

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПмз-02.00.00.000 ПЗ

Група АКПмз-24-1

Назар Хом'як

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут післядипломної освіти
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Хом'як Назар Мар'янович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення, синтез та моделювання системи керування тепловим об'єктом на
(назва роботи)

основі інтелектуальних технологій

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

доцент, к.т.н.

(посада)

А.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПмз-24-1

(шифр групи)

Н.М. Хом'як

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

А.І. Лагойда

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Фешанич

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут післядипломної освіти

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень другий (магістерський)

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

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«__» _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Хом'як Назар Мар'янович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення, синтез та моделювання системи керування тепловим об'єктом на основі інтелектуальних технологій

керівник роботи Лагойда Андрій Іванович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «__» _____ 20__ року №__

2. Строк подання студентом роботи 02.02.2026

3. Вихідні дані до роботи Матеріали практик, науково-технічні журнали, довідники

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Дослідження сучасних підходів до систем автоматизованого керування тепловими технологічними об'єктами.

2. Математичне моделювання об'єкта керування. 3. Розробка системи керування тепловим об'єктом з використанням методів нечіткої логіки.

4. Розробка та імітаційне моделювання нейро-нечіткої системи керування тепловим об'єктом. Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 10.12.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження сучасних підходів до систем автоматизованого керування тепловими технологічними об'єктами		
2	Математичне моделювання об'єкта керування		
3	Розробка системи керування тепловим об'єктом з використанням методів нечіткої логіки		
4	Розробка та імітаційне моделювання нейро-нечіткої системи керування тепловим об'єктом		

Студент _____
(підпис)

Хом'як Н.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Лагойда А.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на здобуття кваліфікації магістра за спеціальністю 174 - «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та освітньою програмою - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - Івано-Франківськ, 2025.

У роботі досліджено синтез і моделювання систем керування тепловим об'єктом із застосуванням традиційного ПІД-, нечіткого та нейро-нечіткого (гібридного) регуляторів. Проведено аналіз методів автоматичного регулювання, принципів роботи систем на базі нечіткої логіки та оцінено можливості MATLAB та Simulink для моделювання інтелектуальних систем керування.

Досліджено тепловий об'єкт-імітатор, визначено його вхідні та вихідні параметри, проведено експериментальні дослідження, отримано перехідну характеристику та передавальну функцію об'єкта. Моделювання системи з ПІД-регулятором підтвердило її ефективність і відповідність вимогам щодо показників якості регулювання.

Розроблено систему керування на основі нечіткого регулятора з використанням FIS Editor, налаштовано функції належності та правила користувача. Моделювання показало високу якість регулювання: перерегулювання відсутнє, коефіцієнт затухання 1, хоча час регулювання збільшений порівняно з ПІД-регулятором.

Створено нейро-нечітку (гібридну) систему на основі ANFIS Editor, проведено навчання та тестування мережі. Результати моделювання свідчать про ефективність гібридного регулятора: $\sigma = 0$, $\psi = 1$, проте час регулювання ($t = 76$ с) більший, ніж у нечіткій системі.

Ключові слова: тепловий об'єкт, нечітка логіка, нейро-нечіткий регулятор (гібридний регулятор), ПІД-регулятор, моделювання систем керування.

ANNOTATION

Master's thesis for obtaining a master's degree in specialty 174 - "Automation, computer-integrated technologies and robotics" and educational program - "Automation and computer-integrated technologies". - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano-Frankivsk, 2025.

The work investigates the synthesis and modeling of thermal object control systems using traditional PID, fuzzy and neuro-fuzzy (hybrid) controllers. The analysis of automatic control methods, principles of operation of systems based on fuzzy logic is carried out, and the capabilities of MATLAB and Simulink for modeling intelligent control systems are assessed.

A thermal object simulator is investigated, its input and output parameters are determined, experimental studies are conducted, and the transient characteristic and transfer function of the object are obtained. Modeling of the system with a PID controller confirmed its effectiveness and compliance with the requirements for control quality indicators.

A control system based on a fuzzy controller is developed using FIS Editor, membership functions and user rules are configured. The modeling showed high control quality: there is no overshoot, the damping coefficient is 1, although the control time is increased compared to the PID controller.

A neuro-fuzzy (hybrid) system based on ANFIS Editor was created, network training and testing were carried out. The simulation results indicate the efficiency of the hybrid controller: $\sigma = 0$, $\psi = 1$, however, the control time ($t = 76$ s) is longer than in the fuzzy system.

Keywords: thermal object, fuzzy logic, Neuro-fuzzy controller (hybrid controller), PID controller, control system modeling.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ’ЄКТАМИ.....	12
1.1. Теоретичні засади та провідні стратегії регулювання теплотехнічних процесів.....	12
1.2. Автоматизовані системи керування, реалізовані за принципами нечіткої логіки.....	17
1.3. Оцінка програмного середовища «MATLAB» як платформи для розробки систем керування на основі нечіткої логіки.....	20
1.4. Формулювання теми та цілей магістерського дослідження.....	22
Висновки до розділу 1.....	23
РОЗДІЛ 2	
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	24
2.1. Визначення та аналіз ключових вхідних і вихідних параметрів.....	24
2.2. Виконання експериментальних досліджень на об’єкті регулювання.....	25
2.3. Побудова передавальної функції об’єкта регулювання.....	29
2.4. Обчислення параметрів конфігурації регулятора.....	31
Висновки до розділу 2.....	35
РОЗДІЛ 3	
РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ ОБ’ЄКТОМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	36
3.1. Теоретичні засади та специфіка керування на основі нечіткої логіки....	37
3.2. Проектування регулятора, що базується на принципах нечіткої логіки.	40

3.2.1. Процедура розробки нечіткого регулятора як ключового елементу системи на основі нечіткої логіки.....	40
3.2.2. Синтез нечіткого регулятора засобами програмного комплексу MATLAB.....	44
3.3. Моделювання віртуальної системи та аналіз керування тепловим об'єктом за допомогою нечіткого регулятора.....	52
Висновки до розділу 3.....	55
РОЗДІЛ 4	
РОЗРОБКА ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ ОБ'ЄКТОМ.....	57
4.1. Основи теорії та принципи нейро-нечіткого проектування.....	57
4.2. Методичний підхід до розробки нейро-нечіткої системи керування тепловим об'єктом.....	59
4.3. Моделювання та аналіз функціонування системи керування тепловим об'єктом на основі нейро-нечіткого регулятора.....	63
Висновки до розділу 4.....	66
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
ДОДАТКИ.....	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АСК – автоматизована система керування.

ОК – об'єкт керування.

ТКО – технологічний керований об'єкт.

САК - система автоматичного керування.

ПІД - пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор.

FIS – Fuzzy Inference System.

ANFIS – Adaptive Neuro-fuzzy Inference system.

АРМ – автоматизоване робоче місце.

ІЧВ – інфрачервоне випромінювання.

ПП – програмний продукт.

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі системи управління є невід’ємною складовою технологічних процесів. Проте в промисловості, зокрема у нафтогазовій сфері, часто зустрічаються об’єкти з нелінійними характеристиками, які функціонують в умовах невизначеності, мають складну структуру зв’язків між параметрами стану та зазнають впливу зовнішніх завад. Оскільки такі об’єкти не підпадають під припущення лінійності, що використовуються в класичній теорії керування, традиційні методи регулювання часто виявляються недостатньо ефективними.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Протягом останніх 20–30 років для подолання зазначених проблем та забезпечення ефективного вирішення завдань керування все ширше застосовуються методи, що базуються на нечіткій логіці, штучних нейронних мережах та гібридних системах керування.

Сфера використання цих технологій надзвичайно різноманітна – від побутових приладів, таких як відеокамери та пральні машини, до високотехнологічних систем, наприклад, засобів наведення ракет протиповітряної оборони та керування літальними апаратами. Можливість реалізації нелінійних законів регулювання сприяла широкому поширенню цих систем, зокрема й у нафтогазовій галузі.

Саме тому обрана тема магістерської роботи, яка передбачає синтез і моделювання автоматизованої системи керування тепловим об’єктом на базі нечіткої логіки та її інтеграції зі штучним інтелектом нейронних мереж, є надзвичайно актуальною.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є розробка та синтез традиційного ПІД-регулятора, нечіткого регулятора та нейро-нечіткого (гібридного) регулятора для керування тепловим об’єктом-імітатором з подальшим порівнянням ефективності цих методів управління.

Досягнення поставленої мети передбачає розв’язання таких завдань:

1. Провести експериментальне дослідження на лабораторному об'єкті-імітаторі, описати методику проведення експерименту та отримати графік перехідної характеристики теплового об'єкта, який слугуватиме базою для подальших досліджень.

2. Виконати моделювання системи керування тепловим об'єктом із застосуванням традиційного ПД-регулювання.

3. Синтезувати та змоделювати систему керування на основі нечіткої логіки.

4. Розробити автоматизовану систему керування з використанням нейро-нечіткої (гібридної) технології.

5. Провести імітаційне моделювання та здійснити порівняльний аналіз результатів роботи традиційних, нечітких та гібридних регуляторів.

Об'єктом дослідження є лабораторний тепловий об'єкт-імітатор ТКО №12, який є частиною лабораторного комплексу «Мікропроцесорні регулятори».

Предмет дослідження є методи та алгоритми управління тепловим об'єктом із застосуванням класичних і інтелектуальних технологій.

Методи дослідження. Дослідження виконано із застосуванням теорії автоматичного управління, методів нечіткої логіки та концепцій поєднання штучних нейронних мереж із нечіткими системами.

Новизна отриманих результатів. Виконано налаштування нечіткого регулятора для управління тепловим об'єктом та створено систему керування на основі нейро-нечіткої (гібридної) технології. Проведено імітаційне моделювання та дослідження розроблених систем керування, а також здійснено порівняльний аналіз ефективності роботи систем з нечітким, гібридним і традиційним регуляторами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Тематика магістерської роботи відповідає профільному напрямку діяльності кафедри Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій і реалізується в рамках державного фінансування. Науковою основою дослідження стали результати робіт, виконаних за планами наукових досліджень ІФНТУНГ у межах держбюджетних тем: «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного

забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР № 011U605890) та «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікації постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» (ДР № 0115U007099).

Практичне значення отриманих результатів. На основі синтезованих і змодельованих структур традиційних, нечітких та гібридних регуляторів створено систему автоматизованого керування тепловим об'єктом.

Отриманий результат слугує базою для подальших наукових досліджень та лабораторних занять студентів кафедри, що проводитимуться з використанням теплового об'єкта-імітатора.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Повний обсяг магістерської роботи становить 78 сторінок: обсяг основного тексту - 69 сторінок, 42 рисунки, 2 таблиці; список використаних джерел, що включає 14 найменувань та займає 2 сторінки; 6 додатків на 7 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

1.1. Теоретичні засади та провідні стратегії регулювання теплотехнічних процесів

У практиці автоматизованого керування технологічними процесами фундаментальним завданням є забезпечення стабільного перебігу цільових режимів шляхом підтримання визначених значень ключових фізичних параметрів або їх цілеспрямованої зміни відповідно до заданої траєкторії. Саме така функція становить зміст автоматизації технологічних систем. При цьому однією з критично важливих вимог є недопущення виходу контрольованих величин за допустимі експлуатаційні межі, оскільки це може призвести до порушення технологічного регламенту або аварійних ситуацій [1].

У реальних умовах динаміка об'єкта керування визначається не лише його власними властивостями, але й впливом зовнішніх чинників, що мають стохастичний характер і описуються збурюючим сигналом $Z(t)$. Такі впливи змінюють внутрішній стан системи, що, у свою чергу, відбивається на поведінці робочих та контрольованих параметрів. Збурюючий вектор, як правило, містить дві складові - ті, що можуть бути виміряні засобами контролю, та невимірювані, які проявляються опосередковано через динаміку об'єкта.

З огляду на це, для забезпечення реалізації заданого алгоритму функціонування необхідно формувати та подавати на об'єкт керуючий сигнал $U(t)$, який компенсує дію збурень і забезпечує відтворення потрібних динамічних характеристик системи (рис. 1.1).

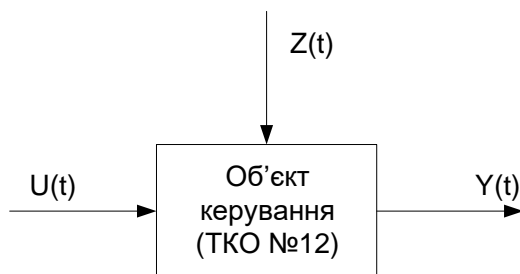


Рис.1.1. Структурна модель об'єкта керування

Структурна модель об'єкта керування передбачає наявність вихідної величини $Y(t)$, яка відображає поточний стан технологічного процесу. Цей параметр має підтримуватися на встановленому рівні або змінюватися відповідно до наперед заданої функціональної залежності. Керувальний вплив $U(t)$ виступає регулюючим сигналом, що подається на об'єкт для формування необхідного режиму роботи. Маніпулюючи значенням $U(t)$, система керування забезпечує корекцію витрати матеріальних чи енергетичних потоків, тим самим впливаючи на динаміку та стабільність процесу.

Сутність задачі автоматичного керування полягає у синтезі такого закону зміни керувального сигналу, який забезпечує реалізацію заданого алгоритму функціонування об'єкта навіть за умов дії зовнішніх збурень [2]. Для досягнення цієї мети застосовують три базові концепції організації керування: управління в режимі розімкнутого контуру, компенсацію збурювальних впливів та регулювання на основі зворотного зв'язку.

Теплові об'єкти є невід'ємними елементами широкого спектра технологічних процесів і виробничих систем. Їх функціонування пов'язане з нагріванням або охолодженням газових та рідинних середовищ, а також зі збереженням матеріалів у строго визначених температурних умовах. У сучасній промисловості практично неможливо знайти виробництво, в якому не застосовувались би теплотехнічні установки.

До типової групи таких об'єктів належать теплообмінні апарати різних типів, трубчасті печі, холодильні установки, конденсатори, системи підтримання мікроклімату, вентиляційні агрегати, котли та котлоагрегати, а також змішувальні

теплообмінники. Нафтогазова промисловість демонструє особливо широке використання подібного обладнання — від комплексів підготовки бурових розчинів до технологічних систем на нафтопереробних і газопереробних заводах.

З позицій автоматизації керування теплотехнічними процесами є вельми складним завданням, оскільки теплові об'єкти часто характеризуються значними геометричними розмірами, високими робочими тисками, великими витратами теплоносіїв та складною схемою технологічного обв'язування. У межах автоматизованого регулювання основною метою є забезпечення стабілізації температури на заданому рівні або реалізація програмно-керованого режиму, коли температура робочого середовища повинна змінюватися у відповідності до заздалегідь формалізованої температурної траєкторії (програмного завдання).

Температура як керований технологічний параметр слугує інтегративною характеристикою теплового стану середовища. У системах з інтенсивними потоками енергії саме цей параметр набуває вирішального значення, що вимагає проведення багатоканальних вимірювань - тиску, температури, витрат та інших характеристик таких робочих середовищ, як:

- свіжа, перегріта, відбірна та відпрацьована пара;
- живильна, охолоджена, хімічно очищена і мережева вода, а також конденсат;
- димові гази в зоні топки та газоходах котлоагрегатів;
- атмосферне повітря та повітря, що використовується для систем охолодження турбогенераторів;
- параметри енергоперетворювального обладнання — насосів, вентиляторів, димососів тощо;
- різні види палива: тверде, рідке та газоподібне [3].

Залежно від вимог до точності терморегулювання застосовуються різні принципи та методи підтримання температури, що визначають структуру та функціональні властивості системи автоматичного керування.

Спосіб 1. Позиційне (релейне) керування.

Цей метод регулювання характеризується прийнятною якістю керування для

об'єктів із незначними динамічними затримками. Позиційні регулятори застосовуються переважно для керування дискретними виконавчими механізмами, які працюють у режимах двопозиційного перемикавання.

Типовим прикладом є керування температурою шляхом подачі або відсутності подачі електричної потужності на нагрівальний елемент. У такій системі нагрівач може перебувати лише у двох станах — повністю увімкнений або повністю вимкнений. Алгоритм функціонування релейного регулятора можна описати наступним чином:

- Нагрівач працює доти, доки температура об'єкта не досягне встановленого значення SP .

- Керувальний вихід Y вимикає нагрівач, щойно температура перевищує точку завдання SP .

- Повторне вмикання нагрівача здійснюється після зниження температури до рівня $SP - H$, де H - величина гістерезису, що створює мертву зону перемикавання.

- Введення гістерезису H є необхідним для запобігання надмірно частим циклам включення та виключення нагрівача, що знижує зношення обладнання та забезпечує стабільнішу роботу системи [4].

Статичну залежність, що описує роботу позиційної системи регулювання, подано на рис. 1.2

Спосіб 2. Аналогове (неперервне) керування.

У системах цього типу регулювання температура підтримується у відповідності до фіксованого значення або програмно змінюваної траєкторії. Коли процес вимагає високої точності стабілізації температурного режиму, застосовують класичні ПІД-регулятори або інтелектуальні підходи — нечітке керування й нейромережеві алгоритми.

На рис. 1.3 подано принципову схему керування температурою реакційної суміші, що підігрівається у теплообміннику. Регулювання здійснюється шляхом зміни витрати палива, яке надходить у теплотехнічний апарат, що дозволяє формувати необхідний тепловий баланс і забезпечувати точне дотримання температурного режиму.

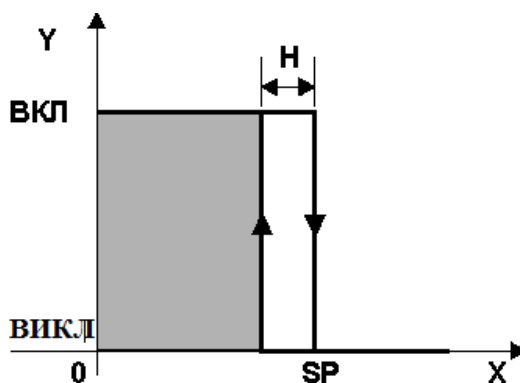


Рис. 1.2. Статична залежність, що відображає особливості роботи позиційної системи регулювання

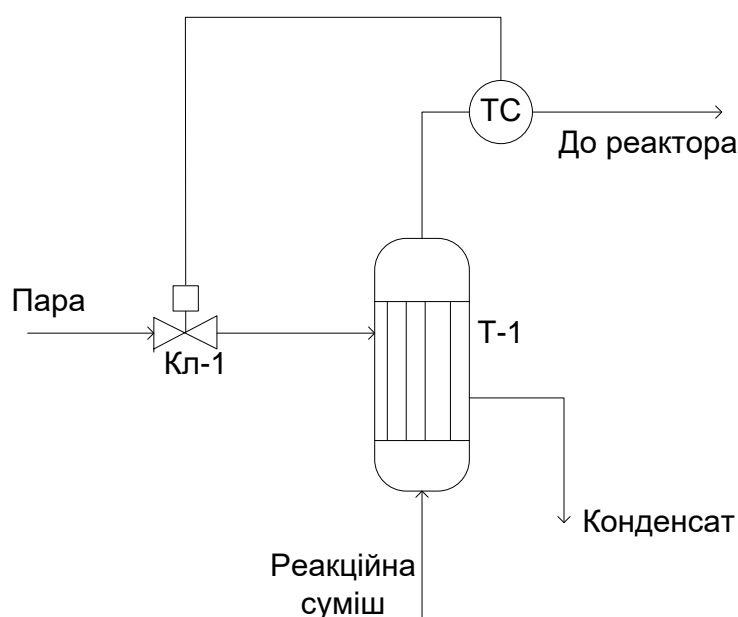


Рис. 1.3. Принципова структура системи неперервного регулювання температури

Спосіб 3. Каскадне (багатоконтурне) керування.

Цей метод регулювання передбачає формування керуючого сигналу основного температурного регулятора на основі виходу додаткового (коригуючого) регулятора.

Каскадні системи застосовуються для об'єктів із високою інерційністю по каналу регулювання, що дозволяє підвищити точність та швидкодію системи. На рис. 1.4 представлено схему каскадного регулювання температури в реакторі, де основним керованим параметром є температура реакційної суміші, а додатковою змінною виступає температура суміші на виході теплообмінника, що надходить у

реактор.

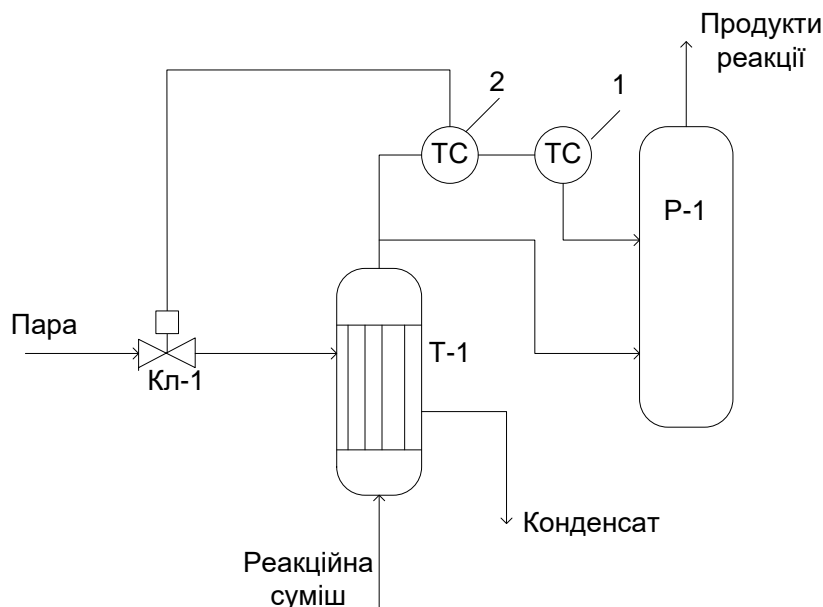


Рис.1.4. Принципова схема багатоконтурного регулювання температури в реакторі P-1

Аналіз роботи одноконтурних і каскадних автоматизованих систем керування демонструє, що завдяки високій швидкодії внутрішнього контуру каскадної АСК значно покращується якість перехідного процесу, особливо при компенсації збурень, що впливають на канал регулювання. У цьому випадку ефективна інерційність еквівалентного об'єкта зменшується порівняно з інерційністю основного регулювального каналу [5].

1.2. Автоматизовані системи керування, реалізовані за принципами нечіткої логіки

Інтенсивний розвиток та вдосконалення систем автоматичного керування вказує на те, що традиційні методи контролю технологічних процесів часто не враховують неповноту інформації та лінгвістичну (словесну) невизначеність рішень, що приймаються оператором. Це породжує потребу у створенні інструментів, які забезпечують аналіз ситуації та допомагають оператору приймати ефективні керуючі рішення.

Складність задачі керування зумовлена високою динамічністю та невизначеністю технологічних процесів у промислових галузях. Високоякісне регулювання можливо лише за умови повного інформаційного забезпечення та застосування адаптивних оптимальних методів керування. У цьому контексті постала потреба у розробці високоефективних автоматизованих систем управління технологічними процесами та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, здатних функціонувати за умов невизначеності.

Одним із ефективних підходів до вирішення цієї проблеми є застосування методів нечіткої логіки та теорії нечітких множин, запропонованих професором Лотфі А. Заде (Lotfi A. Zadeh). Ці методи дозволяють синтезувати архітектуру систем керування та алгоритми їх роботи, а також інтегрувати нейромережеві підходи для підвищення інтелектуальних можливостей систем. У рамках цієї методики прийнятним математичним апаратом виступають теорія нечітких множин та методи нечіткої логіки [6].

Системи нечіткого логічного виводу відіграють ключову роль у численних застосуваннях теорії нечітких множин, включаючи нечіткі експертні системи та контролери. Функціонування таких систем базується на правилах виду «Якщо ..., то ...», де умова (антецедент) та висновок (консеквент) представлені у формі нечітких понять. Подібні наближені судження відображають природну здатність людини оперувати нечіткою інформацією: розуміти мову та жести, розпізнавати складні образи, такі як почерк або голос, і приймати рішення в умовах неповної визначеності та складного середовища.

Для повного опису та формалізації таких систем теорія нечітких множин та її складові - теорія наближених суджень і теорія можливостей - передбачають введення великої кількості додаткових понять, логічних зв'язків і міркувань.

Методи побудови інформаційних моделей та систем на основі теорії нечітких множин значно розширюють традиційні сфери застосування обчислювальної техніки, формуючи окремий науково-прикладний напрямок, відомий як нечітке моделювання. На сьогоднішній день нечітке моделювання є одним із найперспективніших і стратегічно важливих напрямів прикладних досліджень у

галузі автоматизованого керування та підтримки прийняття управлінських рішень.

У сфері керування технічними системами застосування нечіткого моделювання забезпечує більш точне та адекватне відображення поведінки об'єкта порівняно з традиційними аналітичними моделями та класичними алгоритмами управління.

Методологічною основою нечіткого керування є нечітка логіка, яка здатна природніше відтворювати особливості людського мислення та процес прийняття рішень, ніж формально-логічні системи. Використання математичних засобів для опису нечіткої інформації дозволяє створювати моделі, що максимально адекватно відображають різні аспекти невизначеності, властиві реальному середовищу [7].

Розв'язання задач керування різноманітними процесами, об'єктами або системами становить одну з ключових сфер практичного застосування систем нечіткого виводу. У цьому контексті побудова нечіткої моделі здійснюється шляхом формалізації характеристик та параметрів досліджуваного об'єкта через лінгвістичні змінні. Оскільки основними елементами систем керування, поряд із алгоритмом регулювання, є вхідні та вихідні величини, саме вони приймаються за лінгвістичні змінні при формуванні бази правил нечіткого виводу.

Головною метою керування є визначення значень вихідних керуючих змінних на основі аналізу поточного стану об'єкта, що забезпечує досягнення бажаного режиму або поведінки системи. Сьогодні для розв'язання таких задач застосовується загальна теорія керування, в рамках якої розроблено численні алгоритми визначення оптимальних законів регулювання об'єктів різної фізичної природи, зокрема в нафтогазовій промисловості.

Типовим прикладом реалізації керування є застосування ПІД-регулятора. Алгоритм його роботи базується на порівнянні вихідних параметрів об'єкта з заданими значеннями та визначенні розбіжності між ними - похибки, яка використовується для формування керуючого впливу на об'єкт.

Одним із принципових обмежень ПІД-контролерів є припущення про лінійний характер взаємозв'язку між вхідними та вихідними змінними процесу керування, що може значно знижувати адекватність моделі при вирішенні окремих

практичних задач. Іншим суттєвим недоліком є складність виконання обчислень, що здатна призводити до неприйнятних затримок у формуванні керуючих впливів під час оперативного регулювання об'єктів із високою динамікою зміни вихідних параметрів.

Нечіткі моделі та системи розробляються із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, яке реалізує алгоритми керування на основі принципів нечіткої логіки. Архітектура таких систем передбачає заміну класичних систем керування на системи нечіткого керування, реалізовані через механізми нечіткого виводу (FIS, Fuzzy Inference System) [6,7].

При створенні системи керування з використанням нечіткої моделі правила формуються на основі попередньої якісної інформації, а також із врахуванням досвіду та професійної кваліфікації експертів.

Кількість правил, що вводяться користувачем, значною мірою визначається числом значень лінгвістичних змінних. Формалізація цих змінних через визначені нечіткі множини та подальше застосування відповідних формул дозволяє обчислити елементи нечіткого відношення. Сформована база знань може використовуватися без змін або піддаватися корекції в процесі функціонування системи керування.

Методи адаптивної корекції нечіткого відношення умовно поділяють на два основні підходи. Перший полягає у самостійній вибірці правил системою керування з числа заздалегідь визначених варіантів. Другий підхід передбачає уточнення моделі на основі даних, отриманих безпосередньо від об'єкта під час керування [8].

1.3. Оцінка програмного середовища «MATLAB» як платформи для розробки систем керування на основі нечіткої логіки

На сучасному етапі ринок програмного забезпечення пропонує широкий спектр продуктів, здатних реалізовувати алгоритми нечіткого керування. У цьому розділі представлено огляд програмного середовища «MATLAB», оскільки

подальші розділи роботи присвячені моделюванню системи керування тепловим об'єктом-імітатором саме в цьому середовищі.

«MATLAB» (скорочено від англ. MATrix LABoratory - «матрична лабораторія») є інтегрованим програмним комплексом, призначеним для виконання чисельних обчислень, комп'ютерного моделювання та проведення обчислювальних експериментів. Середовище охоплює різні галузі класичної та сучасної математики і забезпечує широкий спектр інженерних застосувань [7].

Програмне середовище MATLAB поєднує сучасні технологічні розробки з функціоналом попередніх версій, включаючи командно-рядковий та високорівневий графічний інтерфейси користувача. Переваги використання MATLAB стають помітними в міру його освоєння. Середовище пропонує стандартний набір типів нейронних мереж та забезпечує можливості нечіткого моделювання через пакет Fuzzy Logic Toolbox, що включає численні функції для реалізації нечіткої логіки та нечіткого виводу. Крім того, MATLAB підтримує роботу з нейронними мережами та нейро-регуляторами.

У складі MATLAB доступні спеціалізовані модулі, які дозволяють проектувати, синтезувати, налаштовувати, програмувати, навчати, тестувати та моделювати нейромережеві, нечіткі та гібридні системи керування, контролю і обробки даних:

- Neural Network Toolbox (Neuro Net Tool);
- Fuzzy Logic Toolbox;
- FIS – Fuzzy Inference System;
- ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System.

На рис. 1.5 наведено робочий простір та інтерфейс користувача під час створення та моделювання нечіткої системи керування в середовищі MATLAB.

Сьогодні MATLAB є одним із найпоширеніших програмних продуктів у світі і широко застосовується в провідних університетах багатьох країн.

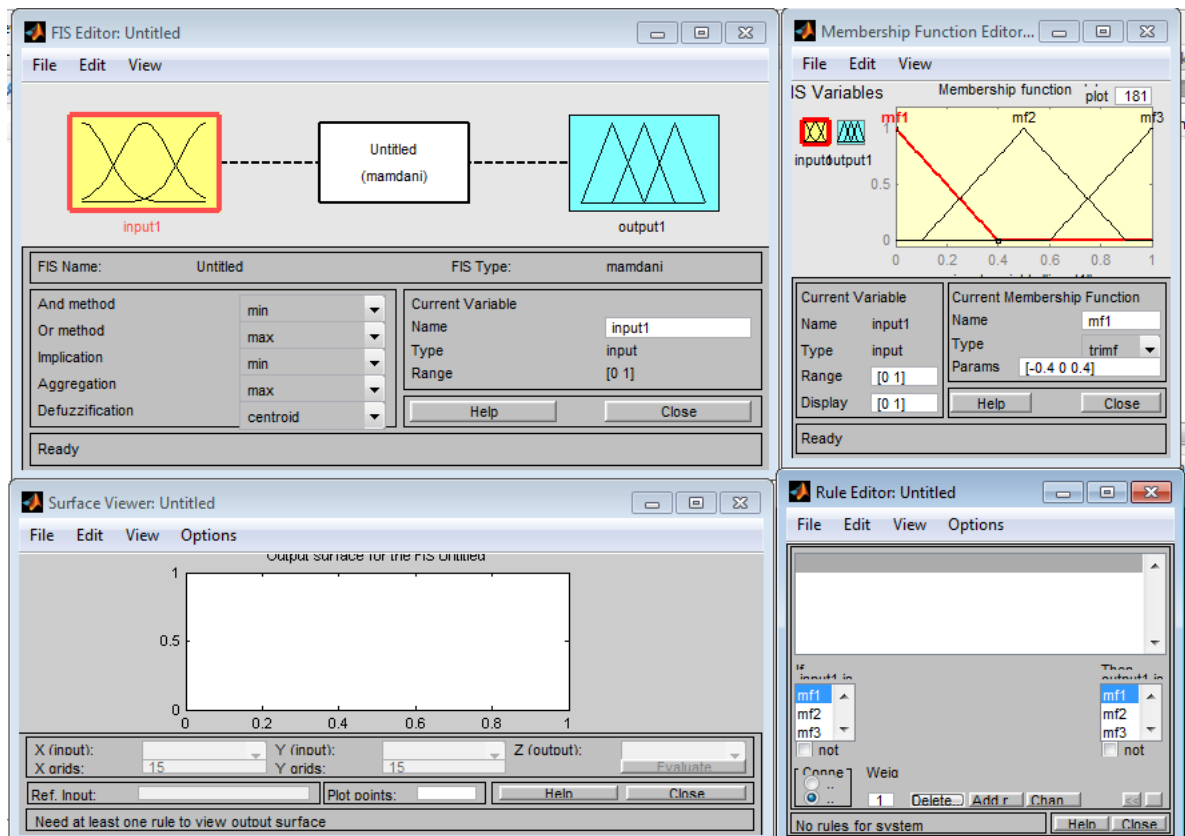


Рис. 1.5. Користувацький інтерфейс і робочий простір середовища Fuzzy Logic Toolbox

1.4. Формулювання теми та цілей магістерського дослідження

На основі аналізу сучасних підходів і методів регулювання теплових об'єктів у технологічних процесах визначено ключові задачі, які необхідно вирішити у рамках даної магістерської роботи:

- Провести експериментальні дослідження на лабораторному об'єкті-імітаторі, описати методику проведення експерименту та отримати графік перехідної характеристики теплового об'єкта (ТКО), який слугуватиме базою для подальших досліджень.
- Виконати моделювання системи керування тепловим об'єктом із застосуванням традиційних методів регулювання.
- Синтезувати та змоделювати систему керування на основі нечіткої логіки.
- Розробити автоматизовану систему керування з використанням нейро-нечіткої (гібридної) технології.

- Провести імітаційне моделювання та здійснити порівняльний аналіз ефективності традиційних, нечітких та гібридних контролерів.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі магістерської роботи виконано аналіз та наведено стислий опис основних методів автоматичного регулювання технологічних процесів у теплових об'єктах, зокрема розглянуто три способи такого регулювання. Представлено ключові поняття та принципи функціонування систем керування на основі нечіткої логіки, а також визначено мету керування у таких системах. Проведено оцінку програмного середовища MATLAB як платформи для моделювання та проектування систем керування тепловим об'єктом із застосуванням методів нечіткої логіки та нейро-нечітких мереж.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1. Визначення та аналіз ключових вхідних і вихідних параметрів

Перед початком дослідження та проведення математичного моделювання об'єкта керування необхідно визначити його основні вхідні та вихідні параметри.

Об'єктом регулювання у даному дослідженні є імітаційна модель теплового об'єкта ТКО №12. Для більш глибокого розуміння принципів його роботи доцільно розглянути структурну схему об'єкта.

Структурна схема імітатора ТКО №12 наведена на рис. 2.1.

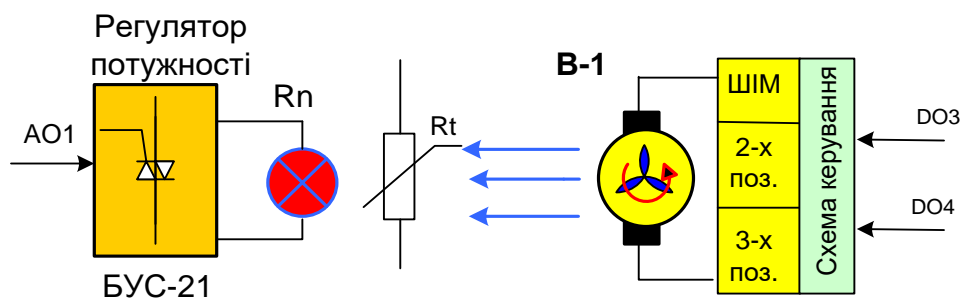


Рис.2.1. Архітектурна схема об'єкта регулювання

Як показано на рисунку, об'єкт керування (ОК) складається з наступних елементів:

- тиристорного регулятора потужності БУС-21, який отримує аналоговий сигнал АО1 від регулятора МІК-21-03;
- нагрівного елемента у вигляді лампи розжарювання Rn;
- повітряного нагнітача - вентилятора В-1 з керуючою схемою, на вхід якої надходять дискретні вихідні сигнали DO3 та DO4 від регулятора;
- датчика температури - термометра опору ТСП 50, розташованого між нагрівним та охолоджувальним елементами.

У якості регулятора для даного об'єкта застосовується вітчизняний мікропроцесорний регулятор МІК-21-03, який належить до сучасного типу цифрових безперервних регуляторів із аналоговим виходом. Ці регулятори

використовуються для управління технологічними процесами в промислових умовах і забезпечують високу точність підтримки заданих параметрів [10].

Аналіз принципу роботи та структурної схеми об'єкта дозволяє визначити вихідну величину - температуру T на об'єкті, яку необхідно підтримувати на заданому рівні. Вхідними величинами є потужність, що подається на нагрівний елемент P_H , та потужність роботи охолоджувального елемента - вентилятора P_V . Варто зазначити, що регулювання потужності вентилятора можливе лише в дискретному режимі. Для подальших досліджень приймається, що цей параметр має сталу величину, наприклад 50% або 100% потужності, тобто $P_V = \text{const}$.

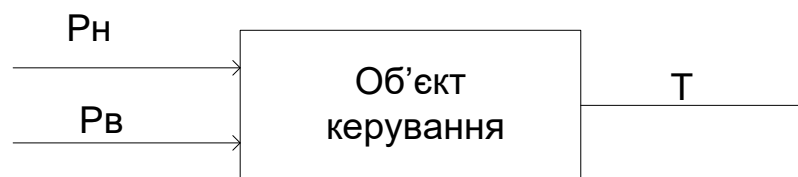


Рис. 2.2. Ключові вхідні та вихідні параметри об'єкта регулювання

Отже, підтримання заданого температурного режиму на тепловому об'єкті здійснюється шляхом регулювання потужності нагрівного та охолоджувального елементів.

2.2. Виконання експериментальних досліджень на об'єкті регулювання

Перед початком проведення експерименту на об'єкті керування та отримання перехідної характеристики ОК, що слугує базовою відправною точкою для подальших досліджень, необхідно детально розібратися в принципах роботи нашої системи автоматичного керування (САК). Для цього на рис. 2.3 наведено структурну схему даної САК.

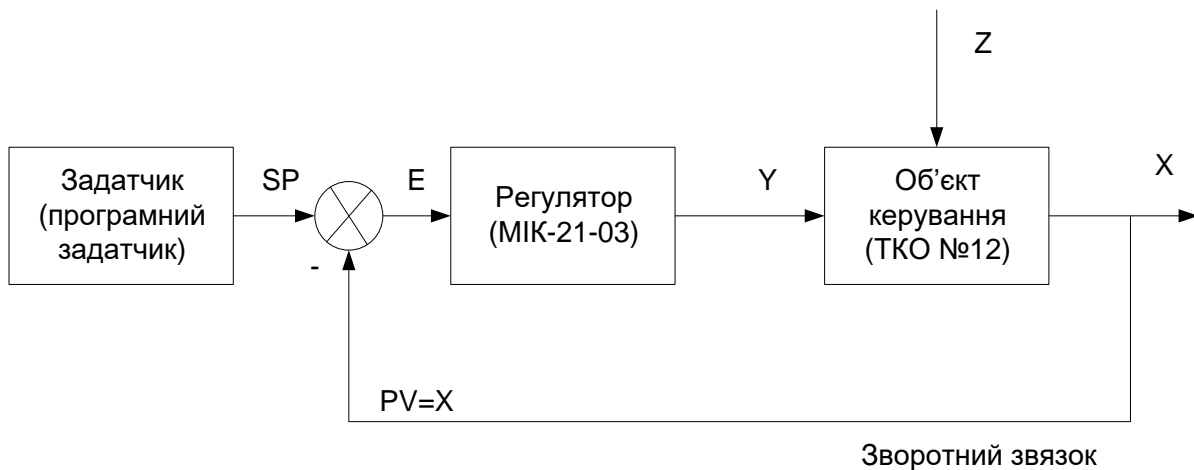


Рис.2.3. Структурна схема САК: SP - сигнал задаючого впливу (завдання), що може надходити від ручного або програмного задатчика, а в багатьох випадках - від оператора системи керування; X - контрольований технологічний параметр, у нашому випадку - температура T; $E = SP - PV$ - розбіжність між заданим і фактичним значенням параметра; Y - керуючий вплив на об'єкт керування, що формується як аналоговий вихідний сигнал регулятора; Z - зовнішнє збурення, в даному випадку сигнал від датчика температури в лабораторних умовах

У ході роботи САК здійснюється порівняння поточного значення контрольованого параметра X із заданим значенням уставки SP, після чого обчислюється та компенсується розбіжність E ($E = SP - X$).

Для отримання перехідної характеристики об'єкта керування застосовується програмне забезпечення MIC_Registration. На початковому етапі проводяться необхідні налаштування для коректного відображення перехідної характеристики. У додатку «База каналів» зазначаються адреса приладу, номер регістра та інші відповідні параметри.

База каналів												
	Шифр параметра	Адрес пристрою	Адрес регістра	Положення дец. роздільника	Нижня границя	Верхня границя	Єдиниця вимірювання	Нижня темп. границя	Верхня темп. границя	Нижня авар. границя	Верхня авар. границя	
1	МІК-21-03	11	3	"0,0"	0	60	С	0	60	0	60	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 2.4. Інтерфейсне вікно програми «База каналів»

Наступним етапом є налаштування формування екрану відображення у додатку «Конфигурирование отображения». Виконується сортування параметрів по вікнах відображення, створюється власний екран, а обраний параметр із загальної бази переноситься до бази даних цього екрану.

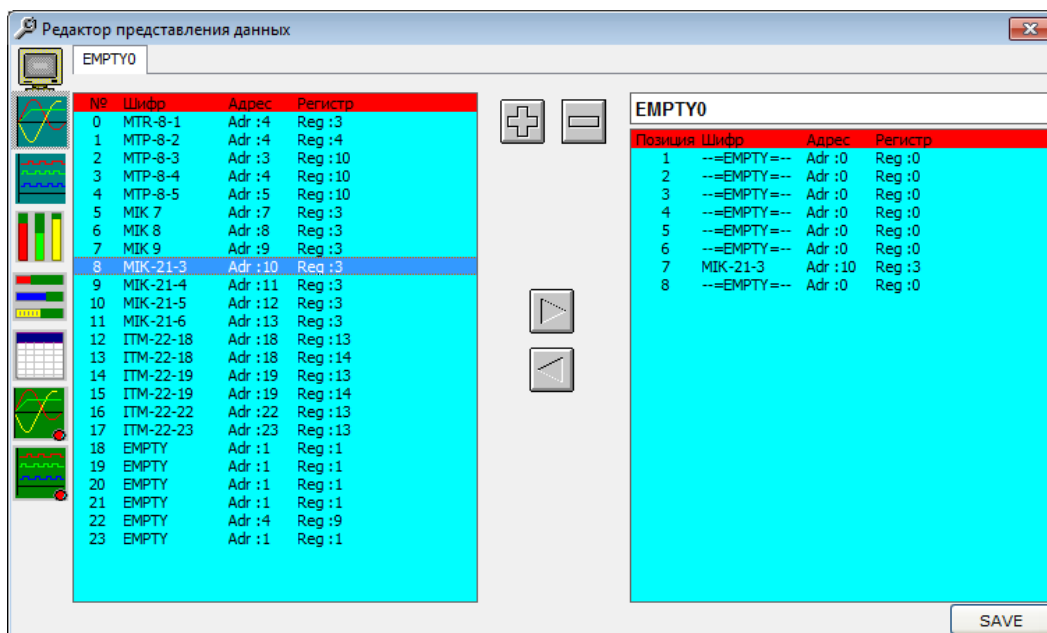


Рис. 2.5. Интерфейсное окно модуля «Конфигурация отображения»

Після формування екрану відображення та проведення необхідних налаштувань можна приступати до експериментальних досліджень та отримання перехідної характеристики об'єкта.

Спочатку включаємо вентилятор В-1 на середнє положення (перша ступінь роботи, 50% потужності) та встановлюємо на дисплеї ВИХІД регулятора значення 2% потужності нагрівання. Температура поступово зростає, доки через певний проміжок часу не досягає усталеного рівня. У даному випадку температура встановлюється на значенні $T = 42,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

На наступному етапі експерименту встановлюємо на дисплеї ВИХІД потужність нагріву на рівні 98%, створюючи тим самим збурення в системі. Відстежуємо зміну температури до досягнення нового усталеного значення, яке становить $52,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

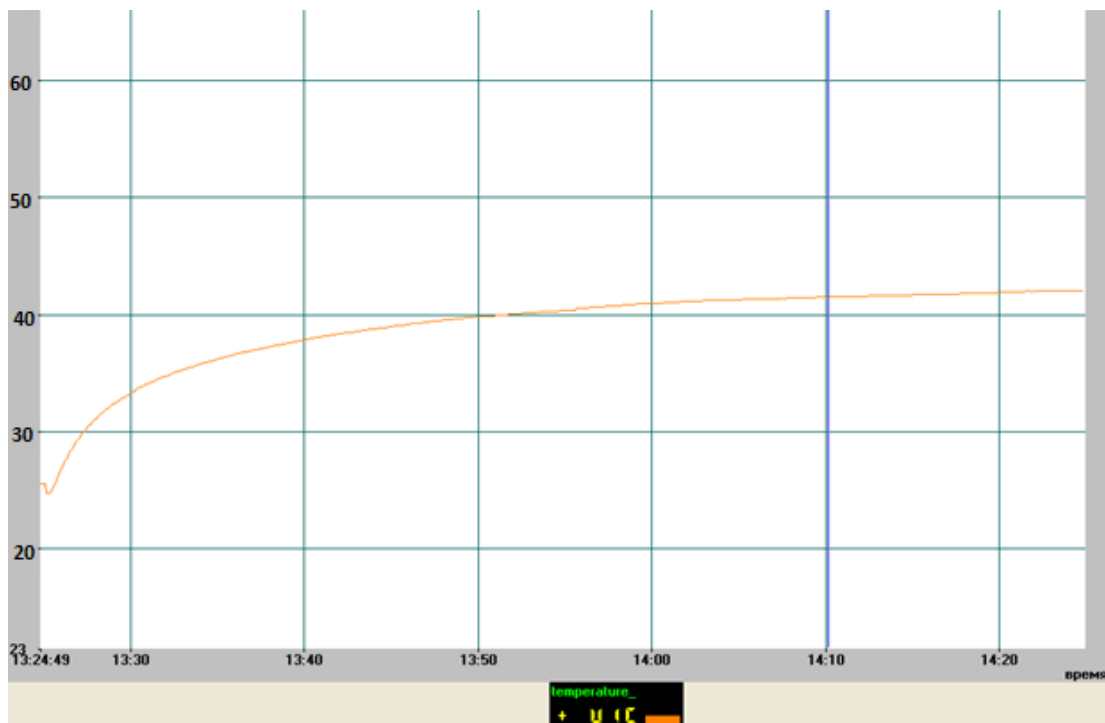


Рис. 2.6. Діаграма встановлення температури на усталеному рівні

Отже, після внесення збурюючого впливу на нашу САК шляхом збільшення потужності нагрівного елемента спостерігається підвищення температури на $\Delta T = 52,9 - 42,3 = 10,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Отримана перехідна характеристика представлена на рис. 2.7.

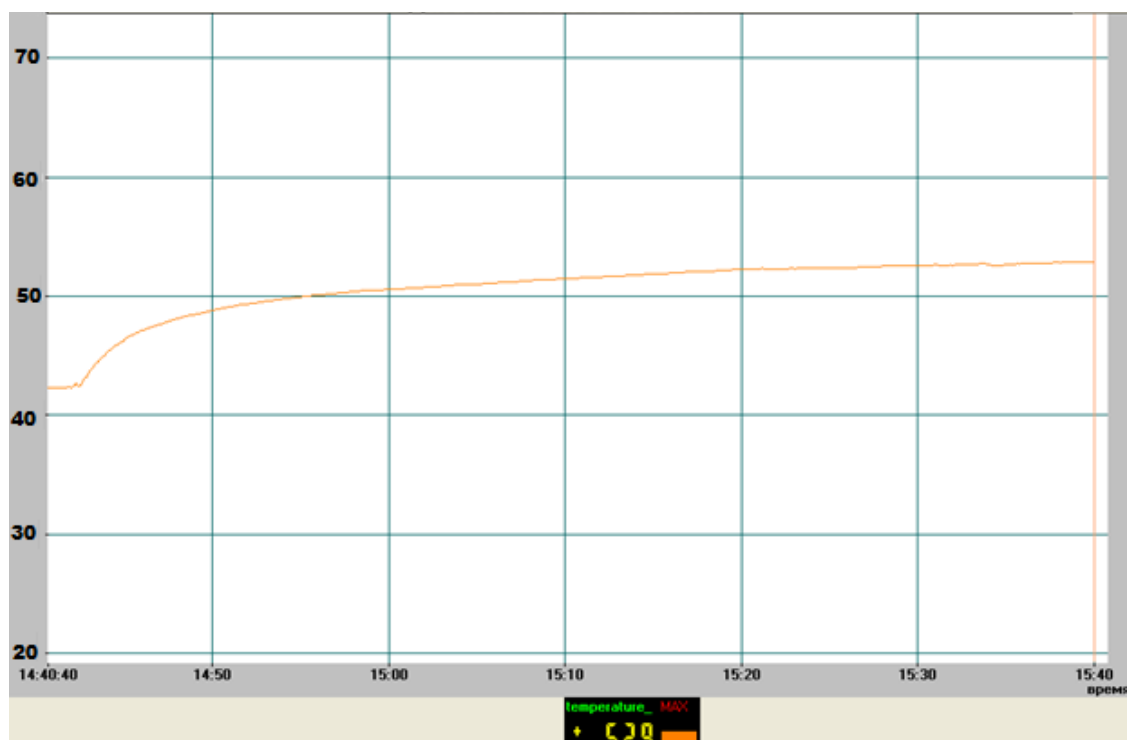


Рис.2.7. Перехідна характеристика, отримана для об'єкта регулювання

Отже, отримана перехідна характеристика об'єкта керування, що дає змогу надалі виконати його математичне моделювання, зокрема визначити передавальну функцію об'єкта регулювання.

2.3. Побудова передавальної функції об'єкта регулювання

Для визначення передавальної функції об'єкта керування на основі перехідної характеристики необхідно спочатку оцифрувати отримані дані та обробити їх, обравши відповідний крок дискретизації.

Аналіз перехідної характеристики показує, що початкова точка по часу дорівнює $t = 2,14$ хв. Це значення віднімається від наступних точок дискретизації. Крок дискретизації приймається рівним $k = 2,5$ хв.

Оцифровані результати експерименту заносяться у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Отримані результати експериментального дослідження

Параметр	Числові значення								
t, хв	0,0	0,360	2,860	5,36	7,86	10,36	12,86	15,360	17,860
T, град С	42,30	42,40	46,30	48,10	49,0	49,40	50,0	50,50	50,90
t, хв	20,360	22,860	25,360	27,86	30,36	32,86	35,36	37,860	40,360
T, град С	51,20	51,50	51,70	51,90	52,10	52,20	52,3,0	52,40	52,50
t, хв	42,860	45,360	47,860	50,36	52,86	55,36	57,860	60,360	
T, град С	52,60	52,70	52,80	52,80	52,90	52,90	52,90	52,90	

Таким чином, маючи оцифровані дані, можна побудувати перехідну характеристику в середовищі MATLAB.

Перед початком апроксимації передавальної функції необхідно привести вхідні та вихідні фізичні величини до безрозмірного вигляду. Це здійснюється за допомогою наступних формул:

$$y(t) = \frac{T(t) - T_{MIN}}{T_{MAX} - T_{MIN}}; \quad (2.1)$$

де $T(t)$ – поточне значення температури;

T_{MIN} – початкове (нульове) значення контрольованого параметра;

T_{MAX} – максимальне значення вибірки;

$y(t)$ – поточне значення температури у безрозмірному вигляді.

Після виконання необхідних обчислень отримуємо нові безрозмірні вхідні та вихідні величини, результати яких заносяться у таблицю 2.2.

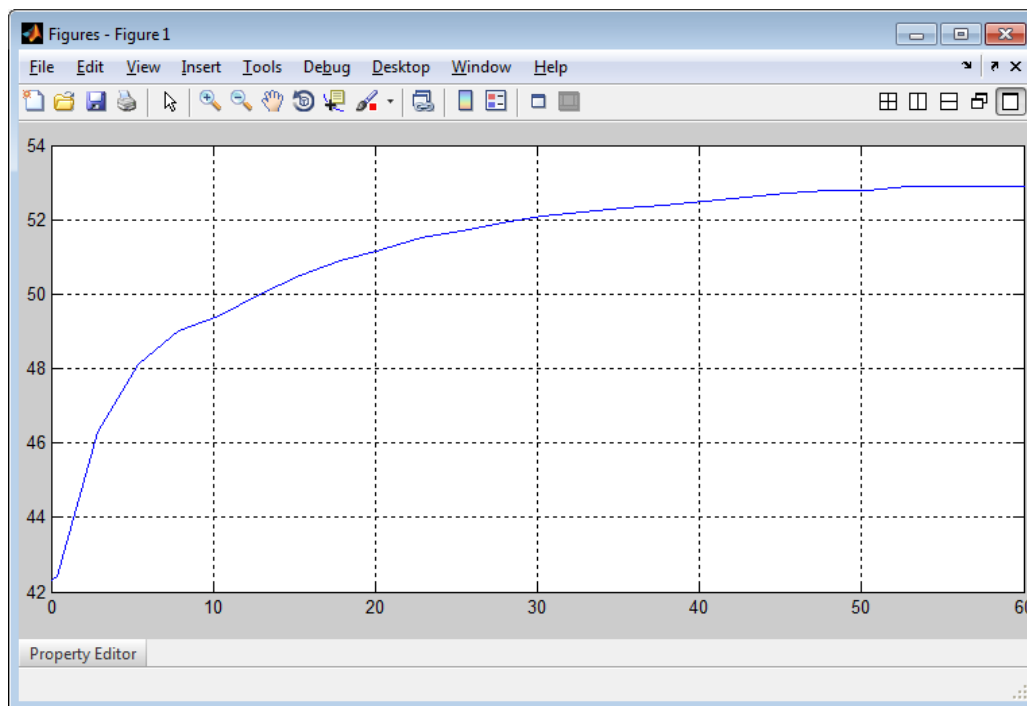


Рис. 2.8. Побудова перехідної характеристики в середовищі MATLAB

Таблиця 2.2

Вхідні та вихідні параметри об'єкта в безрозмірному представленні

Параметр	Числові значення								
	0,0	0,360	2,860	5,360	7,860	10,360	12,86	15,36	17,86
t , хв	0,0	0,360	2,860	5,360	7,860	10,360	12,86	15,36	17,86
$x(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$y(t)$	0,0	0,00940	0,37740	0,54720	0,63210	0,66980	0,7264	0,77360	0,81130
t , хв	20,360	22,860	25,360	27,860	30,360	32,860	35,36	37,860	40,360
$x(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$y(t)$	0,83960	0,86790	0,88680	0,90570	0,92450	0,9340	0,9434	0,95280	0,96230
t , хв	42,860	45,360	47,860	50,360	52,860	55,360	57,860	60,360	
$x(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1	
$y(t)$	0,9717	0,98110	0,99060	0,99060	1,0	1,0	1,0	1,0	

Виконуємо апроксимацію перехідної характеристики за допомогою програмного забезпечення Arrox.

Інтерфейс програми Arrox та графіки експериментальної і апроксимованої перехідних характеристик об'єкта керування наведені у додатку А.

За результатами проведеної апроксимації визначено передавальну функцію об'єкта регулювання.

$$W_{ok}(p) = \frac{93.4*p^2 + 11.8*p + 1}{575.9*p^3 + 193.7*p^2 + 23*p + 1} \quad (2.2)$$

Для визначення передавальної функції розімкнутого контуру регулювання необхідно врахувати коефіцієнт підсилення $W_n(p) = k(p)$ та передавальну функцію регулятора.

Коефіцієнт підсилення визначається як відношення зміни вихідної величини до зміни вхідної величини за умови нульових початкових параметрів.

У нашому випадку вхідна величина у відносних одиницях змінювалася від $R_{n1} = 0,22\%$ до $R_{n2} = 98\%$ вихідного сигналу, тобто $\Delta R_n = 98\% - 0,22\% = 97,78\%$.

Вихідна величина змінювалася від $T_1 = 42,3\text{ }^\circ\text{C}$ до $T_2 = 52,9\text{ }^\circ\text{C}$. У відносних одиницях це дає $\Delta T = (T_2 - T_1) / T_2 = (52,9 - 42,3) / 52,9 \approx 0,2$.

Відповідно, коефіцієнт підсилення визначається як $k(p) = 0,2 / 0,9778 \approx 0,2$.

2.4. Обчислення параметрів конфігурації регулятора

Вибір типу регулятора та оптимальних значень його параметрів здійснюється з урахуванням характеристик об'єкта, природи та величини збурюючих впливів, а також вимог до статичних і динамічних показників системи автоматичного керування.

Для визначення параметрів налаштування регулятора записуємо передавальну функцію розімкнутого контуру системи:

$$\begin{aligned} W'_{роз}(p) &= k(p) * W_{ok}(p) = 0.2 * \frac{93.4*p^2 + 11.8*p + 1}{575.9*p^3 + 193.7*p^2 + 23*p + 1} = \\ &= \frac{18.68*p^2 + 2.36*p + 0.2}{575.9*p^3 + 193.7*p^2 + 23*p + 1} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Визначаємо параметри налаштування регулятора за допомогою методу параметричної оптимізації в середовищі MATLAB. Для цього будемо модель системи керування в середовищі Simulink.

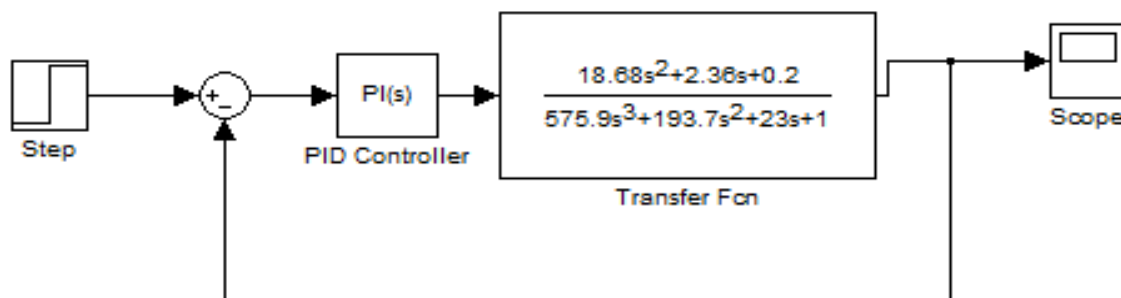


Рис. 2.9. Концептуальна модель системи автоматичного керування

У блоці PID Controller здійснюється налаштування та вибір типу регулятора. Для даного об'єкта оптимальним є PI-регулятор, тобто диференціальна складова приймається рівною нулю. Графік перехідного процесу та обрані параметри регулятора наведені у додатку Б.

За результатами дослідження отримані наступні параметри PI-регулятора:

- пропорційна складова: $k_n = 4,435$;
- інтегральна складова: $k_i = 3,095$.

Відповідно, передавальна функція регулятора має наступний вигляд:

$$W_{\text{рег}}(p) = 4.435 + \frac{3.095}{p} \quad (2.4)$$

Таким чином, визначено оптимальні параметри налаштування PID-регулятора, які після введення в відповідні поля меню конфігурації приладу МК-21-03 дозволяють реалізувати традиційний PID-контролер для керування об'єктом.

Після обчислення параметрів переходимо до моделювання створеної системи керування в середовищі Simulink. Модель запускається кнопкою Start, а у вікні Scope відображається графік зміни температури об'єкта в часі (рис. 2.10).

Аналізуючи отриманий графік перехідного процесу, можна оцінити безпосередні показники ефективності системи керування. Якість роботи автоматичної системи визначається сукупністю характеристик, що забезпечують

ефективне функціонування як об'єкта керування, так і керуючого пристрою, тобто всієї системи керування в цілому.

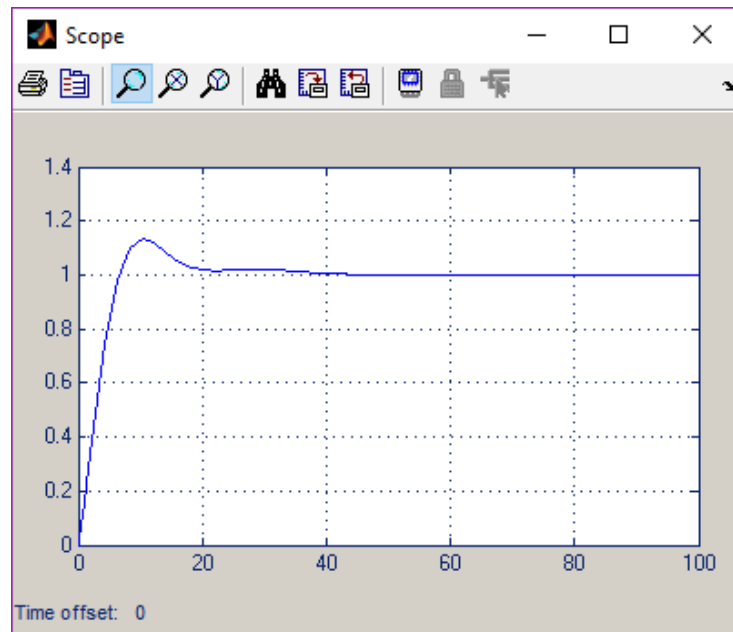


Рис. 2.10. Діаграма динаміки вихідного параметра системи (залежність температури від часу)

Непосередні показники оцінюють за графіком перехідного процесу, що формується в системі під дією ступінчастого зовнішнього впливу. Одним із ключових таких показників є величина перерегулювання.

$$\sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100, \quad (2.5)$$

де $A_1, x(\infty)$ - відповідно, це перше пікове відхилення та встановлене (стале) значення параметра.

Тривалість перехідного процесу (час регулювання) визначається як проміжок часу від моменту прикладання ступінчастого впливу до моменту, коли відхилення керованого параметра від його кінцевого значення не перевищує задану допустиму величину σ_n . Зазвичай у промислових автоматизованих системах $\sigma_n = 0,05x(\infty)$.

Одним із непосредних показників ефективності є також величина затухання:

$$\psi = 1 - \frac{A_3}{A_1}, \quad (2.6)$$

де A_1 та A_3 – послідовні пікові відхилення амплітуди одного знаку.

Дослідимо прямі якісні показники системи:

- тривалість перехідного процесу: $t = 43\text{с}$;

- величина перерегулювання: $\sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100\% = \frac{1,14 - 1}{1} \cdot 100\% = 14\%$;

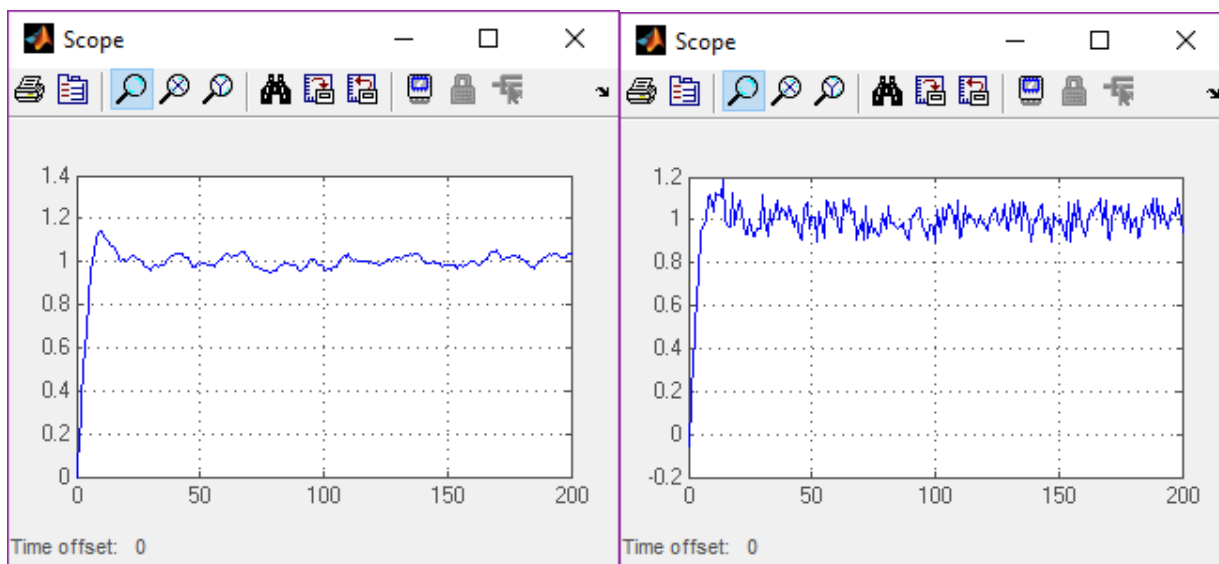
- показник затухання: $\psi = 1 - \frac{A_3}{A_1} = 1 - \frac{0,025}{0,14} = 0.82$.

Отже, аналізуючи отримані прямі показники якості системи, можна зробити висновок про достатньо високий рівень регулювання та правильність вибору і налаштування ПД-регулятора. Графічні залежності динаміки роботи системи з ПД-регулятором наведені у додатку В на рисунках В.1–В.3.

При впливі випадкових сигналів на систему керування спостерігається помітне зниження точності і якості регулювання. У канал завдання вводимо шумовий сигнал рівнем 4–6%, а в канал регулювання – збурювальний сигнал приблизно 25%. Для моделювання цих сигналів у середовищі Simulink використовується блок Uniform Noise Generator. Спочатку сигнал шуму підключається до каналу завдання через суматор із блоком Step, після чого проводиться симуляція та перегляд результатів у вікні Scope. Потім блок генератора шумів переміщується в канал регулювання, і результат моделювання знову переглядається у вікні Scope.

На рис. 2.11а показано перехідну характеристику системи при впливі шумового сигналу на канал завдання, а на рис. 2.11б – реакцію системи на введення додаткового збурювального сигналу на рівні близько 25% у каналі регулювання.

Аналізуючи графіки на рис. 2.11, можна зробити висновок, що впровадження випадкових сигналів у систему знижує точність і якість керування. Проте, у розглянутому випадку з ПД-регулюванням, цей вплив не є критичним і може вважатися допустимим.



а)

б)

Рис. 2.11. Графік динамічної реакції системи керування з класичним ПІД-регулятором при впливі: а) шумового сигналу на канал завдання; б) збурення на канал регулювання

Висновки до розділу 2

У цьому розділі магістерської роботи здійснено стислий опис теплового об'єкта системи керування та проведено аналіз його вхідних і вихідних параметрів. Детально описано процес експериментального дослідження безпосередньо на об'єкті керування з отриманням його перехідної характеристики та побудовою математичної моделі у вигляді передавальної функції, яка слугує базисом для подальших досліджень і розробок. За допомогою програми MIC_Registration отримано графічне відображення перехідної характеристики, що було використано для обробки та апроксимації з метою визначення передавальної функції об'єкта, тобто виконано математичну ідентифікацію ОК. Використовуючи ПП «MATLAB» і «Simulink», проведено моделювання системи керування тепловим об'єктом та розраховано параметри налаштування ПІД-регулятора. Оцінено прямі показники якості перехідного процесу, аналіз яких підтверджує, що розроблена традиційна ПІД-система керування забезпечує виконання вимог щодо регулювання.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ ОБ'ЄКТОМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

У зв'язку з динамічним розвитком інформаційних технологій та прагненням підвищити ефективність автоматизованих систем керування, особливо у випадках складних систем, виникає необхідність практичного впровадження нечітких систем для управління та регулювання різноманітних технічних об'єктів.

При появі нових типів задач керування, що ґрунтуються на діях і рішеннях оператора в контурі «Людина - ЕОМ», часто доводиться відмовлятися від повної точності та детермінованості. Ефективний діалог у такому контурі можливий лише за умови застосування мов, близьких до природних, які здатні описувати нечіткі категорії, наближені до людських понять і уявлень. У цьому контексті доцільно використовувати поняття лінгвістичної змінної, введене Л. Заде. Лінгвістичні змінні дозволяють адекватно передавати наближені мовні описи процесів, коли точний детермінований опис неможливий. При цьому багато нечітких лінгвістично описаних понять мають не меншу інформаційну цінність, ніж точні математичні моделі [8].

Порівняно з традиційними системами керування, системи на основі нечіткої логіки мають низку переваг, особливо помітних у сфері нечіткого управління. Насамперед, вони дозволяють ефективно відтворювати спосіб мислення людини, зокрема прийняття рішень, а також моделювати складні об'єкти за допомогою засобів природної мови.

Безсумнівно, для реалізації управління на основі теорії нечітких множин та нечіткої логіки необхідний пристрій, що формує керуючі впливи на об'єкт - такий пристрій називається нечітким регулятором (регулятором на базі нечіткої логіки).

У цьому розділі магістерської роботи досліджується структура інтелектуальної системи керування з використанням нечіткого регулятора. Нечіткі регулятори розглядаються як одна з ключових моделей у складі інтелектуальних систем керування, поряд із нейронними регуляторами та алгоритмами генетичної

оптимізації, і відзначаються високим потенціалом для формалізації та автоматизації процесів проектування.

3.1. Теоретичні засади та специфіка керування на основі нечіткої логіки

У цьому розділі розглядаються ключові підходи та основні етапи формування, налаштування, програмування, синтезу та функціонування систем керування, що базуються на принципах нечіткої логіки.

При моделюванні систем керування технологічними об'єктами з неперервними або дискретними вихідними сигналами на основі нечіткої логіки застосовується концепція нечіткого логічного виводу.

Нечіткий логічний вивід являє собою метод апроксимації залежності «вхід–вихід» шляхом використання лінгвістичних правил виду «ЯКЩО..., ТО...» та операцій над нечіткими множинами.

Функціональна схема процесу нечіткого логічного виводу в спрощеному вигляді наведена на рис. 3.1.

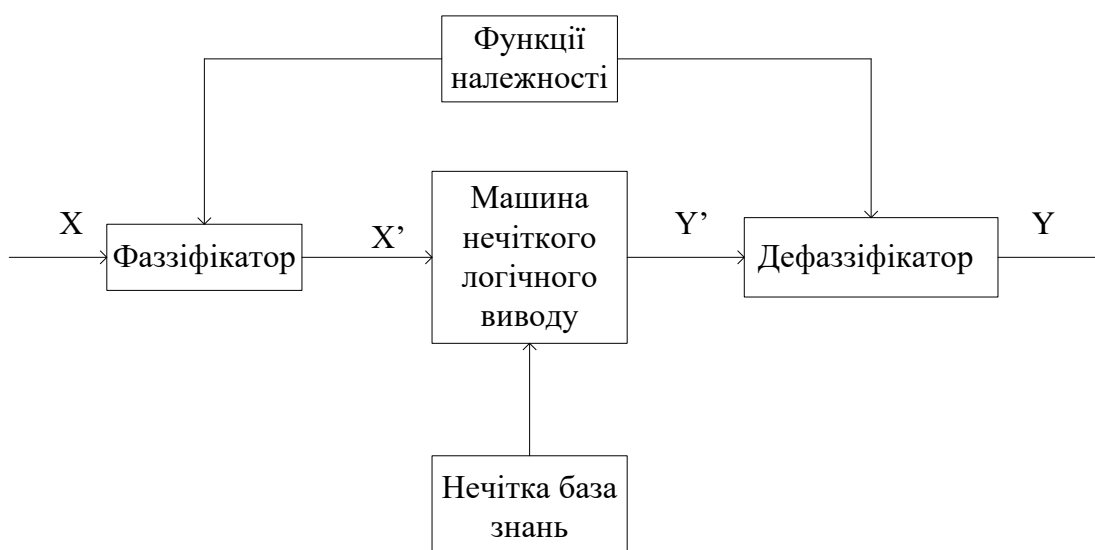


Рис. 3.1. Схематичне представлення процесу нечіткого логічного виводу

На представлений схемі перший етап нечіткого виводу виконує фаззифікатор, який перетворює точне (чітке) вхідне значення X у нечітку множину X' . Безпосереднє формування вихідної нечіткої змінної Y' здійснює машина нечіткого

логічного виводу на основі заданої нечіткої бази знань (сукупності правил). Дефаззифікатор перетворює отриману нечітку змінну назад у чітке значення Y . Для фаззифікації та дефаззифікації використовуються графіки функцій належності [11].

На сучасному етапі розроблено кілька алгоритмів нечіткого виводу, які знайшли найбільше застосування в практичних системах:

- алгоритм Мамдані (Mamdani) – один із перших методів, запропонований Ебрахімом Мамдані у 1975 році для управління паровим двигуном;
- алгоритм Цукамото (Tsukamoto);
- алгоритм Ларсена (Larsen);
- алгоритм Сугено (Sugeno) - розроблений Сугено та Такагі;
- спрощений алгоритм нечіткого виводу.

Нечіткий інференційний метод Мамдані (Mamdani) є однією з найпоширеніших методик у практиці нечіткого керування. Він став одним із перших підходів до створення систем управління, заснованих на теорії нечітких множин. Метод Мамдані був запропонований у 1975 році Ебрагімом Мамдані для управління паровим механізмом шляхом синтезу набору лінгвістичних правил, сформованих на основі досвіду операторів. Ця розробка спиралася на роботи Лотфі А. Заде (1973) та нечіткі алгоритми, призначені для складних систем і процесів прийняття рішень. Хоча інференційний процес, що описується в наступних розділах, відрізняється від оригінальних методів Мамдані, його основна концепція зберігається.

Mamdani-тип передбачає, що вихідні функції належності є нечіткими множинами. Системи типу Sugeno також підтримують моделювання подібних систем, але їхні вихідні функції належності обмежуються лінійними або постійними значеннями.

Порівнюючи традиційні методи керування з підходом на основі нечіткої логіки, можна виділити кілька переваг фаззі-логіки:

- По-перше, нечітка логіка спирається на інтуїцію експертів та практичний досвід інженерів. Вона дозволяє використовувати природну мову для опису поведінки системи, на відміну від складного математичного апарату традиційних

моделей.

- По-друге, це ефективний засіб розробки, оптимізації та побудови висококомплексних систем.

- По-третє, нечіткий підхід реалізує системний метод, який сприяє створенню стійких і надійних систем керування.

Використання нечіткої логіки доцільне в таких ситуаціях:

- коли неможливо або надзвичайно складно побудувати точну математичну модель для конкретної задачі;

- у разі наявності великої кількості параметрів, включно з нелінійними або такими, що змінюються незалежно від часу.

Водночас, у певних випадках традиційні методи керування є більш доцільними. До них варто звертатися, коли:

- задача проста і її ефективно можна вирішити класичними методами;

- існує добре вивчена та достовірна математична модель системи;

- проблема має нестандартний характер, а взаємозв'язки між змінними невідомі, і ні класичні методи, ні нечітка логіка не здатні надати адекватного рішення.

Процес розробки та моделювання системи на основі нечіткої логіки тісно пов'язаний із знаннями та досвідом експерта-технолога у відповідній сфері. Наявність практичного розуміння процесу та взаємодії ключових параметрів дозволяє фазі-логіці значно розширити функціональні можливості системи, скоротити час розробки та підвищити ефективність проектування за допомогою сучасних інструментів підтримки.

Розробка проектів із застосуванням нечіткої логіки традиційно проходить через п'ять основних етапів:

1. Формалізація задачі – визначення вхідних та вихідних змінних, зіставлення словесного опису процесу з конкретними фізичними величинами.

2. Створення бази правил управління – формування фазі-правил і визначення методу дефазифікації для перетворення нечітких вихідних даних у чіткі сигнали.

3. Off-line оптимізація – інтерактивний аналіз поведінки системи на основі

попередньо підготовлених даних або моделі об'єкта керування.

4. On-line оптимізація – підключення системи до реального об'єкта і тонке налаштування її компонентів у реальних умовах, оскільки модель об'єкта не здатна врахувати всі нюанси процесу.

5. Реалізація системи – впровадження розробленого проекту на базі нечіткої логіки в практичне керування об'єктом.

3.2. Проектування регулятора, що базується на принципах нечіткої логіки

Автоматизоване керування технологічними процесами часто відбувається в умовах невизначеності, коли необхідно враховувати фактори, що важко піддаються формалізації. Такі системи відзначаються високою складністю, через що застосування традиційних детермінованих або стохастичних моделей не завжди забезпечує необхідні характеристики. У таких випадках адекватними можуть бути математичні моделі керованих об'єктів, побудовані на основі теорії нечітких множин, що дає змогу синтезувати інтелектуальні системи керування.[12]

Проектування інтелектуальних нечітких регуляторів (фаззі-регуляторів) ґрунтується на формуванні бази "знань" із використанням методів пошуку та представлення знань. Тому створення промислових нечітких регуляторів спирається на принципи штучного інтелекту та актуальні завдання сучасної кібернетики, розвиток яких активно відбувається в США та інших науково розвинених країнах.[13]

3.2.1. Процедура розробки нечіткого регулятора як ключового елементу системи на основі нечіткої логіки

Моделювання системи керування тепловим об'єктом на основі нечіткої логіки передбачає створення користувачем нечіткого проекту (фаззі-проекту), який, як і будь-яка система керування, складається з окремих функціональних

компонентів. Типова структурна схема такого фаззі-проекту наведена на рис. 3.2.

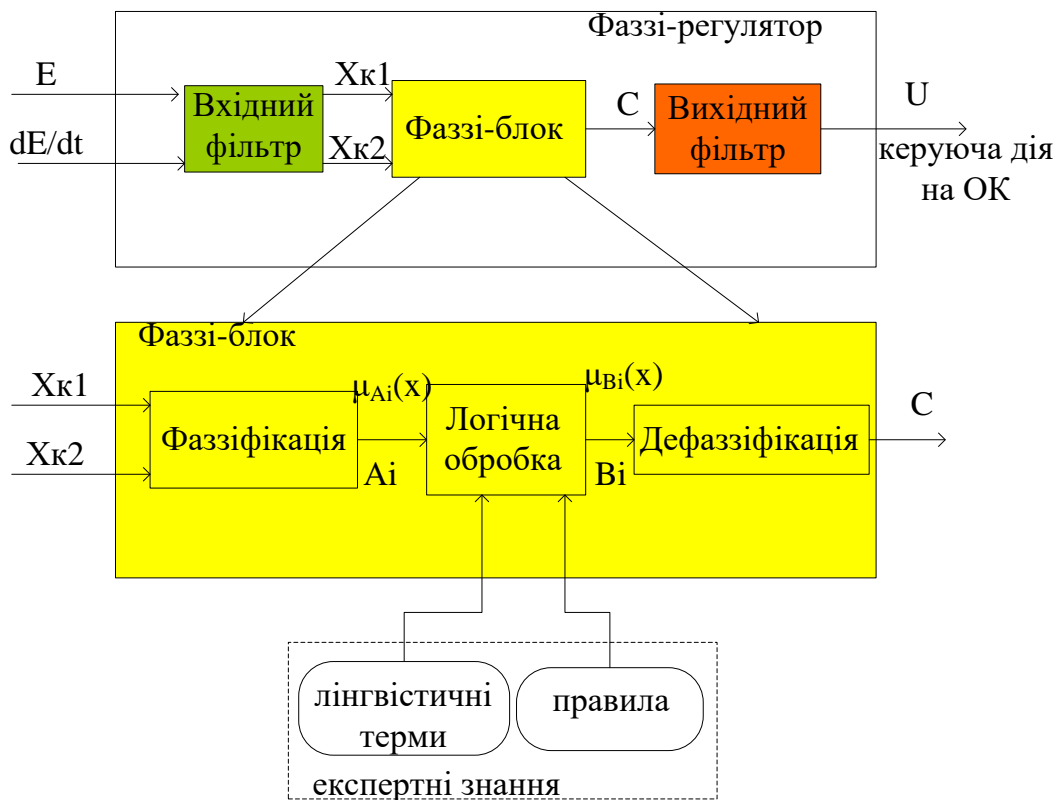


Рис.3.2. Архітектура фаззі-проекту

Сигнали розбалансу (E) та швидкості зміни розбалансу (dE/dt) надходять на вхід фаззі-регулятора, проходячи через вхідний фільтр, і потрапляють у блок фаззифікації.

На етапі фаззифікації відбувається перетворення чітких значень вхідних сигналів у відповідні нечіткі діапазони. Це дозволяє визначити, наскільки певне чітке значення належить тому чи іншому терму, а також ступінь цієї належності у відносних одиницях.

Для теплового об'єкта лінгвістична змінна «Температура» формується як множина із п'яти термів: «досить холодно», «холодно», «нормально», «тепло» та «досить тепло».

Завдяки побудові функцій належності можна обчислити ступінь належності будь-якого елемента універсальної множини до кожного терму.

Отримані нечіткі діапазони формують вихідні дані етапу фаззифікації і передаються на блок логічної обробки – інференціацію.

Отже, основними завданнями етапу фаззифікації є перевірка допустимості нечітких діапазонів, відображення контрольованих параметрів у формі нечітких множин та підготовка результатів для подальшої логічної обробки.

Як показано на схемі, на блок логічної обробки надходять дані з блоку фаззифікації вже у вигляді нечітких діапазонів, а також інформація від користувача – експертні знання. Від користувача ці дані подаються у формі правил, що мають наступну структуру:

Якщо <дані від фазифікації>, то <деякий вихідний нечіткий діапазон>

У правилах закладено експертні знання щодо дій, які слід виконати, коли реалізується одна з властивостей, визначених на етапі фаззифікації. На цьому етапі здійснюється перетворення вхідних нечітких даних у керуючі впливи (B_i), що мають нечіткий характер. [7]

Отже, результатом логічної обробки є нечіткі дані, отримані від блоку фаззифікації, правила користувача та вихідні нечіткі керуючі впливи.

Блок дефаззифікації перетворює ці нечіткі вихідні дані блоку рішень у чітку величину, що використовується для керування об'єктом. Завдання дефаззифікації є зворотним до фаззифікації: на основі нечітких множин необхідно отримати однозначний, зрозумілий комп'ютеру та користувачу результат. Перетворення нечітких даних логічної обробки у точний аналоговий сигнал є складним процесом, для якого застосовують різні методи, зокрема метод центра ваги (метод Мамдані).

Як показано на схемі 3.2, центральним елементом нечіткого регулятора (фаззі-регулятора) є фаззі-блок, який об'єднує три ключові компоненти: фаззифікацію, логічну обробку та дефаззифікацію. Проте розробка фаззі-регулятора передбачає також виконання ряду підготовчих завдань, таких як аналіз системи керування та перевірка роботи сформованого контуру регулювання.

Алгоритмічна схема створення фаззі-регулятора наведена на рис. 3.3.

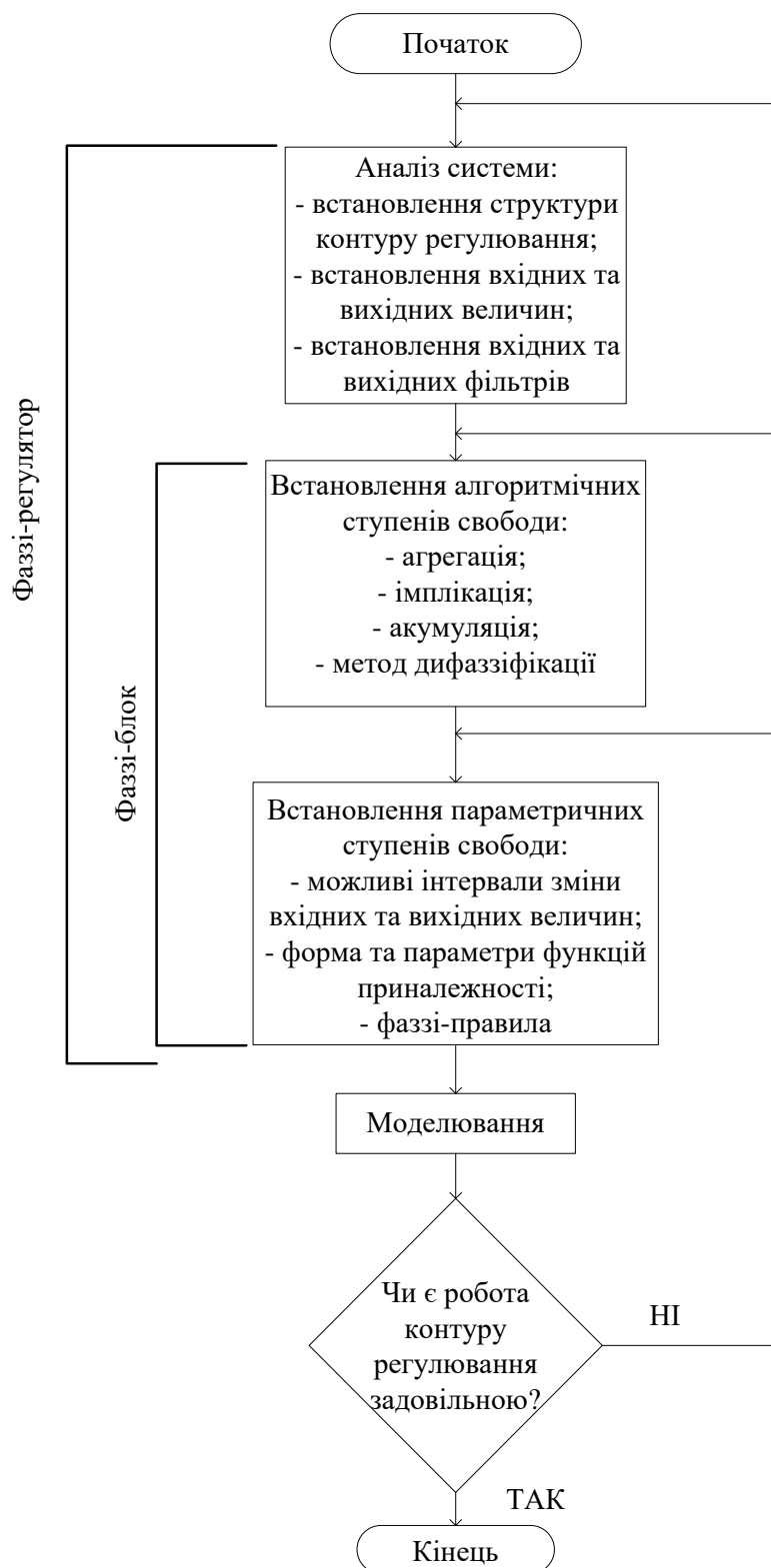


Рис. 3.3. Послідовна методика проєктування нечіткого регулятора

Процес синтезу нечіткого регулятора характеризується високою складністю та значною трудомісткістю, оскільки вимагає глибокої експертної залученості й ретельного опрацювання кожного з взаємопов'язаних етапів його формування. [14]

Після інтеграції нечіткого регулятора до структури системи керування обов'язковим кроком є імітаційне моделювання отриманого контуру, що дозволяє перевірити його відповідність заданим вимогам та забезпечити адекватність функціонування.

3.2.2. Синтез нечіткого регулятора засобами програмного комплексу MATLAB

Перш ніж перейти до практичної реалізації фаззи-регулятора та виконання початкових процедур у модулі FIS Editor, необхідно формально визначити набір лінгвістичних змінних та відповідні їм терм-множини.

У рамках побудови системи нечіткого виводу як вхідні параметри обрано дві лінгвістичні змінні:

- «Різниця між заданою та фактичною температурою».
- «Швидкість зміни розузгодження».

Після формування структурного складу вхідних величин здійснюється перехід до конфігурації фаззи-регулятора в середовищі FIS Editor, доступ до якого забезпечується командою <fuzzy> у робочому полі MATLAB. Даний редактор є ключовим інструментом графічного проектування, який забезпечує створення, налаштування та модифікацію нечітких систем керування.

Після запуску інструмента конфігурації здійснюється поетапне задання ключових параметрів нечіткої системи. Зокрема, визначаються такі характеристики:

- кількість вхідних сигналів - два (відхилення регульованої величини та його часова похідна);
- кількість вихідних сигналів - один;
- позначення вхідних змінних - “temperature” та “deriv__tem”;
- позначення вихідного параметра - “heat__power”;
- обраний тип нечіткого регулятора - Mamdani;
- метод логічної кон'юнкції (AND) - min;

- метод логічної диз'юнкції (OR) - max;
- метод імплікації - min;
- метод агрегування вихідних множин — max;
- процедура дефазифікації - centroid.

У результаті виконання всіх параметричних налаштувань робоче вікно FIS Editor формує впорядковану та повністю визначену конфігурацію системи.

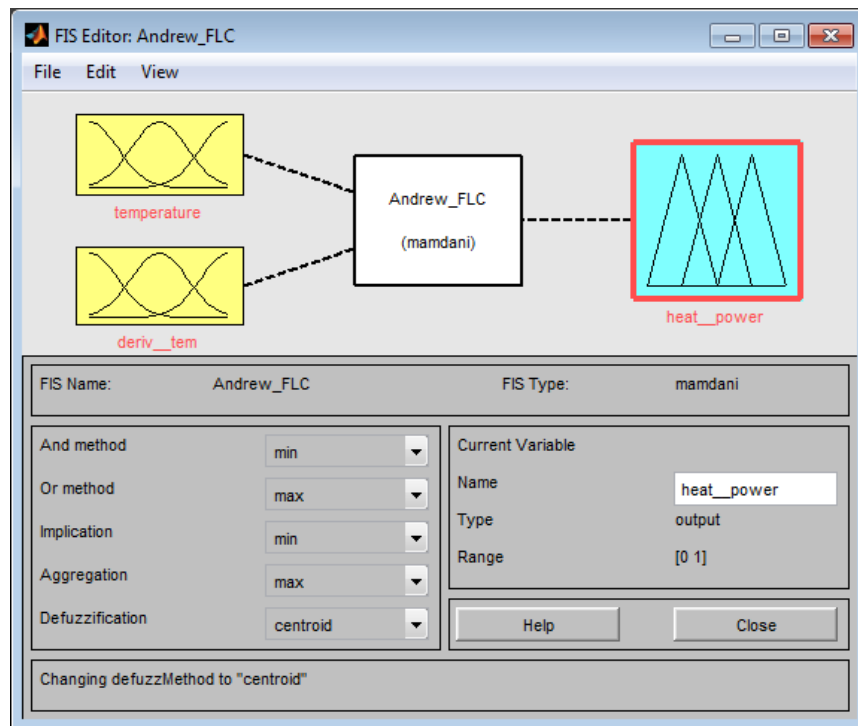


Рис. 3.4. Структурна організація фаззі-регулятора в інтерфейсі FIS Editor

Зберігши сформовану модель нечіткої системи, переходимо до другого, не менш значущого етапу - формування функцій належності.

Конструювання цих функцій здійснюється у спеціалізованому модулі Membership Function Editor, який забезпечує графічне середовище для перегляду, аналізу та коригування параметрів функцій належності, що входять до структури FIS. У цьому редакторі користувач має змогу змінювати назви, типи та числові характеристики функцій, обираючи серед одинадцяти базових варіантів або задаючи власні, кастомізовані профілі.

Після відкриття редактора розпочинається процес призначення відповідних функцій належності для кожної з вхідних і вихідної лінгвістичних змінних, що є

ключовим кроком у формуванні адекватної нечіткої моделі.

Для лінгвістичної змінної «temperature», опираючись на результати аналізу перехідної характеристики, прийmemo, що уставка температури становить 50 °C, тоді як фактичне значення може змінюватися в межах 45–55 °C. Це означає, що різниця між заданою та реальною температурою SP – PV потрапляє в інтервал [-5; 5], який у просторі функцій належності відповідає терму Z (zero), тобто області поблизу нульового відхилення.

Терм NS (Negative Small), що інтерпретується як «мале від’ємне відхилення», покриває діапазон [-10; 0], тоді як інтервал $(-\infty; -10]$ відповідає терму NB (Negative Big) - «велике від’ємне відхилення».

У протилежному напрямі терм PS (Positive Small) - «мале додатне відхилення» - описує область [0; 10], тоді як терм PB (Positive Big) - «значне додатне відхилення» - охоплює інтервал [10; $+\infty$).

Відповідні графічні профілі функцій належності для змінної «temperature», сформовані у середовищі Membership Function Editor, наведено на рис. 3.5.

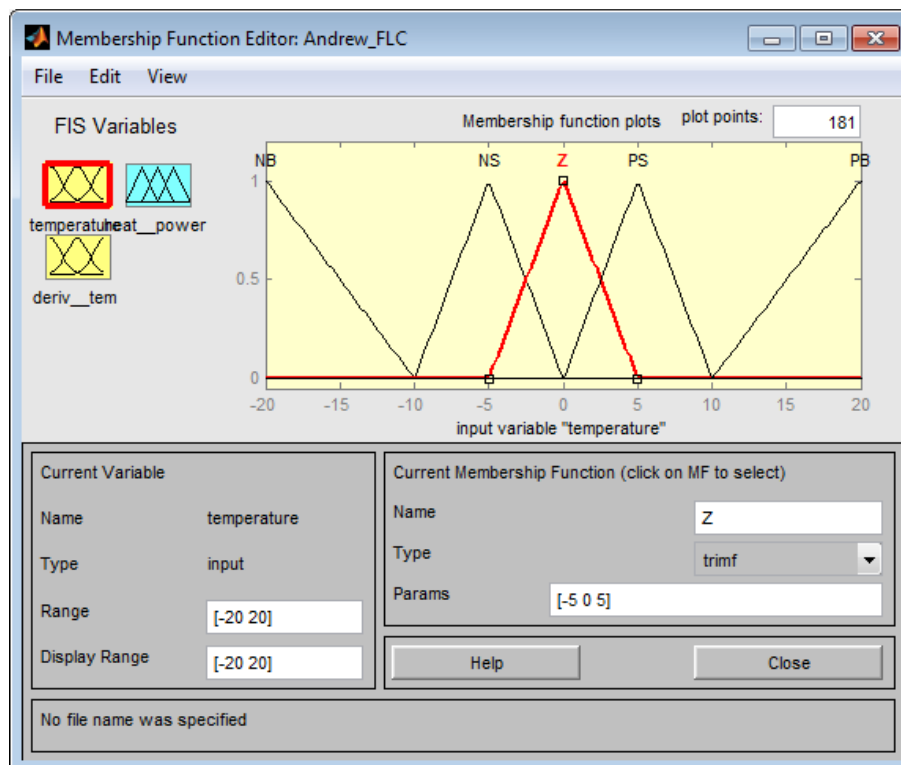


Рис.3.5. Графічне представлення функцій належності лінгвістичної змінної «temperature»

Як показано на рисунку, значення вхідної змінної «temperature» змінюється в межах $[-20; 20]$, що визначено на основі численних експериментів на об'єкті керування.

Для вхідної змінної «deriv_tem» (швидкість зміни розбалансу) передбачено три терми. Оскільки об'єкт керування характеризується значною інерційністю, функція належності терму Z («близько до нуля») охоплює діапазон $[-0,3; 0,3]$, тоді як терми N (Negative) та P (Positive) відповідають «від'ємне» та «додатне» і мають діапазони $(-\infty; 0)$ та $(0; +\infty)$ відповідно.

Графічне представлення функцій належності для змінної «deriv_tem» створене у редакторі Membership Function Editor і наведене на рис. 3.6.

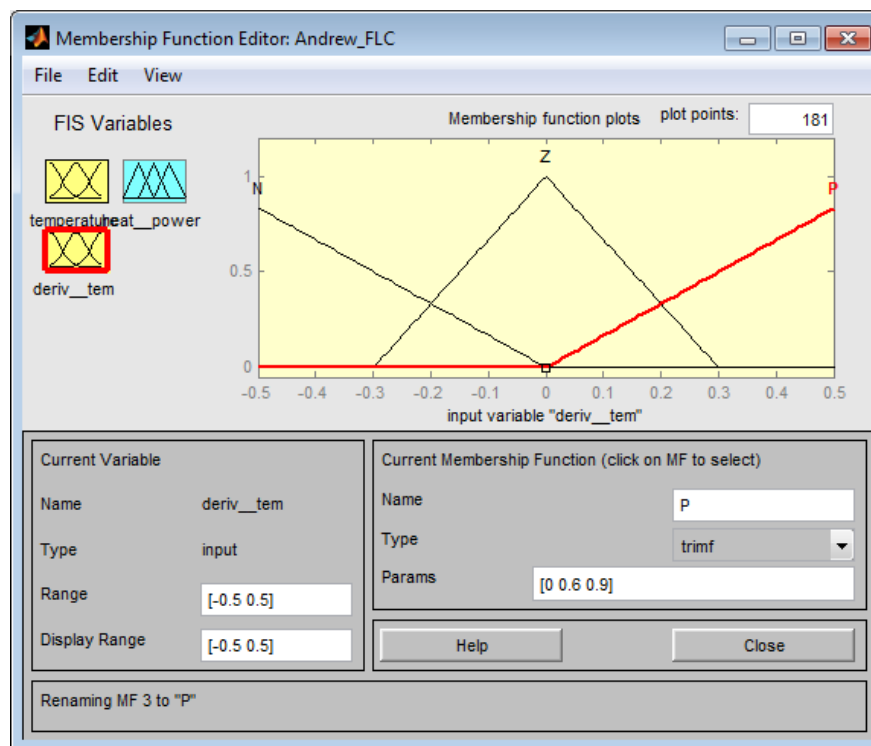


Рис. 3.6. Графічне представлення функцій належності для вхідної змінної «deriv_tem»

Як показано на рисунку, значення вхідної змінної «temperature» коливається в межах $[-0,5; 0,5]$, що визначено за результатами численних експериментів на об'єкті керування.

Наступним кроком є побудова графіків функцій належності для вихідної змінної «heat_power», яка відображає керуючий вплив регулятора на нагрівальний

елемент об'єкта керування (зміна рівня потужності).

На підставі експериментальних даних та технічних характеристик об'єкта відомо, що виконавчим механізмом є тиристорний регулятор напруги, який забезпечує зміну потужності на нагрівальному елементі, а відповідно - регулювання температури. Діапазон керування потужністю через тиристорний регулятор становить 0-100 %.

Для вихідної змінної «heat_power» встановлюємо наступні терми:

- MP (Middle Power) - середнє значення потужності, що охоплює діапазон [35; 65] %;
- SP (Small Power) – мале значення потужності, що відповідає проміжку [10; 40] %;
- ZP (Zero Power) – мінімальне значення потужності, близьке до нуля, у межах [0; 15] %;
- BP (Big Power) – велике значення потужності, що охоплює проміжок [60; 90] %;
- FP (Full Power) – максимальна потужність у діапазоні [85; 100] %.

Графічне представлення функцій належності для вихідної змінної «heat_power» побудоване в редакторі Membership Function Editor і наведене на рис. 3.7.

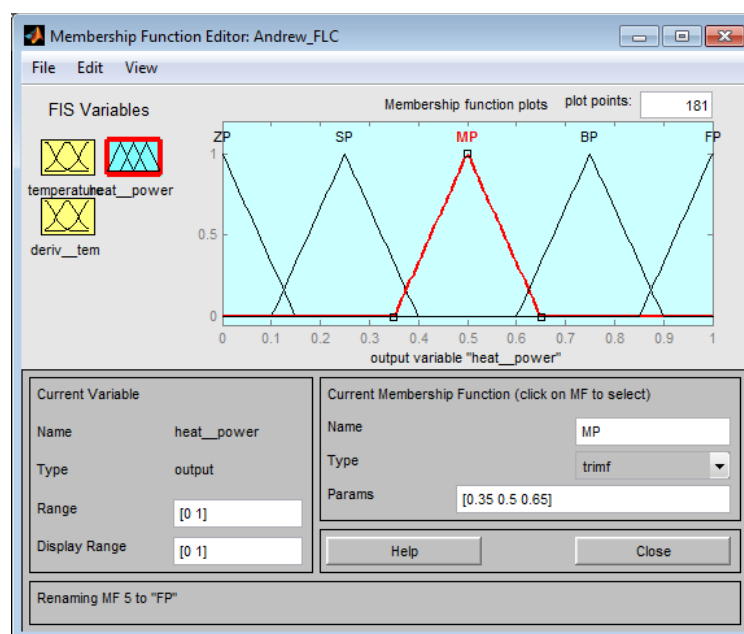


Рис.3.7. Діаграма функцій належності для вихідної змінної «heat_power»

Як видно з рис. 3.7, функція належності вихідного сигналу представлена п'ятьма лінгвістичними термами типу trimf. Концентрація термів у центральній частині функції належності спрямована на покращення стабільності вихідного сигналу та зменшення перерегулювання.

Варто зазначити, що форма термів для вихідної змінної не має такого критичного значення, як для вхідних; основне значення має розташування піку відповідного терму.

Наступним етапом розробки фаззи-регулятора є створення нечітких правил (бази знань) у форматі «ЯКЩО... ТО...», які визначають взаємозв'язок між вхідними та вихідними величинами керованого об'єкта. Формат таких правил має наступний вигляд:

ЯКЩО <відправлення правила> ТО <результат правила>

Антецедент правила (посилка) формулюється як твердження типу «Х є низький», де «низький» є термом, визначеним нечіткою множиною на універсальній множині лінгвістичної змінної Х. Для модифікації термів антецедента використовуються квантифікатори, такі як «дуже», «майже», «більш-менш» тощо.

Консеквент правила (висновок) відображає факт типу «У належить до відкритого», визначений на універсальній множині вихідної лінгвістичної змінної У.

Створення правил користувача здійснюється у середовищі Rule Editor, що дозволяє графічно аналізувати та редагувати правила системи нечіткого виводу. Також передбачена функція граматичної перевірки правил перед їх використанням у системі.

При формуванні бази правил слід враховувати, що антецедент «temperature is NB» означає, що розбаланс (різниця між заданим та фактичним значенням температури на об'єкті) має значення «Negative Big» («від'ємне велике»), що інтерпретується відповідно до визначеної формули.

$$\varepsilon = SP - PV . \quad (3.1)$$

Фактичне значення PV (сигнал від датчика на об'єкті) значно перевищує

встановлене значення SP.

Лінгвістична база правил, що забезпечує функціонування нечіткого регулятора, була сформована у редакторі Rule Editor і представлена на рис. 3.8.

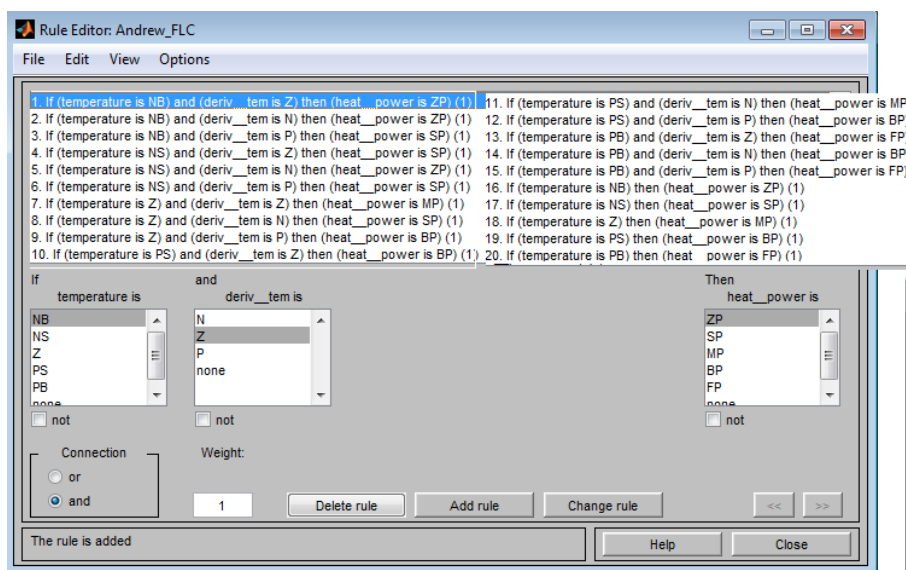


Рис. 3.8. Лінгвістична база правил для нечіткого регулятора

Після створення бази правил можна виконати візуалізацію процесу нечіткого виводу та відобразити залежність вихідних змінних від вхідних у редакторі Rule Viewer. За допомогою цього інструменту переглядаємо сформовані правила (рис. 3.9).

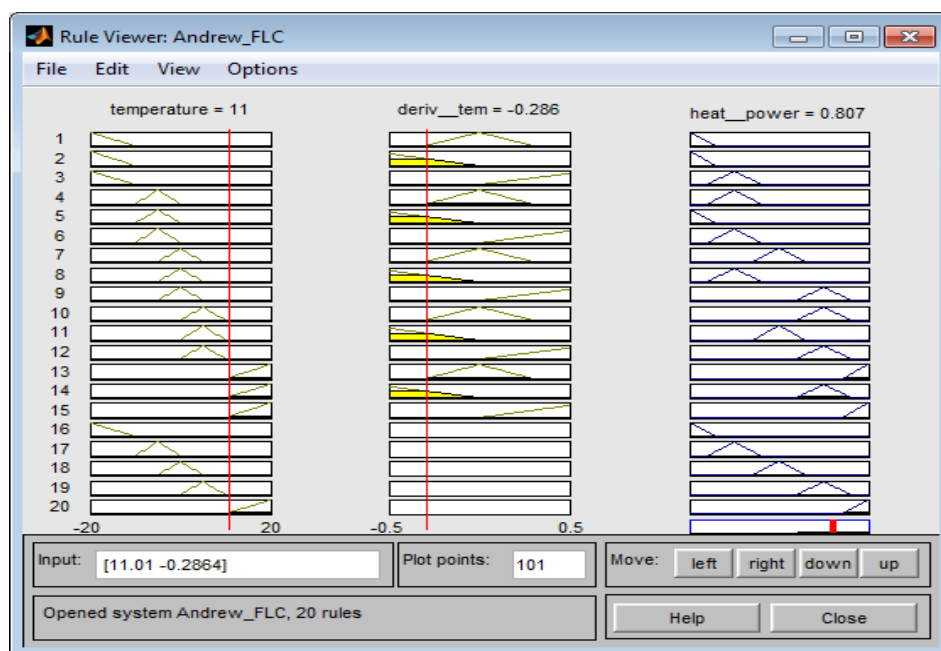


Рис. 3.9. Відображення залежності вихідних змінних від вхідних у середовищі Rule Viewer

Ця функція особливо корисна для повного відображення процесу нечіткого виводу від початкових вхідних сигналів до кінцевих вихідних значень. Користувач може оцінити вихідні величини нечіткої моделі та визначити вплив кожного правила на результат, змінюючи вхідні параметри.

Для заключного етапу аналізу розробленого нечіткого регулятора застосовується редактор Surface Viewer, який дозволяє всебічно оцінити адекватність роботи системи та дослідити, як зміни вхідних нечітких змінних впливають на вихідну величину.

Приклад поверхні нечіткого виводу в редакторі Surface Viewer наведено на рис. 3.10.

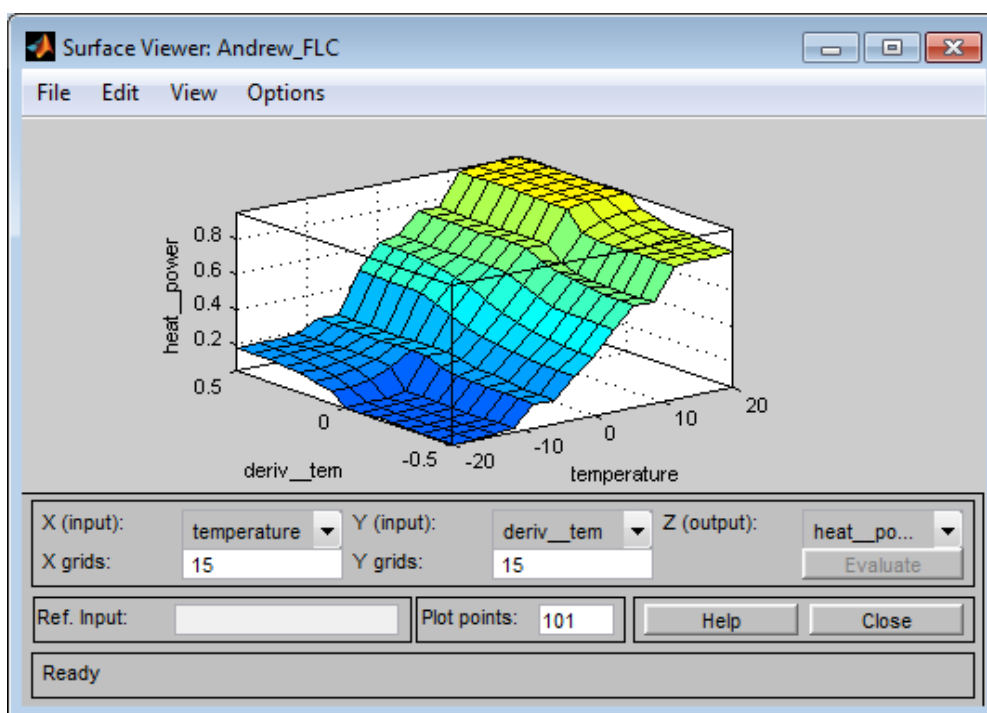


Рис. 3.10. Графічне відображення вихідної поверхні нечіткого виводу

За потреби можливо побудувати окремі графіки залежності вихідної змінної від кожної з вхідних. Оскільки у нашому випадку система має дві вхідні змінні, формуються два відповідні графіки, представлені на рис. 3.11.

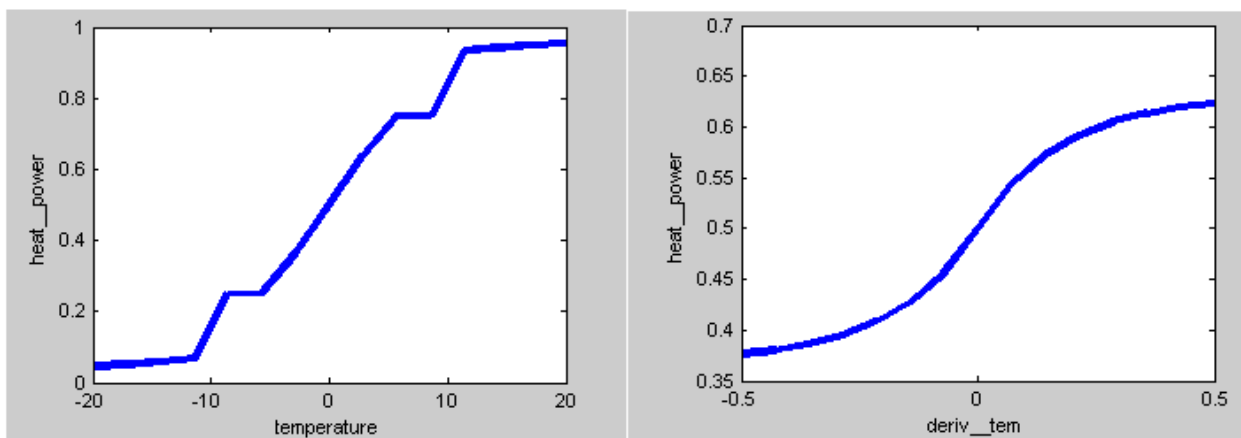


Рис. 3.11. Графіки залежності вихідної змінної від вхідних відповідно

Отже, створений у середовищі MATLAB нечіткий регулятор може бути застосований для подальшого моделювання та дослідження системи керування тепловим об'єктом.

3.3. Моделювання віртуальної системи та аналіз керування тепловим об'єктом за допомогою нечіткого регулятора

Дослідження та моделювання системи керування тепловим об'єктом із застосуванням нечіткого регулятора виконуються в середовищі Simulink пакету MATLAB.

У якості регулювального елемента в змодельованій системі використовується блок Fuzzy Logic Controller with Rule Viewer. Перед початком симуляції необхідно експортувати файл з редактора FIS Editor, що містить розроблений нечіткий регулятор, до робочої області MATLAB. У налаштуваннях блоку Fuzzy Logic Controller with Rule Viewer виконується прив'язка до цього файлу, щоб забезпечити коректну роботу регулятора.

Модель системи керування температурою теплового об'єкта із застосуванням нечіткої логіки представлена на рис. 3.12.

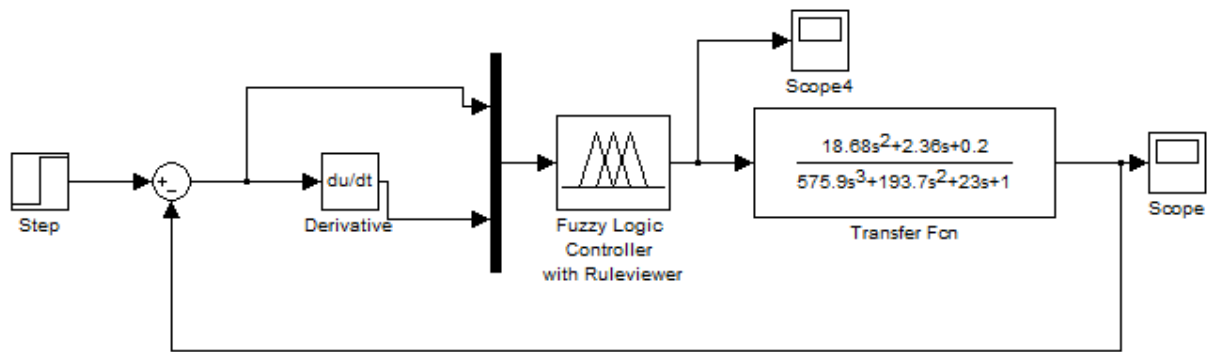


Рис. 3.12. Структурна схема системи керування з використанням нечіткої логіки

При запуску моделі кнопкою Start відкривається вікно перегляду правил користувача Rule Viewer (рис. 3.13.), у якому в режимі реального часу відображаються значення вхідних змінних, спрацьовування окремих правил, результати кожного правила, загальний вихід системи та активність термів.

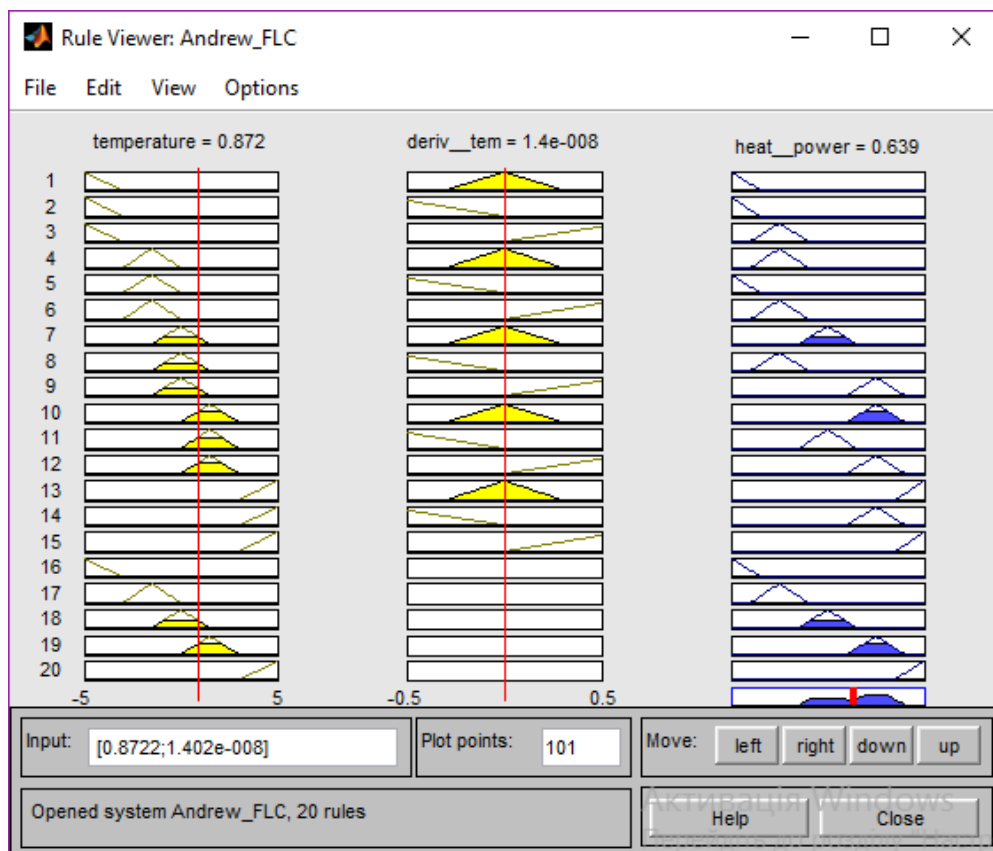


Рис.3.13. Інтерфейс перегляду користувацьких правил Rule Viewer

Подвійним клацанням на блоці Scope відкривається вікно з графіком зміни температури об'єкта у часі (рис. 3.14.).

На основі цього графіка перехідного процесу можливо оцінити прямі

показники якості регулювання відповідно до методики, викладеної у попередньому розділі.

Отже, визначимо прямі показники якості роботи системи:

- тривалість перехідного процесу: $t = 64\text{с}$;

- степінь перерегулювання: $\sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100\% = \frac{1-1}{1} \cdot 100\% = 0\%$;

- величина затухання: $\Psi = 1 - \frac{A_3}{A_1}$.

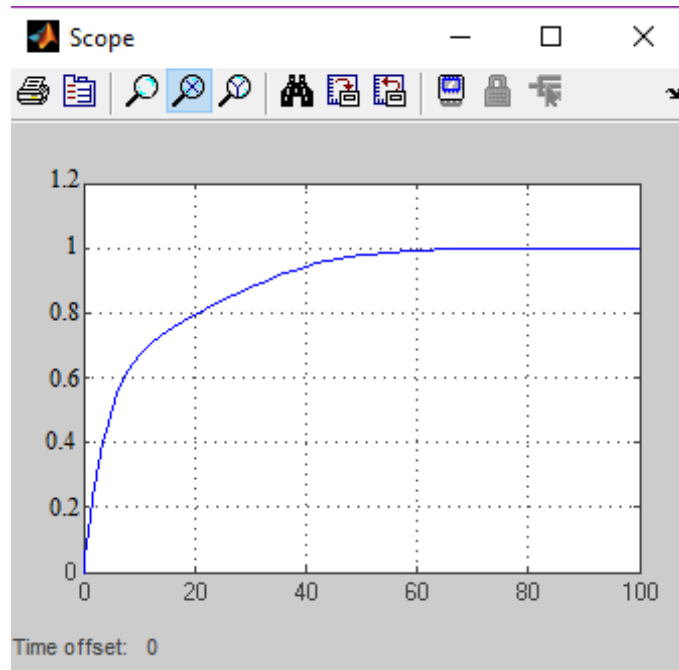


Рис.3.14. Діаграма вихідної реакції системи, що відображає зміну температури в часі

Отже, аналіз прямих показників якості демонструє, що система керування на основі нечіткої логіки забезпечує достатньо високий рівень регулювання. Графічні залежності динаміки роботи нечіткого регулятора представлені у додатку Г на рисунках Г.1 - Г.3.

Для оцінки впливу випадкових факторів на якість керування, зокрема шуму в каналі завдання та сигналу збурення в каналі регулювання, проведено моделювання зміни перехідної характеристики системи під дією цих сигналів. В середовищі Simulink для генерації шумових сигналів використано блок Uniform Noise Generator. Спершу блок підключено через суматор до блоку Step для

введення шуму в канал завдання. Після запуску симуляції результати спостерігаються у вікні Scope. Далі, блок генератора шумів переміщено в канал регулювання, і аналогічно переглянуто реакцію системи.

На рис. 3.15. а) наведено перехідну характеристику при впливі шумового сигналу на канал завдання, а на рис. 3.15. б) - реакцію системи на введення додаткового збурення приблизно 35% через канал регулювання.

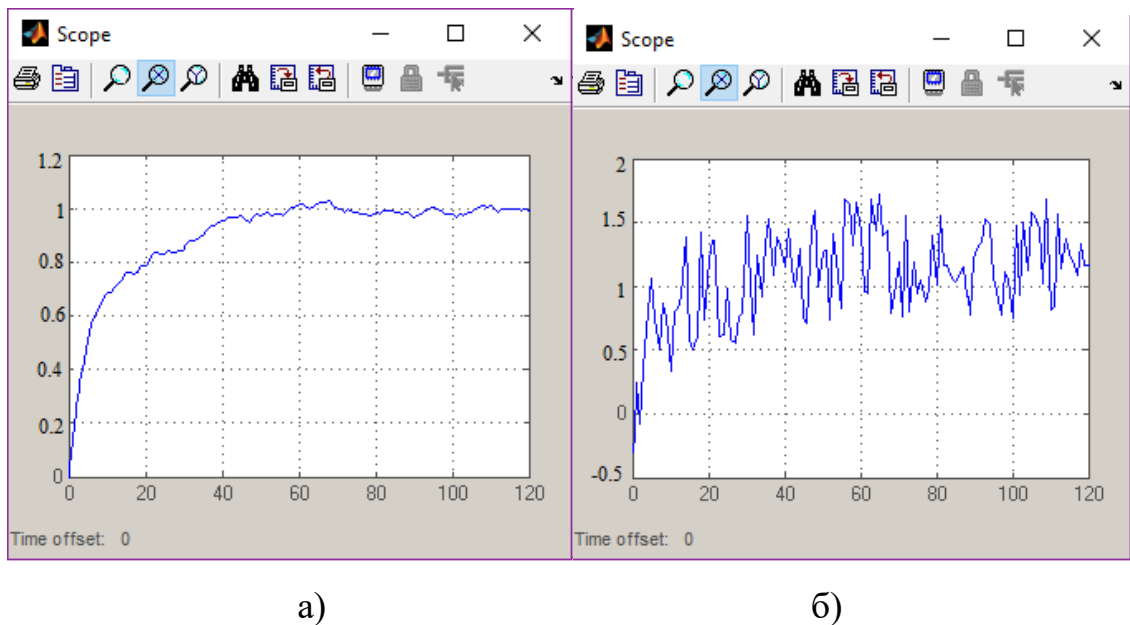


Рис. 3.15. Графічна залежність перехідного процесу системи керування на базі нечіткого регулятора при впливі: а) шумового сигналу в канал завдання; б) додаткового збурення в канал регулювання

Аналізуючи графічні залежності на рис. 3.15, можна зробити висновок, що вплив шумових і збурювальних сигналів на систему керування значно знижує точність та якість регулювання.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі розглянуто розробку системи керування тепловим об'єктом із застосуванням нечіткого регулятора. Викладено особливості управління на основі нечіткої логіки та представлено алгоритм створення нечіткого регулятора як складової частини фаззи-проекту.

За допомогою редактора систем нечіткого виводу FIS Editor виконано налаштування структури фаззи-регулятора, побудову функцій належності та формування бази правил користувача. Імітаційне моделювання розробленої системи проведено в середовищі Simulink, що дозволило отримати характеристики динаміки роботи системи з нечітким ПД-регулятором.

На основі отриманих результатів спостерігається висока якість керування. Порівняння з традиційною системою на базі ПД-регулятора показало, що в нечіткій системі перерегулювання відсутнє, а коефіцієнт затухання дорівнює 1, проте час регулювання збільшений приблизно на третину.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ ОБ'ЄКТОМ

4.1. Основи теорії та принципи нейро-нечіткого проектування

Інтенсивний розвиток нейронних мереж стимулював ідеї їх інтеграції з системами нечіткої логіки для підвищення ефективності керування технологічними об'єктами. Обидва підходи успішно застосовуються самостійно для розв'язання задач, де традиційні системи керування демонструють обмежену ефективність. У випадках, коли об'єкт керування має нечіткі або неповно описані властивості, що ускладнює побудову точних математичних моделей, зазвичай застосовують нейронні мережі або нечіткі системи.

Однією з ключових переваг нейронних мереж є їх здатність до адаптації та навчання: на основі аналізу вхідних та еталонних сигналів мережа здатна оптимізувати керування об'єктом. Після завершення навчання нейронні мережі ефективно вирішують задачі розпізнавання образів, класифікації та апроксимації. Проте знання, здобуті в процесі навчання, розподіляються між численними нейронами та зв'язками мережі, що ускладнює їх інтерпретацію людиною-оператором або наставником.

Цей недолік нейронних мереж став каталізатором для створення гібридних систем керування. На відміну від них, системи на базі нечіткої логіки не страждають від цієї проблеми, оскільки оперують лінгвістичними змінними та використовують якісні знання («як?») замість кількісних («скільки?»). Рішення в таких системах приймаються на основі правил у формі IF–THEN та функцій належності, сформованих на основі спостережень за процесом керування. Проте ключова слабкість цих систем – відсутність властивості адаптації та навчання, яка є головною перевагою нейронних мереж.

Інтеграція обох підходів дозволяє поєднати навчальні можливості та обчислювальну потужність нейронних мереж із «людським» стилем мислення

нечітких правил, що підвищує інтелектуальні властивості системи. У останні роки такі спроби інтеграції стали предметом активних досліджень і призвели до появи систем прийняття рішень, які реалізують концепцію нечіткого мислення та одночасно використовують здатність нейронних мереж до навчання.

Для впровадження та використання гібридної системи керування необхідно виконати етапи, представлені в блок-схемі алгоритму на рис. 4.1.

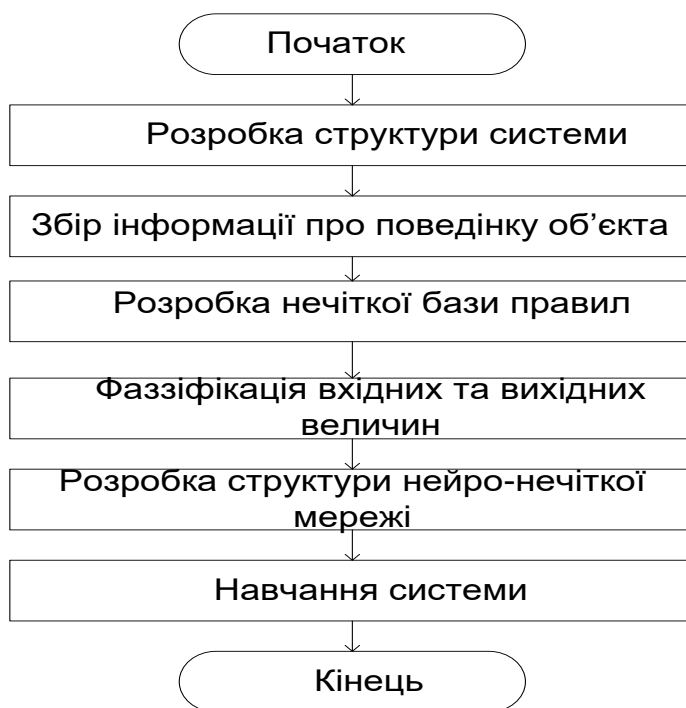


Рис. 4.1. Схема алгоритму розробки нейро-нечіткої системи керування

Математичні методи, які застосовуються в нейронних мережах, є досить складними для прямого впровадження на виробництві. Об'єднання нейрорегуляторів із нечіткими множинами та експертними знаннями у налаштуванні САУ забезпечує простоту, гнучкість і здатність працювати з нелінійними процесами, створюючи доступний та адаптивний підхід до керування складними технологічними системами. Зокрема, знання експерта щодо об'єкта керування можуть бути реалізовані через нечітку логіку, однак сама нечітка логіка не здатна зберігати історію дій системи. Тут на допомогу приходить нейронна мережа, яка використовує дані про поведінку об'єкта, що дозволяє застосовувати нейро-нечітку систему керування для пусконаладжувальних робіт, регуляторів ПІД, адаптивних систем та інших типів контролю [16].

Головною ідеєю моделі гібридних мереж є використання наявної вибірки даних для оптимального визначення параметрів функцій належності, які найкраще описують систему нечіткого виводу. При цьому для налаштування цих параметрів застосовуються стандартні методи навчання нейронних мереж.

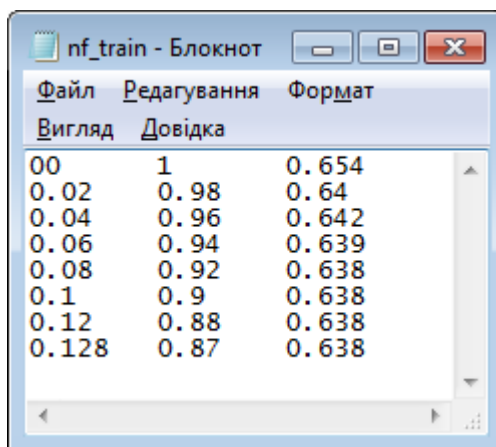
З одного боку, гібридна мережа ANFIS функціонує як нейронна мережа з одним вихідним сигналом і кількома вхідними, що представлені нечіткими лінгвістичними змінними. Термінологія вхідних змінних описується стандартними функціями належності для нечітких систем, тоді як терми вихідної змінної визначаються лінійними або сталими функціями належності (тип Sugeno).

З іншого боку, ANFIS можна розглядати як систему нечіткого виводу FIS типу Сугено першого або нульового порядку, де кожне правило нечіткої продукції має постійну вагу, рівну одиниці [7].

4.2. Методичний підхід до розробки нейро-нечіткої системи керування тепловим об'єктом

Розробка нейро-нечіткої системи керування здійснюється в середовищі ANFIS пакету MATLAB. Редактор ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) надає можливість створювати або завантажувати конкретні моделі адаптивної нечіткої системи, виконувати їхнє навчання, візуалізувати структуру, змінювати та налаштовувати параметри, а також застосовувати розроблену мережу для отримання результатів нечіткого виводу.

Першим етапом розробки є формування трьох наборів даних, які надалі використовуватимуться як навчальна, перевірна та тестова вибірки. Дані представлені у вигляді файлів із роздільниками-табуляціями (nf_train.dat, nf_check.dat, nf_test.dat). Перші стовпці цих файлів містять числові значення вхідних змінних у часі, а останній стовпець – відповідні вихідні значення. Вибірki були сформовані вручну на основі даних, отриманих під час моделювання процесу в Simulink із використанням ПІД-регулювання (вхідні величини: розузгодження системи та швидкість його зміни; вихідна величина: керуючий сигнал контролера).



Input 1	Input 2	Output
00	1	0.654
0.02	0.98	0.64
0.04	0.96	0.642
0.06	0.94	0.639
0.08	0.92	0.638
0.1	0.9	0.638
0.12	0.88	0.638
0.128	0.87	0.638

Рис. 4.2. Створення навчальної вибірки

Переходимо до роботи в редакторі Anfis Editor. Послідовно завантажуюмо дані з трьох вибірок, призначаючи відповідні файли кожній процедурі обробки. Після цього в графічному полі редактора з'являються набори точок (рис. 4.3.), що відображають координати завантажених даних. У розділі Generate FIS обираємо спосіб створення системи за допомогою Grid Partition. Після активації генерації відкривається діалогове вікно, де необхідно вказати кількість функцій належності лише для вхідних змінних мережі (рис. 4.4.). У полі введення для вхідних величин задаємо число термів для кожного параметра. З попереднього розділу відомо, що для змінної «temperature» вибрано 5 термів, а для «deriv_tem» – 3 терми.

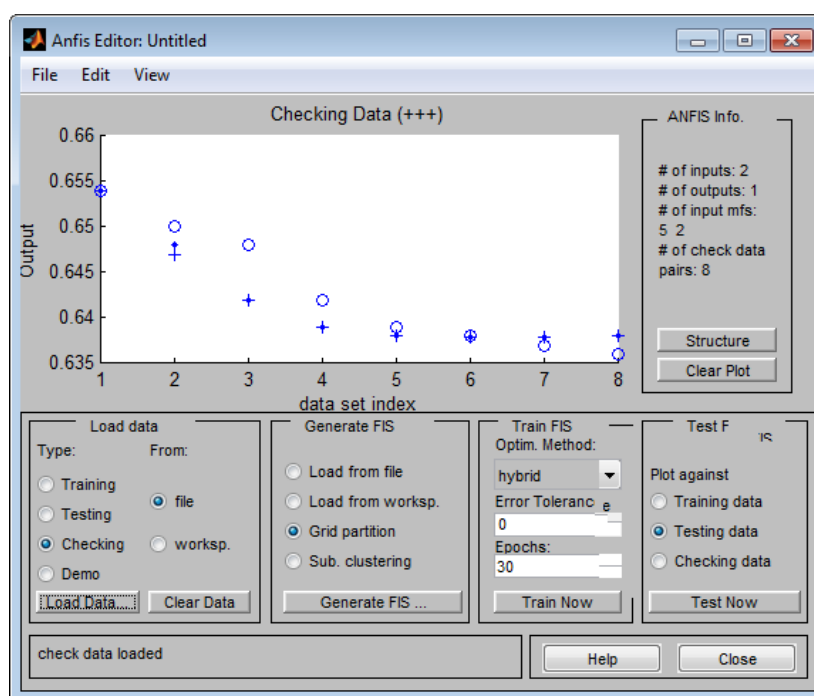


Рис. 4.3. Імпорт даних із вибірок у робочу область редактора Anfis

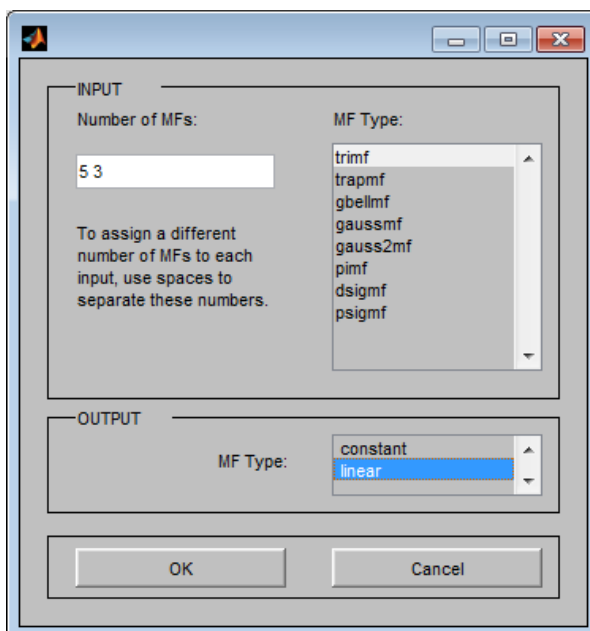


Рис. 4.4. Конфігурування параметрів функцій належності в гібридній системі

Для вхідних змінних у меню вибору типу функцій належності обираємо трикутну форму, тоді як для вихідної змінної встановлюємо лінійну функцію, оскільки вона забезпечує вищу точність порівняно з константною. Використання трикутної форми для входів пояснюється тим, що саме таку форму функцій належності застосовували у попередньому розділі при створенні нечіткого регулятора.

Отже, структура нашої гібридної системи сформована. Ознайомитися з нею можна, натиснувши кнопку Structure. Візуальне подання структури нейро-нечіткої системи наведено на рис. 4.5.

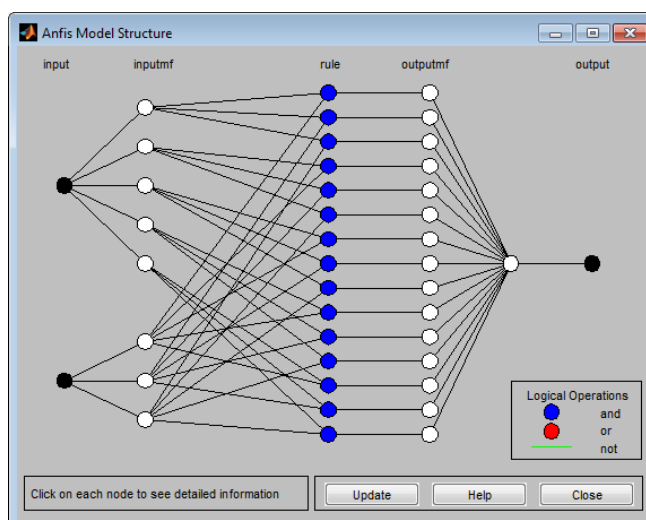


Рис.4.5. Архітектура нейро-нечіткої системи керування тепловим об'єктом

Переходимо до стадії навчання гібридної мережі. У розділі Train FIS задаємо наступні параметри: метод оптимізації навчання – гібридний, допустимий рівень похибки для зупинки – 0, а число ітерацій навчання – 50 (рис. 4.6.).

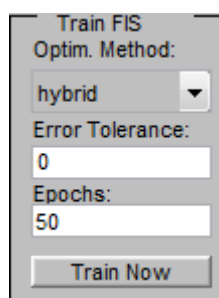


Рис. 4.6. Налаштування параметрів навчання гібридної нейро-нечіткої мережі

Запускаємо процес навчання мережі за допомогою кнопки «Train Now». Хід навчання відображається графічно як залежність величини похибки від кількості ітерацій. Після завершення цього етапу мережа вважається навченою, після чого виконуємо її тестування за допомогою кнопки «Test Now». Отримані результати тестування наведені на рис. 4.7.

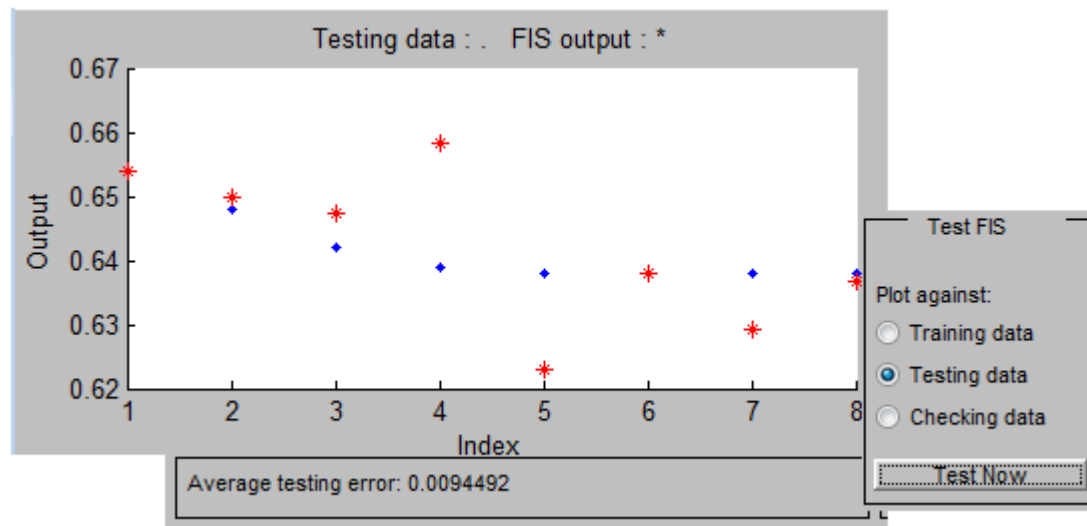


Рис.4.7. Перевірка працездатності навченого нейро-нечіткого регулятора

Як показано на рисунку, величина похибки навчання мережі становить $\delta = 9,45 \cdot 10^{-3}$, що є прийнятним показником для даної системи. Для подальшого використання створеної, навченого та протестованого нейро-нечіткого регулятора, зберігаємо його та експортуємо у робочу область MATLAB.

4.3. Моделювання та аналіз функціонування системи керування тепловим об'єктом на основі нейро-нечіткого регулятора

Для виконання моделювання та подальшого аналізу системи автоматичного регулювання температури із застосуванням нейро-нечіткого регулятора використано інтегроване середовище Simulink програмного комплексу MATLAB.

Подібно до процедур, описаних у попередньому розділі, перед запуском симуляції необхідно імпортувати у робочу область MATLAB файл, сформований у редакторі ANFIS Editor та такий, що містить параметри побудованої нейро-нечіткої мережі. У конфігурації блока Fuzzy Logic Controller with Rule Viewer виконується прив'язування до відповідного файлу нейро-нечіткого регулятора, отриманого на етапі його синтезу та навчання.

Структурна схема системи регулювання температури на об'єкті, реалізована з використанням нейро-нечіткого (гібридного) регулятора, представлена на рис. 4.8.

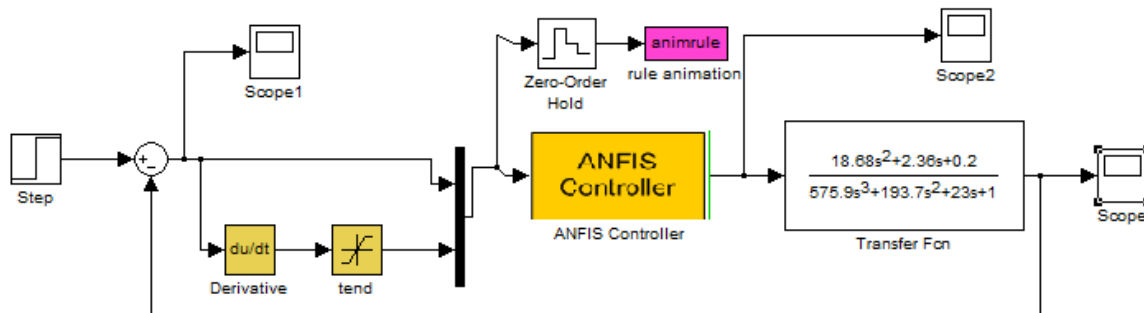


Рис. 4.8. Структурна модель системи автоматичного керування, реалізованої із застосуванням нейро-нечіткого (гібридного) регулятора

Аналогічно до моделювання системи керування тепловим об'єктом із застосуванням нечіткого регулятора, у попередньому розділі, під час запуску симуляції нейро-нечіткої системи керування натискання кнопки Start відкриває вікно Rule Viewer (рис. 4.9). У цьому інтерфейсі в режимі реального часу відображаються значення вхідних сигналів, ступінь активації окремих правил, проміжні результати їх спрацювання, підсумковий вихід регулятора, а також рівень

активності відповідних термів.

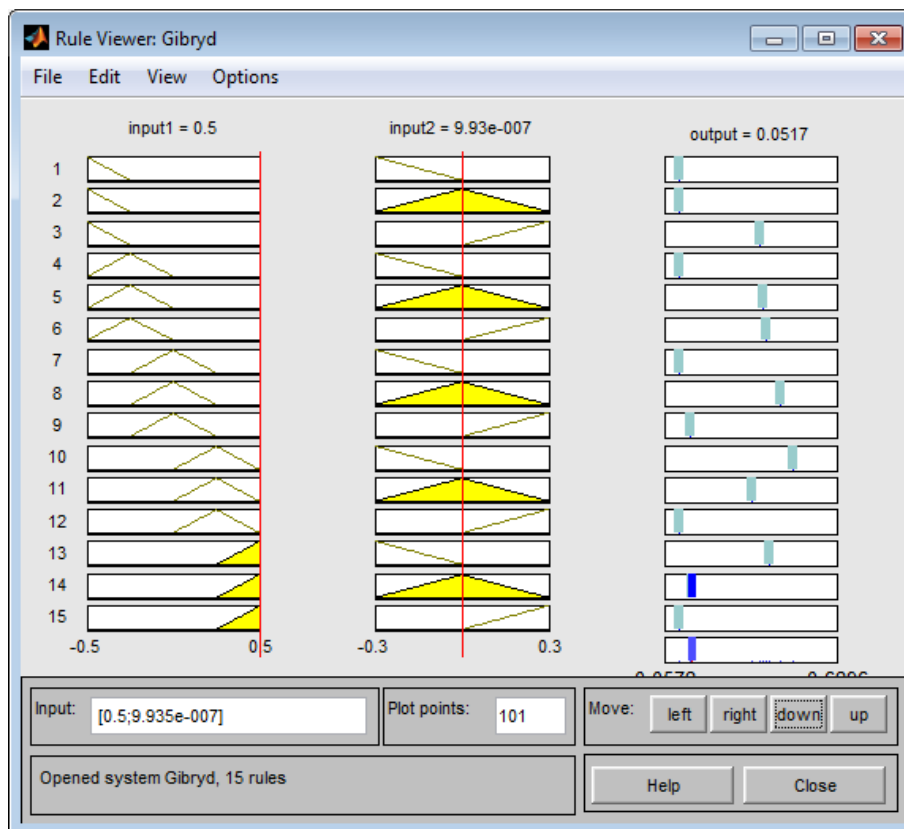


Рис. 4.9. Інтерфейс відображення користувацьких правил Rule Viewer

Для відтворення графіка вихідного сигналу системи - тобто часової еволюції температури - після завершення симуляції необхідно двічі клацнути на блок Score. Отриманий перехідний процес наведено на рис. 4.10.

На основі цього графічного матеріалу, за аналогією з методикою, застосованою у попередніх розділах, можна здійснити кількісне оцінювання динамічних властивостей системи.

Отже, виконаємо визначення прямих показників якості регулювання:

- тривалість перехідного процесу: $t = 76,0$ с;

- степінь перерегулювання: $\sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100\% = \frac{1-1}{1} \cdot 100\% = 0\%$;

- величина затухання: $\psi = 1 - \frac{A_3}{A_1} = 1$.

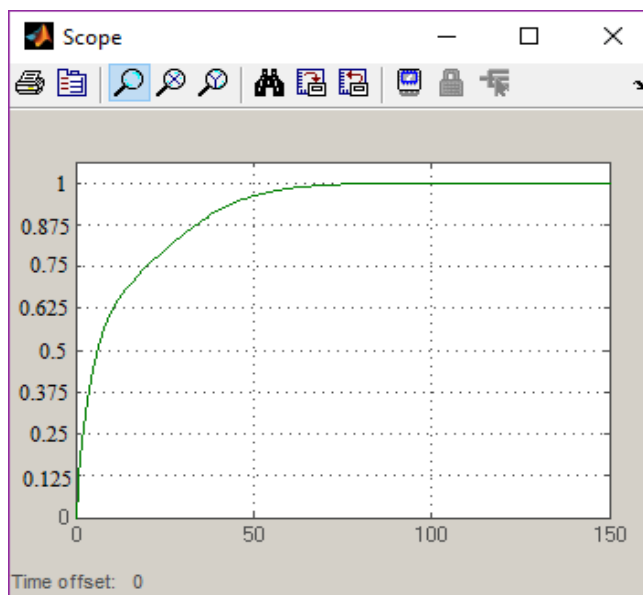
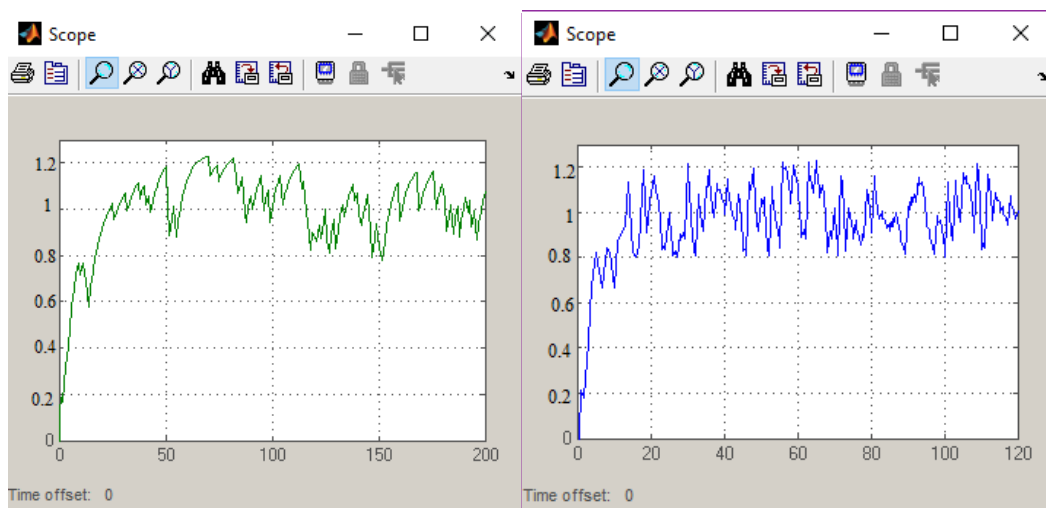


Рис.4.10. Графічне відображення динамічної реакції нейро-нечіткої системи керування на керувальний вплив

Узагальнюючи результати обчислення ключових показників, можна стверджувати, що нейро-нечітка система забезпечує достатньо високий рівень якості керування. Додаткові графічні матеріали, які відображають динаміку функціонування розробленої системи, подано в додатку Д (рисунки Д.1–Д.3).

Для подальшого порівняльного аналізу ефективності гібридного регулятора з іншими системами, синтезованими в попередніх розділах, у модель Simulink було введено випадкові впливи: у канал завдання подано шум із рівнем 4–6% від номінального сигналу, а в канал регулювання – збурення величиною близько 35%. Для формування цих впливів застосовано блок Uniform Noise Generator.

Після запуску симуляції результати відображено у вікні Scope (рис. 4.11). На рис. 4.11, а наведено перехідну характеристику системи за наявності шуму у каналі завдання, тоді як на рис. 4.11, б показано реакцію системи на збурення приблизно 25% у каналі регулювання.



а)

б)

Рис. 4.11. Графічне відображення перехідного процесу системи керування з нейро-нечітким (гібридним) регулятором за умови подання: а) шумового сигналу в канал завдання; б) збурювального впливу в канал регулювання

Аналіз залежностей, поданих на рис. 4.11, засвідчує, що поява збурювальних впливів у системі значною мірою погіршує її точнісні та якісні показники регулювання. Узагальнені порівняльні динамічні характеристики всіх синтезованих у роботі систем керування, включно з результатами моделювання за умов дії шумів і збурень, подано у табличній формі в додатку Е.

На підставі проведеного порівняльного аналізу можна зробити висновок, що серед розглянутих регуляторів найвищу ефективність демонструє нечіткий Fuzzy-регулятор. Хоча його швидкодія дещо нижча порівняно з традиційним ПД-регулятором, відсутність перерегулювання, висока стійкість до шумів і зовнішніх збурень забезпечують йому істотні переваги з позицій якості керування.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі магістерської роботи основна увага приділяється розробці системи керування тепловим об'єктом із застосуванням нейро-нечіткого (гібридного) регулятора. Виконано опис теоретичних основ та специфіки регулювання на основі нейро-нечіткої теорії, а також представлено алгоритм

побудови такого регулятора.

За допомогою редактора ANFIS Editor здійснено налаштування структури нечіткої нейронної мережі, проведено її навчання та тестування. Імітаційне моделювання створеної системи виконано в середовищі Simulink, що дозволило отримати характеристики динаміки роботи системи на базі нейро-нечіткого регулятора.

Аналіз результатів показав високу якість керування системою з гібридним регулятором. Порівняння з системою на базі класичного нечіткого регулятора засвідчує, що в обох випадках перерегулювання відсутнє ($\sigma = 0$), а показник затухання ψ дорівнює 1 ($\psi = 1$). Водночас час регулювання у системі з гібридним регулятором ($t = 76$ с) є більшим, ніж у системі з фаззи-регулятором.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі досліджується синтез та моделювання систем керування тепловим об'єктом із застосуванням інтелектуальних технологій. Основна мета моделювання полягає у спостереженні за поведінкою системи під впливом зовнішніх або внутрішніх факторів та оцінці її здатності до досягнення певного стану, який може бути як заданим, так і невідомим через брак інформації чи інші причини. Моделювання дозволяє встановити, чи здатна система функціонувати в таких умовах під час перехідних процесів.

1. Проаналізовано теоретичні аспекти проблеми розробки і застосування сучасних методів керування типовими тепловими об'єктами галузі. Розглянуто класичні та сучасні підходи, включаючи нечіткі та нейро-нечіткі технології, а також виконано огляд середовищ проектування для їх реалізації та моделювання. Визначено основні завдання магістерської роботи.

2. Ідентифіковано ключові вхідні та вихідні параметри теплового об'єкта, проведено лабораторні експерименти та отримано графік його перехідної характеристики. На основі цього графіка, із застосуванням програми Arrox, розраховано математичну модель об'єкта у вигляді передавальної функції.

3. Виконано моделювання системи керування з використанням традиційного ПІД-регулятора. Найбільш оптимальною виявилася структура ПІ-регулятора з коефіцієнтами $k_p = 4.435$ та $k_i = 3.095$. Отримані прямі показники якості: перерегулювання $\sigma = 14\%$, час регулювання $t = 43$ с та ступінь затухання $\psi = 0.82$.

4. Проведено синтез і моделювання системи керування на основі нечіткої логіки. Описано алгоритм розробки нечіткого регулятора та методика його побудови у MATLAB. Створено імітаційну модель та проведено моделювання. Результати демонструють переваги нечіткої системи над традиційною: відсутність перерегулювання ($\sigma = 0\%$) та ідеальний коефіцієнт затухання ($\psi = 1$). Крім того, система найбільш ефективно відпрацьовує вплив шумів і збурень.

5. Розроблено систему керування на основі нейро-нечіткої (гібридної)

технології. Використовуючи запропонований алгоритм побудови гібридного регулятора, створено систему та проведено її моделювання. Показники регулювання виявилися високими: перерегулювання $\sigma = 0\%$, ступінь затухання $\psi = 1$, аналогічні системі з нечітким регулятором, проте час регулювання ($t = 76$ с) перевищує відповідні значення у попередніх системах.

6. На основі отриманих результатів доцільно рекомендувати для керування даним тепловим об'єктом нечіткий регулятор, який забезпечує високі якісні показники, крім часу регулювання ($t = 64$ с). Найшвидше реагує традиційна система керування ($t = 43$ с), яка також має задовільні показники якості і може бути використана завдяки простоті та малому числу параметрів стану.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Нелінійні системи [Текст]: лаб. практикум / М. І. Горбійчук, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2024. – 84 с.
2. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи. [Текст]: лаб. практикум / М. І. Горбійчук, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. – 64 с.
3. Автоматичне управління [Текст]: навчальний посібник / Г. Н. Семенцов, Я. Р. Когуч, М. І. Когутяк [et al.]. – 2-е вид. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – 398 с.
4. Штучні нейромережі та фаззі логіка в системах автоматизації [Текст] : конспект лекцій / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, Я. Р. Когуч, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ Факел, 2009. – 132 с.
5. Фазі-логіка в системах контролю [Текст] : навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, М. В. Шавранський, В. С. Борин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2002. – 70 с.
6. Фазі-логіка в системах керування [Текст] : навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, М. В. Шавранський, В. С. Борин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2002. – 84 с.
7. Чигур, І. І. Інтелектуальні методи прийняття рішень в технічних системах [Текст] : лаб. практикум / І. І. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 69 с.
8. Чигур, І. І. Основи теорії інформації та кодування [Текст] : практикум / І. І. Чигур, В. М. Гарасимів, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. – 24 с.
9. Альфа [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://microl.ua/ua/new/redaktor-fbd-program-al-fa>.
10. МІК-21 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://microl.ua/ua/product/universalnij-mikroprocesornij-pid-regulator-z-dodatkovimi-funkciami-mik-21?srsId=AfmBOoqJLidSCAUaC4fiyfGY5cEjG8hA5d03M14xYxx60T4CHHg2wYz>

Н.

11. Когутяк, М. І. Мікроконтролери для систем автоматизації [Текст] : навч. посібник / М. І. Когутяк, А. І. Лагойда. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 290 с.

12. Когутяк, М. І. Мікроконтролери та програмовані логічні контролери [Текст] : метод. вказівки для викон. курс. робрти / М. І. Когутяк, А. І. Лагойда. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2025. – 72 с.

13. Когутяк, М. І. Алгоритмізація та програмування промислових контролерів [Текст]: лаб. практикум. Ч. 2: Синтез цифрових статичних та динамічних коректорів / М. І. Когутяк, А. І. Лагойда, Л. І. Лагойда. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 89 с.

14. Когутяк, М. І. Програмно-технічні комплекси та програмне забезпечення автоматизованих систем управління технологічними процесами [Текст] : лаб. практикум / М. І. Когутяк, А. І. Лагойда, Л. І. Фешанич. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 87 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Програма апроксимації перехідної характеристики об'єкта керування та одержання передавальної функції

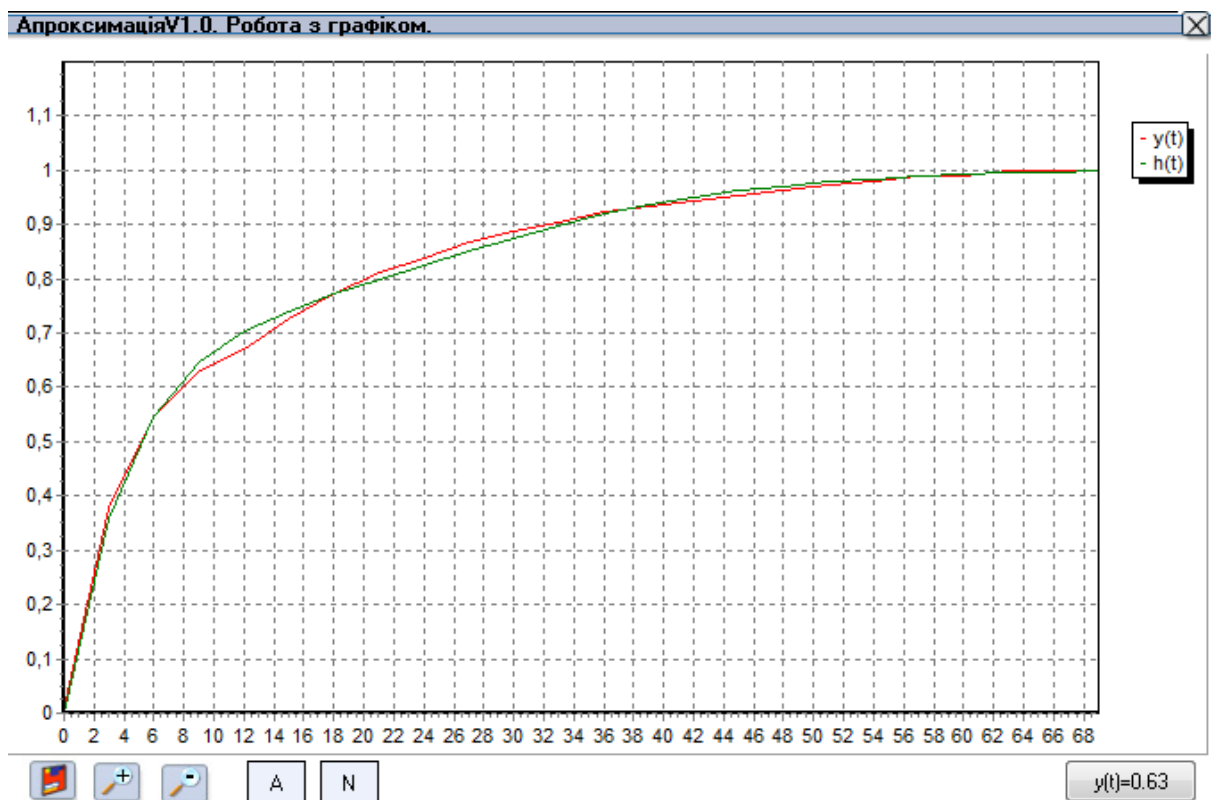
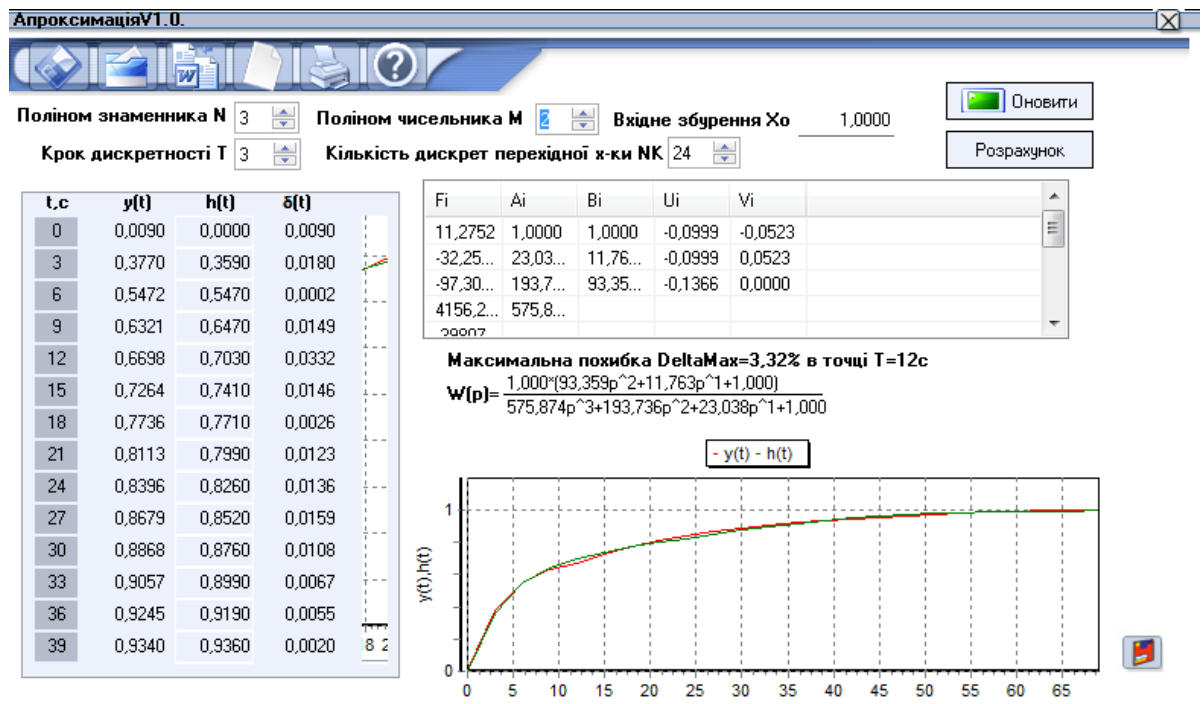


Рисунок А.1 - Вікно програми апроксимації та одержання передавальної функції

Додаток Б

Програма обчислення оптимальних параметрів регулятора

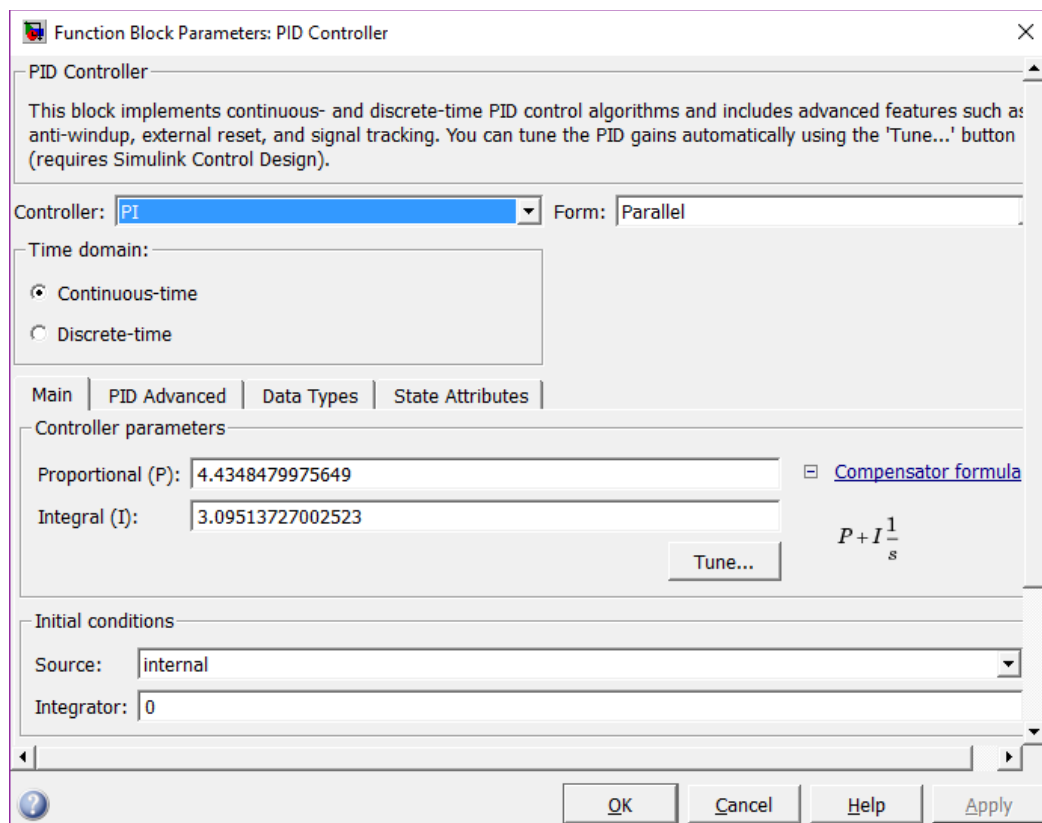
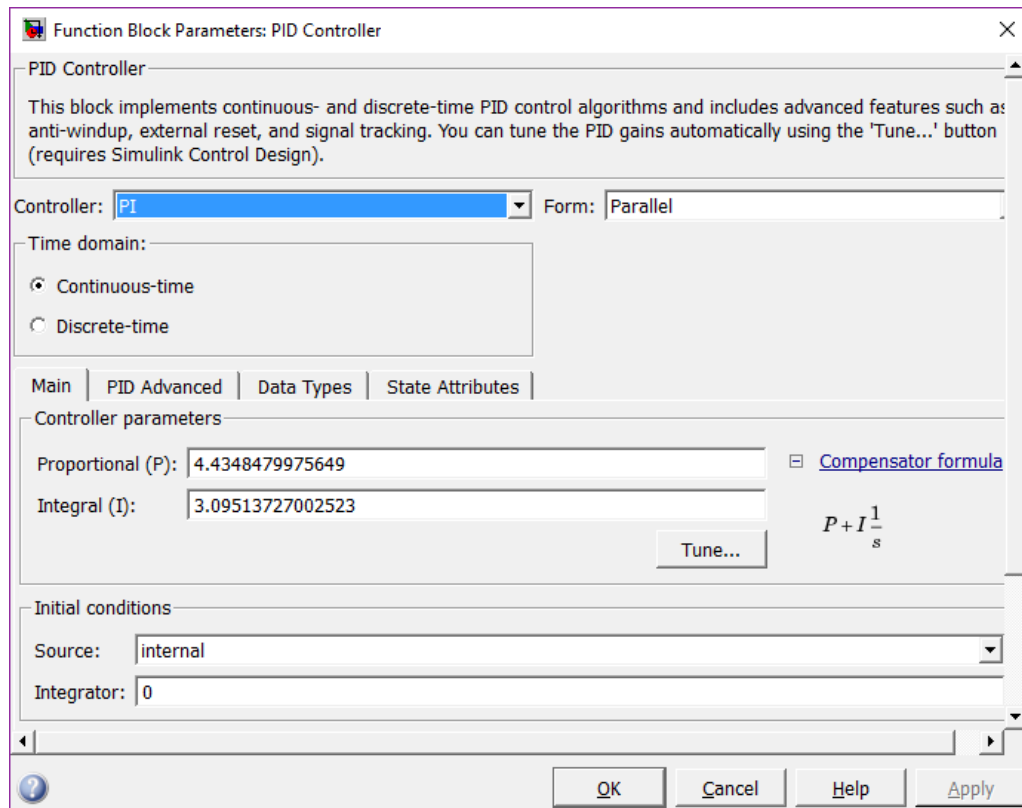


Рисунок Б.1 Вікно програми обчислення оптимальних параметрів регулятора

Додаток В

Динаміка роботи системи з ПІД – регулятором

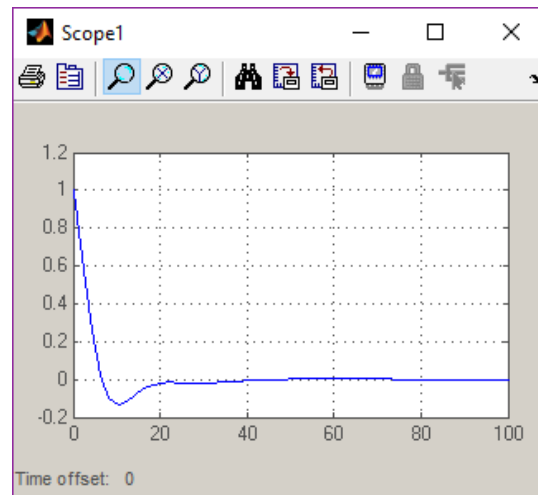


Рисунок В.1 Графік залежності зміни похибки регулювання (розбалансу) від часу

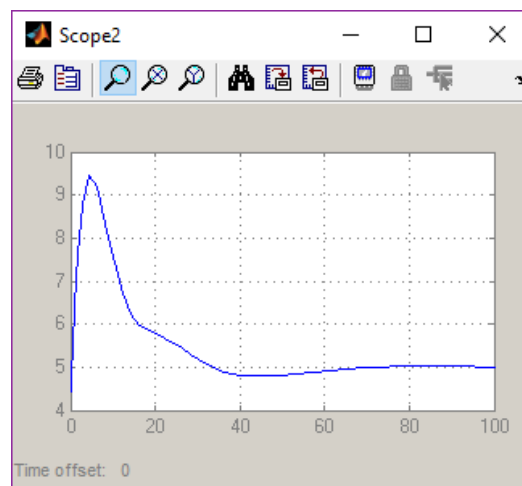


Рисунок В.2 Керуючий вплив регулятора на виконавчий механізм в часі

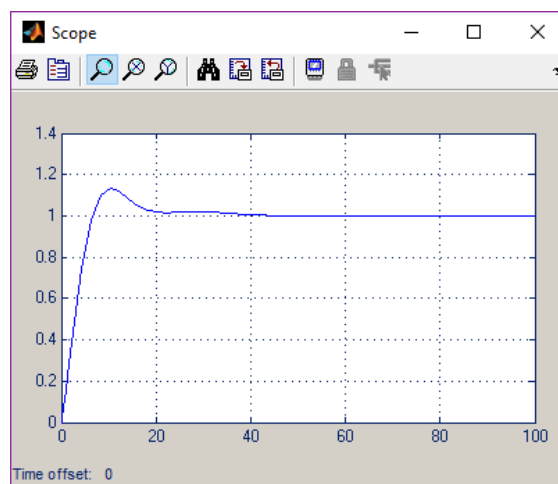


Рисунок В.3 Вихід системи- зміна температури в часі

Додаток Г

Динаміка роботи системи з нечітким регулятором

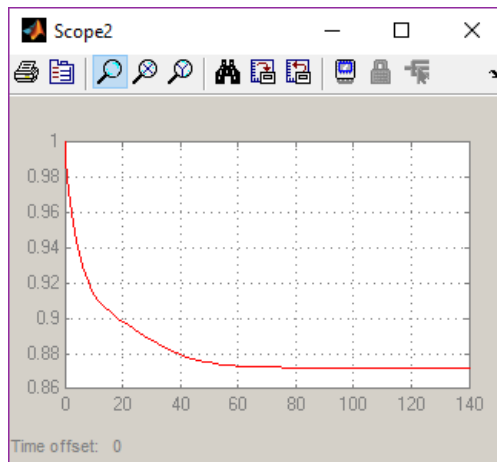


Рисунок Г.1 Графік залежності зміни похибки регулювання (розбалансу) від часу

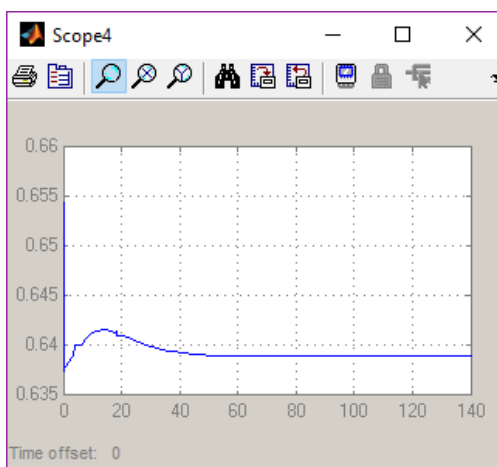


Рисунок Г.2 Керуючий вплив регулятора на виконавчий механізм в часі

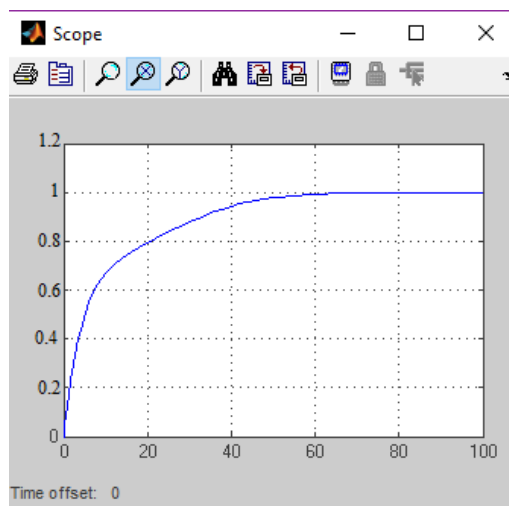


Рисунок Г.3 Вихід системи- зміна температури в часі

Додаток Д

Динаміка роботи системи керування з гібридними регулятором

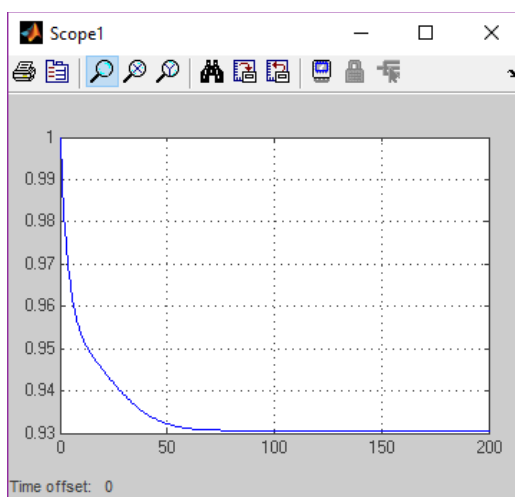


Рисунок Д.1 Графік залежності зміни похибки регулювання (розбалансу) від часу

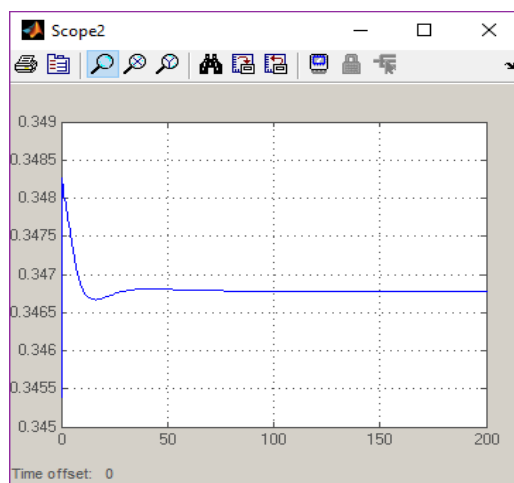


Рисунок Д.2 Керуючий вплив регулятора на виконавчий механізм в часі

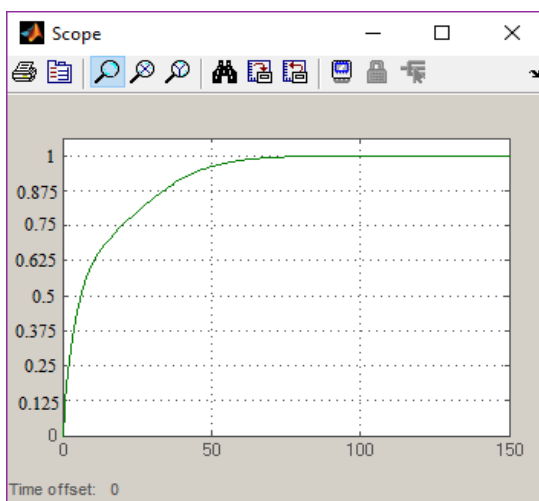
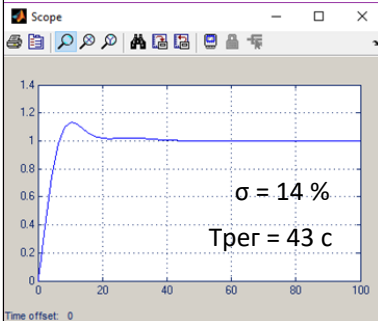
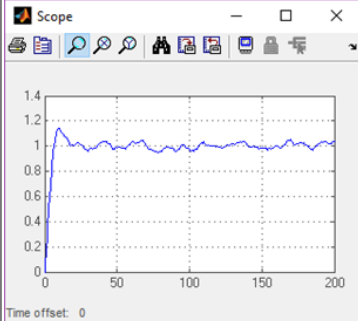
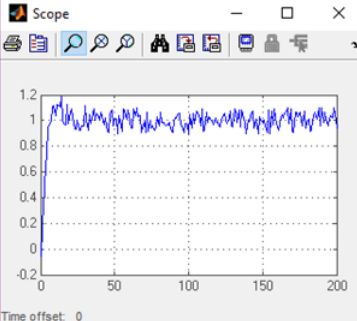
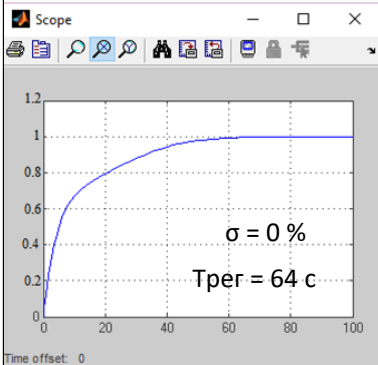
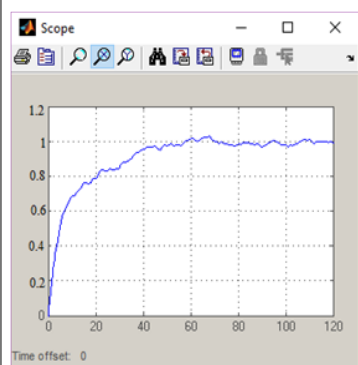
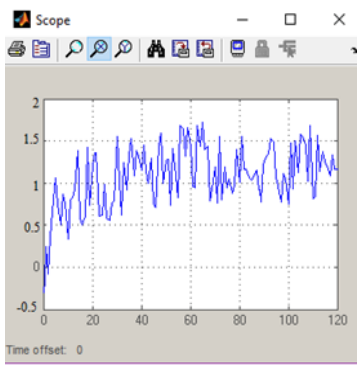
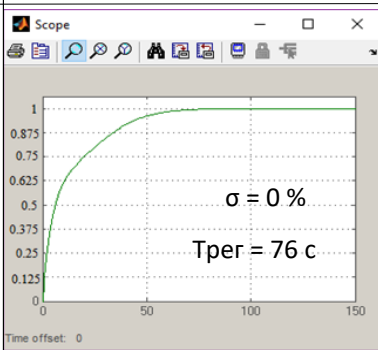


Рисунок Д.3 - Вихід системи- зміна температури в часі

Додаток Е

Порівняльний аналіз роботи регуляторів

	Усталене завдання	Шуми в каналі завдання 4-6%	Збурення в каналі регулювання 25%
ПІД-регулятор	 <p>$\sigma = 14\%$ Трег = 43 с</p>		
Нечіткий Fuzzy-регулятор	 <p>$\sigma = 0\%$ Трег = 64 с</p>		
Нейро-нечіткий (гібридний) регулятор	 <p>$\sigma = 0\%$ Трег = 76 с</p>	