

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Галузь знань _____ 12 – Інформаційні технології _____

Спеціальність _____ 123 – Комп'ютерна інженерія _____

на тему «Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки»

КвРКІП. 190182.23.03.41 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-3


Підпис

Ігор ЛИТВИНЧУК
Ініціали, прізвище

Керівник канд. техн. наук, доцент
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

Володимир ГРИГА
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри КІС,

PhD Ольга ПАВЛОВА

25 04 2025 р.



Хмельницький, 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 1 ” 09 2024 р.



ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Ігорю ЛИТВІНЧУКУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Керівник проекту (роботи) Володимир ГРИГА, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 №8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

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

Концепція реалізації системи опалення у розумному будинку та аналіз відомих рішень

Базова модель системи оптимізації опалення у розумному будинку

Система оптимізації використання опалення в розумному будинку на основі нечіткої логіки

Оцінка ефективності системи оптимізації опалення у розумному будинку на основі нечіткої

логіки

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КПС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	01.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих систем та методів за темою; постановка задачі	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка системи для вирішення поставленої задачі	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – експериментальна частина	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист ДРМ	25.04.2025	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 20.05.2025	


Студент


Підпис

Ігор ЛИТВИНЧУК

Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Володимир ГРИГА

Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема: Система оптимізації використання опалення в “Розумному будинку” на основі нечіткої логіки

Автор роботи: Литвінчук І. М.

Керівник роботи: Грига В.М.

Пояснювальна записка: 71 с., 24 рис., 1 табл., 2 дод., 73 джерела.

ОПТИМІЗАЦІЯ ОПАЛЕННЯ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, АГЕНТ.

Об’єктом дослідження є процеси оптимізації витрат ресурсів у системі опалення Розумного будинку на основі нечіткої логіки.

Предметом дослідження є система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності функціонування системи опалення у Розумному будинку шляхом оптимізації витрат ресурсів у системі опалення Розумного будинку на основі залучення нечіткої логіки.

Для розв’язання поставлених задач використовувалися методи математичні та аналітичні методи дослідження, комп’ютерне моделювання, методи оцінки ефективності.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набула подальшого розвитку базова модель системи опалення у Розумному будинку, яка відрізняється від відомих врахуванням комбінації процесів теплової конвекції, теплової провідності та теплової маси у системі опалення, а також їх формалізації, що дозволило виокремити шляхи удосконалення системи опалення та виконати порівняння із оптимізованою системою на основі нечіткої логіки.

– набула подальшого розвитку система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки, яка відрізняється від відомих організацією її функціонування у формі мультиагентної системи, а також залучення нечіткої логіки у процесі оптимізації, що дозволило підвищити

ефективність системи опалення у Розумному будинку шляхом зменшення витрат на паливо та зменшення коливань температури в кімнатах.

Практична цінність роботи у тому, що запропонована система оптимізації опалення на основі нечіткої логіки може бути інтегрована в існуючі системи Інтернету речей для підвищення ефективності використання опалення та зменшення витрат на енергоносії.

У першому розділі проведено огляд концепції реалізації системи опалення у розумному будинку. Виконано аналіз відомих рішень та засобів, що використовуються для оптимізації опалення. Досліджено механізм нечіткої логіки.

У другому розділі було запропоновано абстрактну модель опису для системи опалення у будинку, що дозволило формалізувати узагальнену базову модель всієї системи опалення у Розумному будинку. Модель симулює поведінку системи опалення в будинку, включаючи обігрівач, контролер, що використовує просту пропорційну стратегію управління, і чотири кімнати з радіаторами, які реагують на зовнішню температуру.

У третьому розділі визначено два основні критерії для оптимізації керування опаленням у Розумному будинку. У рамках оптимізаційної задачі використовувалася математична модель, яка поєднує ці два критерії, враховуючи вагові коефіцієнти для кожного з них. Запропоновано архітектуру системи оптимізації опалення у Розумному будинку. Ключовими особливостями системи є процес її функціонування, що організований у формі мультиагентної системи, а також залучення нечіткої логіки у процесі оптимізації.

У четвертому розділі було проведено оцінку ефективності запропонованої системи оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки. Проведено моделювання роботи двох систем опалення: на основі базової моделі та на основі запропонованої системи нечіткого логічного висновку.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	4
ВСТУП.....	5
1 КОНЦЕПЦІЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ ТА АНАЛІЗ ВІДОМИХ РІШЕНЬ	8
1.1 Концепція реалізації системи опалення в Розумному будинку	8
1.2 Аналіз відомих рішень.....	13
1.3 Обґрунтування вибору апарату нечіткої логіки.....	17
1.4 Загальний підхід реалізації рішень нечіткої логіки.....	19
1.5 Постановка задачі.....	22
2 БАЗОВА Модель СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПАЛЕННЯ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ	24
2.1 Ключові механізми передачі тепла в системі опалення Розумного будинку: конвекція та теплопровідність	24
2.2 Абстрактна модель функціонування системи.....	25
2.3 Базова модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку	26
2.4 Висновки	40
3 СИСТЕМА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ОПАЛЕННЯ В РОЗУМНОМУ БУДИНКУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	42
3.1 Постановка задачі оптимізації керування опаленням.....	42
3.2 Архітектура та функціонування системи оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки.....	44
3.3 Реалізація системи оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки	54
3.4 Висновки	56

4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПАЛЕННЯ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	57
4.1 Реалізація агента нечіткого логічного висновку.....	57
4.2 Оцінка ефективності системи опалення за критеріями оптимізації.....	69
4.3 Висновки	73
ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	77
ДОДАТОК А Копія наукової публікації.....	83
ДОДАТОК Б Копія презентації до захисту кваліфікаційної роботи.....	98

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АНЛВ – агент нечіткого логічного висновку

ПЗ – програмне забезпечення

МАС – мультиагентна система

НЛ – нечітка логіка

ОС – операційна система

СОП – система оптимізації опалення

IoT – Internet of Things

ВСТУП

Технології «розумного дому» все частіше використовуються для автоматизації різних аспектів побуту, і одна з основних проблем, яку вирішують ці системи – це оптимізація енергоспоживання. Опалення є одним з найбільших споживачів енергії в будинку, тому його ефективне управління відіграє ключову роль у зменшенні витрат на енергоресурси та підвищенні рівня комфорту мешканців. Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки є важливим кроком у напрямку енергетичної ефективності та комфорту в сучасних житлових приміщеннях.

Актуальність цієї роботи полягає в тому, що існуючі системи опалення в Розумних будинках часто не є повністю оптимізованими, особливо в аспектах управління витратами палива та зменшення частоти коливань температури. Багато сучасних систем не враховують в повній мірі змінні умови, такі як зовнішня температура, час доби, рівень вологості або індивідуальні потреби користувачів. Це призводить до того, що система працює неефективно: витрати палива можуть бути надмірними, а температура в кімнатах часто коливається, що створює дискомфорт для мешканців. Часті зміни температури можуть також негативно впливати на здоров'я людей, а надмірні витрати палива призводять до економічних збитків і підвищеного навантаження на навколишнє середовище. Оптимізація цих процесів через використання нечіткої логіки дозволяє досягти більш стабільної та енергоефективної роботи системи опалення, що має важливе значення для підвищення комфорту та зниження витрат.

У даній роботі пропонується система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки, яка відрізняється від відомих організацією її функціонування у формі мультиагентної системи, а також залучення нечіткої логіки у процесі оптимізації.

Застосування нечіткої логіки дозволяє більш точно налаштувати систему на оптимальні режими роботи, знижуючи надмірні витрати палива та підтримуючи стабільний температурний режим у приміщеннях. Це забезпечує підвищену

енергоефективність, зменшення коливань температури, що є важливим для комфортного проживання, а також дозволяє знижувати негативний вплив на навколишнє середовище за рахунок економії енергоресурсів.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування системи опалення у Розумному будинку шляхом оптимізація витрат ресурсів у системі опалення Розумного будинку на основі залучення нечіткої логіки.

Об'єктом дослідження є процеси оптимізації витрат ресурсів у системі опалення Розумного будинку на основі нечіткої логіки.

Предметом дослідження є система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки.

Методи дослідження. У роботі було застосовано наступні теорії та засоби:

- математичні та аналітичні методи дослідження;
- комп'ютерне моделювання;
- методи оцінки ефективності.

Наукова новизна роботи:

- набула подальшого розвитку базова модель системи опалення у Розумному будинку, яка відрізняється від відомих врахуванням комбінації процесів теплової конвекції, теплової провідності та теплової маси у системі опалення, а також їх формалізації, що дозволило виокремити шляхи удосконалення системи опалення та виконати порівняння із оптимізованою системою на основі нечіткої логіки.

- набула подальшого розвитку система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки, яка відрізняється від відомих організацією її функціонування у формі мультиагентної системи, а також залучення нечіткої логіки у процесі оптимізації, що дозволило підвищити ефективність системи опалення у Розумному будинку шляхом зменшення витрат на паливо та зменшення коливань температури в кімнатах.

Практична цінність роботи у тому, що запропонована система оптимізації опалення на основі нечіткої логіки може бути інтегрована в існуючі системи Інтернету речей для підвищення ефективності використання опалення та зменшення витрат на енергоносії.

Рекомендації з використання результатів роботи. Отримані результати роботи можуть бути використанні при створенні інтелектуальних систем, що націлені на оптимізацію використання енергоресурсів для опалення.

Публікації. За темою кваліфікаційної роботи магістра опублікована одна стаття у фаховому науковому виданні International Scientific Journal «Computer Systems and Information Technologies».

Структура та об'єм дипломної роботи. Дипломна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновку та додатків, її повний зміст 109 сторінок, основний зміст викладено на 75 сторінках, 2-х додатках на 18 сторінках, містить 24 рисунки, 1 таблицю, включає 73 найменування вітчизняної та зарубіжної літератури.

1 КОНЦЕПЦІЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ ТА АНАЛІЗ ВІДОМИХ РІШЕНЬ

1.1 Концепція реалізації системи опалення в Розумному будинку

Концепція «Розумне опалення» – це система опалення, підключена до інтернету через Wi-Fi, яку можна дистанційно керувати за допомогою смартфона, планшета або ПК. Зручність таких систем полягає в тому, що керувати опаленням можна навіть перебуваючи поза домом.

Основним компонентом розумного опалення є розумний термостат, головна функція якого – регулювати температуру та вмикати або вимикати опалення. Однак сучасні системи опалення мають багато додаткових функцій:

- виявлення відкритих вікон;
- вимкнення опалення, якщо нікого немає вдома;
- вмикання опалення, коли мешканці повертаються додому.

Додатково до розумних термостатів існують й інші компоненти, такі як розумні радіаторні клапани, комплекти центрального керування та електричні радіатори (рис. 1.1). Деякі компоненти можуть працювати автономно, а інші вимагають підключення до центрального вузла (хабу).



а)



б)



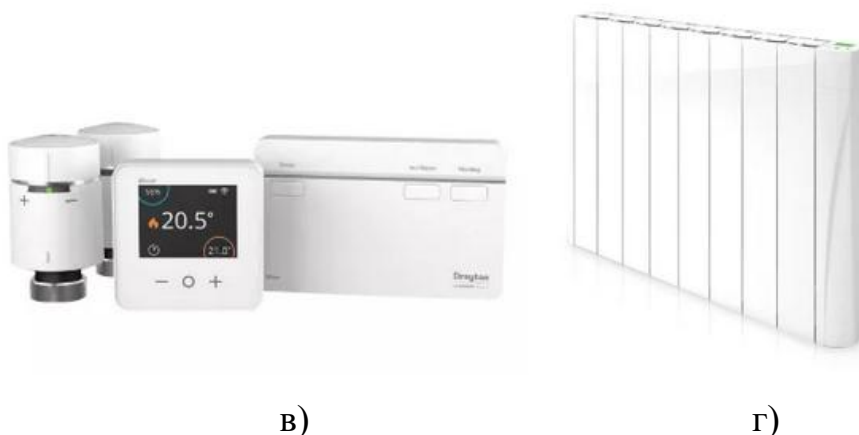


Рисунок 1.1 – Основні компоненти розумного опалення:

- а) розумні термостати;
- б) розумні радіаторні клапани;
- в) комплекти центрального керування;
- г) електричні радіатори

Система «Розумне опалення» складається з кількох основних компонентів, які забезпечують зручне керування температурою в оселі, економію енергії та підвищення комфорту. Одним із ключових елементів є розумні кімнатні термостати. Ці пристрої з'єднують систему опалення з інтернетом, що дозволяє власникам будинків або квартир контролювати температуру в приміщенні за допомогою смартфонів, планшетів або комп'ютерів. Такі термостати поділяються на автономні та інтегровані моделі.

Автономні термостати замінюють звичайні кімнатні термостати і працюють незалежно від інших компонентів. Вони підключаються безпосередньо до системи опалення і можуть функціонувати без додаткового обладнання, наприклад, без розумного хабу. Це робить їх зручними для використання в простих системах або для тих, хто лише починає переходити до розумних рішень.

Інтегровані термостати є більш складними пристроями, які працюють у поєднанні з іншими елементами, такими як розумні радіаторні клапани та центральні хаби. Їхньою перевагою є можливість створення зонального опалення.

Наприклад, з їх допомогою можна налаштувати різний температурний режим для кожної кімнати окремо, враховуючи потреби мешканців.

Розумні радіаторні клапани – ще один важливий компонент системи. Вони встановлюються на звичайні радіатори та дозволяють точно регулювати температуру в кожному приміщенні. Це особливо корисно для великих будинків, де не всі кімнати використовуються одночасно. Завдяки розумним клапанам можна знизити витрати на опалення, автоматично зменшуючи температуру в незайнятих кімнатах. Більшість моделей цих клапанів працюють через підключення до центрального хабу, який забезпечує координацію між різними пристроями та підключення до мережі.

Іншим важливим компонентом є комплекти центрального керування опаленням. Комплекти центрального керування опаленням забезпечують ефективну інтеграцію всіх компонентів розумної системи. До їх складу входять хаб, розумні термостати та радіаторні клапани. Хаб є центральним елементом, який з'єднує всі компоненти системи через Wi-Fi, що дозволяє створювати багатозонні системи опалення (рис. 1.2). Користувач може керувати температурою окремо в кожній зоні, налаштовувати індивідуальні графіки та оптимізувати витрати енергії. Варто зазначити, що компоненти такого комплекту зазвичай сумісні тільки з обладнанням одного бренду, тому важливо ретельно обирати систему під власні потреби.

Розумні електричні радіатори є ще одним сучасним рішенням для систем опалення. Ці пристрої оснащені модулем для підключення до інтернету, що дозволяє власнику керувати радіаторами за допомогою смартфона, планшета чи комп'ютера. Вони працюють автономно, незалежно від інших систем, і дозволяють регулювати температуру окремо для кожної кімнати. Таке рішення є зручним для тих, хто хоче модернізувати систему опалення без необхідності встановлення додаткового обладнання.

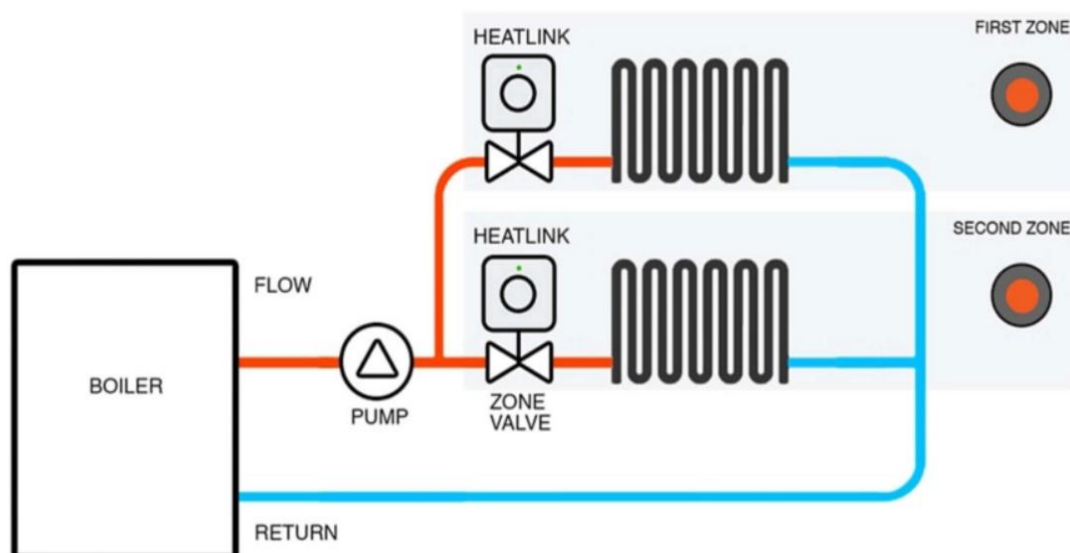


Рисунок 1.2 – Узагальнена схема функціонування «Розумного опалення»[15]

Система «Розумного опалення» функціонує завдяки підключенню опалювального обладнання до інтернету. Це дозволяє користувачам дистанційно керувати температурою та налаштуваннями через мобільний застосунок або комп'ютерний інтерфейс. Основними функціями є можливість встановлення графіка роботи, дистанційне увімкнення та вимкнення опалення, а також автоматична оптимізація системи на основі звичок мешканців. Багато систем підтримують голосове управління через такі платформи, як Alexa чи Google Home.

Розумне опалення сумісне з різними типами систем опалення. Наприклад, розумні термостати можуть працювати з газовими, нафтовими або LPG-котлами, замінюючи традиційні термостати. Сонячні теплові панелі та теплові насоси також можуть бути інтегровані за допомогою сумісного термостата. Навіть системи підігріву підлоги, як електричні, так і водяні, можуть використовуватися разом із розумними термостатами для точного регулювання температури.

Функції розумного термостата включають багато корисних можливостей. Наприклад, користувачі можуть налаштовувати окремі зони опалення для різних приміщень. Система здатна "вчитися" на основі звичок мешканців і автоматично коригувати графіки опалення для максимального комфорту. Інтеграція датчиків руху та GPS дозволяє визначати, коли будинок порожній, і знижувати температуру

для економії енергії. Крім того, термостат враховує прогноз погоди, що допомагає уникнути надмірного нагрівання чи охолодження.

Відомі рішення розумних систем опалення також пропонують функції для контролю гарячої води в будинках із бойлерами, а завдяки датчикам може виявляти відкриті вікна, сповіщаючи про можливі втрати тепла. Енергетичні звіти, що генеруються системою, допомагають аналізувати споживання енергії та оптимізувати витрати. Для безпеки передбачені спеціальні режими, наприклад, режим відпустки, який підтримує мінімальну температуру в приміщенні, запобігаючи замерзанню труб у холодну пору року.

Таким чином, компоненти системи Розумного опалення забезпечують не лише зручність у використанні, а й суттєву економію енергоресурсів. Вони дозволяють точно налаштувати комфортні умови в оселі та адаптувати систему опалення до способу життя її мешканців.

Хоча розумні системи опалення мають багато переваг, вони не позбавлені певних недоліків, які варто враховувати перед встановленням. Один із головних викликів – це процес установки. Замінити старий термостат на розумний досить просто, якщо це поодинокий пристрій, і цю задачу може виконати навіть майстер-аматор. Однак, коли йдеться про встановлення системи з декількома термостатами або радіаторними клапанами, ситуація ускладнюється. У цьому випадку доведеться враховувати нюанси електропроводки, інтеграцію в існуючу систему опалення та навіть водопостачання. Це може вимагати залучення фахівців, що додає витрат і часу.

Крім того, ефективність таких систем багато в чому залежить від способу життя мешканців будинку. Якщо люди рідко перебувають вдома, система може бути не такою корисною, оскільки більшість функцій орієнтовані на оптимізацію роботи під час їхньої присутності. З іншого боку, якщо мешканці будинку проводять вдома більшу частину часу, розумна система теж не завжди виправдовує очікування, оскільки температура часто залишається постійною.

Ще одним суттєвим недоліком є високі початкові витрати. Ціна на самі розумні термостати значно перевищує вартість звичайних, а якщо додати витрати на додаткові компоненти, як-от радіаторні клапани чи хаб, то загальна вартість може стати значною. Більше того, налаштування багатозонних систем ще більше збільшує ці витрати.

Безпека також є важливим аспектом, який не можна ігнорувати. Оскільки розумна система опалення підключається до інтернету, вона стає потенційною точкою вразливості для хакерів. Недостатній рівень захисту, наприклад, слабкий пароль або відсутність належних заходів кібербезпеки, може призвести до несанкціонованого доступу до системи. Це створює ризики не лише для роботи опалення, а й для конфіденційності мешканців.

Отже, хоча розумні системи опалення здатні підвищити комфорт і заощадити енергію, їх установка вимагає ретельного планування, значних інвестицій і забезпечення належного рівня безпеки.

1.2 Аналіз відомих рішень

У роботі [11] запропоновано метод аналізу енергетичної ефективності існуючого енергоефективного будинку, із подальшою інтеграцією гідравлічної системи опалення та оптимізацією стратегії її управління. Результати аналізу теплового попиту показали, що для високоізольованого будинку внутрішні теплові надходження суттєво впливають на потребу в теплі, зменшуючи її на 16%. Було розглянуто дві стратегії керування опаленням: на основі зовнішньої температури та внутрішньої температури. Найкращим рішенням для керування за зовнішньою температурою виявилася стратегія з вимиканням системи на ніч (21:00–05:00), що забезпечило високу кількість комфортних годин і зменшення витрат палива на 10%. Завдяки високій тепловій інерції підлогової системи опалення та ефективній теплоізоляції будинку вдалося уникнути значного зниження температури вночі. Порівняння з керуванням за внутрішньою температурою показало важливість точного налаштування контрольних температур для досягнення балансу між

комфортом і ефективністю. Для подальшого підвищення ефективності запропоновано комбінувати обидві стратегії управління, враховувати орієнтацію будинку та сонячне випромінювання, а також встановлювати нижчу температуру під час відсутності мешканців. Очевидним недоліком такого рішення є ручне керування такою системою опалення, зокрема вибір стратегій оптимізації опалення.

У роботі [12] запропоновано математичну модель системи централізованого теплопостачання, яка оптимізує технічні та економічні аспекти функціонування й розвитку системи. Для вирішення проблем із нелінійністю модель лінійного програмування було поділено на три етапи: потоковий, тепловий і тисковий. Нелінійні залежності розраховуються між цими етапами лінійної оптимізації. У роботі наведено основні припущення та рівняння, які використовуються для розрахунку параметрів теплової системи, зокрема оптимального рівня виробництва тепла, швидкості потоку теплоносія в вузлах і ребрах мережі, втрат тепла, потужності та температури на кожному ребрі, а також витрат на закупівлю й передачу тепла. Запропоновану модель було протестовано на реальній системі централізованого теплопостачання. Результати дослідження підтвердили її ефективність і придатність для підтримки прийняття рішень. Економічні результати моделі до калібрування відрізнялися від історичних даних на 3,6%. Після калібрування всі відхилення не перевищували 1%, що продемонструвало досить високу точність моделі.

В іншій роботі [13] запропоновано методологію для визначення найкращої стратегії розширення мереж централізованого теплопостачання за заданими обмеженнями. Використовуючи підхід змішаного цілочисельного лінійного програмування, розроблена модель оптимізує майбутню роботу енергетичного центру, вибираючи найкраще поєднання технологій для досягнення заданої мети (наприклад, максимізація економії витрат або мінімізація викидів парникових газів). Методологія також враховує просторові аспекти розширення мережі.

Модель була застосована до реального кейсу, де результати показали, що залежно від обраної оптимізації необхідно пріоритизувати певні стратегії

підключення будівель. Також було доведено, що фінансова життєздатність схем централізованого теплопостачання може залежати від обраного сценарію підключення, що підкреслює важливість стратегічного планування для таких мереж. Запропонований авторами підхід показав досить високий ступінь гнучкості, оскільки, за свідченням авторів, його можна адаптувати до інших схем централізованого теплопостачання та модифікувати для інтеграції додаткових аспектів і обмежень.

У роботі [14] статті розглядається проблема пошуку найкращої топології, вибору діаметрів труб та параметрів роботи для реалістичних мереж централізованого теплопостачання. Існуючі інструменти проектування, які використовують нелінійні моделі потоку та теплопереносу, обмежені малими мережами з максимум 20 потенційними споживачами. Запропоновано альтернативну стратегію числової оптимізації на основі спряжених методів, яка дозволяє здійснювати нелінійну оптимізацію теплових мереж великого масштабу.

Щоб уникнути значного зростання обчислювальних витрат із збільшенням розміру мережі, авторами була застосована стратегія агрегування обмежень для споживачів. Крім того, для узгодження безперервної стратегії оптимізації з дискретною природою вибору топології та розмірів труб, запропоновано числову стратегію продовження, яка поступово наближає змінні проектування до дискретних виборів. У результаті одночасно визначаються оптимальна топологія мережі та розміри труб. Також продемонстровано масштабованість алгоритму на прикладі вигаданої мережі централізованого теплопостачання з 160 споживачами. Як доказ концепції, мережу оптимізовано для мінімізації інвестиційних витрат і витрат на перекачування, забезпечуючи теплопостачання у межах 5% комфортного діапазону температур. Починаючи з рівномірного розподілу труб діаметром 15 см по всій мережі, запропонований алгоритм знайшов конфігурацію мережі, яка зменшила витрати на труби на 23% і витрати на перекачування у 14 разів менш ніж за годину на стандартному ноутбучі. Важливість включення нелінійної моделі теплопереносу підтверджується зміною витрати споживачів на 72% через температурні коливання.

У роботі [15] запропоновано новий інтелектуальний контролер системи опалення для житлових приміщень, який має функціонал для роботи в умовах «розумної» енергомережі. У пропонуваній роботі розглядається один із можливих варіантів реалізації активного контролера. Такий контролер працює, реагуючи на комбінацію внутрішніх налаштувань і зовнішніх сигналів від локальних керуючих об'єктів. Оптимізаційною метою управління системами опалення є мінімізація витрат на функціонування розумної мікромережі, зменшення розміру її одиниць, зниження імпорту енергії з розподільної мережі та максимізація надійності мікромережі.

У роботі [19] запропоновано інтегровану стратегію керування, що базується на прогнозуванні навантаження та корекції відповідно до виміряної температури всередині приміщень. Спочатку визначаються періоди регулювання та часові вузли для джерела тепла і станцій. Потім прогнозується температура води на виході для джерела тепла та станцій. Прогнозована температура для станцій коригується на основі виміряного середнього значення температури в їхній зоні обігріву, тоді як загальне середнє використовується для корекції температури джерела тепла. Польове дослідження на реальному проєкті показало, що запропонований метод дозволив покращити тепловий комфорт користувачів, знизивши коефіцієнт нерівномірності температури в приміщеннях з 0,0310 до 0,0196.

У розглянутих роботах запропоновано різні підходи до аналізу, оптимізації та управління системами опалення, включаючи стратегії зменшення енергоспоживання, підвищення теплового комфорту та точності прогнозування теплових навантажень. Перевагами запропонованих методів є покращення енергоефективності, зменшення витрат палива, підвищення стабільності гідравлічних мереж, а також можливість масштабування для великих систем централізованого теплопостачання.

Однак, недоліками є обмеженість моделей у врахуванні динамічних змін у тепловому попиті, залежність від точного налаштування контрольних параметрів, а також складність інтеграції різних стратегій управління для забезпечення балансу між комфортом і ефективністю.

1.3 Обґрунтування вибору апарату нечіткої логіки

Апарат нечіткої логіки є ключовим підходом до вирішення завдань, які пов'язані із невизначеністю та складністю прийняття рішень, що є характерним для сучасних систем оптимізації, зокрема у розумних будинках. Нечітка логіка базується на концепції нечітких множин, запропонованій Лотфі Заде у 1965 році. Вона дозволяє працювати з даними, які не мають точного визначення, та враховувати людське сприйняття складних систем, де формалізувати чіткі правила доволі складно.

Основна перевага нечіткої логіки полягає в тому, що вона дозволяє моделювати процеси, які важко описати через класичні математичні методи, використовуючи лінгвістичні змінні замість числових значень. У контексті розумного будинку це означає, що температура може описуватися такими поняттями, як «тепло», «холодно» або «спекотно», замість точних чисел. Такий підхід значно ближчий до людського мислення і дозволяє створювати гнучкі системи керування.

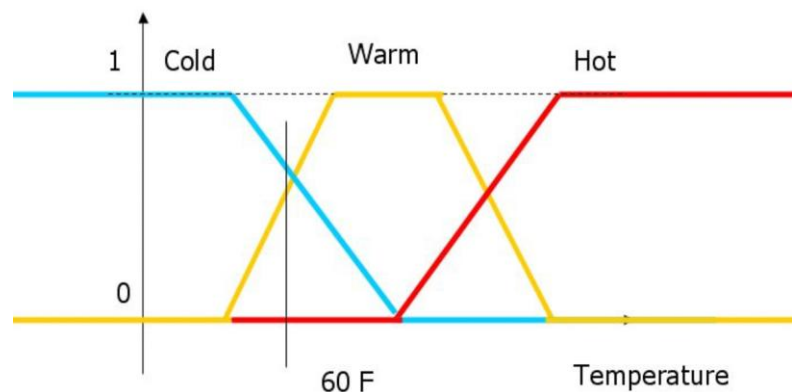


Рисунок 1.3 – Нечіткість при визначенні температури

У системах опалення, побудованих на основі нечіткої логіки, можна враховувати різні фактори, які впливають на комфорт користувачів. Наприклад, температура зовнішнього середовища, наявність людей у приміщенні, час доби та навіть особисті уподобання мешканців можуть інтегруватися у систему як вхідні

дані. Кожен з цих параметрів може бути виражений у вигляді нечітких множин, що дозволяє системі більш точно реагувати на зміни умов та надавати оптимальні рішення для підтримання комфортної температури.

Перевагою такого підходу є гнучкість та адаптивність системи. На відміну від традиційних алгоритмів, які використовують жорстко визначені правила, нечітка логіка дозволяє враховувати різні сценарії без потреби у значному доопрацюванні моделі. Наприклад, якщо змінюються зовнішні умови, такі як похолодання чи різке підвищення вологості, система може швидко адаптувати свої рішення без необхідності внесення змін до програмного забезпечення.

Ще однією суттєвою перевагою є простота інтеграції з іншими інтелектуальними технологіями, такими як Інтернет речей (IoT) або штучний інтелект (ШІ). Нечітка логіка може використовувати дані з датчиків IoT для прийняття рішень у реальному часі. Наприклад, датчики руху можуть визначати, чи є хтось у приміщенні, а система нечіткої логіки вирішить, чи потрібно включати опалення у відповідній зоні.

У процесі реалізації системи нечітка логіка спрощує взаємодію між користувачем і технологією. Наприклад, користувач може встановити бажаний рівень комфорту без необхідності задавати конкретні температурні значення. Система сама визначить, які параметри слід оптимізувати, щоб досягти заданого рівня комфорту з мінімальними витратами енергії.

Крім того, застосування нечіткої логіки дозволяє забезпечити ефективне використання ресурсів та зниження енергетичних витрат. Вона може враховувати поточну ситуацію, такі як прогноз погоди або звички мешканців, і оптимізувати роботу опалення відповідно до цих умов. Наприклад, якщо система прогнозує сонячний день, вона може автоматично зменшити інтенсивність обігріву у кімнатах із великими вікнами, враховуючи природне нагрівання від сонця.

Таким чином, обґрунтування вибору нечіткої логіки як методології для побудови системи опалення у розумному будинку базується на її здатності працювати з невизначеністю, адаптуватися до змінних умов, враховувати індивідуальні потреби користувачів та ефективно управляти ресурсами. Це робить

її одним із найбільш перспективних підходів для реалізації складних систем керування у сучасних розумних будинках.

1.4 Загальний підхід реалізації рішень нечіткої логіки

Нечітка логіка пропонує ефективний підхід до моделювання і керування системами, де традиційні математичні моделі виявляються занадто складними або неефективними [43-60]. Реалізація рішень на основі нечіткої логіки базується на кількох етапах: фузифікація, формулювання правил, побудова нечіткої бази знань, агрегування результатів, дефузифікація та прийняття остаточного рішення. Ці етапи утворюють послідовний процес, який дозволяє системі перетворювати реальні дані в інтелектуальні керуючі дії (рис. 1.4).

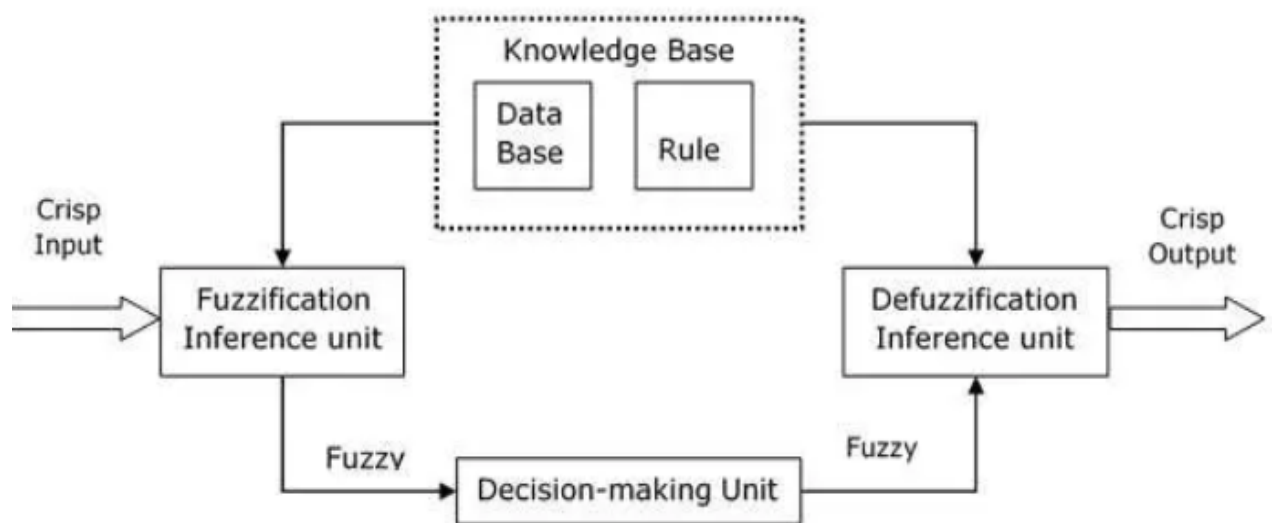


Рисунок 1.4 – Процес формування нечіткого логічного висновку

Фазифікація є першим етапом реалізації рішень нечіткої логіки, в ході якого чіткі входні дані перетворюються на нечіткі змінні. Вона дозволяє описувати фізичні величини, такі як температура, вологість чи час, через лінгвістичні терміни, наприклад, "низька", "середня" чи "висока". Кожен такий термін асоціюється з нечіткою множиною, яка задається функцією належності.

Функції належності можуть мати різні форми (рис. 1.5), наприклад [61-67]:

- трикутні функції належності, які є простими і часто використовуються завдяки легкості обчислень;
- трапецієподібні функції, які додають гнучкості в описі змінних;
- гаусові функції, які застосовуються в задачах, де важливо зберегти плавний перехід між рівнями змінних.

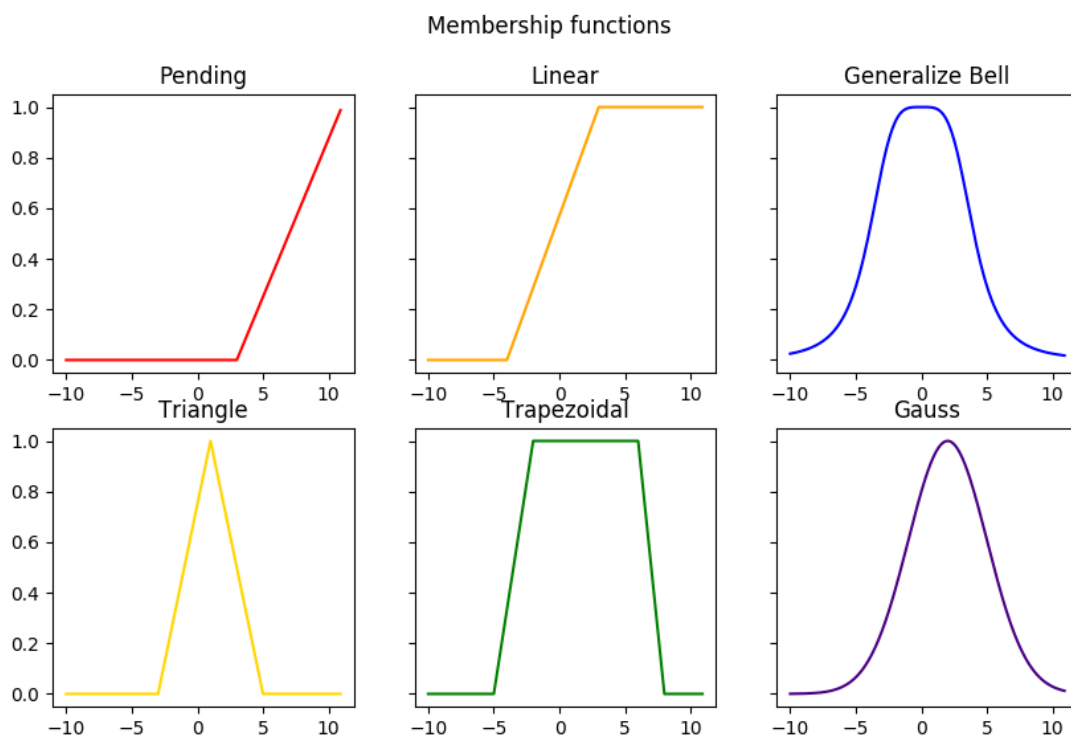


Рисунок 1.5 – Види функцій приналежності

Фазифікація створює основу для обробки нечітких даних і дає можливість системі працювати з описовими термінами замість точних значень.

На етапі формулювання нечітких правил визначаються правила, які зв'язують вхідні змінні з вихідними. Правила задаються у формі "якщо-то", наприклад:

- якщо температура "низька" і присутність у кімнаті "є", то рівень опалення "високий".
- якщо температура "середня" і вікна "відчинені", то рівень опалення "низький".

Ці правила ґрунтуються на експертних знаннях або попередньому аналізі, що робить їх основою для прийняття рішень у системі.

Побудова нечіткої бази знань. Нечітка база знань складається з множини правил і відповідних функцій належності. Вона є ядром системи і дозволяє враховувати множинність взаємозв'язків між змінними. Ця база постійно використовується під час обчислень, коли система визначає відповідні реакції на зміну вхідних параметрів.

Агрегування результатів. На основі заданих правил виконується оцінка відповідності вхідних даних до кожного правила. Цей процес називається агрегуванням і дозволяє об'єднувати результати застосування всіх правил для формування нечіткої вихідної величини.

Агрегування часто виконується за допомогою методів максимізації чи об'єднання, які дають змогу отримати інтегральне значення вихідної нечіткої змінної.

Дефазифікація є ключовим етапом, що перетворює нечітку вихідну змінну у чітке значення, яке може бути використане для керування. Це важливо, оскільки вихідний сигнал системи повинен бути однозначним і зрозумілим для фізичних пристроїв, наприклад, для керування інтенсивністю роботи опалення чи іншими процесами.

Для дефазифікації використовуються різні методи, серед яких найбільш поширені:

- метод центру тяжіння (Centroid Method), який обчислює середньозважене значення функції належності. Він забезпечує точність і стабільність.
- метод середнього максимуму (Mean of Maximum), що визначає середнє значення інтервалу, де функція належності досягає максимуму.
- метод першого максимуму (First of Maximum), який використовує перше значення, де функція належності максимальна.

Обраний метод дефазифікації залежить від специфіки задачі та вимог до швидкості обчислень.

Прийняття рішення. Заключним етапом є використання дефазифікованого значення для прийняття конкретного керуючого рішення. Наприклад, якщо система визначила, що температура в приміщенні занадто низька, вона може подати сигнал до обігрівача для збільшення теплової потужності.

У процесі реалізації рішень нечіткої логіки кожен з цих етапів відіграє важливу роль. Вони забезпечують гнучкість, адаптивність та здатність працювати з невизначеністю, що робить нечітку логіку ефективним інструментом для систем оптимізації у розумних будинках.

Одним із популярних інструментів для розробки систем нечіткого логічного висновку є MATLAB, зокрема, інструмент Fuzzy Logic Toolbox.

Fuzzy Logic Toolbox у MATLAB є спеціалізованим інструментом, призначеним для створення, моделювання, аналізу та тестування систем нечіткого логічного висновку. Цей інструмент дозволяє користувачам розробляти моделі, які можуть опрацьовувати нечіткі (неточні чи неоднозначні) дані для прийняття рішень, що імітують логіку людського мислення. Він широко використовується в автоматизації, управлінні процесами, робототехніці, оптимізації та інших сферах, де необхідно враховувати кілька параметрів в умовах невизначеності.

У Fuzzy Logic Toolbox можна працювати з двома основними типами нечітких систем: Мамдані та Сугено. Мамдані використовується для систем, які передбачають інтерпретацію результатів у вигляді нечітких множин, тоді як Сугено підходить для задач, де вихід потрібно отримати у вигляді конкретного числового значення. Інструмент дозволяє створювати нечіткі множини з трикутними, трапецієподібними, гаусівськими та іншими типами функцій належності.

1.5 Постановка задачі

Для подолання вказаних недоліків, визначених у відомих рішеннях, можна впровадити систему нечіткого логічного висновку (Fuzzy Logic System). Такий підхід дозволив б враховувати множинні фактори, що впливають на ефективність системи, зменшуючи залежність від точних математичних моделей. Нечітка

система управління може забезпечити адаптивне регулювання параметрів опалення залежно від умов, таких як зміни температури, рівень теплової інерції будівель та поведінка споживачів, підвищуючи як комфорт користувачів, так і енергоефективність системи.

Тому для вирішення задачі розробки системи оптимізації опалення Розумному будинку на основі нечіткої логіки слід виконати наступні кроки:

1. провести дослідження процесу керування опаленням у Розумному будинку. Дослідити відомі рішення та засоби оптимізації опалення у Розумному будинку;
2. розробити абстрактну модель функціонування системи опалення;
3. розробити базову модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку;
4. визначити задачу оптимізації керування опаленням, а також критерії оптимізації та цільову функцію;
5. розробити архітектуру системи оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки, визначити основні модулі;
6. реалізувати агента нечіткого логічного висновку, вибрати та обґрунтувати структуру системи нечіткого логічного висновку;
7. провести експериментальні дослідження та порівняти ефективність керування опаленням двох моделей: базової та моделі, яка використовує нечітку логіку. Перевірити, наскільки кожна із цих моделей забезпечує ефективність та стабільність температурного контролю.

2 БАЗОВА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПАЛЕННЯ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ

2.1 Ключові механізми передачі тепла в системі опалення Розумного будинку: конвекція та теплопровідність

Конвекція та теплопровідність є двома основними механізмами передачі тепла, які відіграють важливу роль у моделі системи оптимізації опалення в Розумному будинку. Ці явища визначають, як тепло поширюється у приміщеннях, і впливають на енергоефективність системи опалення.

Теплопровідність – це процес передачі тепла через тверді матеріали, що виникає через різницю температур між їх частинами. У контексті Розумного будинку теплопровідність може спостерігатися, наприклад, у стінах, вікнах або підлозі. Якщо температура всередині приміщення значно відрізняється від зовнішньої, тепло буде передаватися через ці матеріали, що може призводити до тепловтрат взимку або перегріву влітку. У моделі системи оптимізації опалення необхідно враховувати цей процес, оскільки від вибору матеріалів будинку та їх теплоізоляційних властивостей залежить кількість енергії, потрібної для підтримання комфортної температури.

Конвекція, у свою чергу, є процесом передачі тепла через рух повітря або рідин. У системі опалення приміщення конвекція виникає, коли тепле повітря, нагріте радіаторами або іншими джерелами тепла, піднімається вгору, а холодніше повітря опускається вниз, створюючи природну циркуляцію. Цей процес впливає на розподіл температури у приміщенні: наприклад, наявність теплових зон із більш високою або нижчою температурою. У моделі Розумного будинку потрібно враховувати цей фактор для забезпечення рівномірного нагріву та уникнення енергетичних витрат на перегрів окремих зон.

Важливо врахувати, що взаємодія між теплопровідністю та конвекцією може значно вплинути на ефективність системи. Наприклад, у будинках із поганою теплоізоляцією теплопровідність може сприяти великим втратам тепла, що вимагає більше енергії для обігріву. У той же час недостатній контроль над конвекцією

може спричинити неефективний розподіл тепла, залишаючи деякі ділянки будинку холодними.

У базовій моделі опалення ці процеси мають враховуватися при моделюванні взаємодії між елементами системи (наприклад, нагрівальними приладами, стінами, повітрям у приміщенні) і зовнішнім середовищем. Модель має правильно відображати, як тепло переноситься між джерелами тепла, приміщенням та зовнішнім середовищем через теплопровідність і конвекцію, щоб забезпечити реалістичність симуляції та адекватність результатів. Окрім того, модель може використовувати дані про зовнішню температуру та прогноз погоди для передбачення теплових втрат через теплопровідність і розрахунку оптимального режиму опалення. Усе це сприяє зменшенню енергоспоживання, підвищенню комфорту мешканців та досягненню більш сталого використання енергії.

2.2 Абстрактна модель функціонування системи

Для опису складних систем, таких як система оптимізації опалення, зручно використовувати абстрактну модель, яка узагальнює її функціонування у вигляді кортежу. На найвищому рівні абстракції представимо модель у формі:

$$AbstractModel = (\{Inputs\}, \{FunctionalBlocks\}, \{Outputs\}) \quad (2.1)$$

де *Inputs* – множина входів;

FunctionalBlocks – множина функціональних блоків;

Outputs – множина виходів.

Цей підхід дозволяє описати будь-яку систему як взаємодію трьох основних компонентів: множини входів, множини функціональних блоків і множини виходів. Вхідні дані (*Inputs*) представляють усі зовнішні сигнали чи параметри, які впливають на роботу системи. Вони є джерелом інформації, на основі якої система виконує свої функції.

Функціональні блоки (*FunctionalBlocks*) є ключовими елементами моделі, що відповідають за обробку, перетворення та аналіз вхідних даних. Ці блоки моделюють внутрішні процеси системи, забезпечуючи обчислення, передачу даних між підсистемами та прийняття рішень. Вони можуть включати математичні моделі, алгоритми, фізичні характеристики компонентів або навіть програмні модулі.

Виходи (*Outputs*) формують результати роботи системи. Вони відображають, як система відповідає на вхідні сигнали після їх обробки через функціональні блоки. Вихідні параметри дозволяють оцінити ефективність системи, забезпечити зворотний зв'язок або виконати контроль за виконанням поставлених задач.

Такий підхід до моделювання систем забезпечує модульність та ієрархічність. Абстрактний рівень дозволяє не лише зрозуміти загальну логіку функціонування, але й забезпечити можливість деталізації кожного з компонентів на нижчих рівнях моделі. Таким чином, при переході до нижчих рівнів абстракції кожен з елементів моделі може бути описаний детальніше, враховуючи специфіку окремих процесів чи компонентів системи.

2.3 Базова модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку

Для моделювання процесу системи оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки спочатку виконаємо формалізацію процесу оптимізації опалення для моделі, що представлена у [10]. Мета такого підходу – виділити ключові компоненти моделі (входи, функціональні блоки, виходи) і представити їх у стандартизованій формі, що полегшує аналіз, адаптацію, порівняння та шляхи удосконалення системи.

Структуру базової моделі системи оптимізації опалення у Розумному будинку подано на рис. 2.1. Дана структура є ієрархічною і показує інкапсуляцію різних складових моделі. Розглянемо детальніше саму базову модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку і її складові детальніше.

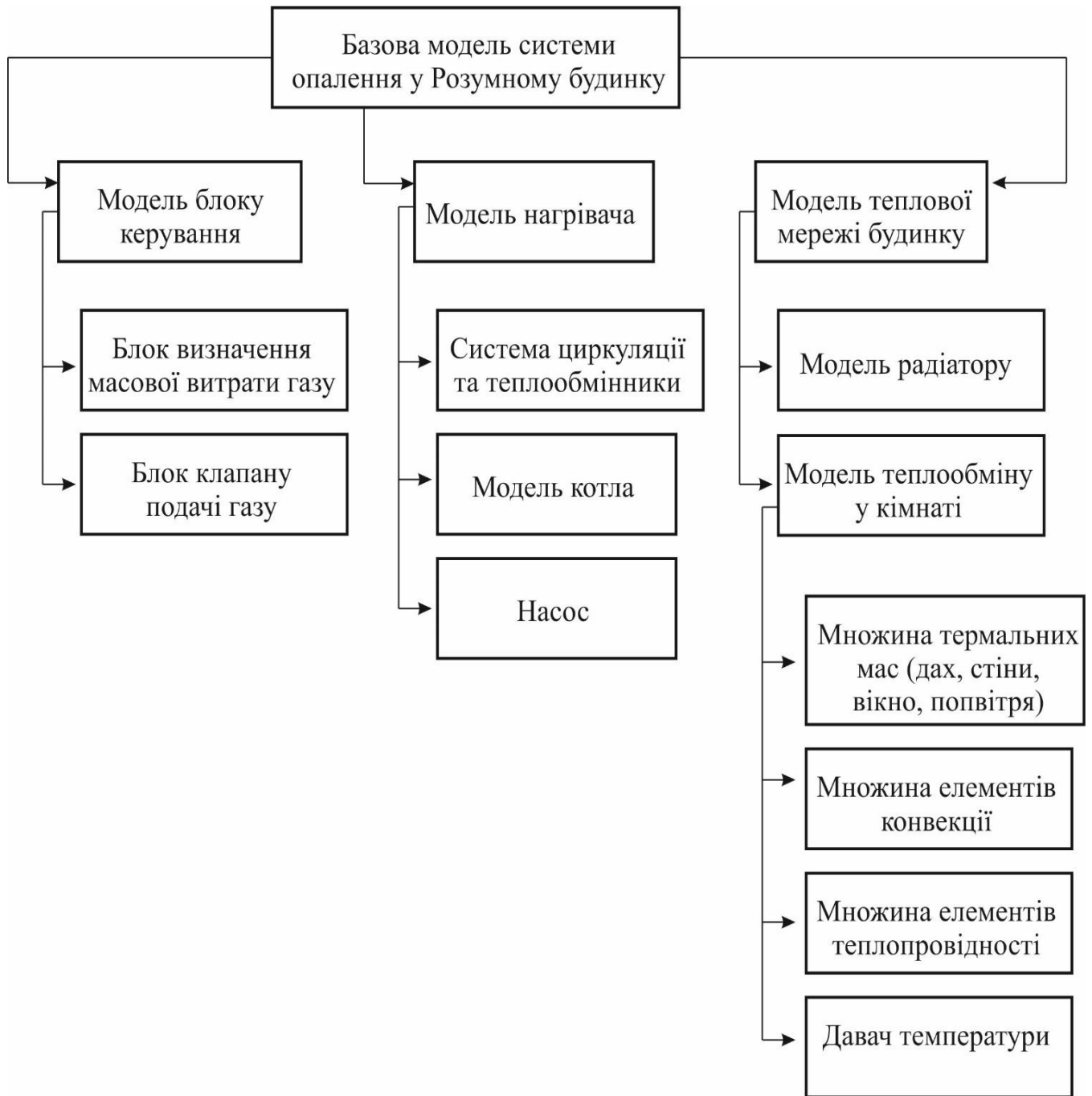


Рисунок 2.1 – Структура базової моделі системи оптимізації опалення у Розумному будинку

Подамо базову модель всієї системи опалення у Розумному будинку $M_{HeatingModel}$ у вигляді:

$$M_{HeatingModel} = (\{T_{exp}, T_{avg}\}, \{M_{Control}, M_{Heater}, M_{HouseThermal\ Network}, ABlocks\}, \{T_{avg}\}) \quad (2.2)$$

де T_{exp} – встановлена (очікувана) температура у приміщенні;

T_{avg} – поточна середня температура у приміщенні, яка відображається з блоку House thermal network;

$M_{Control}$ – модель системи контролю;

M_{Heater} – модель нагрівача;

$M_{HouseThermalNetwork}$ – модель теплової мережі будинку;

ABlocks – додаткові блоки для функціонування моделі.

Пропонована модель представляє систему опалення Розумного будинку та її управління. Дана модель містить блоки для контролю температури, опалювального обладнання (нагрівача), моделювання теплових втрат у будинку та зовнішніх факторів.

Всі процеси функціонування у даній системі опалення симулюється як комбінація теплової конвекції, теплової провідності та теплової маси. Узагальнену базову модель системи опалення у Розумному будинку подано на рис. 2.2.

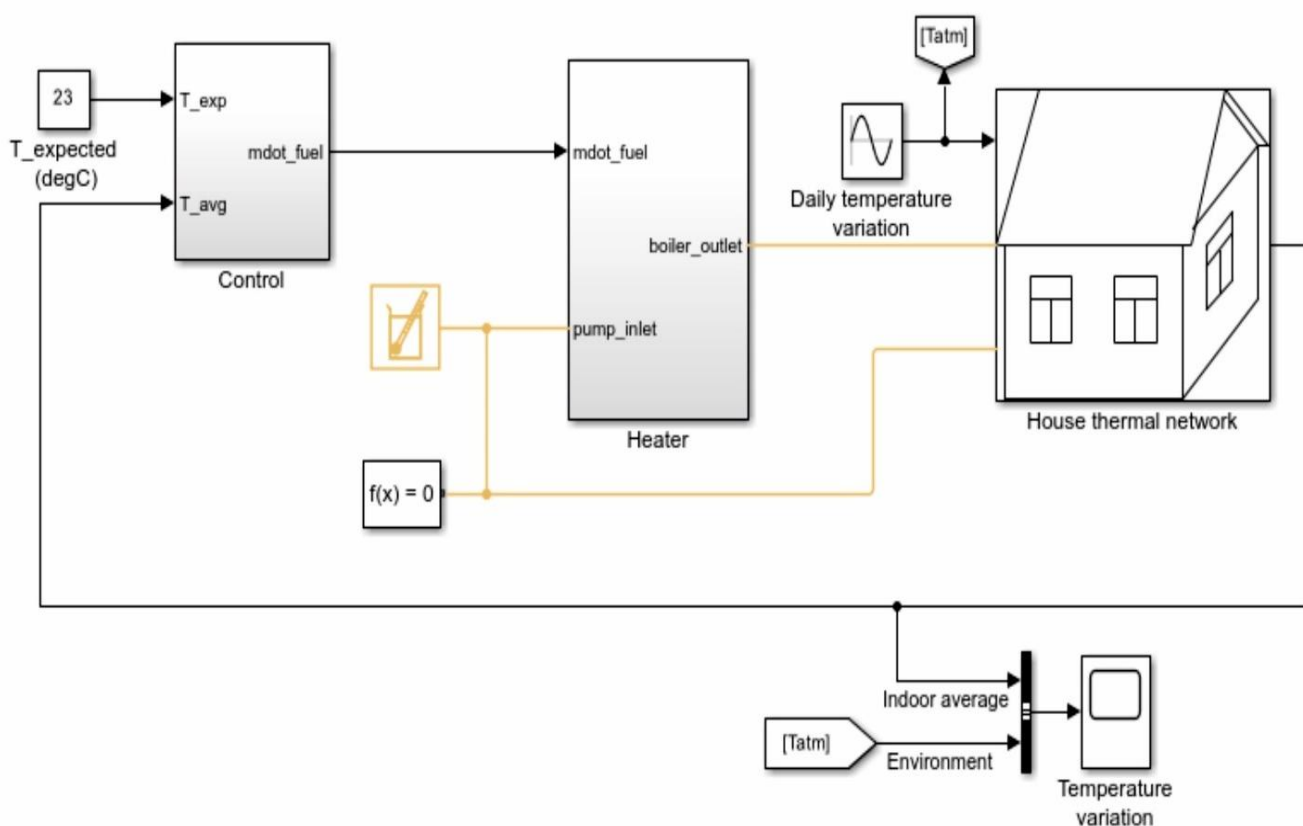


Рисунок 2.2 – Базова модель системи опалення у Розумному будинку

Вхідними даними для системи є:

- T_{exp} – встановлена (очікувана) температура у приміщенні. Це визначає бажаний рівень температури, який система повинна підтримувати.
- T_{avg} – поточна середня температура у приміщенні, яка відображається з блоку House thermal network.

Представлена модель складається із наступних складових: моделі системи контролю (Control Subsystem), моделі нагрівача (Heater), моделі модель теплової мережі будинку House thermal network.

Додатковими блоками *ABlocks* для функціонування моделі є блок для моделювання добової зміни температури (Daily temperature variation), а також графічний дисплей для відстеження результату роботи системи (Temperature variation).

У даній моделі контролер порівнює очікувану температуру (T_{exp}) із середньою поточною температурою (T_{avg}). На основі різниці між ними (помилки) контролер обчислює значення масової витрати палива (\dot{m}_{fuel}) для нагрівача. Виходом даного блоку є \dot{m}_{fuel} – масова витрата палива, яка передається до нагрівача.

Нагрівач приймає масову витрату палива (\dot{m}_{fuel}) як вхідний сигнал. Генерує тепло для нагріву води чи повітря у системі опалення. Виходами блоку нагрівача є *boiler_outlet* – тепловий вихід (теплота, що по дається до системи) та *pump_inlet* – сигнал, що показує поточний стан нагрівача.

Наступним блоком є House thermal network (теплова мережа будинку). Це модель теплової динаміки будинку, яка враховує:

- втрату тепла через стіни, вікна, дах;
- тепло, яке отримується від нагрівача;
- вплив зовнішніх умов (температури навколишнього середовища).

Входами теплової мережі будинку є *boiler_outlet* – теплова енергія, що надходить від нагрівача та Daily temperature variation ($[T_{atm}]$) – добові коливання зовнішньої температури. Виходом є значення T_{avg} – середня температура всередині будинку.

Блок Daily temperature variation моделює добові зміни зовнішньої температури (температури атмосфери). Він подає значення до теплової мережі будинку.

Блок Environment генерує зовнішню температуру як частину впливу навколишнього середовища. Подає сигнал на вхід блоку House thermal network.

Temperature variation (графічний дисплей), відображає значення температури всередині будинку, а також зміну температури зовнішнього середовища.

Одним із центральних елементів даної моделі є тепла мережа Розумного будинку.

Подамо модель теплової мережі будинку $M_{\text{HouseThermal Network}}$ у вигляді наступного кортежу:

$$M_{\text{HouseThermal Network}} = (\{T_{atm}, T_{avg}\}, \{M_{Rooms}, M_{Radiators}, IAT, HC\}, \{T_{avg}\}) \quad (2.3)$$

де T_{atm} – зовнішня температура, яка впливає на тепловтрати кожної кімнати через стіни та вентиляцію,

T_{avg} – поточна середня температура у приміщенні,

M_{Rooms} – модель теплової мережі кімнат $M_{Rooms} = \{M_{Room}\}_{i=1}^4$;

$M_{Radiators}$ – модель джерел опалення (радіаторів) $M_{Radiators} = \{M_{RoomRadiator}\}_{i=1}^4$;

IAT – блок розрахунку середньої температури у будинку;

HC (Heat Control) – блок регулювання потоку тепла між вхідним потоком і радіаторами.

Модель теплової мережі будинку подано на рис. 2.3. Система отримує на вході зовнішню температуру T_{atm} і середню температуру кімнат T_{avg} .

У пропонованій системі модель будинку складається із чотирьох кімнат. У кожній кімнаті присутній радіатор, який є єдиним джерелом тепловіддачі у кімнаті. Кожна кімната отримує вплив зовнішньої температури, яка змінюється із часом. У даній системі зовнішню температуру змодельємо відповідно до наступного закону:

$$T_{outside} = 6 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12 \cdot 360} \cdot t\right) + 5 \quad (2.4)$$

Радіатори $M_{Radiators}$ генерують тепло для кімнат на основі сигналів регулювання тепла HC , який враховує тепловтрати та потрібну (встановлену) температуру. Середня температура (отримується в блоці IAT) визначається як контрольний параметр, що дозволяє підтримувати бажаний тепловий баланс у приміщеннях.

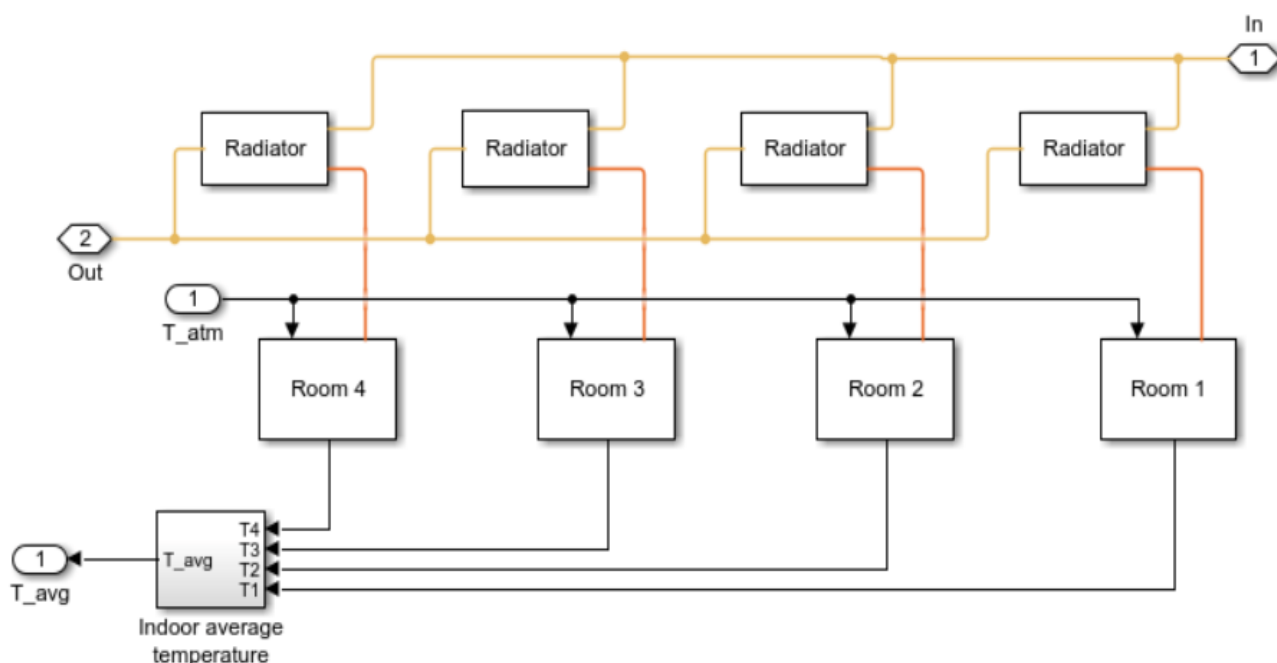


Рисунок 2.3 – Модель теплової мережі будинку

Структуру блоку IAT подано на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Структура блоку IAT

Однією із основних складових моделі системи опалення у Розумному будинку (вираз 2.2) є модель теплової мережі кімнат $M_{Rooms} = \{M_{Room}\}_{i=1}^4$. Дана модель є множиною із чотирьох елементів, кожен із яких описує процеси моделювання теплообміну між внутрішнім повітрям приміщення, його структурними елементами (дах, стіни, вікна), зовнішнім середовищем, а також джерелом тепла (обігрівачем). Представимо модель теплової мережі кімнати M_{Room} у вигляді наступного кортежу:

$$M_{Room} = (\{T_{atm}, H\}, \{TM, Conv, Cond, TS\}, \{T_{room}\}) \quad (2.5)$$

де T_{atm} – зовнішня температура,

H – джерело тепла

TM – множина термальних мас;

$Conv$ – множина елементів конвекції (convection);

$Cond$ – множина елементів теплопровідності (conduction);

T_{room} – температура у кімнаті

TS – давач температури;

У моделі M_{Room} множина термальних мас TM описує фізичні об'єкти, які зберігають тепло і передають його як у приміщення, так і назовні. Дана множина складає чотири елементи:

$$TM = \{TM_{Air}, TM_{Roof}, TM_{Wall}, TM_{Window}\} \quad (2.6)$$

де TM_{Air} – термальна маса для моделювання внутрішнього повітря кімнати,

TM_{Roof} – термальна маса для моделювання даху як об'єму, який накопичує та передає тепло

TM_{Wall} – термальна маса для моделювання стіни як об'єму, який накопичує та передає тепло

TM_{Window} – термальна маса для моделювання вікна як об'єму, який накопичує та передає тепло

У цій множині TM_{Air} представляє повітря в кімнаті, оскільки воно має низьку теплоємність, тому швидко реагує на зміну джерел тепла (обігрівач, тепловтрати через конструкції). TM_{Roof} представляє дах, який зазвичай має значну теплоємність і впливає на тепловтрати, особливо через контакт із зовнішнім середовищем. TM_{Window} моделює вікно як теплову масу, хоча його теплоємність значно нижча, ніж у даху чи стін, проте вікна є основним джерелом тепловтрат через низький коефіцієнт теплової ізоляції.

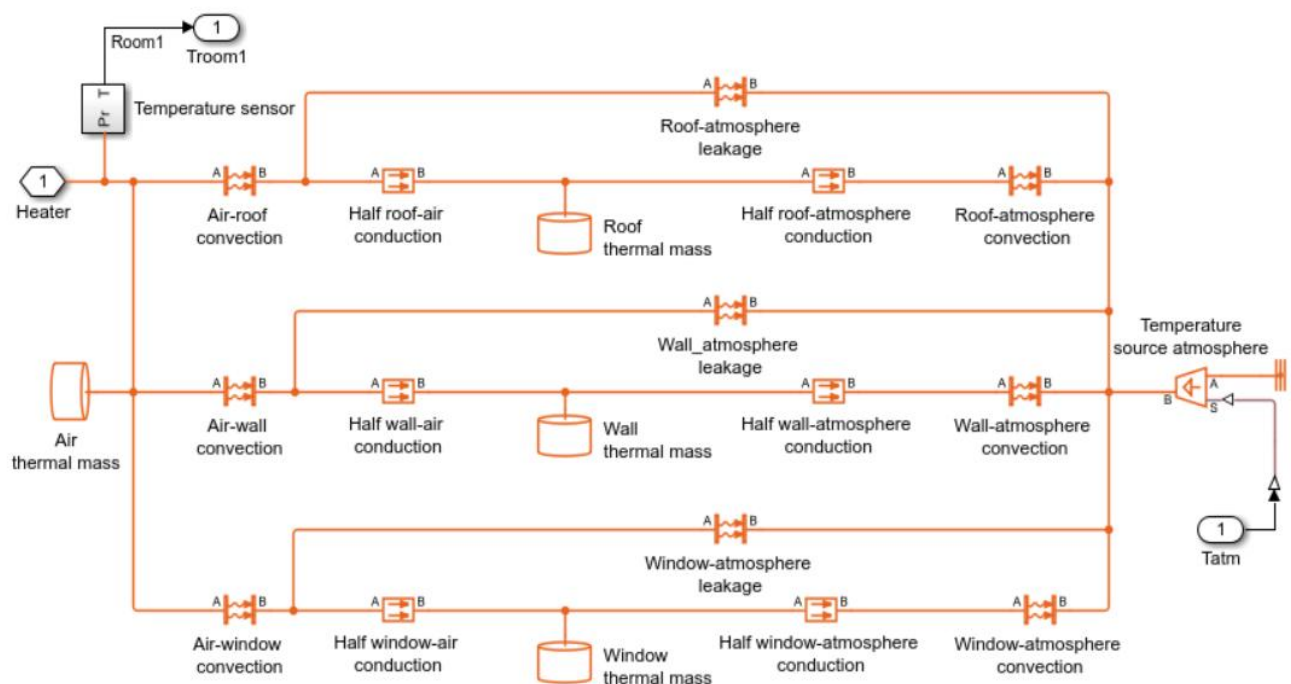


Рисунок 2.5 – в Модель теплової мережі кімнат

Основними компонентами моделі M_{Room} є блоки теплової маси, блоки конвекції та теплопровідності. Повітря всередині приміщення взаємодіє з дахом, стінами та вікнами через теплопередачу (конвекція та теплопровідність), що моделюється окремими блоками. Кожен структурний елемент (дах, стіни, вікна) представлений як окрема теплова маса, що моделює накопичення та передачу тепла.

Дах, стіни та вікна підключені до атмосфери через блоки тепловтрат, які враховують як теплопровідність, так і конвекцію. Для точнішого моделювання теплопередачі, теплопровідність між повітрям і структурними елементами (дахом, стінами, вікнами) розділена на дві половини: Half roof-air conduction, Half wall-air conduction та Half window-air conduction. Вони забезпечують послідовність передачі тепла між повітрям у кімнаті, тепловою масою елементів і зовнішнім середовищем.

Джерелом тепла є обігрівач H , який передає тепло повітрю в кімнаті. Повітря у приміщенні також моделюється як тепла маса (Air thermal mass), що враховує його здатність накопичувати та передавати тепло. Температура зовнішнього середовища T_{atm} моделюється як джерело температури, яке підключене до теплових мас через блоки теплопередачі. Ці блоки враховують тепловтрати через дах, стіни та вікна до атмосфери.

Представлена модель реалізує взаємодію повітря всередині приміщення із дахом, стінами та вікнами через теплопередачу, що складають три теплових ланцюги. У даній моделі ці ланцюги є типовими, зокрема для даху тепловий ланцюг моделюється наступним чином:

1. Передача тепла від кімнатного повітря до внутрішньої поверхні даху. Цей етап моделюється блоком Convection Air Roof (конвекція між повітрям кімнати та внутрішньою поверхнею даху). Як результат тепло передається від кімнатного повітря до внутрішньої поверхні даху.

2. Передача тепла через першу половину матеріалу даху (Half Roof Air Conduction). На цьому етапі тепло поширюється через внутрішню половину товщини даху. Це моделюється блоком Half Roof Air Conduction (теплопровідність через першу половину даху). Як результат частина тепла доходить до середини товщини даху.

3. Передача тепла через другу половину матеріалу даху (Half Roof Atmosphere Conduction). Тепло поширюється через другу половину товщини даху до зовнішньої поверхні. Це моделюється блоком Half Roof Atmosphere Conduction

(Теплопровідність через другу половину даху). Як результат тепло досягає зовнішньої поверхні даху.

4. Втрати тепла через витоки між дахом і атмосферою (Roof Atmosphere Leakage). На цьому етапі враховується витік тепла через можливі щілини або негерметичність даху. Це моделюється блоком Roof Atmosphere Leakage (втрати тепла через витоки даху в атмосферу). Як результат це призводить до втрати частини тепла через негерметичність даху.

5. Передача тепла від зовнішньої поверхні даху до атмосфери (Convection Roof Atmosphere). Зовнішня поверхня даху передає тепло до атмосфери через конвекцію. Це моделюється блоком Convection Roof Atmosphere (конвекція між дахом і атмосферою). В результаті частина тепла передається у зовнішнє середовище через конвекцію.

Таким чином варто відзначити, що кожний ланцюг теплообміну поділяється на дві умовні зони для врахування теплових потоків у двох напрямках з кімнати до зовнішнього середовища та із зовнішнього середовища до кімнати. Це дозволяє точніше моделювати процес передачі тепла та забезпечувати динамічну зміну теплових потоків залежно від умов.

Ще однією важливою складовою загальної моделі системи оптимізації опалення є модель нагрівача M_{Heater} . Представимо модель нагрівача у вигляді кортежу:

$$M_{\text{Heater}} = (\{\dot{m}_{\text{fuel inlet}}\}, \{SS, Pump, Boiler, CC\}, \{\text{outlet}\}) \quad (2.7)$$

Ця модель складається з наступних основних компонентів:

де \dot{m}_{fuel} – масова витрата палива;

inlet – потік рідини, який прямує до котла для нагрівання;

outlet – потік рідини, який прямує від котла після нагрівання;

SS – Джерело швидкості (speed) – використовується для керування швидкістю потоку рідини через насос;

Pump – Насос (Pump) – відповідає за створення потоку рідини;

M_{Boiler} – модель котла (Boiler) – використовується для нагрівання рідини;
 SS – Система циркуляції і теплообмінники – перенаправляють і передають тепло між компонентами.

Модель нагрівача подано на рис. 2.6.

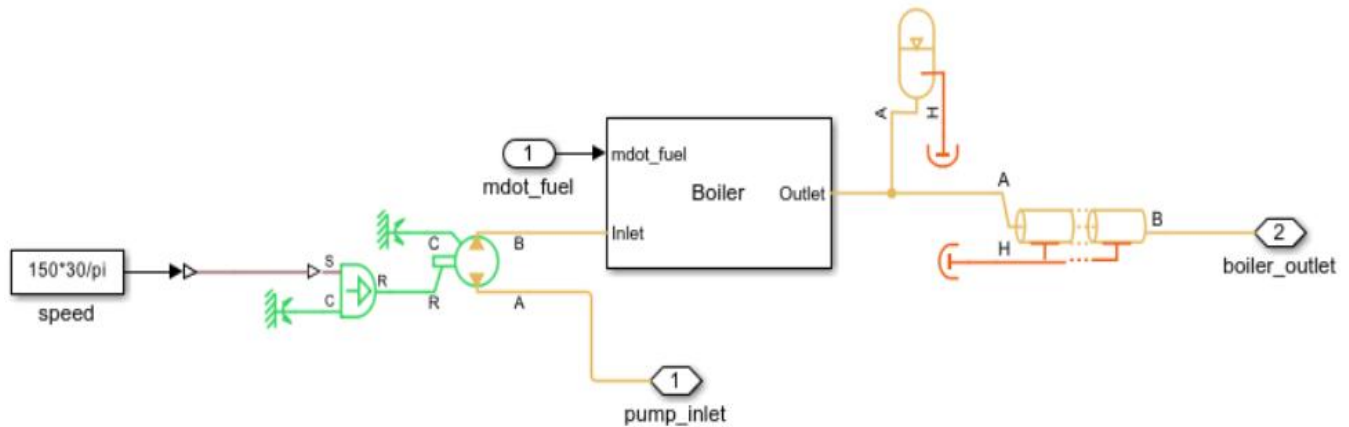


Рисунок 2.6 – Модель нагрівача

Блок SS задає вхідний параметр швидкості роботи насоса.

Насос $Pump$ забезпечує рух рідини через систему. Вихід потоку насоса визначається потужністю і швидкістю обертання. Насос складається з декількох компонентів:

- вхід S (Suction) – вхід насоса, куди надходить рідина.
- вихід R (Return) – вихід рідини після створення потоку.
- вихід C (Control) – вихід, через який сигнал швидкості впливає на роботу насоса.

Котел M_{Boiler} визначає основний компонент, що виконує нагрівання рідини. Має один вхід *inlet*, що представляє рідину, що надходить у систему, а також вихід *outlet* – нагріта рідина виходить із котла і як направляється до теплообмінників. Котел отримує теплоенергію з пального, яке подається через потік *mdot_fuel*. Нагрівання рідини виконується до необхідної температури.

Система SS складається із блоку теплообміннику та блоку циркуляції. Теплообмінник передає теплову енергію між нагрітою рідиною і робочим середовищем. У даній підсистемі вхід A визначає нагріта рідина, що надходить у

теплообмінник, тоді як В визначає вихід після теплообміну, коли рідина передається далі в систему. Блок Н визначає процес циркуляція рідини між котлом і теплообмінниками. Цей блок моделює зміну потоку і повернення рідини назад у систему.

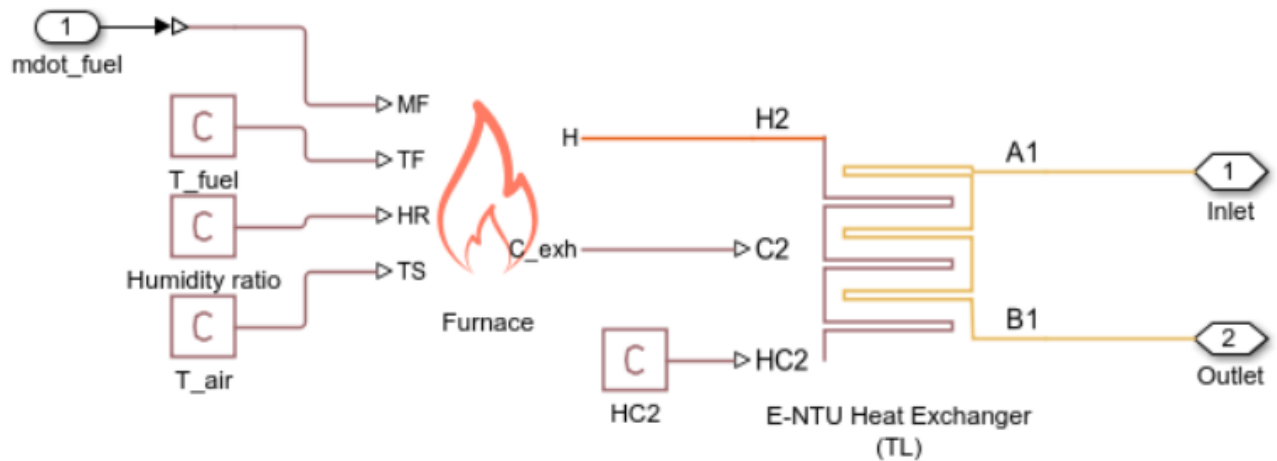


Рисунок 2.7 – Модель бойлера

Останнім основним компонентом базової системи опалення є модель системи керування $M_{Control}$, що представлена у вигляді блоку Control (рис. 2.1). Даний блок реалізує підсистему керування процесом опалення, яка враховує температурні параметри та масову витрату палива для мінімізації витрат (fuel cost). Дану модель керування можна віднести до пропорційно-інтегральних (ПІ) моделей із динамічною обробкою сигналів. Подамо модель системи керування $M_{Control}$ у вигляді:

$$M_{Control} = \left(\{T_{exp}, T_{avg}\}, \{S, GVL, VOMFR, NGD, IB, SB\}, \{\dot{m}_{fuel}, fuel\ cost\} \right) \quad (2.8)$$

де T_{exp} – встановлена (очікувана) температура у приміщенні.

T_{avg} – поточна середня температура у приміщенні;

S – суматор, GVL – блок динамічної затримки клапана подачі газу,

VOMFR – блок визначення масової витрати газу через клапан,
 NGD – блок інверсії щільності природного газу,
 IB – блок-інтегратор,
 SB – scale blocks, блоки масштабування сигналів,
 mdot_fuel – масова витрата палива, fuel cost – витрати на паливо.
 Модель системи керування опаленням подано на рис. 2.8.

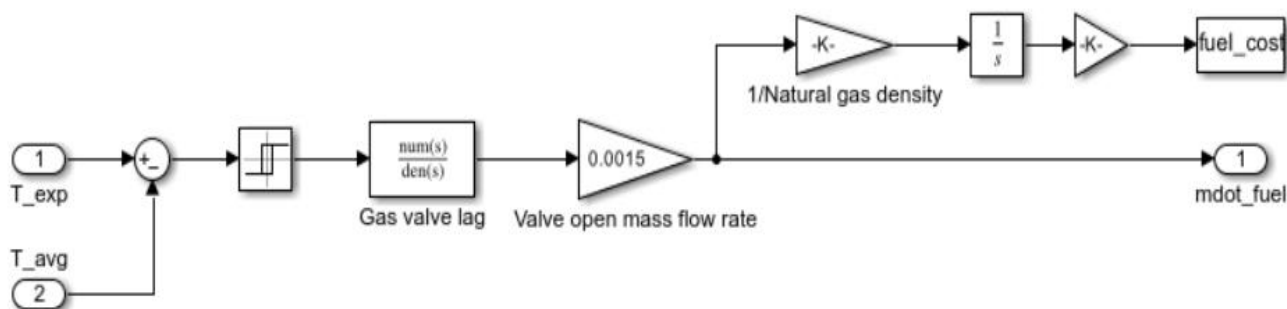


Рисунок 2.8 – Модель системи керування опаленням

Входами даної моделі є T_{exp} та T_{avg} (Temperature expected і Temperature average). T_{exp} це очікувана температура, яку система повинна підтримувати (задана користувачем або програмою). T_{avg} – це середня поточна температура (наприклад, зчитана із сенсорів). Ці два сигнали надходять на суматор для обчислення помилки (відхилення від бажаної температури).

Виходами даної моделі є mdot_fuel – масова витрата палива. Дане значення використовується для аналізу роботи системи та fuel cost – витрати на паливо, які розраховуються як функція витрати палива та його вартості.

Блок суматор (позначається на схемі як +) обчислює різницю між значеннями T_{exp} і T_{avg} . Отримане значення визначає, наскільки фактична температура відрізняється від бажаної. Ця помилка є основою для подальшого регулювання витрати природного газу:

$$Error = T_{exp} - T_{avg} \quad (2.9)$$

Наступним етапом є динамічна обробка цього сигналу через модель затримки клапана подачі газу, яка враховує часові характеристики системи, що описуються передавальною функцією:

$$w(s) = \frac{num(s)}{den(s)} \quad (2.10)$$

Дану функціональність представляє блок *GVL* – Gas Valve Lag.

Блок *VOMFR* – Valve Open Mass Flow Rate масштабує сигнал від клапана, щоб визначити масову витрату газу через клапан. У пропонованій моделі значення коефіцієнта для даного блоку складає 0.0015.

Блок інверсії щільності природного газу *NGD* (1/Natural Gas Density) представляє інверсію щільності природного газу і дозволяє врахувати властивості газу (густину), щоб перевести масову витрату у відповідну теплову енергію.

Додатковий блок інтегратор (1/s) інтегрує сигнал, що відповідає витраті газу, для обчислення накопиченої кількості використаного палива (або енергії, переданої в систему).

Блоки з коефіцієнтами *SB* масштабують сигнали на основі характеристик системи (на рисунку позначені як -K-). Перший коефіцієнт визначає енергетичну ефективність газу, тоді як другий коефіцієнт визначає вартість палива за одиницю енергії.

Таким чином контролер, реалізований у базовій версії [10], є пропорційним контролем, який оцінює фактичну температуру будинку щодо цільової температури, з похибкою 2 °C та гістерезисом 4 °C. У даному випадку поняття гістерезису визначає ефект, коли система має різну реакцію на зміни вхідної величини в залежності від того, чи зростає чи зменшується ця величина.

У контексті даної теплової системи гістерезис використовується для запобігання частим вмиканням/вимиканням пристроїв, коли температура коливається навколо певного порогу. Наприклад, у системах опалення чи

охолодження гістерезис визначає різницю між пороговими значеннями для вмикання і вимикання пристрою. Це дозволяє уникнути постійного вмикання і вимикання (яке може бути шкідливим для обладнання) при незначних коливаннях температури. Таким чином у даній моделі гістерезис встановлений на рівні 4°C . Це означає, що контролер відкриє клапан для підключення обігрівача, коли температура опуститься нижче ніж на 2°C від заданої, і закриє клапан, коли температура перевищить цільову на 2°C .

Обігрівач системи отримує паливо, яке регулюється клапаном, і вода в системі опалення повертається такою ж, але гарячішою завдяки ефекту котла. Котел працює при постійних умовах вологості та повітря. Він може передавати тепло, що генерується в процесі горіння, воді завдяки теплообміннику. Тому вода, що виходить з обігрівача, значно гарячіша за ту, що в нього входить.

Таким чином описано модель оптимізації опалення, яка буде порівнюватись із запропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку. Такий підхід передбачатиме збереження однакових умов для обох моделей, що дозволить коректно оцінити ефективність запропонованої системи в порівнянні із традиційною. Моделювання буде здійснюватися на основі тієї ж моделі інформаційного моделювання будівлі в MATLAB, що забезпечить порівняння за однаковими параметрами.

2.4 Висновки

Запропоновано абстрактну модель опису для системи опалення у будинку, яка забезпечує структурований підхід до формалізації процесів, що лежать в основі функціонування сучасних систем опалення. Це дозволило формалізувати узагальнену базову модель всієї системи опалення у Розумному будинку, яка служить референтною основою для оцінки ефективності альтернативних підходів до управління тепловими ресурсами.

Описана базова модель системи опалення симулює поведінку системи опалення в будинку, включаючи обігрівач, контролер, що використовує просту

пропорційну стратегію управління, і чотири кімнати з радіаторами, які реагують на зовнішню температуру. Модель інтегрує ключові теплові процеси, такі як конвекція, теплопровідність та теплову масу, які впливають на розподіл тепла в приміщеннях. Особлива увага приділяється контролю температури, який реалізовано з гістерезисом для забезпечення стабільної та ефективної роботи системи опалення.

Крім того, модель враховує вплив зовнішніх факторів, таких як зміни зовнішньої температури, які є важливими для оцінки здатності системи підтримувати комфортні умови всередині будинку при мінімальних витратах енергії. Описана модель є основою для порівняння із запропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку, що базується на нечіткій логіці. Нечітка система забезпечує більш гнучке та адаптивне управління, яке враховує множинні фактори, такі як присутність людей у приміщенні, рівень вологості та зовнішню температуру.

Такий підхід передбачає збереження однакових умов для обох моделей, що дозволяє коректно оцінити ефективність запропонованої системи на основі нечіткої логіки у порівнянні з базовою моделлю опалення. Проведений аналіз надає можливість зробити висновки про доцільність використання інноваційних підходів у системах опалення та їхній вплив на зниження енергоспоживання й підвищення комфорту.

3 СИСТЕМА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ОПАЛЕННЯ В РОЗУМНОМУ БУДИНКУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

3.1 Постановка задачі оптимізації керування опаленням

Розглянута у попередньому розділі базова модель керування опаленням у Розумному будинку визначає пропорційно-інтегральне керування із динамічною обробкою сигналів. Проте очевидним недоліком є досить часте перемикання режимів роботи системи, що може призводити до надмірного споживання енергії та швидшого зношування обладнання. Це пояснюється тим, що базова модель орієнтована на оперативне реагування на зміну температури, проте не враховує довгострокову стабільність роботи системи. Як наслідок, вона забезпечує недостатньо плавний режим керування та підвищену кількість коливань температури навколишнього середовища.

Для вирішення цих проблем у подальших розділах пропонується використати систему з нечітким логічним висновком. Сформуємо задачу оптимізації керування опаленням у Розумному будинку.

Задача оптимізації керування опаленням може бути представлена через математичну цільову функцію, яку необхідно мінімізувати. Метою цієї задачі є одночасне зменшення витрат на паливо та зменшення коливань температури в кімнатах.

Нехай вхідною змінною для системи керування є температура в Розумному будинку $T_{house}(t)$, а також задана температура $T_{desired}$, яка визначає комфортну температуру для обраного приміщення. Задача полягає в тому, щоб управляти тепловою потужністю $Q_{heat}(t)$, яка регулюється через котел чи інші джерела опалення, для того щоб мінімізувати два критеріальні показники.

Першим критерієм є вартість палива. Вартість палива залежить від того, скільки палива споживається для підтримки заданої температури в Розумному будинку. Це можна виразити через витрату палива $\dot{m}_{fuel}(t)$ за певний період часу T . Вартість палива визначається як інтеграл від витрати палива на одиницю часу,

помножений на вартість одиниці палива C_{fuel} . Математично це можна записати так:

$$C_{total} = \int_0^T \dot{m}_{fuel}(t) \cdot C_{fuel} dt \quad (3.1)$$

Це перший критерій, який ми прагнемо мінімізувати.

Другим критерієм є зменшення частоти коливань температури в Розумному будинку. Коливання температури виникають через часті вмикання та вимикання котла, що веде до значних перепадів температури в приміщенні. Це можна описати через функцію, що вимірює швидкість зміни теплової потужності $Q_{heat}(t)$. Згладжена зміна потужності є важливим аспектом для забезпечення стабільної температури в приміщенні. Для цього можна використовувати метрику, яка інтегрує похідну теплової потужності, тобто:

$$S_{smoth} = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dQ_{heat}(t)}{dt} \right| dt \quad (3.2)$$

Чим менше це значення, тим плавніше працює система, а значить, коливання температури менші.

Таким чином задача оптимізації в цілому полягає у мінімізації комбінації цих двох критеріїв:

$$\min J = w_1 \cdot C_{total} + w_2 \cdot S_{smoth} \quad (3.3)$$

де w_1 і w_2 – це вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного з критеріїв. Вагові коефіцієнти можуть бути налаштовані залежно від того, на чому більше акцентується загальний критерій оптимізації (наприклад, якщо важливіша економія палива, то w_1 буде більшим).

У рамках цієї задачі, система нечіткого логічного висновку (FLS) використовується для визначення оптимальної потужності опалення $Q_{heat}(t)$

залежно від поточного відхилення температури $\Delta T = T_{house}(t) - T_{desired}$ і швидкості зміни температури. Виходячи з цих входів, нечітка система визначає, чи потрібно збільшити або зменшити теплову потужність для стабілізації температури в Розумному будинку.

Таким чином, задача є задачею багатокритеріальної оптимізації, де потрібно одночасно зменшити витрати палива та стабілізувати температуру в приміщенні, застосовуючи систему нечіткого керування для більш плавного регулювання теплової потужності.

3.2 Архітектура та функціонування системи оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

З метою вирішення задачі підтримки оптимальної (комфортної) температури у Розумному будинку запропоновано систему оптимізації використання опалення. Ключовими особливостями системи є процес її функціонування, що організований у формі мультиагентної системи, а також залучення нечіткої логіки у процесі оптимізації.

У пропонованій системі агенти поділені на три модулі, що відрізняються за функціонуванням. Зокрема виділено такі модулі, як модуль контролю та взаємодії із користувачем, модуль відстеження фізичних параметрів та модуль формування рішення.

У даній системі припускається, що агенти, які належать до однієї групи, можуть бути схожими або працювати разом для досягнення проміжної цілі системи. Завдяки цим модулям легше включати, видаляти або змінювати агентів. Розглянемо детальніше структуру та процес функціонування та комунікації цих агентів.

Центральним компонентом всієї системи є модуль контролю та взаємодії із користувачем. Функціонально даний модуль відповідальний за два головних завдання: координацію роботи всієї системи та комунікацію із користувачем. Структурно модуль контролю та взаємодії із користувачем складається із

контролюючого агенту, бази даних та комунікаційного інтерфейсу для взаємодії із користувачем. В контексті мультиагентної системи контролюючий агент є агентом, який контролює та координує роботу решти агентів. Він відповідає за ініціалізацію інших агентів, контролює їхню діяльність і перевіряє виконання завдань.

Кожен агент має визначену поведінку, яка визначає, як він буде виконувати свої завдання у системі. У даній системі агенти можуть виконувати власні функції відповідно до декількох шаблонів поведінки, зокрема одноразове функціонування, циклічне функціонування та функціонування із періодичністю, а також їх комбінації.

У пропонуваній системі контролюючий агент володіє такими типами поведінки:

- одноразове функціонування для ініціалізації агентів на початку роботи мультиагентної системи;
- функціонування із періодичністю для перевірки активності решти агентів.
- циклічне функціонування для отримання повідомлень від агентів модуля штучного інтелекту.

Структурно модуль контролю та взаємодії із користувачем також складається із агент комунікації із користувачем. Головна мета даного модуля це організація інтерфейсу для передачі та прийому повідомлень від користувача.

Іншим модулем запропонованої системи є модуль відстеження фізичних параметрів. Він містить агентів датчиків. Кожен модуль у цій архітектурі підключається до певного датчика через відповідний протокол. Кількість агентів залежить від кількості параметрів, які центральна система хоче контролювати або вимірювати. У цьому випадку запропонована система включає чотири різні агенти:

- агент вимірювання зовнішньої температури: включає датчик температури, розташований за межами будівлі, щоб отримувати температуру зовнішнього середовища, а також сервіс отримання даних із зовнішніх джерел. В якості зовнішнього джерела використано OpenWeatherMap. Таким чином агент вимірювання зовнішньої температури отримує два значення – виміряне давачем

температури, а також отримане від зовнішнього джерела. Зважене середнє спільного значення температури визначається як:

$$T_{out} = w_{sen} \cdot T_{sen} + w_{owm} \cdot T_{owm} \quad (3.4)$$

де w_{sen}, T_{sen} – коефіцієнт і довіри для давача і виміряна ним температура (0,7), w_{owm}, T_{owm} – коефіцієнт довіри для зовнішнього джерела (0,3) і отримана температура.

– агент вимірювання внутрішньої температури: система включає датчик температури всередині будівлі, щоб визначити, чи досягнуто комфортної температури.

– агент вимірювання зовнішньої вологості: цей агент враховує лише зовнішню вологість, оскільки внутрішня залежить від цільової температури. Значення зовнішньої вологості розраховується аналогічно значенню зовнішньої температури (3.4);

– агент визначення кількості людей: агент визначає, чи є люди всередині будівлі, щоб уникнути надлишкового споживання енергії.

Робота вищезгаданих агентів здійснюється за схожим принципом. Кожен із них підключений до окремого давача, але їхня робота організована майже однаково. Даним агентам притаманне циклічне функціонування: вони отримують поточні дані з давача (або сенсора і зовнішнього середовища), аналізують їх і обирають найбільш оптимальну дію. У разі необхідності агент може адаптувати свою поведінку.

Ключовою особливістю всіх агентів є наявність невеликої тимчасової пам'яті, яка зберігає останні m вимірених значень, отриманих від давача. Параметр m є емпіричним. У даній роботі було обране значення 30 для даного параметру. Таким чином пам'ять у даних агентах використовується для забезпечення двох функцій:

– визначення екстремальності отриманого значення відповідно до формули:

$$y > \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Y_i + \text{mean}(Y))^2}{m}} \cdot k + \frac{\sum_{i=1}^m Y_i}{m} \quad (3.5)$$

де y – поточне отримане значення від агента із множини всіх збережених значень у тимчасовій пам'яті Y ; Y_i – кожне значення із набору Y ; m – кількість значень у наборі Y ; $\text{mean}(Y)$ – середнє значення набору Y ; k – коефіцієнт узгодження.

– переконатися, що поточне значення відрізняється від будь-якого з нещодавно збережених значень у тимчасовій пам'яті (останніх 15 значень).

У випадку якщо поточне значення виявляється екстремальним (умова (1)), воно автоматично відхиляється, не записується в базу даних системи, не зберігається у тимчасовій пам'яті агента і не передається агенту формування нечіткого логічного рішення, що знаходиться у модулі формування рішення.

Якщо значення не є екстремальним, тоді здійснюється перевірка умови (2). У разі її виконання відповідний агент збільшує інтервал часу до наступного зчитування даних із давачу, вважаючи, що показники є стабільними і не потребують частих перевірок. Це призводить до зниження активності агента та зменшує споживання енергії. Чим довше стабільність значень зберігається, тим більший фіксується інтервал часу між вимірюваннями даним агентом. У такому випадку значення залишається лише у тимчасовій пам'яті, і не записується до бази даних (що розташовується у модулі контролю та взаємодії із користувачем), а також не передається агенту формування нечіткого логічного рішення (знаходиться у модулі формування рішення).

У протилежному випадку, при фіксації зміни вимірюваних даних, агент повертається до звичайного режиму роботи, виконує передачу зібраної інформації агенту формування нечіткого логічного рішення і зберігає дані у базі даних модуля контролю та взаємодії із користувачем.

Таким чином алгоритм функціонування агента вимірювання зовнішньої температури виглядає наступним чином:

1. Ініціалізація агента, встановити параметри:

- коефіцієнти довіри: $w_{sen}=0.7$, $w_{owm}=0.3$.
- параметри для пам'яті: $m=30$ (кількість збережених значень).
- поріг екстремальності для перевірки (умова (1)).
- кількість останніх значень для перевірки стабільності: 15.

2. Підключення до сенсора:

- налаштувати зв'язок з локальним сенсором температури.
- налаштувати API для отримання даних від OpenWeatherMap.

3. Основний цикл роботи агента (циклічна поведінка):

- отримати поточну температуру з локального сенсора T_{sen} ;
- отримати температуру з OpenWeatherMap T_{owm} ;
- розрахувати зважене середнє за формулою 3.1 (умова 1);
- розрахувати середнє значення збережених даних: $mean(Y)$;
- розрахувати екстремальне значення за формулою 3.2;
- якщо T_{out} відповідає умові перевірки на екстремальне значення, то відхилити значення, не записувати в пам'ять, пропустити всі наступні етапи циклу;
 - перевірка стабільності значень (умова (2)), порівняти T_{out} з останніми 12 значеннями в пам'яті. Якщо значення стабільне: збільшити інтервал зчитування даних, не записувати в базу даних, не передавати значення агенту формування рішення. Якщо значення змінюється: повернути інтервал зчитування до стандартного, перейти до наступного кроку.

– Збереження даних: додати T_{out} у тимчасову пам'ять (з врахуванням ліміту m), записати T_{out} у базу даних, передати T_{out} агенту формування нечіткого логічного рішення.

4. Завершення роботи:

- завершити цикл роботи агента при отриманні відповідної команди;
- зберегти стан пам'яті та параметри для подальшого запуску.

Третім модулем у запропонованій системі оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки є модуль формування рішення. Даний модуль виконує інтелектуальні функції всієї системи. Він

використовуватиме інформацію, зібрану попереднім модулем і передану контролюючим агентом, для оцінювання всіх змінних і визначення найбільш відповідного вихідного сигналу для поточної ситуації. У складі даного модуля визначено два типи агентів: агенту формування нечіткого логічного рішення та агент стану системи.

Агент формування нечіткого логічного рішення є ключовим елементом системи керування опаленням. Він включає нечітку систему управління, яка обробляє дані, отримані від агентів модуля відстеження фізичних параметрів, і генерує відповідну керуючу дію, що передається системі. У межах агента визначаються правила та функції належності для різних змінних, щоб забезпечити коректне виконання керуючих дій. Агент отримує дані від сенсорних агентів для виконання своєї функції. Якщо якийсь із сенсорних агентів перестає надсилати дані (наприклад, через стабільність значень або вихід з ладу), нечіткий агент використовує останній запис, збережений у базі даних. У такій ситуації надсилається повідомлення наглядачеві для перевірки статусу одного із агентів вимірювання фізичних параметрів. Механізм функціонування агенту формування нечіткого логічного рішення передбачає періодичну активність, що включає відсутність постійної генерації вихідних сигналів для керування системою опалення (лише за потреби).

Агент стану системи відповідає за встановлення керуючої дії, визначеної нечітким агентом, і повідомлення контролюючого агента про те, що дія виконана в фізичній системі. Попри простоту функціонування, його роль є надзвичайно важливою, адже він змінює стан системи. Агент працює циклічно: він постійно прослуховує повідомлення від агенту формування нечіткого логічного рішення і виконує свою задачу кожного разу, коли це необхідно.

Структуру системи оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки наведено на рис. 3.1.

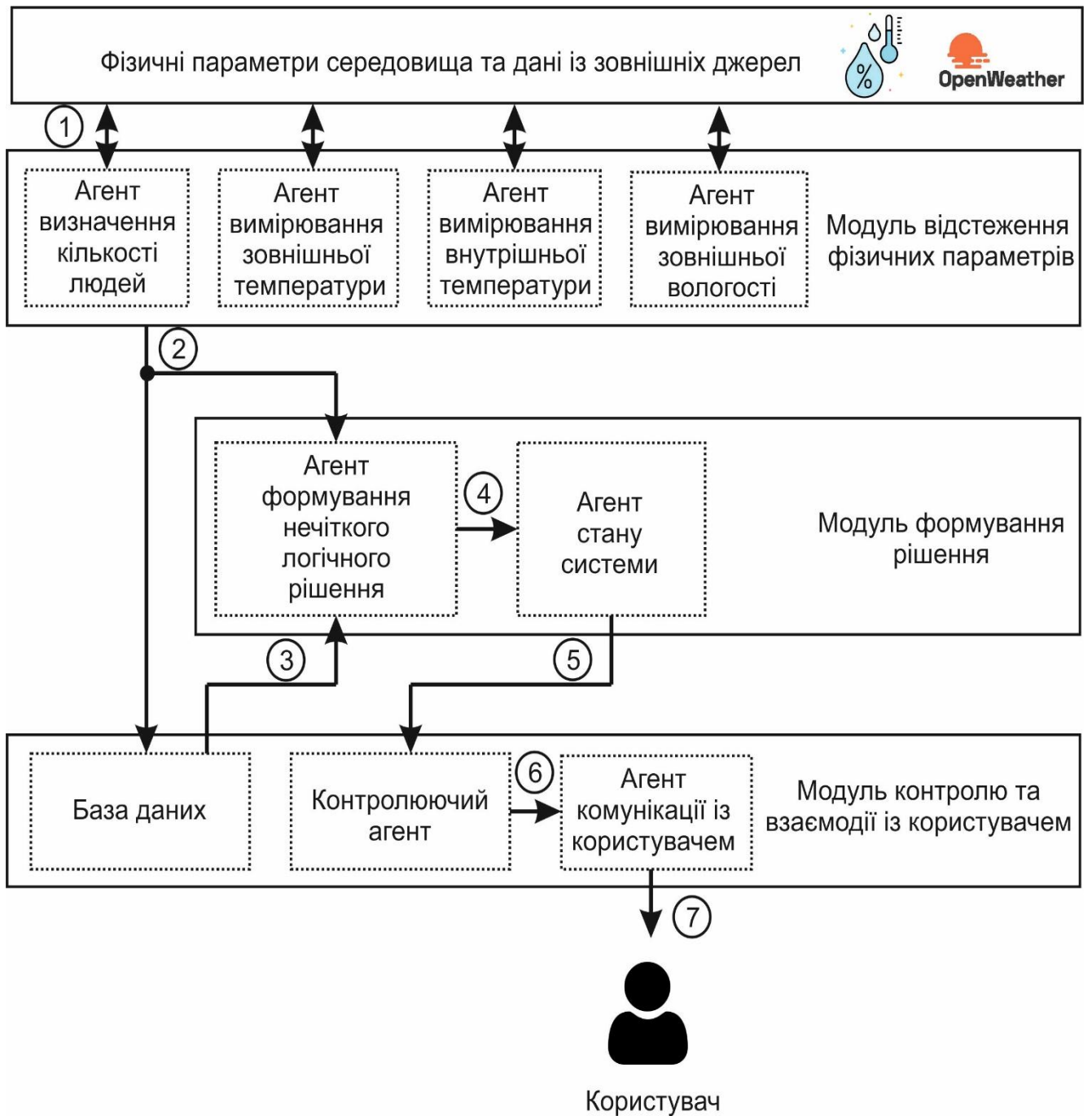


Рисунок 3.1 – Структура системи оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Запропонована архітектура базується на модульній структурі, що складається із декількох модулів, і кожен із них спеціалізується на виконанні певного завдання чи досягненні конкретної мети. Однак ключовим аспектом є комунікація між модулями, яка дозволяє їм ділитися результатами виконаних завдань для спільного

розв'язання загальної проблеми. Комунікація між агентами та модулями є основною поведінкою мультиагентної системи.

Коли система запускається, першим починає працювати контролюючий агент. При запуску роботи всієї системи, контролюючий агент здійснює ініціалізацію агентів системи, що архітектурно знаходяться у модулі відстеження фізичних параметрів. Після запуску інших агентів вони починають працювати відповідно до визначеної для них поведінки. В процесі свого функціонування контролюючий агент періодично здійснює перевірку на активність інших агентів у системі. Якщо якийсь агент виходить з ладу або припиняє роботу, контролюючий агент повторно здійснює його запуск.

Агенти модуля відстеження фізичних параметрів здійснюють формування даних відповідно до формули 3.4 і оцінюють ці дані, щоб визначити, яку дію виконати або чи потрібно змінити власну поведінку. У випадку якщо необхідно передати вимірянні дані, вони відправляються до агенту формування нечіткого логічного рішення.

Агенту формування нечіткого логічного рішення здійснює очікування на повідомлення від агентів у модулі відстеження фізичних параметрів, щоб отримати значення, які визначають подальшу контрольну дію. Якщо після певного часу не отримано всіх необхідних даних, використовуються останні значення, збережені в базі даних, а контролюючий агент отримує попередження про можливі проблеми з певними агентами сенсорів. У разі коли всі значення отримано, виконується процес запуску системи нечіткого логічного висновку, яка є основою агента формування нечіткого логічного рішення. Після визначення вихідних даних агент формування нечіткого логічного рішення надсилає повідомлення агенту стану системи. Цей агент застосовує вихідні дані до системи опалення у будинку, а також надсилає повідомлення контролюючому агенту.

Виконання даного процесу носить циклічний характер. Найоптимальніший підхід – виконувати його, наприклад, кожні десять хвилин, щоб перевірити, чи змінилися умови зовнішнього середовища з моменту останньої контрольної дії, і, відповідно, оновити дії управління. Такий підхід мінімізує обчислювальні витрати

та вплив на реальну розподілену мережу давачі, оскільки давачі не передають дані постійно. Це також знижує енергоспоживання, оскільки агенти можуть «спати» протягом цього проміжку часу, зменшуючи споживання енергії як агентами, так і сенсорами. Зменшення інтервалу можливе, але призводить до збільшення енергоспоживання системи та давачів. Збільшення інтервалу також можливе, але це може призвести до зміни вимірних значень у проміжку, що вплине на комфорт користувачів. Тому оптимальний інтервал обрано емпіричним шляхом на рівні 10 хвилин. Потік повідомлень, що передаються у системі оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки подано на рис. 3.2.

Відповідно до запропонованої архітектури системи оптимізації опалення і її процесу функціонування було оцінено часові витрати системи T_{sys} , які обчислюються наступним виразом:

$$T_{sys} = \sum_{i=1}^N (t_{communicate,j} + t_{collect,j}) + t_{fuzzy} + t_{sentToSS} + t_{sentToCA} \quad (3.6)$$

де N – кількість агентів у модулі відстеження фізичних параметрів;

$t_{collect,j}$ – час витрачений на формування даних агентами у модулі відстеження фізичних параметрів;

$t_{communicate,j}$ – час витрачений на комунікацію між агентами у модулі відстеження фізичних параметрів;

t_{fuzzy} – час витрачений на формування нечіткого логічного висновку

$t_{sentToSS}$ – час витрачений на передачу даних до агенту стану системи від агента формування нечіткого логічного рішення

$t_{sentToCA}$ – час витрачений на передачу повідомлення до контролюючого агента агенту

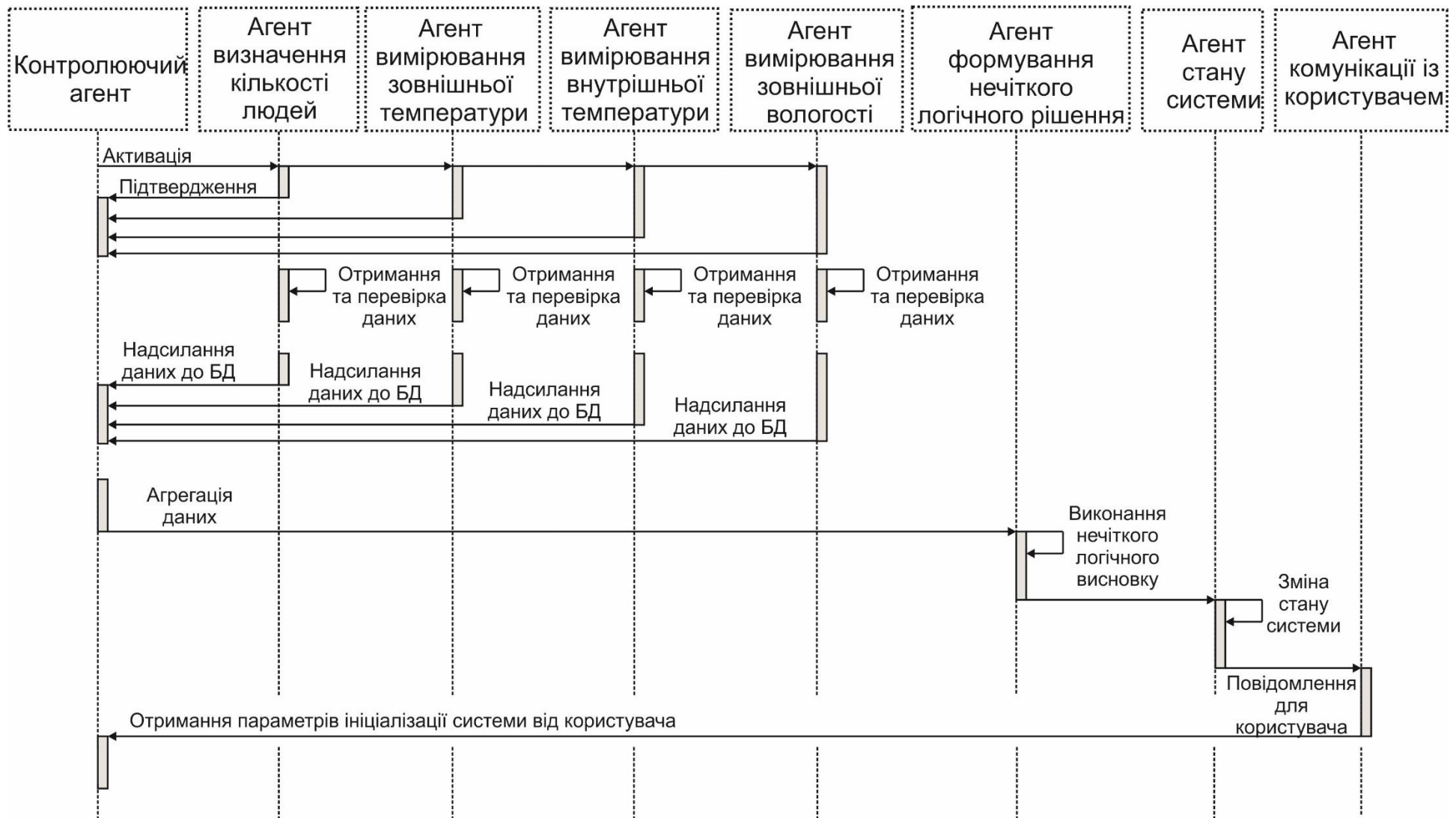


Рисунок 3.2 – Потік повідомлень, що передаються у системі оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

3.3 Реалізація системи оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

З метою оцінки запропонованих рішень було спроектовано прототип системи оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки. Ключовим механізмом організації зв'язку та обміну повідомленнями у цій системі є мультиагентний принцип. З цією метою використано SPADE (Smart Python Agent Development Environment), що є платформою для створення інтелектуальних агентів, які можуть взаємодіяти між собою асинхронно. Основною метою системи є моніторинг і аналіз ключових параметрів у розумному будинку, таких як температура, вологість і кількість людей у приміщенні. Ці параметри збираються агентами, обробляються, і на основі них приймаються рішення за допомогою нечіткої логіки.

Оскільки реальні датчики у цій системі відсутні, їх функції імітуються в MATLAB. Наприклад, значення зовнішньої температури моделюються змінними у MATLAB, які динамічно оновлюються. Зовнішня температура змінюється за синусоїдальним законом із заданими параметрами амплітуди, частоти, фази та зміщення.

Для моделювання зовнішньої температури було задано такі параметри:

- амплітуда: 6°C (визначає коливання температури навколо середнього значення);
- частота: $2\pi / (12 \times 3600)$ (відповідає добовому циклу, де 12×3600 секунд – це половина доби);
- фаза: 0 (визначає початкову точку коливань);
- зсув (bias): 5°C (середнє значення температури).

Подібним чином моделюється зовнішня вологість, але з додатковим фазовим зсувом для відображення реальної взаємозалежності між температурою та вологістю.

Кількість людей у приміщенні симулюється як випадкове число в межах певного діапазону, яке оновлюється через регулярні проміжки часу.

Кожен агент у модулі відстеження фізичних параметрів відповідає за збір даних із симульованих давачів. Зв'язок між Python і MATLAB здійснюється за допомогою MATLAB API. Це дозволяє агентам отримувати значення змінних із MATLAB у реальному часі. Наприклад, агент вимірювання зовнішньої температури через API звертається до MATLAB і отримує поточне значення симульованої температури з робочої області MATLAB. Аналогічно, агенти для внутрішньої температури, вологості та кількості людей використовують ті ж підходи для доступу до своїх відповідних змінних.

Окрім агентів, які збирають дані, у системі є агент, відповідальний за нечіткий логічний висновок. Цей агент також реалізований у MATLAB, оскільки MATLAB має потужні інструменти для роботи з нечіткою логікою. Цей агент отримує дані від інших агентів через Python і використовує MATLAB Engine API для передачі цих даних до моделі нечіткого логічного висновку. Модель, створена у MATLAB, приймає входні дані (зовнішню температуру, внутрішню температуру, зовнішню вологість, а також кількість людей у приміщенні) і повертає результат у вигляді вихідного значення, яке відповідає значення «увімкнути» або «вимкнути» джерело опалення.

Завдяки MATLAB Engine API для Python, система забезпечує двосторонній обмін даними. Python-агенти можуть передавати дані до MATLAB, виконувати обчислення у середовищі MATLAB, а потім отримувати результати назад для подальшої обробки. Наприклад, якщо агент отримує дані про температуру, вологість і кількість людей, він передає їх до моделі нечіткого логічного висновку у MATLAB. Модель обробляє ці дані, визначає поточний стан системи (наприклад, чи потрібно вмикати нагрів), і повертає результат агенту. Потім агент може використати цей результат для інформування інших частин системи, зокрема агента стану системи.

Таким чином, система поєднує моделювання фізичних процесів у MATLAB із можливостями Python для реалізації мультиагентного середовища. Це дозволяє забезпечити гнучкість, реалістичність і масштабованість симуляції, навіть за відсутності реальних фізичних пристроїв.

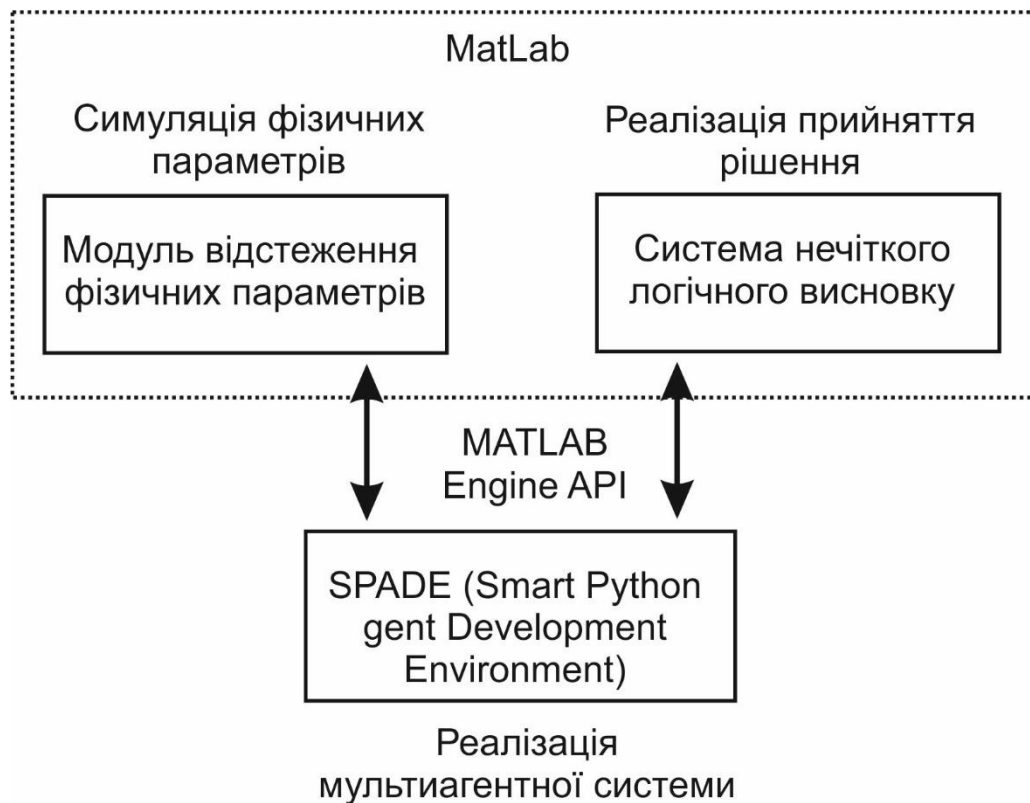


Рисунок 3.3 – Схема взаємодії структурних компонентів системи оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки

3.4 Висновки

Таким чином визначено два основні критерії для оптимізації керування опаленням у Розумному будинку. У рамках оптимізаційної задачі використовувалася математична модель, яка поєднує ці два критерії, враховуючи вагові коефіцієнти для кожного з них. Запропоновано архітектуру системи оптимізації опалення у Розумному будинку. Ключовими особливостями системи є процес її функціонування, що організований у формі мультиагентної системи, а також залучення нечіткої логіки у процесі оптимізації. У пропонуваній системі агенти поділені на три модулі, що відрізняються за функціонуванням. Зокрема виділено такі модулі, як модуль контролю та взаємодії із користувачем, модуль відстеження фізичних параметрів та модуль формування рішення.

4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПАЛЕННЯ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

4.1 Реалізація агента нечіткого логічного висновку

У пропонованій системі оптимізації опалення в Розумному будинку використано підхід, заснований на нечіткій логіці. Процес функціонування пропонованої системи організовано у формі мультиагентної системи, де центральним компонентом є агент нечіткого логічного висновку. Ця система взаємодіє з іншими агентами, які відповідають за управління температурою та збір даних.

Агент нечіткого логічного висновку реалізовано у програмному середовищі Matlab. В основі його функціонування задіяно систему нечіткого логічного висновку типу Сугено (рис. 4.1). Використання нечіткої системи типу Сугено для оптимізації опалення в Розумному будинку обґрунтовано її особливостями, які добре відповідають вимогам цієї задачі. Основною перевагою моделі Сугено є те, що вона забезпечує чіткий (точний) вихід, що дуже зручно для задач, де рішення має бути представлено у вигляді конкретного значення або дії, наприклад, «увімкнути» або «вимкнути» систему опалення.

У запропонованій системі вихід нечіткої логіки представлений у дискретному вигляді (ON/OFF). Це відповідає реальним потребам управління опалювальними приладами, які функціонують у двох режимах: активному (увімкнуто) або пасивному (вимкнуто). Нечітка логіка Сугено дозволяє інтегрувати складні залежності між вхідними змінними, такими як поточна температура, бажана температура, температура зовнішнього середовища, вологість та інші параметри, для генерування чітких рішень.

Ще однією перевагою є простота впровадження нечіткої системи Сугено в апаратне чи програмне середовище завдяки її меншій обчислювальній складності порівняно з іншими типами нечітких систем (наприклад, Мамдані). Це важливо для реального часу, де швидкість прийняття рішення критично впливає на ефективність системи.

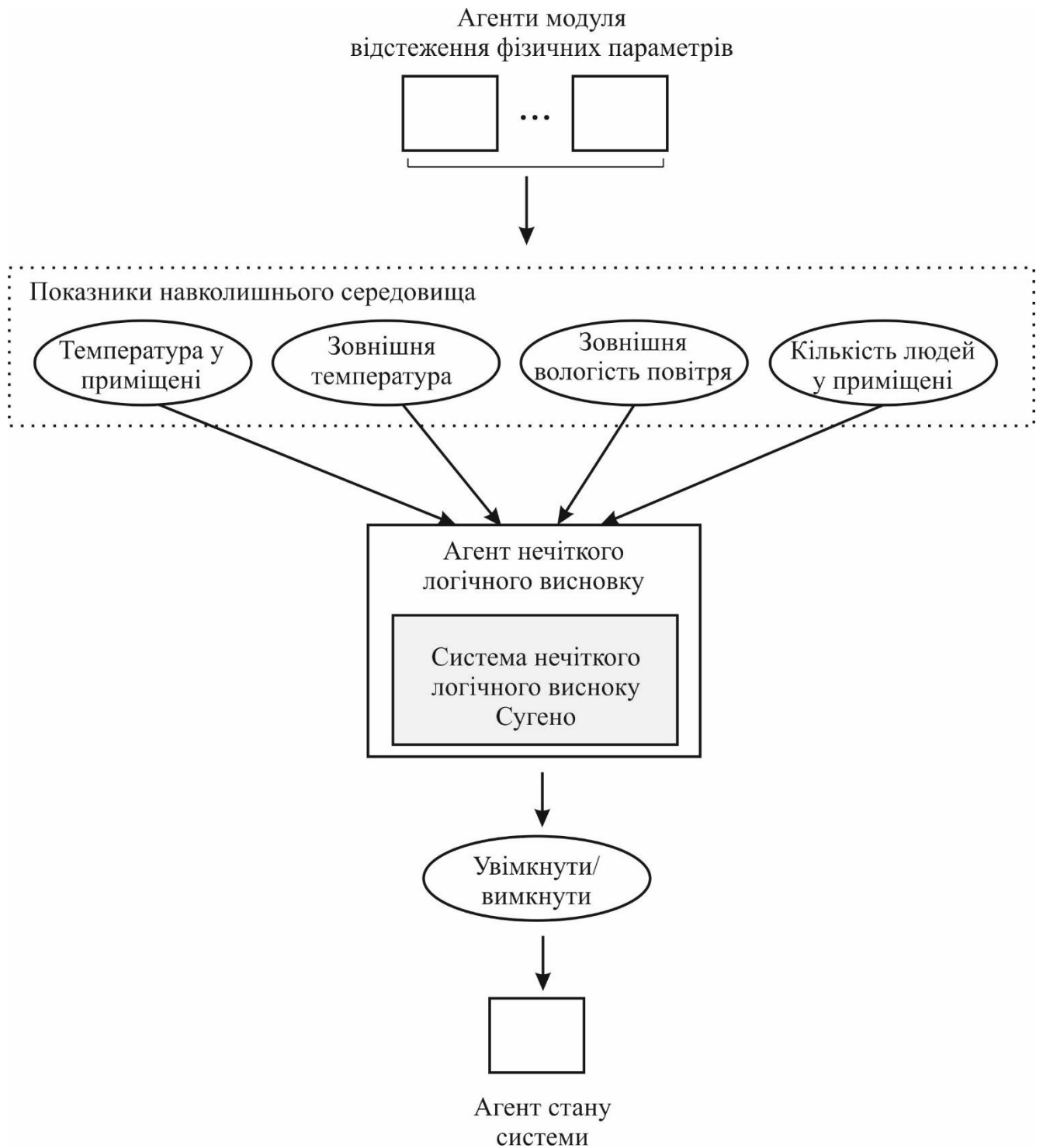


Рисунок 4.1 – Агент нечіткого логічного висновку у системі оптимізації опалення у Розумному будинку

Структура системи нечіткого логічного висновку наведено на рис. 4.2. Система керування опаленням в запропонованій системі ґрунтується на нечіткій логіці типу Сугено і враховує чотири вхідні змінні: різницю температур (TemperatureDelta), зовнішню вологість (Humidity), зовнішню температуру

(TemperatureOut) та наявність людей у приміщенні (PeoplePresence). Кожна з цих змінних представлена трапецієподібними функціями належності, що дозволяє враховувати їх вплив у нечіткій системі з гнучкістю та точністю.

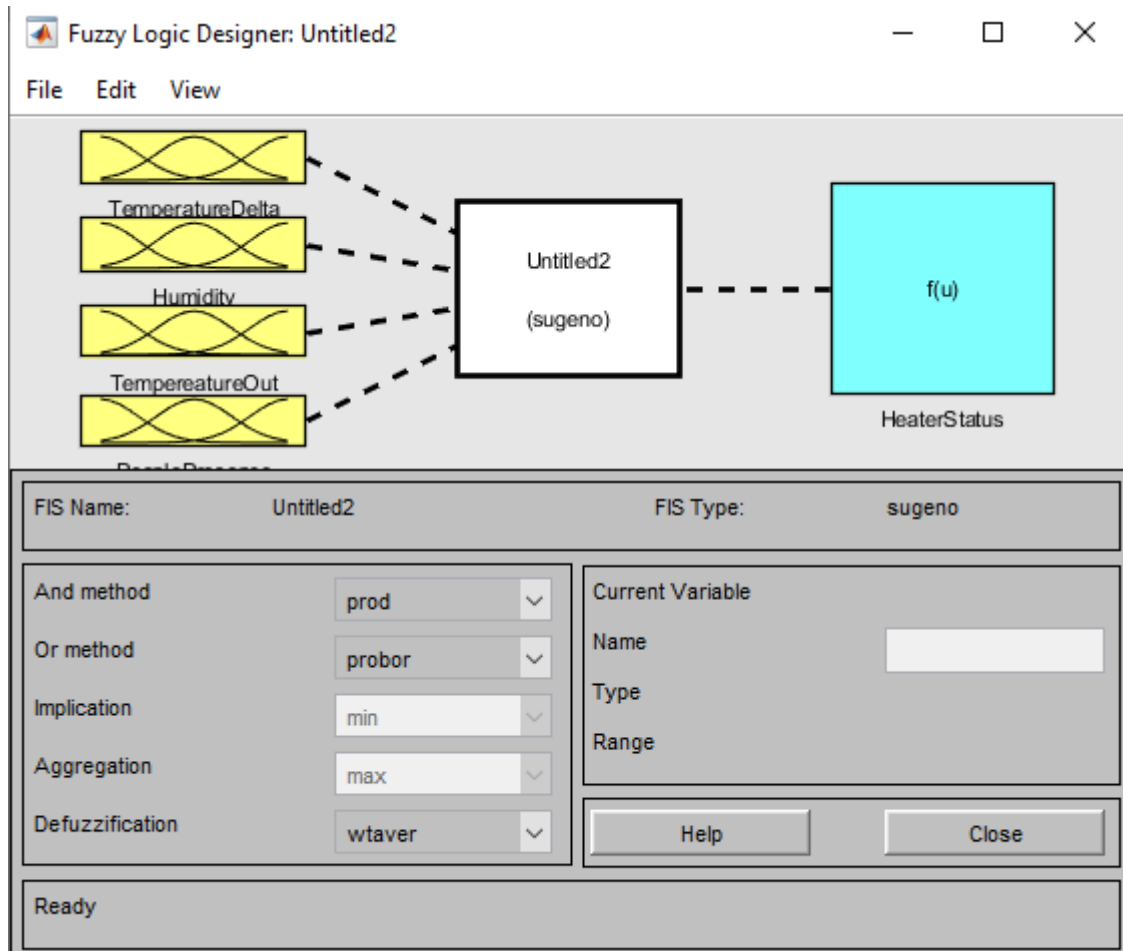
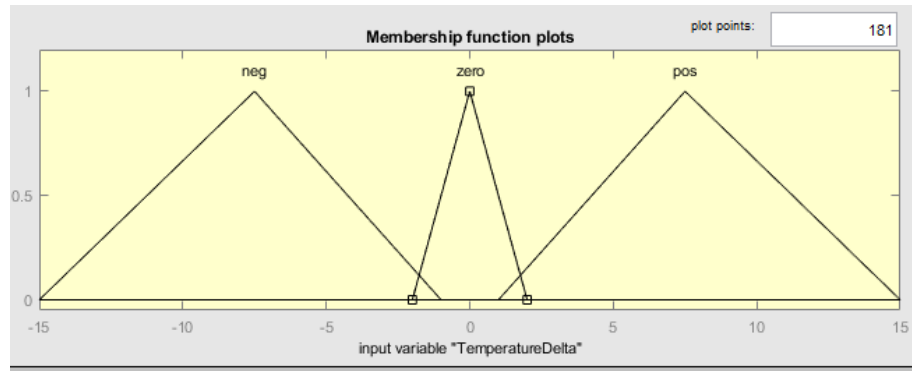


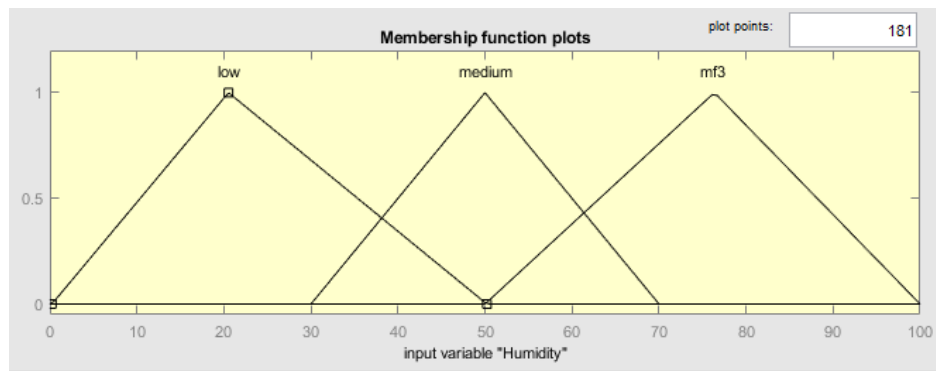
Рисунок 4.2 – Структура системи нечіткого логічного висновку

Графіки функцій приналежності зображено на рис. 4.3.

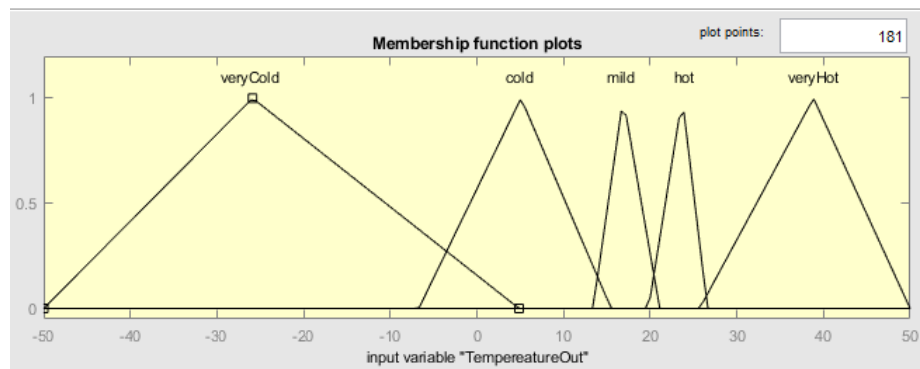
Перша змінна TemperatureDelta, визначає різницю між очікуваною температурою в приміщенні та фактичною. Вона має три нечіткі значення: Neg, Zero та Pos, які відповідають значному зниженню температури, її наближенню до очікуваної, або перевищенню. Ця змінна дозволяє системі визначити необхідність увімкнення чи вимкнення опалення залежно від того, наскільки температура відхиляється від бажаного значення.



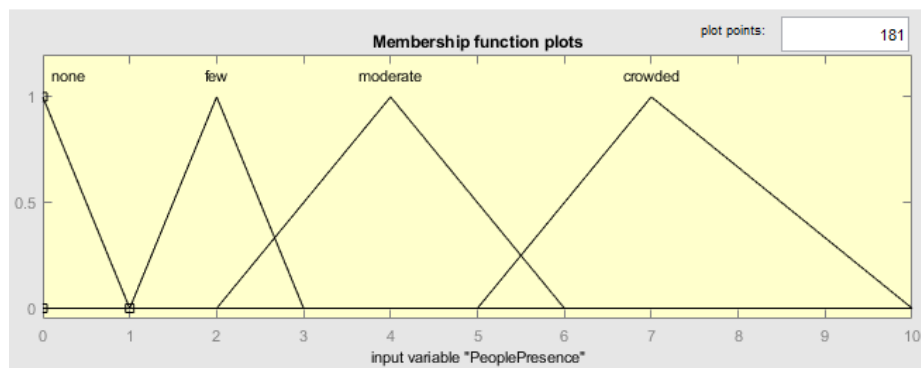
a)



б)



в)



г)

Рисунок 4.3 – Функції приналежності: а) TemperatureDelta; б) Humidity; в) TemperatureOut; г) PeoplePresence

Друга змінна Humidity, представляє зовнішню вологість і також поділяється на три категорії: Low, Medium, та High, що описують низький, середній та високий рівень вологості відповідно. Вологість впливає на тепловий комфорт, тому її врахування дозволяє системі адаптувати інтенсивність обігріву, забезпечуючи комфортні умови для перебування.

Третя змінна, TemperatureOut, відображає зовнішню температуру і класифікується на п'ять значень: VeryCold, Cold, Mild, Hot та VeryHot. Ці значення дозволяють системі враховувати сезонні чи погодні зміни, щоб налаштувати роботу обігрівача. Наприклад, у дуже холодних умовах система може підвищити температуру в приміщенні, тоді як у жарку погоду її робота буде мінімальною або зовсім припинена.

Четверта змінна PeoplePresence, враховує кількість людей у приміщенні. Вона поділяється на чотири категорії: None, Few, Moderate, та Crowded, які представляють відсутність людей, невелику кількість, помірну кількість, або переповнене приміщення. Даний параметр необхідний для оптимізації керування опаленням у Розумному будинку, коли опалення не вмикається, якщо людей у приміщенні не має.

Вихідною змінною системи є HeaterStatus, який приймає значення на основі сукупності правил нечіткої логіки. Ці правила аналізують вхідні змінні, визначаючи, чи потрібно увімкнути обігрівач, зменшити його інтенсивність, або повністю вимкнути. Система інтегрує всі вхідні фактори, забезпечуючи адаптивне та енергоефективне керування опаленням у приміщенні, враховуючи не тільки тепловий комфорт, але й економію ресурсів.

Таким чином результатом роботи агента нечіткого логічного висновку є значення вихідної змінної HeaterStatus. Дане значення надсилається іншому агенту – агенту стану системи. Інтерфейсне вікно Matlab для вихідної змінної HeatStatus подано на рис. 4.4.

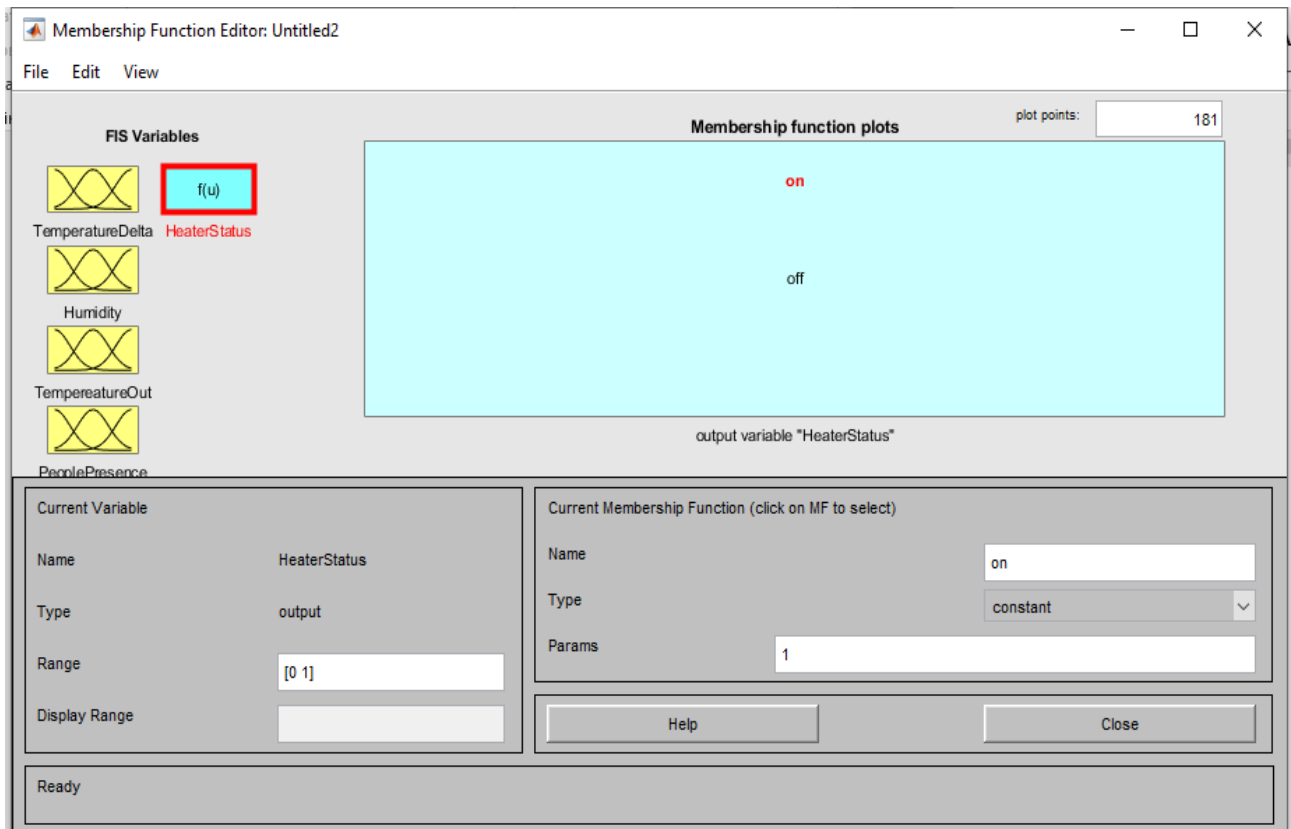


Рисунок 4.4 – Інтерфейсне вікно Matlab для вихідної змінної HeatStatus

Ядро системи, що складається з 14 правил, відіграє вирішальну роль у механізмі прийняття рішень у системі оптимізації опалення в Розумному будинку. Ці правила є основою для функціонування нечіткої логіки, яка визначає, як змінна HeaterStatus (стан обігрівача) реагує на комбінації вхідних параметрів. Основними вхідними змінними системи є: різниця між очікуваною та фактичною температурою (TemperatureDelta), зовнішня температура (TemperatureOut), вологість повітря (Humidity) та присутність людей у приміщенні (PeoplePresence).

Кожне з правил формалізує залежність між цими вхідними параметрами та результатом у вигляді увімкнення або вимкнення обігрівача. Наприклад, якщо зовнішня температура є дуже низькою, різниця температур значна, а в приміщенні знаходиться велика кількість людей, система може ухвалити рішення увімкнути обігрівач для забезпечення комфорту. Навпаки, якщо зовнішня температура є помірною, а в приміщенні відсутні люди, система може вимкнути обігрівач для економії енергії.

Набір правил, що використовувались для системи нечіткого логічного висновку:

IF “TemperatureDelta” IS “Neg” OR “TemperatureDelta” IS “Zero” THEN 0

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “PeoplePresence” IS “None” THEN 0

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “TemperatureOut” IS “VeryCold” THEN 1

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “TemperatureOut” IS “Cold” THEN 1

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “PeoplePresence” IS “Few” AND “TemperatureOut” IS “Mild” THEN 1

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “PeoplePresence” IS “Moderate” AND “TemperatureOut” IS “Mild” THEN 1

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “PeoplePresence” IS “Crowded” AND “TemperatureOut” IS “Mild” THEN 0

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “TemperatureOut” IS “Mild” AND “Humidity” IS “High” THEN 1

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “TemperatureOut” IS “Mild” AND “Humidity” IS “Medium” THEN 1

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “TemperatureOut” IS “Mild” AND “Humidity” IS “Low” THEN 1

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “TemperatureOut” IS “Hot” THEN 0

IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “TemperatureOut” IS “VeryHot” THEN 0

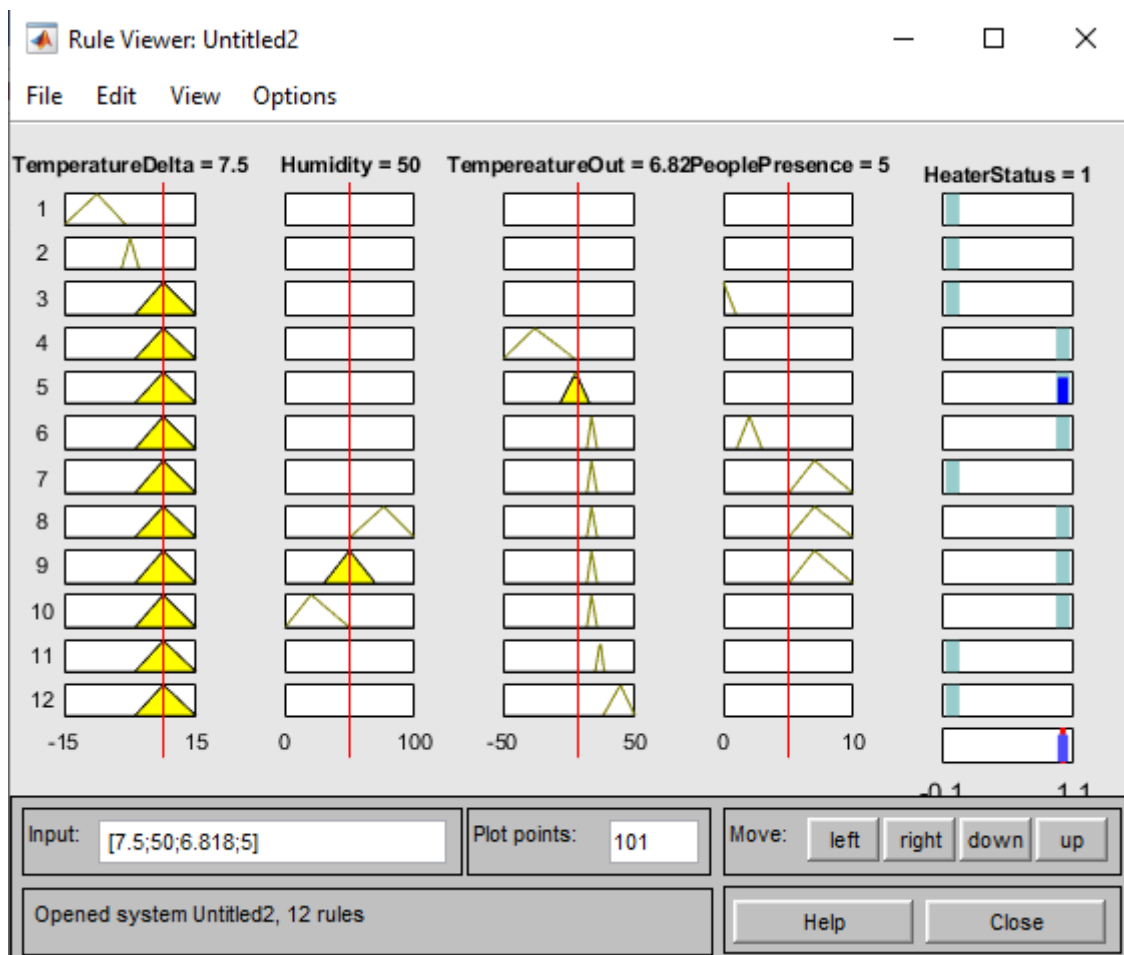
IF “TemperatureDelta” IS “Pos” AND “PeoplePresence” IS “Moderate” AND “Humidity” IS “Low” THEN 1

IF “TemperatureDelta” IS “Neg” AND “TemperatureOut” IS “VeryCold” THEN 1

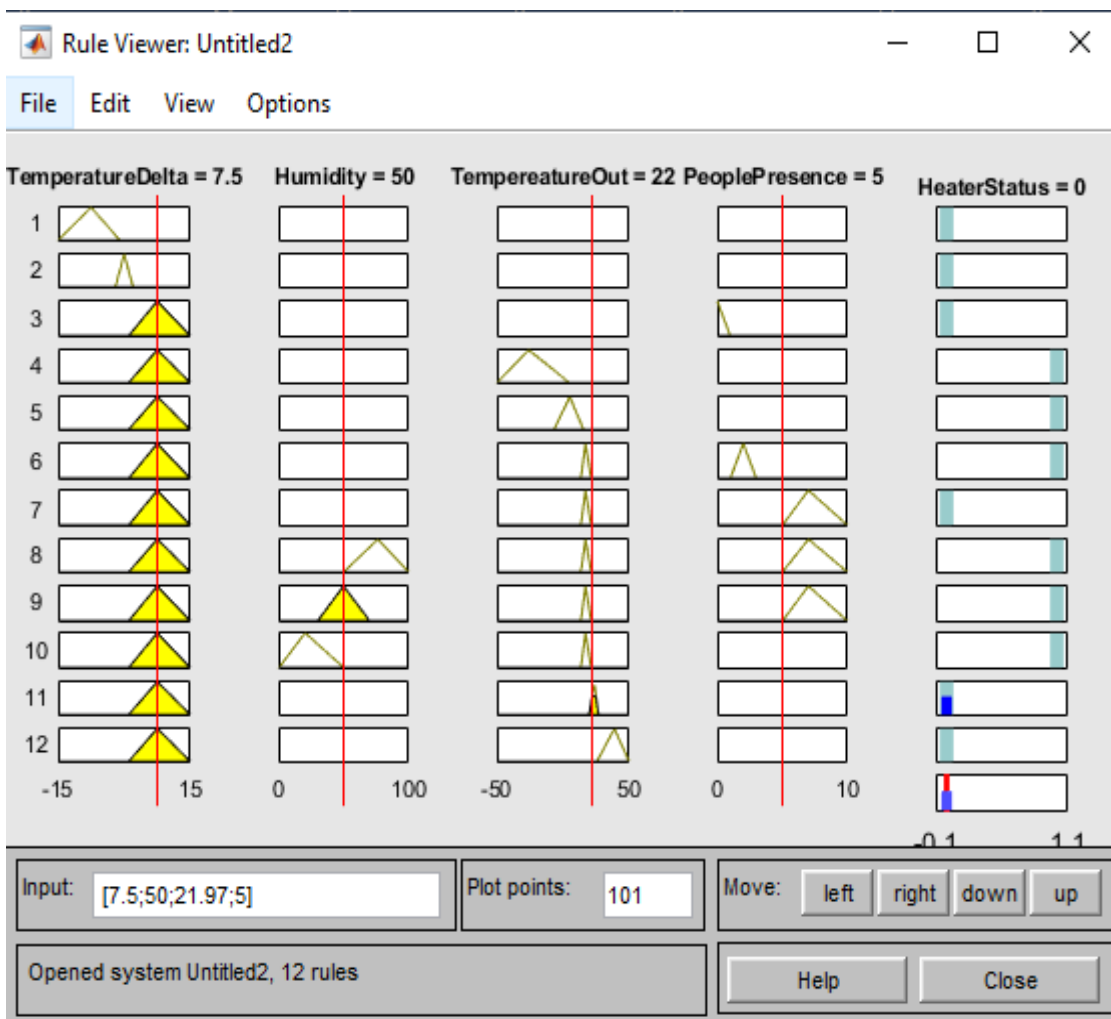
Такі правила дозволяють системі адаптуватися до змін умов у режимі реального часу, забезпечуючи баланс між комфортом мешканців та енергоефективністю. Завдяки нечіткій логіці система може працювати з неточними даними та враховувати різні ступені впливу кожного вхідного параметра, що робить її досить гнучкою в контексті управління опаленням у розумному будинку.

Для перегляду спрацювання правил в нечіткій системі у matlab було досліджено вікно Rule Viewer. У цьому вікні можна спостерігати вхідні значення для кожної змінної, які відображаються на шкалах із виділенням активованих ступенів приналежності. Також представлені всі правила системи, де кожен рядок відповідає окремому правилу, і можна побачити, як вони впливають на вихідне значення. Крім того, вікно відображає обчислене значення вихідної змінної HeaterStatus, враховуючи вплив активованих правил. Видно також, які правила були активними і з якою силою вони вплинули на остаточний результат.

На рис. 4.5 зображено інтерфейсні вікна Rule Viewer у matlab, що демонструють спрацювання правил нечіткої системи.



a)



б)

Рисунок 4.5 – Інтерфейсні вікна Rule Viewer у matlab, що демонструють спрацювання правил нечіткої системи

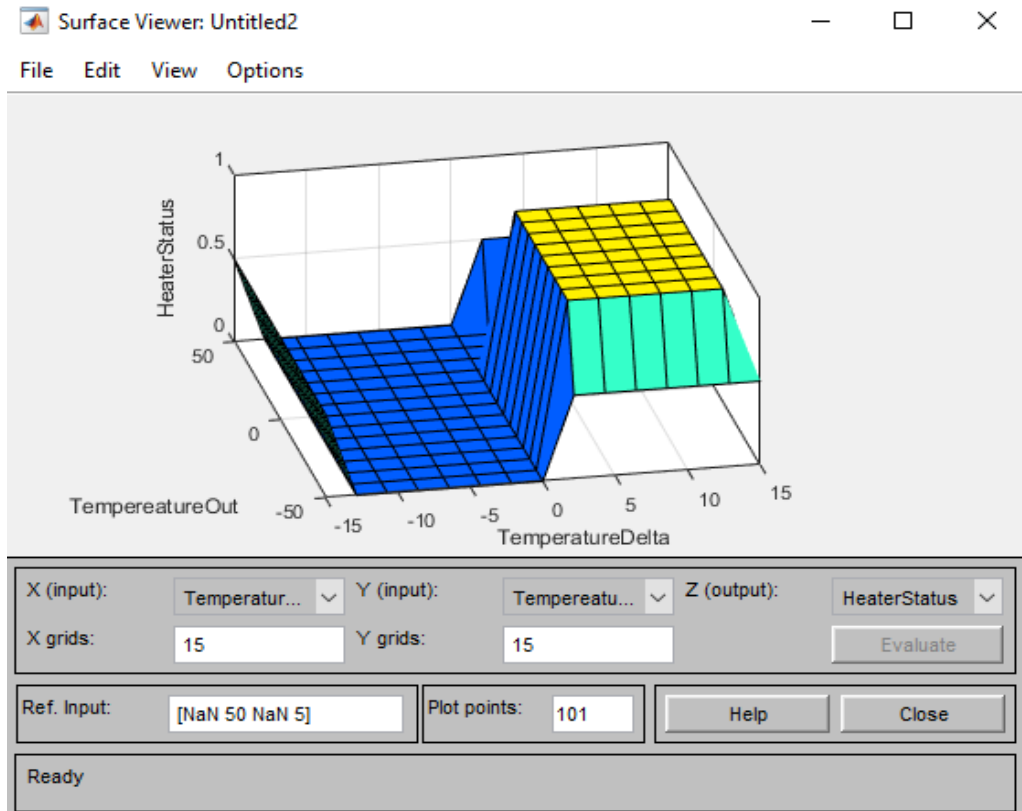
У поданих рисунках можна відмітити, що у випадку, коли температура є досить прохолодною і зберігається різниця температур, спрацьовують правила, що активують обігрів (рис. 4.1 а), тоді як при теплі зовнішній температурі, навіть за присутності людей у приміщенні, обігрів не вмикається, і вихідна змінна HeaterStatus дорівнює 0.

Значення параметрів вхідних нечітких змінних для системи нечіткого логічного висновку подано у таблиці 4.1.

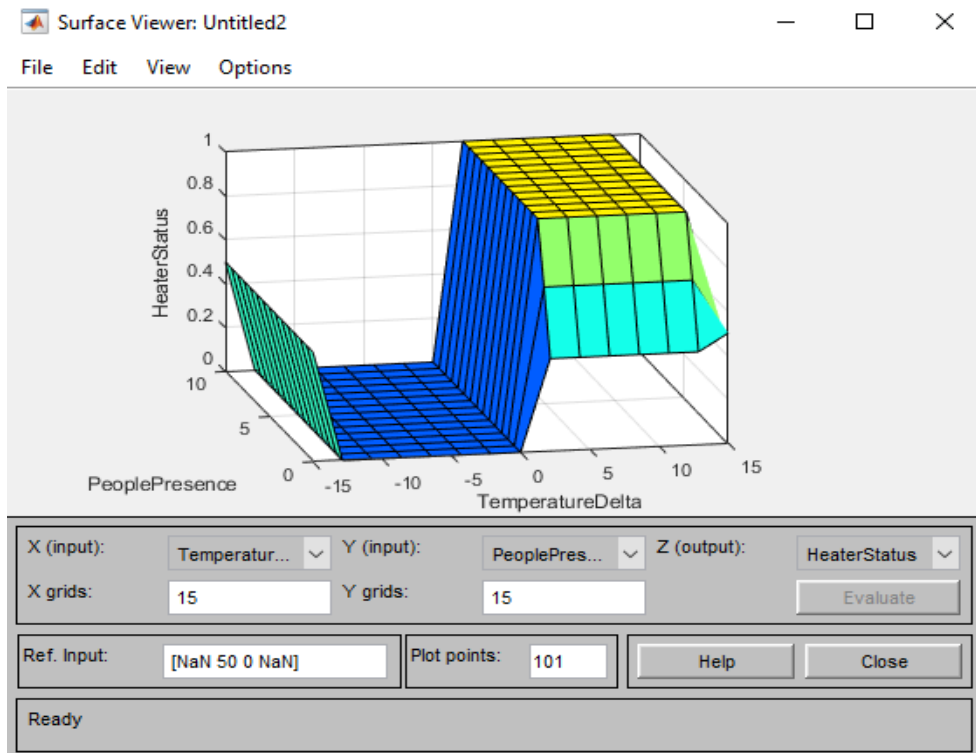
Таблиця 4.1 – Значення параметрів вхідних нечітких змінних для системи нечіткого логічного висновку

№ з/п	Нечітка змінна	Короткий опис	Нечітка терм множина	Значення параметрів
1.	TemperatureDelta	Різниця між очікуваною температурою і поточною	Neg	[-15 -7.5 -1]
			Zero	[-2 0 2]
			Pos	[1 7.5 15]
2.	Humidity	Зовнішня вологість повітря	Low	[0 20 50]
			Medium	[30 50 70]
			Hight	[50 75 100]
3.	TemperatureOut	Зовнішня температура	veyCold	[-50 -25.9 5]
			cold	[-6.71 5.09 15.49]
			Mild	13.6 17 21.3]
			Hot	[19.8 23.7 26.6]
			VeryHot	[25.7 38.84 50]
4.	PeoplePresence	Присутність людей	None	[0 0 1]
			Few	[1 2 3]
			Moderare	[2 4 6]
			Crowded	[5 7 10]

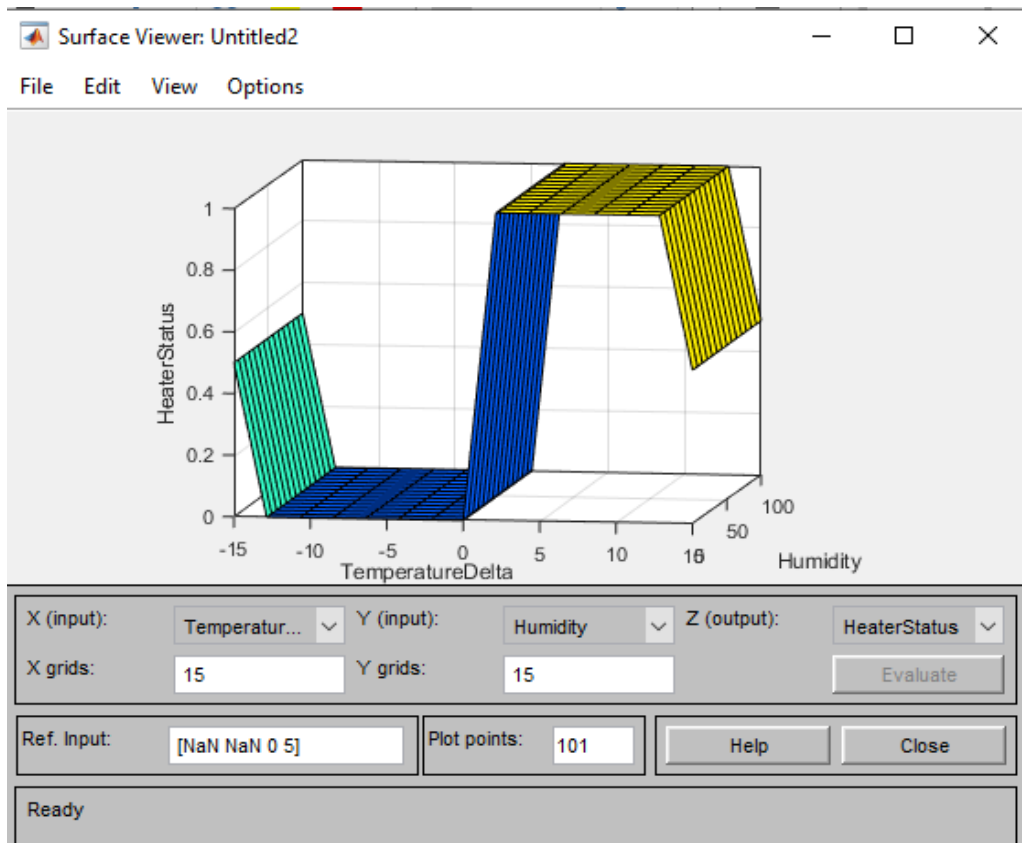
Поверхні, що ілюструють залежності між вихідною змінною та вхідними змінними подано на рис. 4.6.



a)



b)



в)

Рисунок 4.6 – Поверхні, що ілюструють залежності між вихідною змінною HeaterStatus та входними змінними: а) TemperatureOut та TemperatureDelta; б) PeoplePresence та TemperatureDelta; в) TemperatureDelta та Humidity

На першому графіку зображена залежність HeaterStatus (стан обігрівача) від двох параметрів: TemperatureDelta (різниця між очікуваною та фактичною температурою) та TemperatureOut (зовнішньої температури). Горизонтальна вісь X представляє зовнішню температуру, а вісь Y – різницю температур. Графік демонструє, що коли різниця температур велика та зовнішня температура низька, обігрівач активно працює (HeaterStatus близький до 1). Зі зростанням зовнішньої температури або зменшенням різниці температур обігрівач починає вимикатися, і HeaterStatus зменшується до 0. Це демонструє логічний принцип: при теплій зовнішній погоді або майже досягнутій оптимального рівня внутрішній температурі обігрів стає непотрібним. Із другого графіку можна побачити, що якщо різниця температур значна, навіть за великої кількості людей обігрівач продовжує

працювати, але його інтенсивність зменшується у порівнянні з випадком, коли людей у приміщенні немає (не має необхідності обігрівати порожнє приміщення).

Третій графік показує взаємозв'язок між HeaterStatus, TemperatureDelta (різницею температур) та Humidity (зовнішньою вологістю). Вісь X – різниця температур, вісь Y – зовнішня вологість. Із графіка можна побачити, що зменшення вологості впливає менш суттєво, але за низької вологості система може активніше вмикати обігрівач.

4.2 Оцінка ефективності системи опалення за критеріями оптимізації

Відповідно до поставленої мети роботи, яка полягала в оптимізації витрат ресурсів у системі опалення Розумного будинку, було змодельовано систему управління, що включала дві моделі: базову та на основі нечіткої логіки. Ефективність роботи системи оцінювалась за двома критеріями оптимізації.

Порівнювалися дві моделі: базова модель регулювання та модель, яка використовує нечітку логіку. Мета полягала в тому, щоб визначити, наскільки кожна з цих моделей забезпечує ефективність та стабільність температурного контролю. Для аналізу використовували два показники, які відповідали заздалегідь визначеним критеріям. Перший показник оцінював загальні витрати (наприклад, енергії чи ресурсів) на підтримання заданого рівня температури, а другий показник аналізував частоту коливань температури (плавність змін температури), яка свідчить про комфортність умов.

Для цього використовувалося програмне забезпечення MATLAB, яке дозволяє моделювати складні системи та аналізувати результати. Симуляція охоплювала часовий період тривалістю 50 годин, під час якого здійснювалося моделювання змін температури в умовах, наближених до реальних.

Оцінка витрат палива базовою системою опалення та запропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки подано на рис. 4.7.

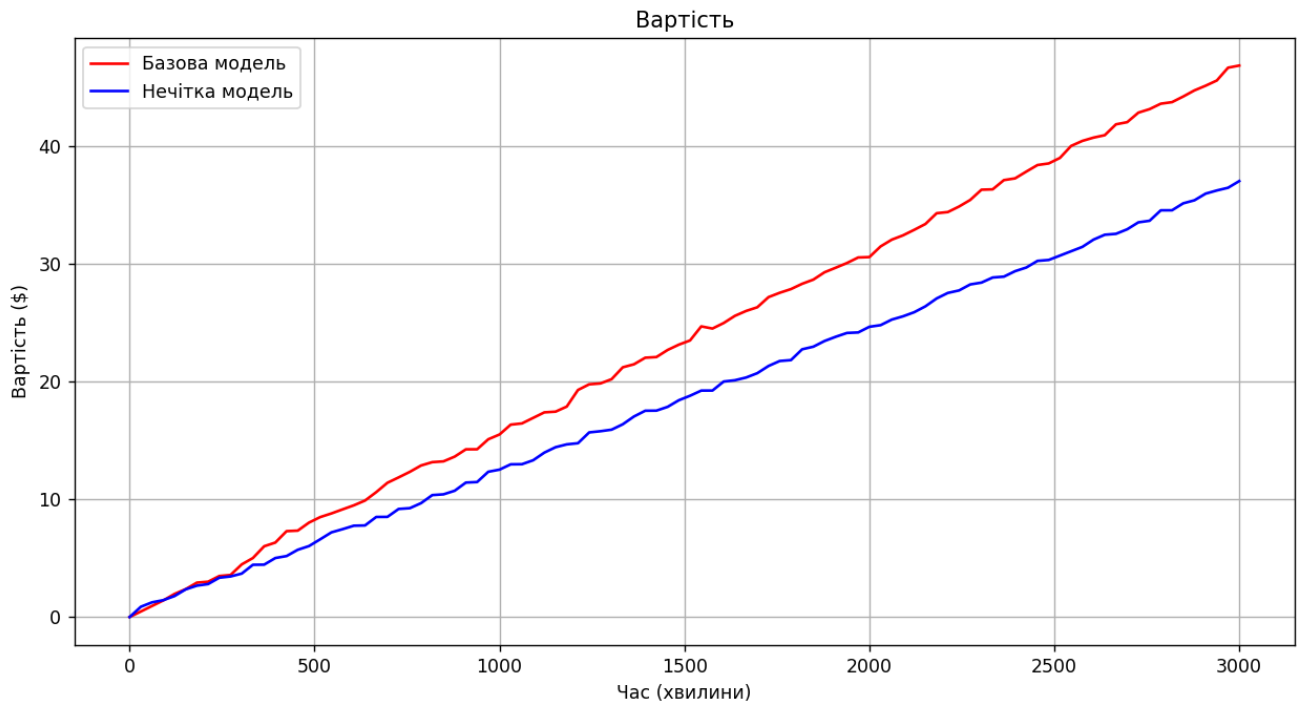


Рисунок 4.7 – Оцінка витрат палива базовою системою опалення та пропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки

На рис. 4.8 наведено графік зміни температури при реалізації базової системи керування опаленням та пропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки.

Отриманий графік показує зміну температури всередині будинків залежно від часу. Червона лінія, що відповідає базовій моделі, демонструє великі та різкі коливання температури, які виглядають нерегулярними.

Це свідчить про менш ефективне регулювання. Натомість синя лінія, що представляє нечітку модель, виглядає значно стабільнішою. Температура змінюється більш плавно, з меншими відхиленнями, що говорить про краще згладжування коливань і більш ефективну роботу цієї моделі.

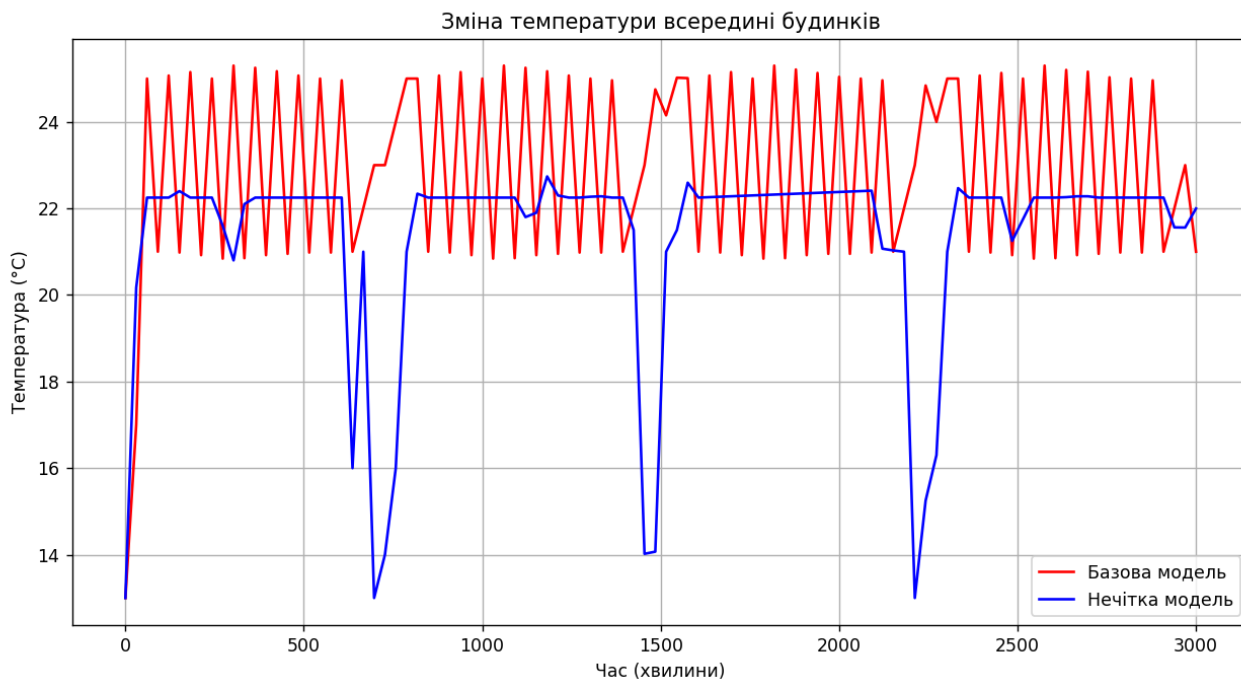


Рисунок 4.8 – Графік зміни температури при реалізації базової системи керування опаленням та пропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Виконаємо оцінку ефективності оптимізації керування опалення у Розумному будинку. Для цього визначимо відсоткову зміну двох показників, які відповідають визначеним критеріям оптимізації (формула 3.1) – вартість палива та частота коливань температури в Розумному будинку.

Відсоткову зміну за першим критерієм (вартість палива) визначимо за наступною формулою:

$$\Delta C = \frac{C_{base} - C_{fuzzy}}{C_{base}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

де C_{base} – сукупна вартість у базовій (неоптимізованій) системі, C_{fuzzy} – сукупна вартість у системі з нечіткою логікою.

Відсоткову зміну за другим критерієм (плавність керування) визначимо на основі підрахунку кількості вмикань котла. Обрахунок кількості вмикань

проводився як середнє значення вмикань у годину. Таким чином для кожної із систем на кожній із 50 годин роботи системи було пораховано середнє значення вмикань. Ці значення виражені як S_{base} та S_{fuzzy} . Тоді відсоткове зміну за другим критерієм (плавність керування) визначимо на основі наступної формули:

$$\Delta S = \frac{S_{base} - S_{fuzzy}}{S_{base}} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Таким чином відповідно до графіків оцінки витрат палива (рис. 4.1) базовою системою опалення та пропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки значення ΔC складатиме $\Delta C = (46 - 37)/46) * 100\% = 19,57\%$,

Тоді як відповідно до графіків зміни температури при реалізації базової системи керування опаленням та пропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки значення ΔS складатиме $\Delta S = (17 - 6)/17) * 100\% = 64,70\%$.

Відповідно до формули 3.1 значення w_1 і w_2 , що є ваговими коефіцієнтами, які визначають пріоритетність кожного з критеріїв встановлено на рівні 0,7 та 0,3 відповідно (пріоритет віддається зменшенню витрат палива).

Відповідно до формули 3.1 обчислимо значення J_{base} як:

$$J_{base} = w_1 \cdot C_{base} + w_2 \cdot S_{base} \quad (4.3)$$

В результаті отримаємо значення $J_{base} = 0,7 * 46 + 0,3 * 17 = 37,3$.

Аналогічним чином визначимо значення J_{fuzzy} :

$$J_{fuzzy} = w_1 \cdot C_{fuzzy} + w_2 \cdot S_{fuzzy} \quad (4.4)$$

В результаті отримаємо значення $J_{fuzzy} = 0,7 * 37 + 0,3 * 6 = 27,7$.

Врешті визначимо приріст ефективності за наступною формулою:

$$\Delta J = \frac{J_{base} - SJ_{fuzzy}}{J_{base}} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Таким чином в результаті отримано значення 25.7%, що свідчить про досягнення задачі оптимізації у чверть у порівнянні із базовою версією системи.

4.3 Висновки

Таким чином було проведено оцінку ефективності запропонованої системи оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки. Реалізація агента системи нечіткого логічного було виконано за допомогою програмного середовища Matlab. Проведено моделювання роботи двох систем опалення: на основі базової моделі та на основі запропонованої системи нечіткого логічного висновку. Для аналізу використовувались два показники, які відповідали заздалегідь визначеним критеріям. Перший показник оцінював загальні витрати енергоносіїв на підтримання заданого рівня температури, а другий показник аналізував частоту коливань температури (плавність змін температури), яка свідчить про комфортність умов.

Згідно з отриманими результатами, використання нечіткої логіки значно покращує стабільність температури в будинку, що є важливим для комфорту мешканців. Базова система, яка не враховує змінні фактори з таким рівнем гнучкості, призводить до великих і різких коливань температури, що може створювати дискомфорт та збільшувати споживання енергії. Натомість модель з нечіткою логікою демонструє більш плавне та стабільне регулювання температури, що дозволяє значно знизити витрати на енергоресурси.

Згідно з розрахунками, сума відсоткових змін для обох критеріїв показала значне поліпшення. Витрати палива в моделі з нечіткою логікою зменшились на

19,57%, що свідчить про суттєву економію енергоресурсів. Також відбулося значне зниження частоти коливань температури — на 64,70%, що позитивно впливає на комфорт проживання в будинку. Зважаючи на ці показники, ефективність роботи системи з нечіткою логікою виявилася набагато вищою.

Для комплексної оцінки ефективності було обчислено загальний показник J, який враховує обидва критерії оптимізації з певними ваговими коефіцієнтами. Результати показали, що загальна ефективність системи з нечіткою логікою підвищилась на 25,7%, що є значним досягненням у порівнянні з базовою системою. Це доводить, що використання нечіткої логіки дозволяє оптимізувати роботу системи опалення, знижуючи витрати палива та підвищуючи комфортність умов у Розумному будинку.

Отже, запропонована система оптимізації на основі нечіткої логіки є перспективним та ефективним підходом для покращення управління опаленням в Розумному будинку. Вона не тільки дозволяє значно знизити енергетичні витрати, а й забезпечує більш стабільний температурний режим, що є важливим для забезпечення комфортного середовища в приміщеннях. Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення існуючих систем опалення та впровадження нових технологій для енергоефективності в розумних будинках.

ВИСНОВКИ

У результаті виконаного дослідження було розроблено та змодельовано систему оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки. Метою роботи було визначити, наскільки ефективним є використання нечіткої логіки в порівнянні з базовою моделлю регулювання опалення. Для цього було проаналізовано два критерію: витрати палива та частота коливань температури, що дозволяють оцінити ефективність роботи системи.

Згідно з отриманими результатами, використання нечіткої логіки значно покращує стабільність температури в будинку, що є важливим для комфорту мешканців. Базова система, яка не враховує змінні фактори з таким рівнем гнучкості, призводить до великих і різких коливань температури, що може створювати дискомфорт та збільшувати споживання енергії. Натомість модель з нечіткою логікою демонструє більш плавне та стабільне регулювання температури, що дозволяє значно знизити витрати на енергоресурси.

У першому розділі проведено огляд концепція реалізації системи опалення в Розумному будинку. Здійснено огляд відомих рішень для автоматичного та інтелектуального керування опаленням. Було визначено недоліки, серед яких основними є обмеженість моделей у врахуванні динамічних змін у тепловому попиті, залежність від точного налаштування контрольних параметрів, а також складність інтеграції різних стратегій управління для забезпечення балансу між комфортом і ефективністю.

У другому розділі було запропоновано абстрактну модель опису для системи опалення у будинку, що дозволило формалізувати узагальнену базову модель всієї системи опалення у Розумному будинку. Модель симулює поведінку системи опалення в будинку, включаючи обігрівач, контролер, що використовує просту пропорційну стратегію управління, і чотири кімнати з радіаторами, які реагують на зовнішню температуру. Модель використовує теплові розрахунки на основі конвекції, теплопровідності та теплової маси, а також включає контроль температури з гістерезисом для ефективного керування подачею тепла. Описана

модель є основою для порівняння із запропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки. Такий підхід передбачатиме збереження однакових умов для обох моделей, що дозволить коректно оцінити ефективність запропонованої системи на основі нечіткої логіки в порівнянні із базовою моделлю опалення.

У третьому розділі визначено два основні критерії для оптимізації керування опаленням у Розумному будинку. У рамках оптимізаційної задачі використовувалася математична модель, яка поєднує ці два критерії, враховуючи вагові коефіцієнти для кожного з них. Запропоновано архітектуру системи оптимізації опалення у Розумному будинку. Ключовими особливостями системи є процес її функціонування, що організований у формі мультиагентної системи, а також залучення нечіткої логіки у процесі оптимізації. У запропонованій системі агенти поділені на три модулі, що відрізняються за функціонуванням. Зокрема виділено такі модулі, як модуль контролю та взаємодії із користувачем, модуль відстеження фізичних параметрів та модуль формування рішення.

У четвертому розділі було проведено оцінку ефективності запропонованої системи оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки. Проведено моделювання роботи двох систем опалення: на основі базової моделі та на основі запропонованої системи нечіткого логічного висновку. Для аналізу використовувались два показники, які відповідали заздалегідь визначеним критеріям. Перший показник оцінював загальні витрати енергоносіїв на підтримання заданого рівня температури, а другий показник аналізував частоту коливань температури (плавність змін температури), яка свідчить про комфортність умов. Було запропоновано та проведено комплексну оцінку ефективності J , який враховував обидва критерії оптимізації з певними ваговими коефіцієнтами. Результати показали, що загальна ефективність системи з нечіткою логікою підвищилась на 25,7%, у порівнянні із базовою системою.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Nchena L. Fuzzy Logic Application in Automation Control, in *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, Jan. 2010, pp. 115-116.
2. MathWorks, Matlab, URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
3. Zhong H., Wang J., Jia H., Mu Y., Lv S., Vector field-based support vector regression for building energy consumption prediction, *Appl. Energy*, Vol. 242, 2019, pp. 403–414.
4. Ahmed K., Pylsy P., Kurnitski J., Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings, *Sol. Energy*, Vol. 137, 2016 pp. 516-530.
5. Ionesi A., Jradi M., Thorsen J. E., Veje C. T., Simulation of an adaptive heat curve for automatic optimization of district heating installation, *14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015*, pp. 2117-2124.
6. Mr. Central Heating Heating Control, URL:<https://energysavingtrust.org.uk/advice/thermostats-and-heating-controls/>
7. Smart Heating Controls, URL: <https://www.mrcentralheating.co.uk/heating-control/controls-by-type/smart-heating-controls>
8. Controlling Central Heating, URL:<https://www.centralheating.co.nz/controlling-central-heating/>
9. The most economical ways to use your central heating, URL: <https://energysavingtrust.org.uk/take-control-your-heating-home/>
10. MathWorks, House Heating System URL: <https://es.mathworks.com/help/hydro/ug/house-heating-system.html>
11. Rimoldi M., Carlon E., Schwarz M., Golicza L., Verma V K., Schmidl C., H. Walter, Optimizing the Control Strategy of a Low-Energy House's Heating System, 2015, World Sustainable Energy Days Next, Pp.63-69. doi:10.1007/978-3-658-04355-1_8.

12. Pałka P., Malec M., Kaszyński P., Kamiński J., Saługa P. District Heating System Optimisation: A Three-Phase Thermo-Hydraulic Linear Model. 2023, *Energies*. Vol 16, 3316. doi: 10.3390/en16083316.
13. Delangle A., Lambert R., Shah N., Acha S., Markides C. Modelling and optimising the marginal expansion of an existing district heating network, 2017, *Energy*. vol. 140. doi:10.1016/j.energy.2017.08.066.
14. Blommaert M., Wack Y., Baelmans M. An Adjoint Optimization Approach for the Topological Design of Large-Scale District Heating Networks based on Nonlinear Models. *Applied Energy*, 2020, vol. 280. 116025. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116025.
15. Hakimi S., Mehdi M.-T., Alamuti. M.M.. Smart heating system control strategy to enhance comfort and increase renewable energy penetration. Proceedings of the 2013 *IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems, IWIES*, 2013. doi:191-196. 10.1109/IWIES.2013.6698584.
16. Peeters L., Van der Veken J., Hens H., Control of heating systems in residential buildings: Current practice. *Energy and Buildings*, 2008, 40. Pp. 1446-1455. doi:10.1016/j.enbuild.2008.02.016.
17. Paris B., et. al Heating control schemes for energy management in buildings. *Energy and Buildings*, 2010, vol. 42 (10), pp.1908-1917. doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.027
18. Jiménez-Bravo D.M., Lozano Murciego Á., de la Iglesia D.H., de Paz J.F., Villarrubia González, G., Central Heating Cost Optimization for Smart-Homes with Fuzzy Logic and a Multi-Agent Architecture, *Applied Sciences*, 2020
19. Chunhua S., Yanan L., Shanshan C., Xiaoyu G., Guoqiang X., Chengying Q., Xiangdong W. Integrated control strategy of district heating system based on load forecasting and indoor temperature measurement, 2022, vol. 8, Pp. 8124-8139.
20. ScrewFix, Smart heating guide, URL: <https://www.screwfix.com/guides/smart-homes/smart-heating-guide>
21. Pangalos G. and Lichtenbergc G. Approach to Boolean Con-troller Design by Algebraic Relaxation for Heating Systems. In Proceedings of 4th IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems, Eindhoven, 2012.

22. HeatingHub, A 2021 guide to central heating controls | wireless | digital | dial | advanced, URL: <https://www.theheatinghub.co.uk/thermostat-guide-wireless-digital-room-central-heating-controls>
23. Bbh, Heating controls, URL: <https://www.bbh.org.uk/energy-saving/heating-controls/>
24. Heat-timer, Commercial Domestic Hot Water Trends 2020, URL: <https://www.heat-timer.com/commercial-domestic-hot-water-trends-2020/>
25. Elsaid A. M, Mohamed H. A, Abdelaziz G. B., Ahmed M. S. A critical review of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems within the context of a global SARS-CoV-2 epidemic, *Process Saf Environ Prot.* 2021, pp. 230-261.
26. InTech, Open-loop, closed-loop heating methods, URL: <https://www.isa.org/intech-home/2020/july-august-2020/departments/open-loop-closed-loop-heating-methods>
27. Hajian H., Ahmed K., Kurnitski J. Dynamic heating control measured and simulated effects on power reduction, energy and indoor air temperature in an old apartment building with district heating. *Energy and Buildings*, 2022, 268, Article 112174.
28. Firth K., Lomas K.J., Wright A.J., Targeting household energy-efficiency measures using sensitivity analysis, *Build. Res. Inf.* Vol, 38 (1), 2010, pp. 25–41,
29. Kelly S., Suryadevara N.K., Mukhopadhyay S.C., Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 13, No. 10, 2013, pp. 3846-3853.
30. Yang R., Wang L., Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors, *Energy and Buildings*, Vol. 56, 2013, pp. 1-7.
31. Klein L., Kwak J.Y., Kavulya G., Jazizadeh F., Becerik-Gerber B., Varakantham P., Tambe M., Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multi-agent systems, *Automation in Construction*, Vol. 22, 2012, pp. 525-536.

32. Lu J., Sookoor T., Srinivasan V., Gao G., Holben B., Stankovic J.A., Field E., Whitehouse K., The Smart Thermostat: Using occupancy sensors to save energy in homes, *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2010, pp. 211-224.
33. Gao G., Whitehouse K., The self-programming thermostat: Optimizing setback schedules based on home occupancy patterns, *Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, 2009, pp. 67-72.
34. Erickson V.L., Lin Y., Kamthe A., Brahme R., Cerpa A.E., Energy efficient building environment control strategies using real-time occupancy measurements, *Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, 2009, pp. 19-24.
35. Jazizadeh F., Kavulya G., Klein L., Becerik-Gerber B., Kwak J.Y., Varakantham P., Human-building interaction for energy conservation in office buildings, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 1, 2014, pp. 30-38.
36. Reinisch C., Kofler M.J., Iglesias F., Kastner W., ThinkHome: A smart home as digital ecosystem, *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*, 2010, pp. 256-261.
37. Kofler M.J., Reinisch C., Kastner W., A semantic representation of energy-related information in future smart homes, *Energy and Buildings*, Vol. 47, 2012, pp. 169-179.
38. Gunay H.B., O'Brien W., Beausoleil-Morrison I., Implementation and comparison of existing occupant behaviour models in EnergyPlus, *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 9, No. 6, 2016, pp. 567-588.
39. Ayo B.S., Development of a Home Automation System Using Wireless Sensor/Actuator Nodes, *arXiv preprint arXiv:1802.01955*, 2018.
40. Passenberg C., Meyer D., Feldmaier J., Shen H., Optimal Water Heater Control in Smart Home Environments, *arXiv preprint arXiv:1607.05587*, 2016.
41. Bragante Corssac L., Wickboldt J.A., A Digital Twin-based Smart Home: A Proof of Concept Study, *arXiv preprint arXiv:2212.14238*, 2022.

42. Pergantis E.N., Priyadarshan, Al Theeb N., Dhillon P., Ore J.P., Ziviani D., Groll E.A., Kircher K.J., Field demonstration of predictive heating control for an all-electric house in a cold climate, *arXiv preprint arXiv:2402.07032*, 2024.
43. Levin V.M., Yahya A.A., Boyarova D.A., Predicting the technical condition of the power transformer using fuzzy logic and dissolved gas analysis method, *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, Vol. 12, No. 2, 2022, pp. 1139-1146.
44. Cheng C., Liu B., Song F., Jiang J., Li Z., An adaptive fuzzy logic control of green tea fixation process based on image processing technology, *Biosyst. Eng.*, Vol. 215, 2022, pp. 1-20.
45. Sharifi A., Khoshnoudi-Nia S., Ranking novel extraction systems of seedless barberry (*Berberis Vulgaris*) bioactive compounds with fuzzy logic-based term weighting scheme, *Sustain. Chem. Pharm.*, Vol. 25, 2022, Article 100561.
46. Salem A.A., ElDesouky A.A., Alaboudy A.H.K., New analytical assessment for fast and complete pre-fault restoration of grid-connected FSWTs with fuzzy-logic pitch-angle controller, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 136, 2022, Article 107745.
47. Cabrane Z., Kim J., Yoo K., Lee S.H., Fuzzy logic supervisor-based novel energy management strategy reflecting different virtual power plants, *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 205, 2022, Article 107731.
48. Qazani M.R.C., Asadi H., Mohamed S., Lim C.P., Nahavandi S., An optimal washout filter for motion platform using neural network and fuzzy logic, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, Vol. 108, 2022, Article 104564.
49. Taghvaei M., Gilvanejad M., Cooperation of large-scale wind farm and battery storage in frequency control: An optimal fuzzy-logic based controller, *J. Energy Storage*, Vol. 46, 2022, Article 103834.
50. Brussee R., Fuzzy Logic and Markov Kernels, *arXiv preprint arXiv:2303.03725*, 2023.
51. Fakhravar H., Quantifying Uncertainty in Risk Assessment using Fuzzy Theory, *arXiv preprint arXiv:2009.09334*, 2020.
52. Wondosen A., Shiferaw D., Fuzzy Logic Controller Design for Mobile Robot Outdoor Navigation, *arXiv preprint arXiv:2401.01756*, 2024.

53. Raza K., Fuzzy logic based approaches for gene regulatory network inference, *arXiv preprint arXiv:1804.10775*, 2018.
54. Ross T. J. Fuzzy logic with engineering applications, Wiley, 3rd ed., 2016, 585 p.
55. GeeksForGeeks, Fuzzy Logic | Introduction, 2023, URL: <https://www.geeksforgeeks.org/fuzzy-logic-introduction/>
56. MathWorks, What Is Fuzzy Logic?, URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-fuzzy-logic.html>
57. Дружинін В., Степанов М., Жиров Г., Ряба Л., Алгоритм використання fuzzy logic в моделях управління та прийняття рішень. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*, 2021, № 69, с. 75–81.
58. Techtarget, fuzzy logic, URL: <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/fuzzy-logic>
59. Aydın Ö., Sönmez Ş., Ayasun S., Determination of stability delay margins for multi-area load frequency control systems with incommensurate time delays through eigenvalue tracing method, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 137, 2022, Article 107821.
60. Pertzborn A.J., Veronica D.A., Baseline Control Systems in the Intelligent Building Agents Laboratory, NIST Technical Note 2178, 2022.
61. Sarma A.A., Li J.S., Stenberg J., Card G., Heckscher E.S., Kasthuri N., Sejnowski T., Doyle J.C., Internal Feedback in Biological Control: Architectures and Examples, *arXiv preprint arXiv:2110.05029*, 2021.
62. Schöning J., Riechmann A., Pfisterer H.J., AI for Closed-Loop Control Systems -- New Opportunities for Modeling, Designing, and Tuning Control Systems, *arXiv preprint arXiv:2201.06961*, 2022.
63. Cavraro G., Advocating Feedback Control for Human-Earth System Applications, *arXiv preprint arXiv:2405.07376*, 2024.
64. Grüne L., Dissipativity and optimal control, *arXiv preprint arXiv:2101.12606*, 2021.

65. Barmish B.R., Primbs J.A., On a New Paradigm for Stock Trading Via a Model Free Feedback Controller, *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 61, No. 3, 2016, pp. 662-676.
66. Hsieh C.H., Barmish B.R., Gubner J.A., At What Frequency Should the Kelly Bettor Bet?, *Proc. Amer. Control Conf. (ACC)*, 2018, pp. 5485-5490.
67. Proskurnikov A.V., Barmish B.R., On the Benefit of Nonlinear Control for Robust Logarithmic Growth: Coin Flipping Games as a Demonstration Case, *IEEE Control Syst. Lett.*, Vol. 7, 2023, pp. 2275-2280.
68. Aydın Ö., Sönmez Ş., Ayasun S., Stability Analysis of Load Frequency Control Systems with Time Delays: An Eigenvalue-Based Approach, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 36, No. 1, 2021, pp. 758-767.
69. Medium, What is Fuzzy Logic? | Fuzzy Logic, URL: <https://medium.com/@gokcenazakyol/what-is-fuzzy-logic-fuzzy-logic-1-20041db1b971>
70. Баган Т. Г. Fuzzy-logic контролер для керування технологічними об'єктами, *Наукові вісті КНУДП : міжнародний науково-технічний журнал*, 2019. № 2(124). с. 7-14.
71. The Fascinating Role of Fuzzy Logic in Advancing AI, URL: <https://www.simplilearn.com/fuzzy-logic-in-ai-article>
72. Fuzzy logic, URL: <https://www.engati.com/glossary/fuzzy-logic>

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

КОПІЯ НАУКОВОЇ ПУБЛІКАЦІЇ

UDC 004.5

IHOR LYTVINCHUK, BOHDAN SAVENKO, SERHII DANCHUK

Khmelnitskyi National University

HEATING OPTIMIZATION SYSTEM IN A SMART HOME BASED ON FUZZY LOGIC AND INTEGRATION WITH CLOUD SERVICES

This paper proposes a heating optimization system in a smart home based on fuzzy logic and integration with cloud services. According to the results obtained, the use of fuzzy logic significantly improves the stability of the temperature in the house, which is important for the comfort of residents. For the experiments, two models were compared - the basic heating model and the model based on fuzzy logic. The basic system, which does not take into account variable factors with such a level of flexibility, leads to large and sharp temperature fluctuations, which can create discomfort and increase energy consumption. In contrast, the model with fuzzy logic demonstrates a smoother and more stable temperature control, which allows you to significantly reduce energy costs.

Keywords: heating system optimization, fuzzy logic, control system

I. M. Литвінчук, Б.О. Савенко, С.В. Данчук
Хмельницький національний університет

СИСТЕМА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ОПАЛЕННЯ В РОЗУМНОМУ БУДИНКУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА ІНТЕГРАЦІЇ З ХМАРНИМИ СЕРВІСАМИ

Технології «розумного дому» все частіше використовуються для автоматизації різних аспектів побуту, і одна з основних проблем, яку вирішують ці системи – це оптимізація енергоспоживання. Опалення є одним з найбільших споживачів енергії в будинку, тому його ефективне управління відіграє ключову роль у зменшенні витрат на енергоресурси та підвищенні рівня комфорту мешканців. Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки є важливим кроком у напрямку енергетичної ефективності та комфорту в сучасних житлових приміщеннях.

Актуальність даної роботи полягає в тому, що існуючі системи опалення в Розумних будинках часто не є повністю оптимізованими, особливо в аспектах управління витратами палива та зменшення частоти коливань температури. Багато сучасних систем не враховують в повній мірі змінні умови, такі як зовнішня температура, час доби, рівень вологості або індивідуальні потреби користувачів. Це призводить до того, що система працює неефективно: витрати палива можуть бути надмірними, а температура в кімнатах часто коливається, що створює дискомфорт для мешканців. Часті зміни температури можуть також негативно впливати на здоров'я людей, а надмірні витрати палива призводять до економічних збитків і підвищеного навантаження на навколишнє середовище. Оптимізація цих процесів через використання нечіткої логіки дозволяє досягти більш стабільної та енергоефективної роботи системи опалення, що має важливе значення для підвищення комфорту та зниження витрат.

У даній роботі пропонується система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки. Згідно із отриманими результатами, використання нечіткої логіки значно покращує стабільність температури в будинку, що є важливим для комфорту мешканців. Для проведення експериментів порівнювались дві моделі – базова модель опалення та модель на основі нечіткої логіки. Базова система, яка не враховує змінні фактори з таким рівнем гнучкості, призводить до великих і різких коливань температури, що може створювати дискомфорт та збільшувати споживання енергії. Натомість модель з нечіткою логікою демонструє більш плавне та стабільне регулювання температури, що дозволяє значно знизити витрати на енергоресурси.

Ключові слова: оптимізація системи опалення, нечітка логіка, система керування

Introduction

Smart home technologies are increasingly being utilized to automate various aspects of household management, with energy consumption optimization being one of the primary challenges addressed by these systems. Heating is one of the largest energy consumers in a home, making its efficient management crucial for reducing energy costs and enhancing residents' comfort [1, 2].

The relevance of this work lies in the fact that existing heating systems in smart homes are often not fully optimized, particularly in terms of fuel cost management and minimizing temperature fluctuations. As a result, these systems may operate inefficiently: fuel consumption can be excessive, and room temperatures may frequently vary,

causing discomfort for residents. Frequent temperature changes can also negatively impact people's health, while excessive fuel consumption leads to economic losses.

The structure of this article is organized as follows: first, the basic heating model in a Smart Home is researched and formalized. Next, optimization criteria are proposed, along with a heating optimization system for Smart Homes based on fuzzy logic. Finally, a study is conducted to evaluate the efficiency of heating systems according to the defined criteria, comparing the basic operational model with control systems based on fuzzy logic.

Related works

Various methods have been proposed to date, demonstrating significant potential for improving heating systems. One notable advancement is the use of hydraulic heating systems combined with a nighttime shutdown strategy. Due to high thermal inertia and quality insulation, this approach reduces fuel consumption by 10% without significant comfort losses [3]. Other approaches include developing mathematical models for heat supply systems to optimize energy consumption with minimal deviations.

In [4], a mathematical model of centralized heating supply was developed, divided into flow, thermal, and pressure stages, enabling efficient system parameter calculations and optimization with deviations of only 1% after calibration. The methodology in [5] proposes expanding heating networks using mixed-integer programming, accounting for spatial aspects and adapting to various building connection scenarios. Similarly, the work in [6] introduces numerical optimization for large-scale heating networks, employing constraint aggregation for consumers and an approximation strategy for discrete parameters. This approach reduced pipe costs by 23% and pumping costs by a factor of 14 within an hour of computation.

Moreover, [7] introduced an intelligent controller for a "smart" energy grid that minimizes energy imports, optimizes costs, and enhances microgrid reliability. An integrated control strategy featuring load forecasting and real-time temperature correction was also studied, reducing the temperature imbalance coefficient in rooms from 0.0310 to 0.0196 [8].

The reviewed studies propose various approaches for analyzing, optimizing, and managing heating systems, including strategies for reducing energy consumption, enhancing thermal comfort, and improving the accuracy of heat load forecasts. The advantages of these methods include improved energy efficiency, reduced fuel consumption, increased hydraulic network stability, and scalability for large centralized heating systems. However, limitations include the models' inability to fully account for dynamic changes in heat demand, dependency on precise tuning of control parameters, and the complexity of integrating diverse management strategies to balance comfort and efficiency.

To further enhance the efficiency of heating systems in Smart Homes, the use of fuzzy logic is proposed, offering resource optimization within Smart Home heating systems.

Abstract model of system functioning

To describe complex systems, such as a heating optimization system, it is convenient to use an abstract model that generalizes its functionality in the form of a tuple. At the highest level of abstraction, the model can be represented as:

$$AbstractModel = (\{Inputs\}, \{FunctionalBlocks\}, \{Outputs\}) \quad (1)$$

where *Inputs* – set of inputs; *FunctionalBlocks* – set of functional blocks; *Outputs* – set of outputs.

This approach allows any system to be described as an interaction of three main components: the set of inputs, the set of functional blocks, and the set of outputs.

(*Inputs*) represent all external signals or parameters that influence the operation of the system. They serve as the source of information upon which the system performs its functions.

FunctionalBlocks are the key elements of the model responsible for processing, transforming, and analyzing input data. These blocks model the internal processes of the system, enabling computations, data transmission between

subsystems, and decision-making. They may include mathematical models, algorithms, physical characteristics of components, or even software modules.

Outputs get the results of the system's operation. They reflect how the system responds to input signals after processing through functional blocks. Output parameters allow the evaluation of system performance, provide feedback, or enable monitoring of task execution.

This approach to system modeling ensures modularity and hierarchy. The abstract level not only helps understand the general logic of operation but also provides the ability to detail each component at lower levels of the model. Thus, as the abstraction level decreases, each element of the model can be described in more detail, considering the specifics of individual processes or system components.

Basic heating model in a Smart Home

To model the process of heating optimization system in a smart home based on fuzzy logic, we will first formalize the process for the model presented in [9]. The purpose of this approach is to identify the key components of the model (inputs, functional blocks, outputs) and present them in a standardized form, which facilitates analysis, adaptation, comparison and ways to improve the system.

We will present the basic model of the entire heating system in a Smart Home $M_{HeatingModel}$ in the form of:

$$M_{HeatingModel} = (\{T_{exp}, T_{avg}\}, \{M_{Control}, M_{Heater}, M_{HouseThermalNetwork}, ABlocks\}, \{T_{avg}\}) \quad (2)$$

where T_{exp} – set (expected) room temperature; T_{avg} – current average room temperature; $M_{Control}$ – model of control system; M_{Heater} – model of heater; $M_{HouseThermalNetwork}$ – model of house thermal network; $ABlocks$ – additional blocks for model operation.

The proposed model represents the heating system of a Smart Home and its management. This model contains blocks for temperature control, heating equipment (heater), modeling of heat losses in the house and external factors.

All processes of functioning in this heating system are simulated as a combination of thermal convection, thermal conductivity and thermal mass. A generalized basic model of the heating system in a Smart Home is presented in Fig. 1.

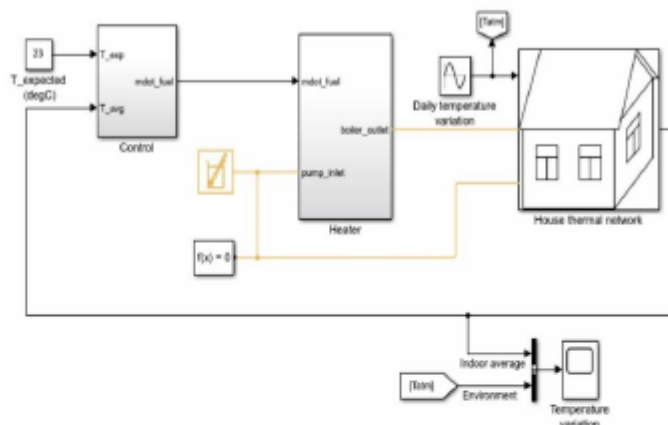


Fig. 1. Generalized basic model of the heating system in a Smart Home

The presented model consists of the following components: model of control system ($M_{Control}$), model of heater (M_{Heater}) and the model of house thermal network ($M_{HouseThermalNetwork}$).

Additional blocks for the functioning of the model include a block for modeling daily temperature variation and a graphical display for tracking the system's performance (Temperature variation).

In this model, the controller compares the expected temperature (T_{exp}) with the average current temperature (T_{avg}). Based on the difference between them (error), the controller calculates the value of the mass fuel consumption ($mdot_{fuel}$) for the heater.

The heater accepts the mass fuel consumption ($mdot_{fuel}$) as an input signal. Generates heat for heating water or air in the heating system. The outputs of the heater block are *boiler_outlet* – thermal output (heat supplied to the system) and *pump_inlet* – a signal showing the current state of the heater.

One of the components of the basic heating system model is the model of house thermal network. This is a model of the thermal dynamics of the house, which takes into account such aspects as heat loss through walls, windows, roof; heat received from the heater, as well as the influence of external conditions (ambient temperature).

The inputs of the house thermal network are *boiler_outlet* – thermal energy supplied by the heater and Daily temperature variation [T_{atm}] – daily fluctuations in the external temperature. The output is the value T_{avg} – the average temperature inside the house.

Let us present the model of the house thermal network $M_{HouseThermal\ Network}$ in the form of the following tuple:

$$M_{HouseThermal\ Network} = ((T_{atm}, T_{avg}), \{M_{Rooms}, M_{Radiators}, IAT, HC\}, \{T_{avg}\}) \quad (3)$$

where T_{atm} is the outdoor temperature that affects the heat loss of each room through walls and ventilation, T_{avg} is the current average temperature in the room, M_{Rooms} is the model of the room heating network $M_{Rooms} = \{M_{Room}\}_{i=1}^4$, $M_{Radiators}$ is the model of heating sources (radiators) $M_{Radiators} = \{M_{RoomRadiator}\}_{i=1}^4$, IAT is the block for calculating the average temperature in the house, HC (Heat Control) is the block for regulating the heat flow between the input flow and radiators.

The model of the model of house thermal network is shown in Fig. 2. The system receives the outdoor temperature T_{atm} and the average room temperature T_{avg} at the input.

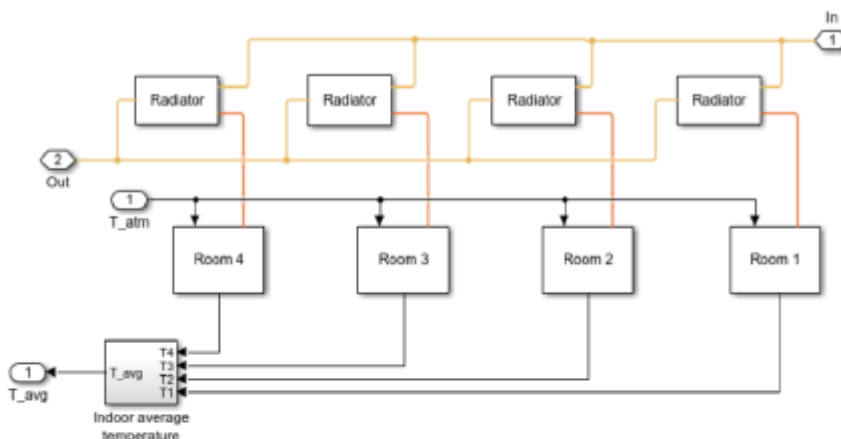


Fig. 2. The model of the model of house thermal network

In the proposed system, the model of house thermal network consists of four rooms. Each room has a radiator, which is the only source of heat transfer in the room. Each room is affected by the external temperature, which changes over time. In this system, the external temperature is modeled according to the following law:

$$T_{outside} = 6 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12 \cdot 360} \cdot t\right) + 5 \quad (4)$$

$M_{Radiators}$ generate heat for rooms based on HC heat control signals, which take into account heat loss and the desired (set) temperature. The average temperature (obtained in the IAT block) is defined as a control parameter that allows maintaining the desired heat balance in the rooms.

One of the main components of the heating system model in the Smart Home (equation 2) is the model of room heat network $M_{Rooms} = \{M_{Room}\}_{i=1}^4$ (Fig. 3). This model is a set of four elements, each of which describes the processes of modeling heat exchange between the internal air of the room, its structural elements (roof, walls, windows), the external environment, and the heat source (heater).

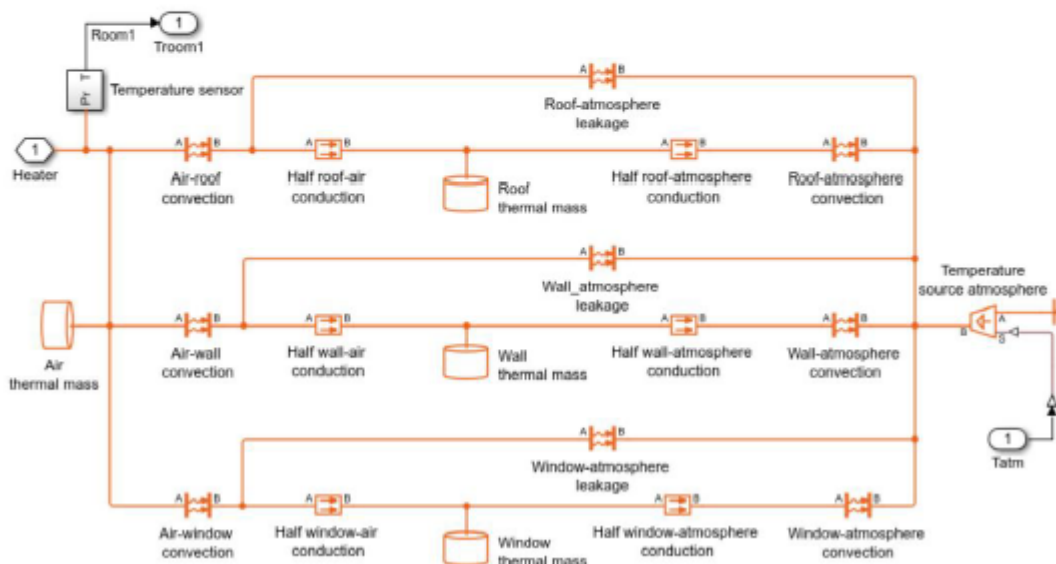


Fig. 3. The model of room heat network

Let us represent the model of the room heating network M_{Room} in the form of the following tuple:

$$M_{Room} = (\{T_{atm}, H\}, \{TM, Conv, Cond, TS\}, \{T_{room}\}) \quad (5)$$

where T_{atm} is the outdoor temperature, H is the heat source, TM is the thermal mass set, $Conv$ is the convection set, $Cond$ is the conduction set, T_{room} is the room temperature, TS is the temperature sensor;

In the M_{Room} model, the thermal mass set TM describes the physical objects that store heat and transfer it both indoors and outdoors. This set consists of four elements.

$$TM = \{TM_{Air}, TM_{Roof}, TM_{Wall}, TM_{Window}\} \quad (6)$$

where TM_{Air} is the thermal mass for modeling the indoor air of the room, TM_{Roof} is the thermal mass for modeling the roof as a volume that accumulates and transfers heat, TM_{Wall} is the thermal mass for modeling the wall as a volume that accumulates and transfers heat, TM_{Window} is the thermal mass for modeling the window as a volume that accumulates and transfers heat.

In this set, TM_{Air} represents the air in the room, as it has a low heat capacity, therefore it responds quickly to changes in heat sources (heater, heat loss through structures). TM_{Roof} represents the roof, which usually has a significant heat capacity and affects heat loss, especially due to contact with the external environment. TM_{Window} models the window as a thermal mass, although its heat capacity is much lower than that of the roof or walls, nevertheless windows are the main source of heat loss due to their low thermal insulation coefficient.

The main components of the M_{Room} model are thermal mass blocks, convection blocks and thermal conduction blocks. The air inside the room interacts with the roof, walls and windows through heat transfer (convection and thermal conduction), which is modeled by separate blocks. Each structural element (roof, walls, windows) is represented as a separate thermal mass, which models the accumulation and transfer of heat. The roof, walls and windows are connected to the atmosphere through heat loss blocks, which take into account both thermal conduction and convection. For a more

accurate modeling of heat transfer, the thermal conduction between the air and the structural elements (roof, walls, windows) is divided into two halves: Half roof-air conduction, Half wall-air conduction and Half window-air conduction. They provide a sequence of heat transfer between the air in the room, the thermal mass of the elements and the external environment.

The heat source is a heater H , which transfers heat to the air in the room. The air in the room is also modeled as a thermal mass (Air thermal mass), which takes into account its ability to accumulate and transfer heat. The external temperature T_{atm} is modeled as a temperature source, which is connected to the thermal masses through heat transfer blocks. These blocks take into account heat losses through the roof, walls and windows to the atmosphere.

The presented model implements the interaction of the air inside the room with the roof, walls and windows through heat transfer, which constitute three heat chains. In this model, these chains are typical, in particular, for the roof, the heat chain is modeled as follows:

1. Heat transfer from the room air to the inner surface of the roof. This stage is modeled by the Convection Air Roof block (convection between the room air and the inner surface of the roof). As a result, heat is transferred from the room air to the inner surface of the roof.

2. Heat transfer through the first half of the roof material (Half Roof Air Conduction). At this stage, heat spreads through the inner half of the roof thickness. This is modeled by the Half Roof Air Conduction block. As a result, some of the heat reaches the middle of the roof thickness.

3. Heat transfer through the second half of the roof material (Half Roof Atmosphere Conduction). Heat spreads through the second half of the roof thickness to the outer surface. This is modeled by the Half Roof Atmosphere Conduction block. As a result, the heat reaches the outer surface of the roof.

4. Heat loss through leaks between the roof and the atmosphere (Roof Atmosphere Leakage). At this stage, heat leakage through possible cracks or leaks in the roof is taken into account. This is modeled by the Roof Atmosphere Leakage block. As a result, this leads to a loss of some heat through leaks in the roof.

5. Heat transfer from the outer surface of the roof to the atmosphere (Convection Roof Atmosphere). The outer surface of the roof transfers heat to the atmosphere through convection. This is modeled by the Convection Roof Atmosphere block. As a result, some of the heat is transferred to the external environment through convection.

Thus, it is worth noting that each heat exchange circuit is divided into two conditional zones to account for heat flows in two directions from the room to the external environment and from the external environment to the room. This allows for a more accurate simulation of the heat transfer process and provides for a dynamic change in heat flows depending on the conditions.

Another important component of the basic model of the heating optimization system is the heater model M_{Heater} . Let's represent the heater model as a tuple:

$$M_{Heater} = (\{\dot{m}_{fuel} inlet\}, \{SS, Pump, Boiler, CC\}, \{outlet\}) \quad (7)$$

where \dot{m}_{fuel} is the mass flow of fuel; *inlet* is the flow of liquid that goes to the boiler for heating; *outlet* is the flow of liquid that goes from the boiler after heating; *SS* is the source of speed – used to control the flow rate of liquid through the pump; *Pump* is responsible for creating the flow of liquid; M_{Boiler} is the boiler model – used to heat the liquid; *CC* is the circulation system and heat exchangers – redirect and transfer heat between components.

The M_{Boiler} defines the main component that performs liquid heating. It has one inlet input, representing the liquid entering the system, and an *outlet* – the heated liquid leaves the boiler and is directed to the heat exchangers. The boiler receives thermal energy from the fuel supplied through the \dot{m}_{fuel} stream. The liquid is heated to the required temperature.

The *CC* system consists of a heat exchanger block and a circulation block. A heat exchanger transfers heat energy between a heated fluid and a working medium. In this subsystem, input *A* defines the heated fluid entering the heat exchanger, while *B* defines the output after heat exchange, when the fluid is transferred further into the system. Block *H* defines the process of fluid circulation between the boiler and the heat exchangers. This block models the change in flow and the return of the fluid back to the system.

The last main component of the basic heating system is the $M_{Control}$ model of control system. This block implements the heating process control subsystem, which takes into account temperature parameters and mass fuel consumption to minimize costs (fuel cost). This control model can be attributed to proportional-integral (PI) models with dynamic signal processing. Let us present the $M_{Control}$ model of control system in the following form:

$$M_{Control} = (\{T_{exp}, T_{avg}\}, \{S, GVL, VOMFR, NGD, IB, SB\}, \{mdot_fuel, fuel_cost\}) \quad (8)$$

where T_{exp} – set (expected) room temperature, T_{avg} – current average room temperature, S – adder, GVL – gas supply valve dynamic delay block, $VOMFR$ – gas mass flow rate determination block through the valve, NGD – natural gas density inversion block, IB – integrator block, SB – scale blocks, signal scaling blocks, $mdot_fuel$ – fuel mass flow rate, fuel cost – fuel cost.

The model of heating control system for the base model is shown in Fig. 4.

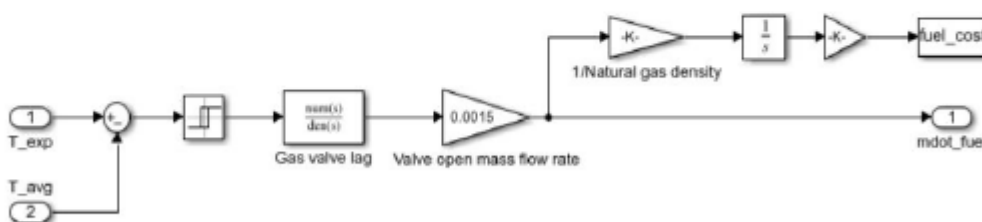


Fig. 4. Model of heating control system

The inputs of this model are T_{exp} and T_{avg} (Temperature expected and Temperature average). T_{exp} is the expected temperature that the system should maintain (set by the user or the program). T_{avg} is the average current temperature (for example, read from sensors). These two signals are fed to the adder to calculate the error (deviation from the desired temperature).

The outputs of this model are $mdot_fuel$ – mass fuel consumption. This value is used to analyze the system operation and fuel cost – fuel costs, which are calculated as a function of fuel consumption and its cost.

The adder block (indicated in the diagram as +) calculates the difference between the values of T_{exp} and T_{avg} . The resulting value determines how much the actual temperature differs from the desired one. This error is the basis for further regulation of the natural gas flow rate:

$$Error = T_{exp} - T_{avg} \quad (9)$$

The next stage is the dynamic processing of this signal through a gas supply valve delay model, which takes into account the time characteristics of the system described by the transfer function:

$$w(s) = \frac{num(s)}{den(s)} \quad (10)$$

This functionality is represented by the GVL – Gas Valve Lag block.

The $VOMFR$ block scales the signal from the valve to determine the gas mass flow rate through the valve. In the proposed model, the coefficient value for this block is 0.0015.

The NGD (1/Natural Gas Density) block represents the inversion of the natural gas density and allows you to take into account the properties of the gas (density) to convert the mass flow rate into the corresponding thermal energy.

An additional integrator block ($1/s$) integrates the signal corresponding to the gas flow rate to calculate the accumulated amount of fuel used (or energy transferred to the system).

Blocks with SB coefficients scale signals based on system characteristics (in the figure marked as -K-). The first coefficient determines the energy efficiency of the gas, while the second coefficient determines the cost of fuel per unit of energy.

Thus, the controller implemented in the basic version [9] is a proportional control that estimates the actual temperature of the house relative to the target temperature, with an error of 2 °C and a hysteresis of 4 °C. In this case, the

concept of hysteresis defines the effect when the system has a different reaction to changes in the input value depending on whether this value increases or decreases. This means that the controller will open the valve to connect the heater when the temperature drops below 2 °C from the set point, and close the valve when the temperature exceeds the target by 2 °C.

Thus, the basic heating model in a Smart Home is described, which will be compared with the proposed heating optimization system in the Smart House. This approach will assume the preservation of the same conditions for both models, which will allow a correct assessment of the effectiveness of the proposed system compared to the traditional one. The modeling will be carried out on the basis of the same building information modeling model in Matlab, which will provide a comparison according to the same parameters.

Defining the optimization problem for heating optimization

The basic heating control model in the Smart Home considered in the previous section defines proportional-integral control with dynamic signal processing. However, an obvious drawback is the rather frequent switching of the system operating modes, which can lead to excessive energy consumption and faster wear of the equipment. This is explained by the fact that the basic model is focused on a quick response to temperature changes, but does not take into account the long-term stability of the system. As a result, it provides an insufficiently smooth control mode and an increased number of fluctuations in the ambient temperature.

To solve these problems, in the following sections it is proposed to use a system with fuzzy logic inference. Let us formulate the problem of optimizing heating control in the Smart Home.

The problem of optimizing heating control can be represented through a mathematical objective function that must be minimized [10]. The goal of this problem is to simultaneously reduce fuel costs and reduce temperature fluctuations in rooms.

Let the input variable for the control system be the temperature in the Smart House $T_{house}(t)$, as well as the set temperature $T_{desired}$, which determines the comfortable temperature for the selected room. The task is to control the heat output $Q_{heat}(t)$, which is regulated through the boiler or other heating sources, in order to minimize two criterion indicators.

The first criterion is the cost of fuel. The cost of fuel depends on how much fuel is consumed to maintain the set temperature in the Smart House. This can be expressed in terms of fuel consumption $\dot{m}_{fuel}(t)$ for a certain time period T . The cost of fuel is defined as the integral of fuel consumption per unit of time, multiplied by the cost of a unit of fuel C_{fuel} . Mathematically, this can be written as:

$$C_{total} = \int_0^T \dot{m}_{fuel}(t) \cdot C_{fuel} dt \quad (11)$$

This is the first criterion that we aim to minimize.

The second criterion is to reduce the frequency of temperature fluctuations in the Smart Home. Temperature fluctuations occur due to frequent switching on and off of the boiler, which leads to significant temperature differences in the room. This can be described by a function that measures the rate of change of the thermal power $Q_{heat}(t)$. The smoothed power change is an important aspect to ensure a stable temperature in the room. For this, a metric that integrates the derivative of the thermal power can be used, i.e.:

$$S_{smoth} = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dQ_{heat}(t)}{dt} \right| dt \quad (12)$$

The smaller this value, the smoother the system works, and therefore, the smaller the temperature fluctuations. Thus, the optimization problem as a whole is to minimize the combination of these two criteria:

$$\min J = w_1 \cdot C_{total} + w_2 \cdot S_{smoth} \quad (13)$$

where w_1 and w_2 are weighting factors that determine the priority of each of the criteria. Weighting factors can be adjusted depending on what the overall optimization criterion is more focused on (for example, if fuel economy is more important, then w_1 will be larger).

In this problem, a fuzzy logic inference system is used to determine the optimal heating power $Q_{heat}(t)$ depending on the current temperature deviation $\Delta T = T_{house}(t) - T_{desired}$ and the rate of temperature change. Based on these inputs, the fuzzy system determines whether it is necessary to increase or decrease the heating power to stabilize the temperature in the Smart House. Thus, the problem is a multi-objective optimization problem, where it is necessary to simultaneously reduce fuel consumption and stabilize the temperature in the room, using a fuzzy control system for smoother regulation of the heating power.

Architecture and functioning of the heating optimization system in a smart home based on fuzzy logic and integration with cloud services

In order to solve the problem of maintaining the optimal temperature in a Smart Home, a heating optimization system is proposed. Its key feature is the modular structure and the involvement of fuzzy logic in the optimization process.

In the proposed system, all blocks are divided into three modules that differ in their functioning. In particular, such modules as the control and user interaction module, the physical parameters tracking module, and the decision-making module are highlighted.

The central component of the entire system is the user control and interaction module. Functionally, this module is responsible for two main tasks: coordinating the operation of the entire system and communicating with the user. Structurally, the control and user interaction module consists of a controlling block and a communication interface for interacting with the user. In the context of the proposed system, the controlling block is a block that controls and coordinates the operation of the remaining components. It is responsible for initializing other blocks, controlling their activity, and checking the performance of tasks. In the proposed system, the control unit initializes other system units at the beginning of operation, periodically checks the activity of the remaining units, and also listens to incoming messages from the units of the artificial intelligence module.

Structurally, the user control and interaction module also includes a user communication block. Thanks to integration with cloud services, this unit provides the possibility of extended functionality, allowing users to access the system and manage it from any point of connection to the network. The main purpose of this block is to organize an interface for transmitting and receiving messages from the user via the cloud infrastructure.

Another module of the proposed system is a physical parameters tracking module. This module consists of the following blocks: block of detection of people presence, outdoor temperature measurement block, indoor temperature measurement block and outdoor humidity measurement block. All these blocks have one goal, which is to determine the physical parameters of the environment (external and internal).

The third module in the proposed system for optimizing the use of heating in a Smart Home based on fuzzy logic is a decision-making module. This module performs the intelligent functions of the entire system. It will use the information collected by the previous module and transmitted by the control unit to evaluate all variables and determine the most appropriate output signal for the current situation. Two types of blocks are defined in this module: a fuzzy logic decision block and a system status block.

The fuzzy logic decision block is a key element of the heating control system. It includes a fuzzy control system that processes data received from the physical parameter tracking module blocks and generates the appropriate control action that is transmitted to the system. Within the block, rules and membership functions for various variables are defined to ensure the correct execution of control actions. The block receives data from the sensor blocks to perform its function. The mechanism of operation of the fuzzy logic decision block involves periodic activity, which includes the absence of constant generation of output signals for controlling the heating system (only when necessary).

The system status block is responsible for setting the control action defined by the fuzzy block and notifying the control block that the action has been performed in the physical system. Despite its simplicity of operation, its role is extremely important, because it changes the state of the system. This block operates cyclically: it constantly listens to messages from the fuzzy logic decision block and performs its task each time it is needed.

The structure of the heating optimization system in a smart home based on fuzzy logic and integration with cloud services is shown in Fig. 5.

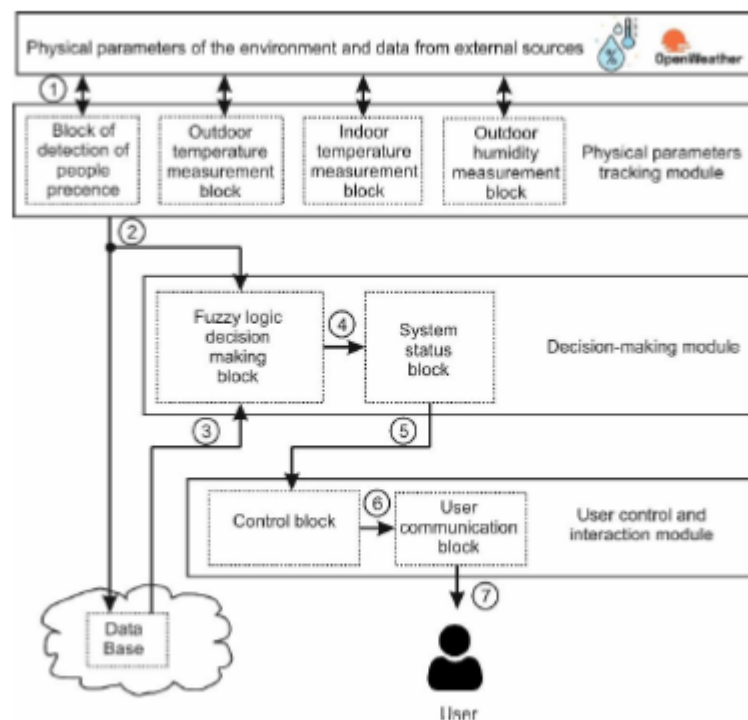


Fig. 5. The structure of the heating optimization system in a smart home based on fuzzy logic and integration with cloud services

Implementation of proposed solution

In order to evaluate the proposed solutions, a prototype of a heating optimization system in a Smart Home based on fuzzy logic was designed. The JADE (Java Agent Development Framework) framework was used to implement the functioning of the designed system [11].

The main goal of the system is to monitor and analyze key parameters in a smart home, such as temperature, humidity, and the number of people in the room. These parameters are collected by blocks that track physical parameters, processed, and decisions are made based on them using fuzzy logic.

Since there are no real sensors in this system, their functions are simulated in matlab (and getting from external sources). For example, the values of the external temperature are modeled by variables in matlab and double check with OpenWeatherMap [12], which are dynamically updated. The external temperature changes according to a sinusoidal law with given parameters of amplitude, frequency, phase, and offset.

Implementation of the fuzzy logic inference block

The fuzzy logic inference block is implemented in the Matlab software environment. Its operation is based on a fuzzy logic inference system of the Sugeno type, which provides the formation of a clear output (on/off). The proposed system operates on four input variables: temperature difference (TemperatureDelta), external humidity (Humidity), external temperature (TemperatureOut) and the presence of people in the room (PeoplePresence). Each of these variables is represented by trapezoidal membership functions, which allows taking into account their influence in a fuzzy system with flexibility and accuracy. The graphs of the membership functions are shown in Fig. 6.

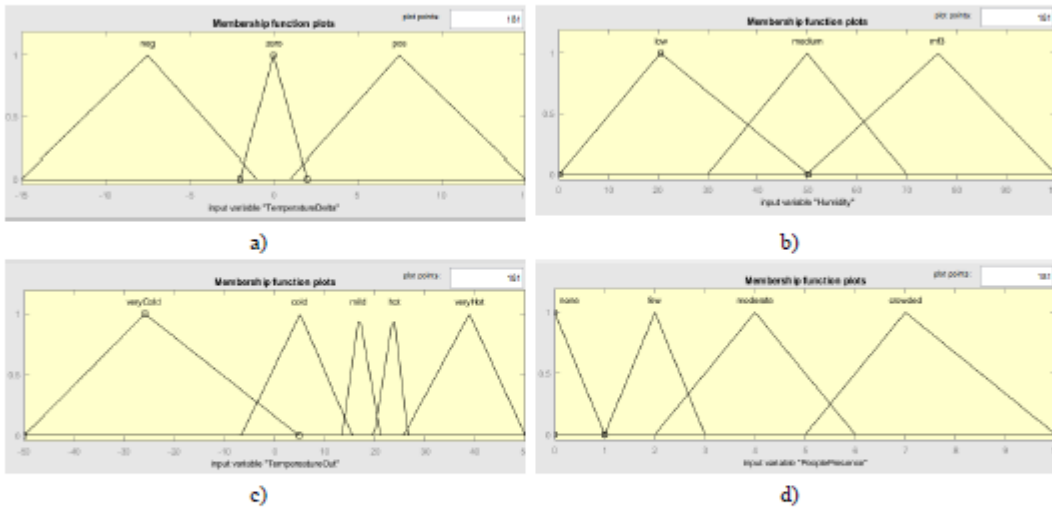


Fig. 6. Membership function: a) TemperatureDelta; b) Humidity; c) TemperatureOut; d) PeoplePresence

The core of the system consists of 21 rules that were empirically developed. These rules are the basis for the functioning of fuzzy logic, which determines how the variable HeaterStatus (heater status) reacts to combinations of input parameters. Surfaces illustrating the dependencies between the output variable and the input variables are shown in Fig. 7.

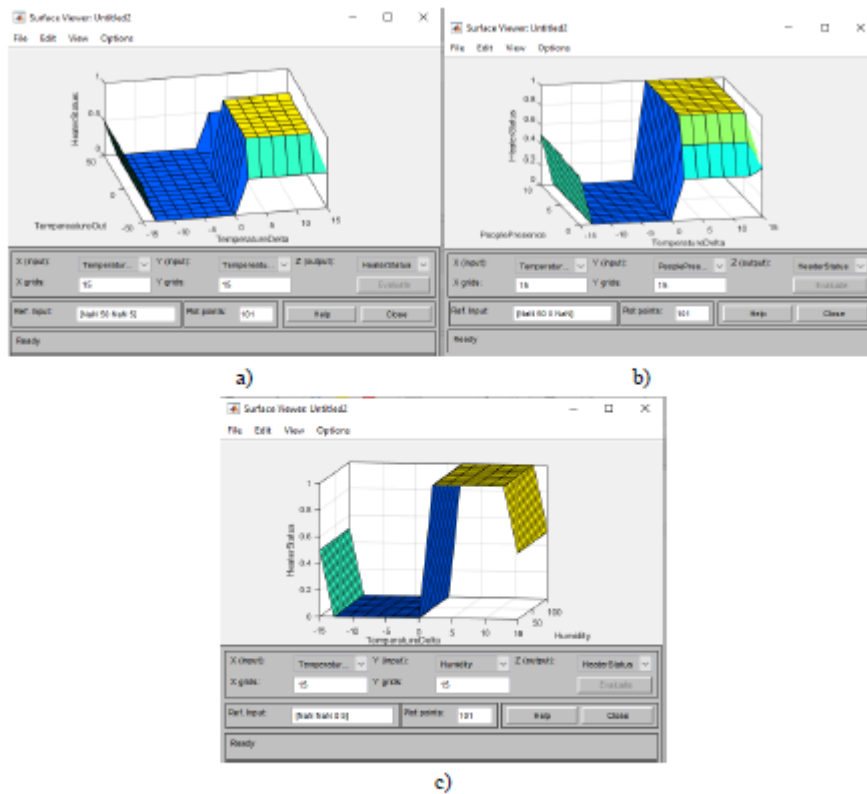


Fig. 7. Surfaces illustrating the dependencies between the output variable HeaterStatus and the input variables: a) TemperatureOut and TemperatureDelta; b) PeoplePresence and TemperatureDelta; c) TemperatureDelta and Humidity

From the surfaces shown in Fig. 7, it can be noted that when the temperature difference is large and the outside temperature is low, the heater is actively working (HeaterStatus is close to 1). As the outside temperature increases or the temperature difference decreases, the heater starts to turn off, and HeaterStatus decreases to 0. This demonstrates a logical principle: when the outside weather is warm or the inside temperature is almost at the optimum level, heating becomes unnecessary. It can also be seen that if the temperature difference is large, even with a large number of people, the heater continues to work, but its intensity is reduced compared to the case when there are no people in the room (there is no need to heat an empty room).

Evaluation of the efficiency of the heating system using optimization criteria

According to the goal of the work, which was to optimize resource consumption in the heating system of the Smart Home, a control system was modeled, which included two models: basic and based on fuzzy logic. The efficiency of the system was evaluated using two optimization criteria.

Two models were compared: the basic control model and a model using fuzzy logic. The goal was to determine how much each of these models provides efficiency and stability of temperature control. Two indicators that met predefined criteria were used for the analysis. The first indicator assessed the total costs (fuel cost) for maintaining a given temperature level, and the second indicator analyzed the frequency of temperature fluctuations (smoothness of temperature changes), which indicates the comfort of conditions.

For this, Matlab software was used, which allows you to model complex systems and analyze the results. The simulation covered a time period of 50 hours, during which temperature changes were simulated in conditions close to real ones.

The estimation of fuel consumption by the basic heating system and the proposed heating optimization system in the Smart Home based on fuzzy logic is presented in Fig. 8.

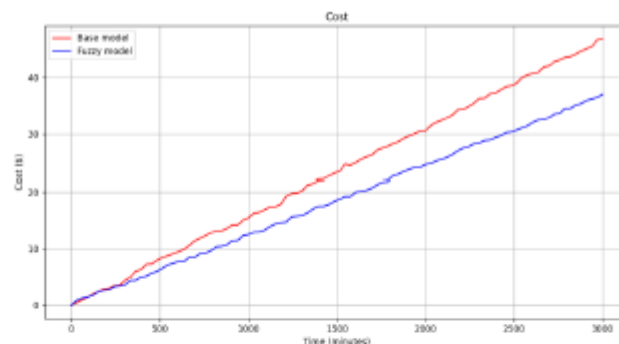


Fig. 8. Estimation of fuel consumption by the basic heating system and the proposed heating optimization system in the Smart Home based on fuzzy logic

Fig. 9 shows a graphs of temperature changes when implementing the basic heating control system and the proposed heating optimization system in the Smart Home based on fuzzy logic. The resulting graph shows the temperature change inside the houses depending on time. The red line, corresponding to the basic model, demonstrates large and sharp temperature fluctuations that look irregular. This indicates less effective regulation. In contrast, the blue line, representing the fuzzy model, looks much more stable. The temperature changes more smoothly, with smaller deviations, which indicates better smoothing of fluctuations and more efficient operation of this model.

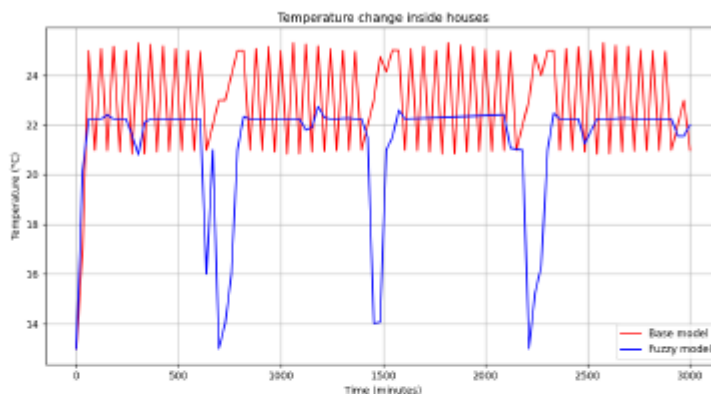


Fig. 9. Temperature change graph when implementing the basic heating control system and the proposed heating optimization system in a Smart Home based on fuzzy logic

Let us calculate the effectiveness of optimizing heating control in a Smart Home. To do this, we will determine the percentage change in two indicators that meet the specified optimization criteria (equation 13) – the cost of fuel and the frequency of temperature fluctuations in the Smart Home. The percentage change for the first criterion (cost of fuel) will be determined by the following formula:

$$\Delta C = \frac{C_{base} - C_{fuzzy}}{C_{base}} \cdot 100\% \quad (14)$$

where C_{base} is the total cost in the base (non-optimized) system, C_{fuzzy} is the total cost in the system with fuzzy logic.

The percentage change according to the second criterion (smoothness of control) is determined based on the calculation of the number of boiler starts. The number of starts was calculated as the average number of starts per hour. Thus, for each of the systems, the average number of starts was calculated for each of the 50 hours of system operation. These values are expressed as S_{base} and S_{fuzzy} . Then the percentage change according to the second criterion (smoothness of control) is determined based on the following formula:

$$\Delta S = \frac{S_{base} - S_{fuzzy}}{S_{base}} \cdot 100\% \quad (15)$$

Thus, according to the fuel consumption estimation graphs (fig. 8) for the basic heating system and the proposed heating optimization system in the Smart Home based on fuzzy logic, the value of ΔC will be $\Delta C = (46 - 37)/46 \cdot 100\% = 19,57\%$.

Тоді як відповідно до графіків зміни температури при реалізації базової системи керування опаленням та запропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки значення ΔS складатиме $\Delta S = (17 - 6)/17 \cdot 100\% = 64,70\%$.

According to equation 13, let us calculate the value of J_{base} :

$$J_{base} = w_1 \cdot C_{base} + w_2 \cdot S_{base} \quad (16)$$

where the values w_1 and w_2 , which are the weighting coefficients that determine the priority of each of the criteria, are set at 0.7 and 0.3, respectively (priority is given to reducing fuel consumption).

As a result, we obtain the value of $J_{base} = 0,7 \cdot 46 + 0,3 \cdot 17 = 37,3$.

Similarly, we determine the value of J_{fuzzy} :

$$J_{fuzzy} = w_1 \cdot C_{fuzzy} + w_2 \cdot S_{fuzzy} \quad (17)$$

As a result, we will obtain the value $J_{fuzzy} = 0,7 \cdot 37 + 0,3 \cdot 6 = 27,7$.

Finally, we determine the efficiency gain using the following formula:

$$\Delta J = \frac{J_{base} - J_{fuzzy}}{J_{base}} \cdot 100\% \quad (18)$$

Thus, the result was 25.7%, which indicates that the optimization task has been achieved by a quarter compared to the basic version of the system.

Conclusions

As a result, heating optimization system in a smart home based on fuzzy logic and integration with cloud services was developed and modeled. The aim of the work was to determine how effective the use of fuzzy logic is in comparison with the basic heating control model. For this purpose, two criteria were analyzed: fuel consumption and the frequency of temperature fluctuations, which allow assessing the efficiency of the system.

The implementation of the fuzzy logic system block was performed using the Matlab software environment. The operation of two heating systems was simulated: based on the basic model and based on the proposed fuzzy logic inference system. Two indicators were used for the analysis that met the predefined criteria. The first indicator assessed the total energy consumption to maintain a given temperature level, and the second indicator analyzed the frequency of temperature fluctuations (smoothness of temperature changes), which indicates the comfort of the conditions.

According to the results obtained, the use of fuzzy logic significantly improves the stability of the temperature in the house, which is important for the comfort of residents. The basic system, which does not take into account variable factors with such a level of flexibility, leads to large and sharp temperature fluctuations, which can create discomfort and increase energy consumption. In contrast, the model with fuzzy logic demonstrates smoother and more stable temperature regulation, which allows you to significantly reduce energy costs.

According to the calculations, the sum of the percentage changes for both criteria showed a significant improvement. Fuel consumption in the model with fuzzy logic decreased by 19.57%, which indicates significant energy savings. There was also a significant decrease in the frequency of temperature fluctuations - by 64.70%, which has a positive effect on the comfort of living in the house. Given these indicators, the efficiency of the system with fuzzy logic turned out to be much higher.

For a comprehensive assessment of efficiency, a general J-index was calculated, which takes into account both optimization criteria with certain weighting factors. The results showed that the overall efficiency of the system with fuzzy logic increased by 25.7%, which is a significant achievement compared to the baseline system. This proves that the use of fuzzy logic allows optimizing the operation of the heating system, reducing fuel consumption and increasing the comfort of conditions in the Smart Home.

References

1. Hajian H., Ahmed K., Kurnitski J. Dynamic heating control measured and simulated effects on power reduction, energy and indoor air temperature in an old apartment building with district heating. *Energy and Buildings*, 2022, 268, Article 112174.
2. Chunhua S., Yanan L., Shanshan C., Xiaoyu G., Guoqiang X., Chengying Q., Xiangdong W. Integrated control strategy of district heating system based on load forecasting and indoor temperature measurement, 2022, vol. 8, Pp. 8124-8139.
3. Rimoldi M., Carlon E., Schwarz M., Golicza L., Verma V K., Schmidl C., H. Walter, Optimizing the Control Strategy of a Low-Energy House's Heating System, 2015, World Sustainable Energy Days Next, Pp.63-69. doi:10.1007/978-3-658-04355-1_8.
4. Palka P., Malec M., Kaszyński P., Kamiński J., Saluga P. District Heating System Optimisation: A Three-Phase Thermo-Hydraulic Linear Model. 2023, *Energies*. Vol 16, 3316. doi: 10.3390/en16083316.
5. Delangle A., Lambert R., Shah N., Acha S., Markides C. Modelling and optimising the marginal expansion of an existing district heating network, 2017, *Energy*. vol. 140. doi:10.1016/j.energy.2017.08.066.
6. Blommaert M., Wack Y., Baelmans M. An Adjoint Optimization Approach for the Topological Design of Large-Scale District Heating Networks based on Nonlinear Models. *Applied Energy*, 2020, vol. 280. 116025. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116025.
7. Hakimi S., Mehdi M.-T., Alamuti. M.M. Smart heating system control strategy to enhance comfort and increase renewable energy penetration. *Proceedings of the 2013 IEEE International Workshop on Intelligent Energy*

Systems, IWIES, 2013. doi:191-196. 10.1109/IWIES.2013.6698584.

8. Chunhua S., Yanan L., Shanshan C., Xiaoyu G., Guoqiang X., Chengying Q., Xiangdong W. Integrated control strategy of district heating system based on load forecasting and indoor temperature measurement, 2022, vol. 8, Pp. 8124-8139.

9. MathWorks, House Heating System URL: <https://es.mathworks.com/help/hydro/ug/house-heating-system.html>

10. Okrushko D., Pavlova O. Decision-making support system regarding the optimization process of crop cultivation using remote sensing data. *Computer Systems and Information Technologies*, 2024, No. 4, pp. 78–91. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-4-10>

11. JAVA Agent DEvelopment Framework, URL: <https://jade.tilab.com/>

12. OpenWeather, URL: <https://openweathermap.org/>

Ihor Lytvynchuk – master's degree student, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine,

e-mail: LytvinchukI@gmail.com.

Bohdan Savenko – PhD, Senior Lecturer of Computer Engineering & Information Systems Department, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

e-mail: bsavenko@khmnu.edu.ua.

orcid.org/0000-0001-5647-9979, Scopus Author ID: 57194494846

Serhii Danchuk – PhD student, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine,

e-mail: sergey.danchuk.p@gmail.com

orcid.org/0009-0003-4510-0363, Scopus Author ID: 59129900600

ДОДАТОК Б
КОПІЯ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Ігор Литвінчук

Науковий керівник: к.т.н., Грига В.М.

Хмельницький, 2025

Об'єктом дослідження є процеси оптимізації витрат ресурсів у системі опалення Розумного будинку на основі нечіткої логіки.

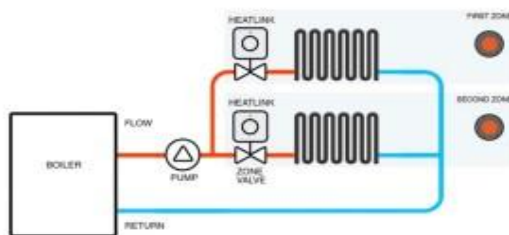
Предметом дослідження є система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності функціонування системи опалення у Розумному будинку шляхом оптимізації витрат ресурсів у системі опалення Розумного будинку на основі залучення нечіткої логіки.

Наукова новизна

- **набула подальшого розвитку** базова модель системи опалення у Розумному будинку, яка відрізняється від відомих врахуванням комбінації процесів теплової конвекції, теплової провідності та теплової маси у системі опалення, а також їх формалізації, що дозволило виокремити шляхи удосконалення системи опалення та виконати порівняння із оптимізованою системою на основі нечіткої логіки.
- **набула подальшого розвитку** система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки, яка відрізняється від відомих організацією її функціонування у формі мультиагентної системи, а також залучення нечіткої логіки у процесі оптимізації, що дозволило підвищити ефективність системи опалення у Розумному будинку шляхом зменшення витрат на паливо та зменшення коливань температури в кімнатах.

Актуальність дослідження. Постановка задачі



Узагальнена схема
функціонування системи
опалення

- Опалення є одним із найбільших споживачів енергії, і його ефективне управління знижує витрати на енергоресурси та підвищує комфорт.
- **Проблеми сучасних систем опалення :**
 - Часткове врахування змінних умов (зовнішньої температури, часу доби, вологості).
 - Надмірні витрати палива та часті температурні коливання.

Дане дослідження в рамках кваліфікаційної роботи організовано таким чином:

1. Проведено аналіз та формалізацію базової моделі опалення у Розумному будинку.
2. Визначено критерії оптимізації роботи системи опалення.
3. Розроблено систему оптимізації опалення для Розумного будинку на основі нечіткої логіки
4. Проведено дослідження ефективності системи опалення при базовій моделі та при використанні нечіткої логіки.

Абстрактна модель функціонування системи

- Подамо **абстрактну модель функціонування системи** як взаємодію трьох основних компонентів: множини входів, множини функціональних блоків і множини виходів.
- Вхідні дані (*Inputs*) представляють усі зовнішні сигнали чи параметри, які впливають на роботу системи.
- Функціональні блоки (*FunctionalBlocks*) є ключовими елементами моделі, що відповідають за обробку, перетворення та аналіз вхідних даних. Ці блоки моделюють внутрішні процеси системи, забезпечуючи обчислення, передачу даних між підсистемами та прийняття рішень.
- Виходи (*Outputs*) формують результати роботи системи. Вони відображають, як система відповідає на вхідні сигнали після їх обробки через функціональні блоки.

$$AbstractModel = (\{Inputs\}, \{FunctionalBlocks\}, \{Outputs\}) \quad (2.1)$$

Базова модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку

$$M_{HeatingModel} = (\{T_{exp}, T_{avg}\}, \{M_{Control}, M_{Heater}, M_{HouseThermal\ Network}, ABlocks\}, \{T_{avg}\})$$

де T_{exp} – встановлена (очікувана) температура у приміщенні;

T_{avg} – поточна середня температура у приміщенні, яка відображається з блоку House thermal network;

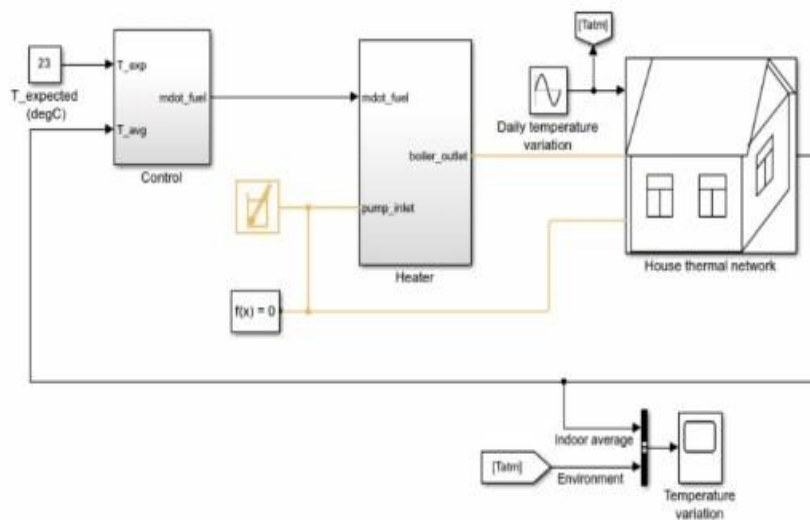
$M_{Control}$ – модель системи контролю;

M_{Heater} – модель нагрівача;

$M_{HouseThermal\ Network}$ – модель теплової мережі будинку;

$ABlocks$ – додаткові блоки для функціонування моделі.

Базова модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку



Базова модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку

Модель теплової мережі будинку

$$M_{\text{HouseThermal Network}} = (\{T_{\text{atm}}, T_{\text{avg}}\}, \{M_{\text{Rooms}}, M_{\text{Radiators}}, IAT, HC\}, \{T_{\text{avg}}\})$$

де T_{atm} – зовнішня температура, яка впливає на тепловтрати кожної кімнати через стіни та вентиляцію,

T_{avg} – поточна середня температура у приміщенні,

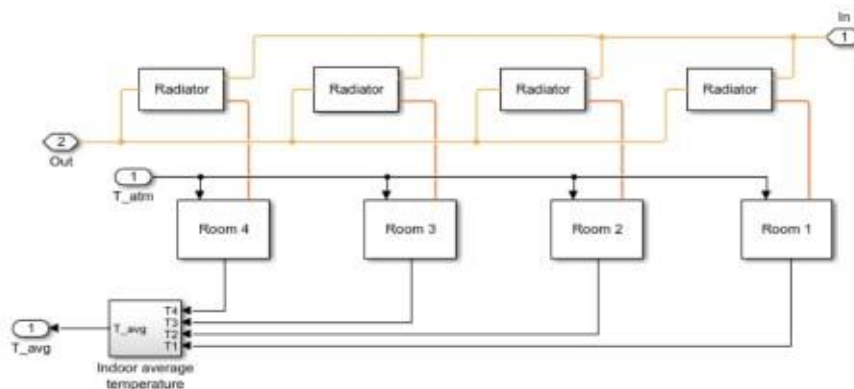
M_{Rooms} – модель теплової мережі кімнат $M_{\text{Rooms}} = \{M_{\text{Room}}\}_{i=1}^4$;

$M_{\text{Radiators}}$ – модель джерел опалення (радіаторів) $M_{\text{Radiators}} = \{M_{\text{RoomRadiator}}\}_{i=1}^4$;

IAT – блок розрахунку середньої температури у будинку;

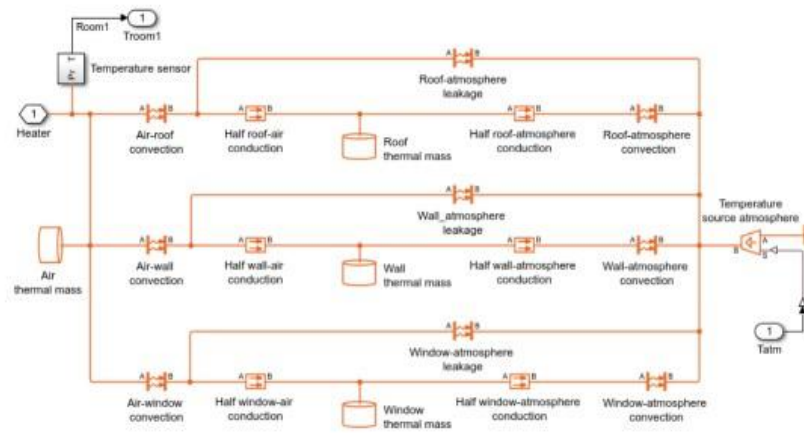
HC (Heat Control) – блок регулювання потоку тепла між вхідним потоком і радіаторами.

Базова модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку



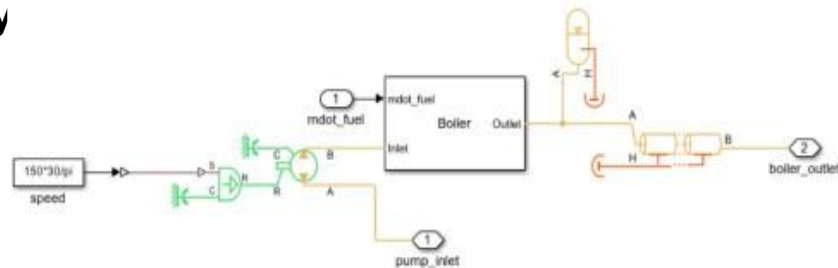
Модель теплової мережі будинку

Базова модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку

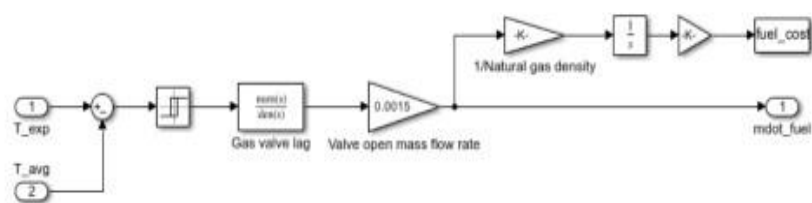


Модель теплової мережі кімнат

Базова модель системи оптимізації опалення у Розумному будинку



Модель нагрівача



Модель системи керування опаленням

Постановка задачі оптимізації керування опаленням

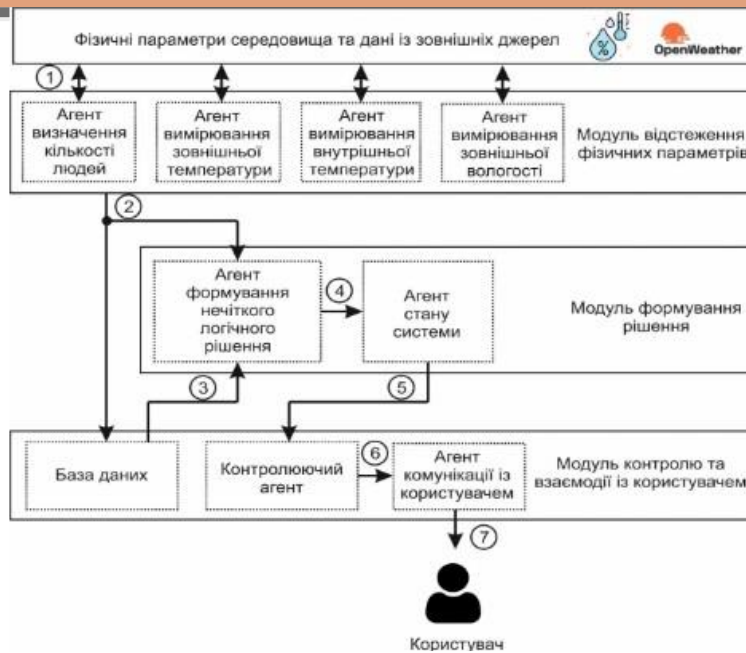
Задача оптимізації керування опаленням може бути представлена через математичну цільову функцію, яку необхідно мінімізувати. Метою цієї задачі є одночасне зменшення витрат на паливо та зменшення коливань температури в кімнатах.

$$\min J = w_1 \cdot C_{total} + w_2 \cdot S_{smoth}$$

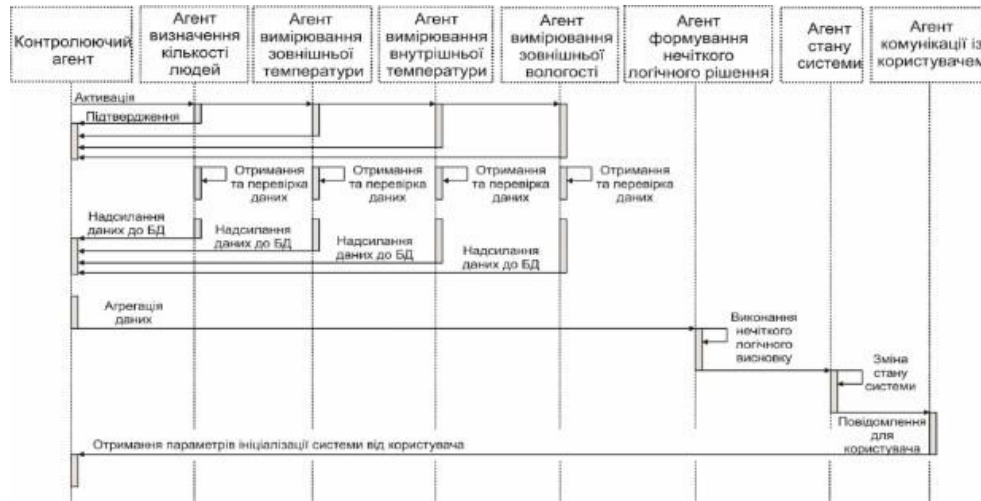
де w_1 і w_2 – це вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного з критеріїв.

C_{total} – зменшення витрат палива

S_{smoth} зменшення частоти коливань

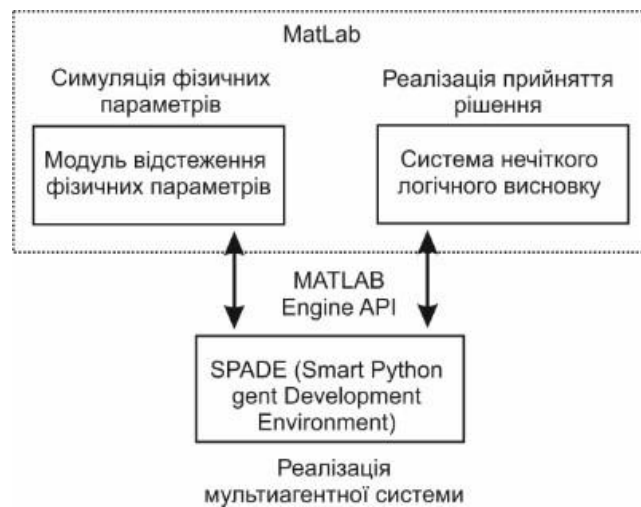


Архітектура та функціонування системи оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

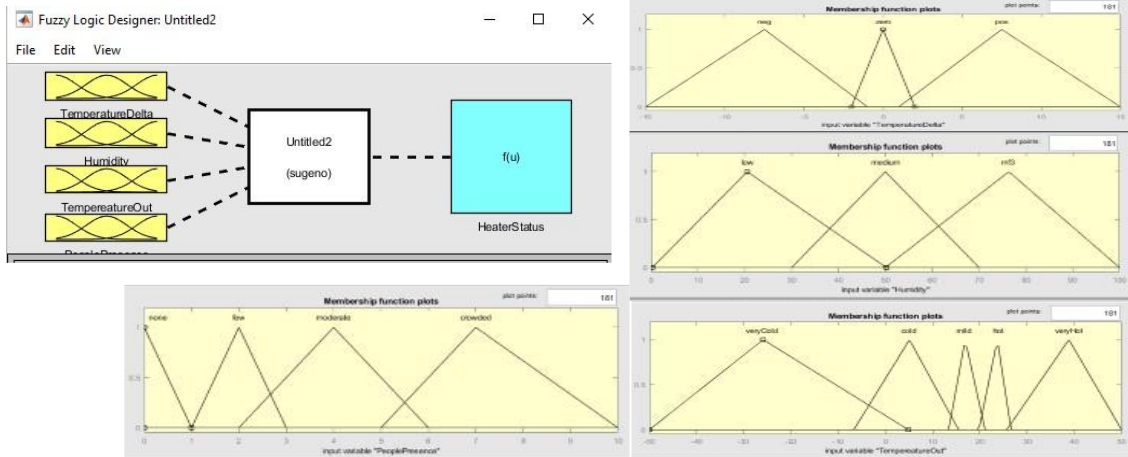


Потік повідомлень, що передаються у системі оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Реалізація системи оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

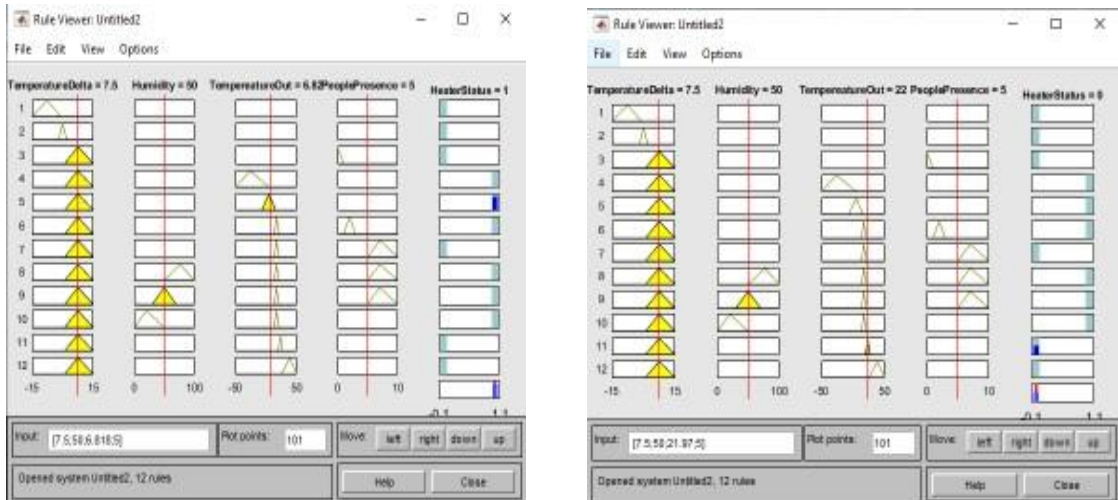


Система нечіткого логічного висновку



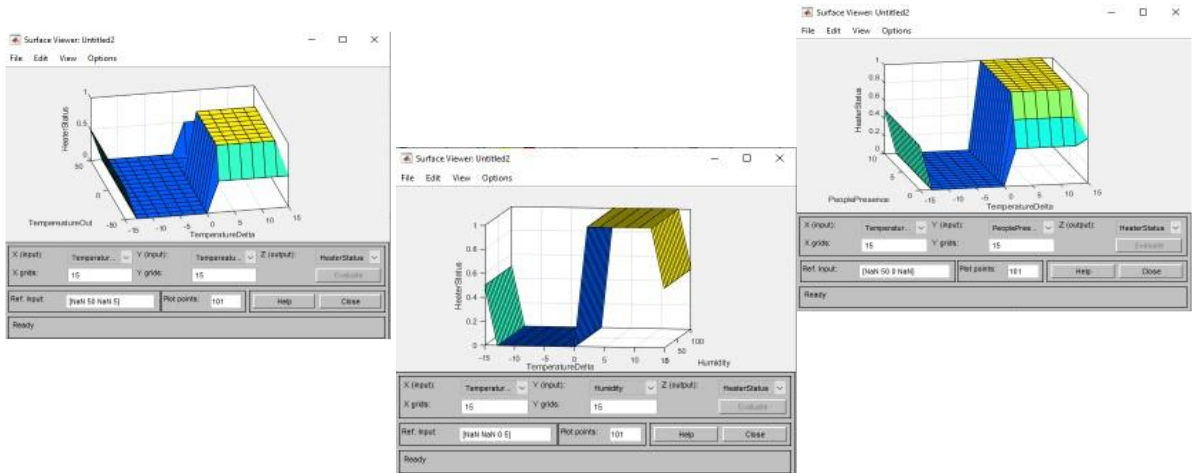
Система нечіткого логічного висновку та функції приналежності

Постановка задачі оптимізації керування опаленням



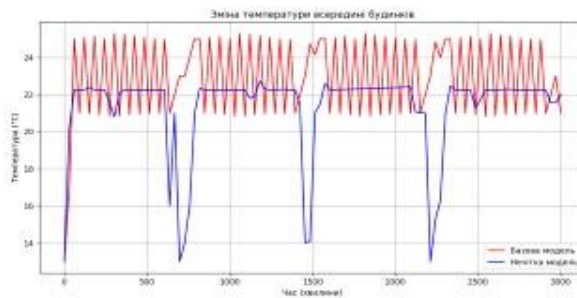
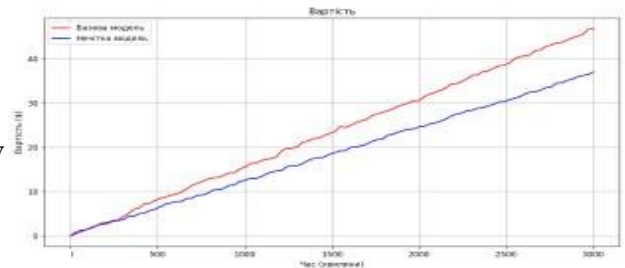
Інтерфейсні вікна Rule Viewer у matlab

Поверхні, що ілюструють залежності між вихідною змінною HeaterStatus та вхідними змінними



Оцінка ефективності системи опалення за критеріями оптимізації

Оцінка витрат палива базовою системою опалення та пропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки



Графік зміни температури при реалізації базової системи керування опаленням та пропонованою системою оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Оцінка ефективності оптимізації керування опалення у Розумному будинку

$$\Delta C = \frac{C_{base} - C_{fuzzy}}{C_{base}} \cdot 100\%$$

де C_{base} – сукупна вартість у базовій (неоптимізованій) системі, C_{fuzzy} – сукупна вартість у системі з нечіткою логікою.

$$\Delta S = \frac{S_{base} - S_{fuzzy}}{S_{base}} \cdot 100\%$$

де S_{base} – кількість вмикань у базовій (неоптимізованій) системі, S_{fuzzy} – кількість вмикань у системі з нечіткою логікою.

Оцінка ефективності оптимізації керування опалення у Розумному будинку

В результаті отримаємо значення $J_{base} = 0,7 * 46 + 0,3 * 17 = 37,3$.

та значення J_{fuzzy} : $J_{fuzzy} = 0,7 * 37 + 0,3 * 6 = 27,7$.

Показник ефективності у відсотках, було обчислено на основі формули:

$$\Delta J = \frac{J_{base} - J_{fuzzy}}{J_{base}} \cdot 100\%$$

Таким чином в результаті отримано значення 25.7%, що свідчить про досягнення задачі оптимізації у чверть у порівнянні із базовою версією системи.

Завідувачу кафедри КІС
доктору філософії, доценту
Ользі ПАВЛОВІЙ

Литвінчука Ігора Миколайовича

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-23-3

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

14 квітня 2025 року



Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Ігор ЛИТВИНЧУК

Співавтор:

Назва: ЛИТВИНЧУК_Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 5%

Коефіцієнт подібності 2: 1.6%

Мікропробіли: 13

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 1

Дата створення звіту: 2025-04-15 12:49:38.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-04-15



Доцент Андрій Нічепорук

Дата

експерт

Anti-Plagiarism v-15.260 Educational

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 8%

ID: 229447 Назва: МКР Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки Додано в БД: 2025-04-15 Автора: Ігор ЛІТВИНЧУК Керівники: Володимир ГРИГА Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	103929	834	680 (1%)	9 (1%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Ігор ЛИТВІНЧУК

Тема: Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 75

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано систему оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню _____
Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено огляд концепції реалізації системи опалення у розумному будинку. У другому розділі запропоновано абстрактну модель опису для системи опалення у будинку, що дозволило формалізувати узагальнену базову модель всієї системи опалення у Розумному будинку. У третьому розділі запропоновано систему оптимізації опалення у Розумному будинку. Визначено критерії оптимізації. У четвертому розділі проведено оцінку ефективності запропонованої системи оптимізації опалення у Розумному будинку на основі нечіткої логіки

4. Позитивні сторони роботи: Запропонована система оптимізації дозволила підвищити ефективність системи опалення у Розумному будинку шляхом зменшення витрат на паливо та зменшення коливань температури в кімнатах.

5. Негативні сторони роботи: Представлена система оптимізації опалення в Розумному будинку подана у вигляді моделі, яка демонструє основні принципи та

логіку її функціонування. Проте доцільним кроком було б також інтегрувати практичну реалізацію цієї системи, що дозволило б перевірити її ефективність у реальних умовах.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: —

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на достатньому рівні.

8. Інші зауваження: —

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 4.5 (B)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) —

д.т.н., проф., завідуюч кафедрою автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Мартинюк В.В.

“ 1 травня ” 2025р.



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Система оптимізації використання опалення в Розумному будинку на основі нечіткої логіки

Автор: Литвінчук Ігор Миколайович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Грига В.М., к.т.н, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 5% і адресується до 37 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи



Володимир ГРИГА

Гарант ОП



Олег САВЕНКО

Завідувач кафедри КІІС



Ольга ПАВЛОВА