енергоефективності впровадженої системи (розрахунок економії енергоресурсів)**

Економічна ефективність впровадження роботизованої системи керування визначається різницею між вартістю зекономлених енергоресурсів та капітальними витратами на створення і експлуатацію системи. Для об'єктивної оцінки порівнюємо два сценарії експлуатації житлового будинку площею 140 м<sup>2</sup>:

**Базовий сценарій:** Опалення здійснюється електричним котлом з використанням стандартного двопозиційного термостата (гістерезис  $\pm 1^\circ\text{C}$ , відсутність погодної компенсації).

**Проектний сценарій:** Впроваджено розроблену роботизовану систему з нечітким регулятором (Fuzzy Logic), адаптацією до вітру та алгоритмом оптимізації під зонні тарифи.

### **5.2.1. Розрахунок річного споживання теплової енергії**

Виходячи з даних, наведених у п. 5.1.3, базове річне споживання електроенергії на потреби опалення становить  $W_{base} = 15\,000$  кВт·год. Ця величина відповідає будинку з середнім утепленням (питомі тепловтрати  $\sim 70$  Вт/м<sup>2</sup>) у кліматичній зоні України (Київська обл.) за опалювальний сезон тривалістю 176 діб.

Економія енергоресурсів у проектному сценарії досягається за рахунок трьох факторів, підтверджених експериментально (Розділ 3):

Усунення перерегулювання (Overshoot): Нечіткий регулятор запобігає перегріву приміщення на 1–1.5°C, що дає економію близько 6–8%.

Компенсація вітрового навантаження: Превентивне реагування на вітер зменшує динамічні тепловтрати на 3–4%.

Зниження температури у відсутності людей (Eco Mode): Автоматичне зниження уставки на 3°C при спрацюванні PIR-датчиків (в робочі години) дає економію 5–7%.

Сумарний коефіцієнт економії енергії  $K_{save}$  (консервативна оцінка):  $K_{save} = 15.5\% = 0.155$

Річне споживання у проектному сценарії ( $W_{proj}$ ):  $W_{proj} = W_{base} \cdot (1 - K_{save}) = 15\,000 \cdot (1 - 0.155) = 12\,675 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

Абсолютна економія енергії в натуральному вираженні ( $\Delta W$ ):  $\Delta W = W_{base} - W_{proj} = 15\,000 - 12\,675 = 2\,325 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

### 5.2.2. Розрахунок грошової економії з урахуванням тарифної політики

Оскільки наукова новизна роботи передбачає врахування динаміки тарифів, розрахунок вартості електроенергії проведемо для випадку використання двозонного лічильника ("день/ніч").

Денний тариф ( $T_{day}$ ): 4.32 грн/кВт·год (чинний тариф для населення з 01.06.2024).

Нічний тариф ( $T_{night}$ ): 2.16 грн/кВт·год (50% від денного, діє з 23:00 до 07:00).

Витрати у Базовому сценарії: Звичайний термостат вмикає котел рівномірно протягом доби, ігноруючи вартість енергії. Розподіл споживання: День — 67% (16 год), Ніч — 33% (8 год).  $C_{base} = W_{base} \cdot (0.67 \cdot T_{day} + 0.33 \cdot T_{night})$   $C_{base} = 15\,000 \cdot (0.67 \cdot 4.32 + 0.33 \cdot 2.16) = 15\,000 \cdot (2.89 + 0.71) = 15\,000 \cdot 3.60 = 54\,000 \text{ грн}$

Витрати у Проектному сценарії: Роботизована система використовує теплоємність будівлі (інерцію), форсуючи нагрів у нічний час (Pre-heating) і знижуючи споживання в пікові години. Алгоритм дозволяє змістити структуру споживання до: День — 50%, Ніч — 50%.  $C_{proj} = W_{proj} \cdot (0.50 \cdot T_{day} + 0.50 \cdot T_{night})$   $C_{proj} = 12\,675 \cdot (0.50 \cdot 4.32 + 0.50 \cdot 2.16) = 12\,675 \cdot (2.16 + 1.08) = 12\,675 \cdot 3.24 = 41\,067$  грн

Річна грошова економія ( $S_{year}$ ):  $S_{year} = C_{base} - C_{proj} = 54\,000 - 41\,067 = 12\,933$  грн

### 5.2.3. Розрахунок вартості розробки системи (CapEx)

Для визначення терміну окупності розрахуємо собівартість компонентів програмно-апаратного комплексу (за роздрібними цінами станом на 2025 рік).

Таблиця 5.2.

Кошторис витрат на апаратну частину

Найменування компонента	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
Мікроконтролер ESP32-WROOM-32 DevKit	1	250	250
Датчик BME280 (Температура/Вологість/Тиск)	2	200	400
Датчик якості повітря SGP30	1	650	650
Анемометр чашковий (JL-FS2)	1	1200	1200
Сервопривід електротермічний (230В)	4	450	1800
Модуль реле 4-канальний (з опторозв'язкою)	1	150	150
Блок живлення 12В 5А (для автоматики)	1	400	400
Корпус на DIN-рейку, клемники, РСВ, дріб'язок	1	600	600
ВСЬОГО (Капітальні витрати $K_{sys}$ )			5450

#### 5.2.4. Розрахунок терміну окупності та ROI

Термін окупності проекту ( $T_{pb}$ ) показує час, за який економія на комунальних платежах повністю покриє витрати на обладнання.  $T_{pb} = \frac{K_{sys}}{S_{year}} = \frac{5450}{12933} \approx 0.42$  року

У перерахунку на опалювальний сезон (який триває ~6 місяців):  $T_{season} = 0.42 \cdot 12 \approx 5$  місяців

Це означає, що система повністю окупається вже протягом першого опалювального сезону.

Коефіцієнт рентабельності інвестицій (ROI) за перший рік:  $ROI = \frac{S_{year} - K_{sys}}{K_{sys}} \cdot 100\% = \frac{12933 - 5450}{5450} \cdot 100\% = 137\%$

Проведені розрахунки переконливо доводять високу економічну ефективність розробленої системи. Впровадження адаптивного керування дозволяє знизити річні витрати на опалення на **12 933 грн** (при поточному тарифі), що забезпечує надшвидку окупність проекту (менше 6 місяців) та рентабельність інвестицій на рівні 137%. Це робить систему конкурентоспроможною навіть у порівнянні з дорогими комерційними рішеннями (KNX/Danfoss), вартість яких часто перевищує 20–30 тис. грн.

#### 5.3. Утилізація компонентів системи після завершення терміну експлуатації.

Питання утилізації електронного обладнання є завершальним етапом його життєвого циклу. Враховуючи стрімкий розвиток технологій, моральне старіння компонентів системи (датчиків, контролерів) може настати раніше за фізичне зношування, орієнтовно через 7–10 років експлуатації.

Процес утилізації розробленого програмно-апаратного комплексу повинен здійснюватися відповідно до Закону України «Про управління відходами» (№ 2320-

IX від 20.06.2022) та вимог Директиви ЄС WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment).[18]

5.3.1. Сортування компонентів за класом небезпеки  
Для забезпечення екологічно безпечної переробки, компоненти системи при демонтажі підлягають сортуванню на три основні групи:

Група А. Небезпечні відходи (Елементи живлення)  
Сюди відносяться літій-іонні (Li-Ion) або літій-полімерні (Li-Po) акумулятори, що можуть використовуватися для резервного живлення контролера, а також батарейки бездротових датчиків.

Ризик: Містять важкі метали та електроліт, який при пошкодженні корпусу може спричинити займання або забруднення ґрунту.

Метод утилізації: Категорично заборонено викидати у загальні контейнери для сміття. Вони підлягають здачі у спеціалізовані пункти прийому для подальшої передачі на заводи з переробки хімічних джерел струму (для вилучення літію, кобальту, нікелю).

Електронний лом (Друковані плати, мікросхеми)

Сюди входять: модуль ESP32, датчики BME280/SGP30, драйвери MOSFET, плати реле.

Цінність: Електронні компоненти містять дорогоцінні метали (золото на контактах, срібло у припої, паладій у конденсаторах) та кольорові метали (мідь у фользі текстоліту).

Ризик: Склотекстоліт (основа плати) та епоксидні корпуси мікросхем при спалюванні виділяють токсичні речовини.

Метод утилізації: Механічне подрібнення з подальшою сепарацією металів (гідрометалургія). Неметалева фракція (скловолокно) утилізується як наповнювач для будівельних матеріалів або спалюється у печах з системою газоочистки.

Полімерні та конструкційні відходи (Корпус, дроти)

Корпус: Якщо корпус макету виготовлено з PLA-пластику (полілактиду) методом 3D-друку, він є біорозкладним і може бути компостований у промислових умовах. Якщо використано ABS-пластик або стандартні монтажні коробки — вони підлягають механічному рециклінгу (грануляції) для виготовлення нових пластикових виробів.

Дроти: Мідні жили відокремлюються від ПВХ-ізоляції для повторної переплавки.

### 5.3.2. Стратегія повторного використання (Reuse)

В рамках концепції циркулярної економіки (Circular Economy), пріоритетом є не утилізація, а повторне використання. Модульна архітектура розробленої системи (описана в п. 3.1) дозволяє:

Модернізацію (Upgrade): Замінити лише застарілий мікроконтролер (наприклад, ESP32 на новішу модель), залишивши працювати виконавчі механізми (реле, сервоприводи), ресурс яких значно вищий.

Реюз (Repurposing): Після демонтажу системи, справні компоненти (Блок живлення, MOSFET-модулі) можуть бути використані студентами або радіоаматорами для навчальних цілей та створення нових прототипів, що повністю виключає їх потрапляння на звалище.

У даному розділі доведено, що розроблена роботизована система є екологічно збалансованим продуктом. Позитивний екологічний ефект від зниження викидів CO<sub>2</sub> (внаслідок економії 2325 кВт·год енергії на рік) значно переважає шкоду від її виробництва та утилізації. Застосування безсвинцевих технологій та дотримання правил роздільного збору відходів гарантує мінімальний вплив на довкілля після завершення терміну служби пристрою.



## ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення енергоефективності та комфорту житлового будинку шляхом створення роботизованої системи керування процесами життєзабезпечення. В ході виконання роботи отримано наступні теоретичні та практичні результати:

Проведено аналіз сучасного стану систем автоматизації будівель. Встановлено, що існуючі комерційні рішення (KNX, Apple HomeKit) мають високу вартість та закриту архітектуру, що обмежує впровадження адаптивних алгоритмів керування. Обґрунтовано доцільність розробки гібридної системи на базі відкритого мікроконтролера ESP32 та протоколу MQTT, що дозволило знизити вартість апаратної частини у 3–4 рази порівняно з аналогами.

Розроблено та удосконалено математичну модель теплового балансу приміщення. На відміну від класичних моделей, запропонована модель враховує нелінійну залежність коефіцієнта теплопередачі огорожувальних конструкцій від швидкості вітру. Це дозволило підвищити точність прогнозування теплового режиму будинку та реалізувати керування за збуренням (Feed-forward).

Синтезовано адаптивний регулятор на базі нечіткої логіки (Fuzzy Logic). Розроблена база правил (25 правил) та функції належності дозволяють системі автоматично адаптувати потужність опалення залежно від величини помилки та швидкості її зміни. Комп'ютерне моделювання в середовищі Matlab/Simulink показало, що використання нечіткого регулятора дозволяє усунути перерегулювання (яке становило 8.5% для ПІД-регулятора) та зменшити час перехідного процесу на 20%.

Створено діючий програмно-апаратний комплекс. Розроблено принципову електричну схему модуля керування з гальванічною розв'язкою силових ланцюгів. Написано програмне забезпечення мовою C++ з використанням ОС реального часу FreeRTOS, яке реалізує алгоритми збору даних, цифрової фільтрації, нечіткого виведення та захисту від аварійних ситуацій. Реалізовано зручний WEB-інтерфейс

(Dashboard) на базі платформи Home Assistant для моніторингу та керування системою зі смартфона.

Експериментально підтверджено ефективність системи. Натурні випробування на фізичному макеті довели працездатність алгоритму компенсації вітрового навантаження: система реагує на посилення вітру миттєвим збільшенням потужності, утримуючи відхилення температури в межах  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ . Доведена надійність роботи системи протягом 24 годин безперервної експлуатації.

Виконано техніко-економічне обґрунтування. Розрахунок показав, що впровадження розробленої системи дозволяє знизити річне енергоспоживання на опалення на 15.5% (близько 2325 кВт·год/рік). Завдяки алгоритму оптимізації роботи під "нічний тариф", річна економія коштів складає понад 12 900 грн, що забезпечує окупність проекту менш ніж за один опалювальний сезон (5 місяців).

Оцінено екологічний вплив. Впровадження системи забезпечує зменшення викидів вуглекислого газу в атмосферу на 1.9 тонни щорічно. Коефіцієнт екологічної ефективності (співвідношення заощадженої енергії до спожитої системою) становить 168, що підтверджує відповідність розробки принципам сталого розвитку.

Створена роботизована система є завершеним, енергоефективним та конкурентоспроможним продуктом, готовим до впровадження в реальних об'єктах житлового фонду.

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – К. : Мінрегіон України, 2013. – 149 с.
2. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – К. : Мінрегіонбуд України, 2018. – 133 с.
3. Правила улаштування електроустановок. – Харків : Форт, 2017. – 617 с.
4. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці від 09.01.1998 № 4.
5. Закон України «Про управління відходами» : прийнятий 20 черв. 2022 р. № 2320-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20> (дата звернення: 10.12.2025).
6. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: підручник. – 2-ге вид. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.
7. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID Control. – ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – 460 p.
8. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. – 13th ed. – Pearson, 2017. – 1032 p.
9. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, Is. 3. – P. 338–353.
10. Mamdani E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1974. – Vol. 121, No. 12. – P. 1585–1588.
11. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M. An Introduction to Fuzzy Control. – Springer Science & Business Media, 2013. – 316 p.
12. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. Version 4.3. – 2023. – 73 p. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

13. Bosch Sensortec. BME280: Combined humidity and pressure sensor. Datasheet BST-BME280-DS002. – 2021. – 55 p.
14. Sensirion AG. SGP30 – Indoor Air Quality Sensor for TVOC and CO<sub>2</sub>eq. Datasheet. – 2020. – 16 p.
15. OASIS Standard. MQTT Version 3.1.1. – 2014. URL: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>.
16. Lea P. Internet of Things for Architects. – Packt Publishing, 2018. – 522 p.
17. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union.
18. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE).
19. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Transactions of the ASME. – 1942. – Vol. 64. – P. 759–768.
20. FreeRTOS. The FreeRTOS Kernel Documentation. – Amazon Web Services, Inc., 2024. URL: <https://www.freertos.org/>.
21. International Rectifier. IRLZ44N HEXFET Power MOSFET Datasheet. – 2003. – 8 p.
22. Al-Ali A. R., Zualkernan I. A., Rashid M. A smart home energy management system using IoT and big data analytics // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2017. – Vol. 63, No. 4. – P. 426–434.