

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПм-51.00.00.000 ПЗ

Група АКПм-24-2

Микола Пилипшин

2025

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

Пилипишин Микола Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення та дослідження систем керування тепловим об'єктом

(назва роботи)

на основі методів нечіткої логіки

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-2

(шифр групи)

М.М. Пилипишин

(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)

І.І. Чигур

(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)

Факультет автоматизації та енергетики

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**

Пилипишин Микола Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення та дослідження систем керування тепловим об'єктом на основі методів нечіткої логіки

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

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

затвердені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз існуючих методів керування тепловими об'єктами. 2. Математичний опис об'єкта керування. 3. Синтез системи керування тепловим об'єктом на базі нечіткої логіки. 4. Синтез і моделювання нейро-нечіткої ситеми 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 30.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих методів керування тепловими об'єктами	02.12.2025	
2	Математичний опис об'єкта керування	03.12.2025	
3	Синтез системи керування тепловим об'єктом на базі нечіткої логіки	04.12.2025	
4	Синтез і моделювання нейро-нечіткої системи керування тепловим об'єктом	05.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Пилипишин М.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.

Виконано ґрунтовний аналіз традиційних і сучасних підходів до керування типовими тепловими об'єктами. У ході експериментальних досліджень, проведених на лабораторному стенді в умовах, наближених до реальних, отримано перехідну характеристику об'єкта та побудовано його математичну модель у формі передавальної функції. На основі результатів дослідження здійснено синтез системи автоматичного керування із застосуванням ПІД-регулятора. Створено імітаційну модель системи керування, реалізовану з використанням апарату нечіткої логіки, що дало змогу визначити основні показники динаміки її функціонування. Крім того, змодельовано систему керування на основі гібридного підходу, який поєднує нейромережеві та нечіткі методи. На підставі отриманих результатів проведено порівняльний аналіз ефективності досліджених систем за критеріями якості регулювання.

Ключові слова: Allen-Bradley, Rockwell Automation, тепловий об'єкт, система керування, моделювання, ПІД-регулятор, нечітка логіка, фаззі-регулятор, гібридні системи, перехідний процес, якість керування, MatLab, Simulink, нейромережі.

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.

A thorough analysis of traditional and modern approaches to the control of typical thermal facilities has been performed. In the course of experimental studies conducted on a laboratory stand in conditions close to real ones, the transient characteristic of the facility has been obtained and its mathematical model in the form of a transfer function has been constructed. Based on the results of the study, an automatic control system has been synthesized using a PID controller. A simulation model of the control system has been created, implemented using a fuzzy logic apparatus, which made it possible to determine the main indicators of the dynamics of its functioning. In addition, a control system has been modeled based on a hybrid approach that combines neural network and fuzzy methods. Based on the results obtained, a comparative analysis of the effectiveness of the studied systems according to the criteria of control quality has been performed.

Keywords: Allen-Bradley, Rockwell Automation, thermal object, control system, modeling, PID-regulator, Fuzzy-Logic, phase-regulator, hybrid systems, work dynamics, transient process, management quality, MathLab, Simulink, Neural-network.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМИ ОБ'ЄКТАМИ.....	13
1.1. Основні методи регулювання технологічних процесів в теплових об'єктах.....	13
1.2. Системи автоматичного керування на базі методів фазі логіки.....	18
1.3. 1.3. Аналіз програмного продукту MATLAB як середовища для розробки систем керування з використанням нечіткої логіки.....	22
1.4. Постановка завдання на магістерську роботу.....	24
Висновки до розділу 1.....	24
РОЗДІЛ 2	
МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	25
2.1. Аналіз та виявлення основних вхідних та вихідних величин.....	25
2.2. Проведення експериментальних досліджень на об'єкті.....	26
2.3. Визначення передавальної функції керованого об'єкта.....	29
2.4. Визначення параметрів налаштування регулятора.....	31
Висновки до розділу 2.....	36
РОЗДІЛ 3	
СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ ОБ'ЄКТОМ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	37
3.1. Теоретичні основи та особливості керування на базі нечіткої логіки.....	37
3.2. Розробка регулятора на основі нечіткої логіки.....	41
3.2.1. Алгоритм процесу розробки нечіткого регулятора, як складової нечіткого проекту.....	42

3.2.2. Розробка нечіткого регулятора в середовищі MATLAB.....	45
3.3. Імітаційне моделювання та дослідження системи керування тепловим об'єктом з використанням нечіткого регулятора.....	54
Висновки до розділу 3.....	57
РОЗДІЛ 4	
СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ СИТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ ОБ'ЄКТОМ.....	
	59
4.1. Теоретичні засади нейро-нечіткого проектування.....	59
4.2. Методика проектування нейро-нечіткої системи для керування тепловим об'єктом.....	61
4.3. Моделювання та дослідження системи керування тепловим об'єктом з використанням нейро-нечіткого регулятора.....	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73
ДОДАТКИ.....	75

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

ЗА - засоби автоматизації.

FIS - Fuzzy Inference System.

ANFIS - Adaptive Neuro-fuzzy Inference system.

ПП - програмний продукт.

АСК - автоматизована система керування.

ОК - об'єкт керування.

ТКО - технологічний керований об'єкт.

БУС - блок управління симістором.

САК - система автоматичного керування.

FIS - Fuzzy Inference System.

ANFIS - Adaptive Neuro-fuzzy Inference system.

АРМ - автоматизоване робоче місце.

АСУТП - автоматизована система управління технологічними процесами.

ВСТУП

Актуальність теми. Системи автоматичного керування становлять невід’ємну складову будь-якого технологічного процесу. У сучасних промислових комплексах, зокрема в нафтогазовій галузі, часто функціонують об’єкти, поведінка яких описується складними нелінійними залежностями. Такі системи характеризуються високим рівнем невизначеності, значною кількістю взаємопов’язаних параметрів стану та істотною чутливістю до дії зовнішніх збурень. На відміну від класичної теорії керування, що базується на припущенні лінійності об’єктів, подібні системи потребують застосування інших підходів, оскільки традиційні методи регулювання часто виявляються малоефективними або навіть непридатними для адекватного керування такими об’єктами.

Протягом останніх десятиліть для подолання зазначених обмежень і підвищення якості керування активно впроваджуються сучасні інтелектуальні методи, зокрема системи на основі нечіткої логіки (Fuzzy Logic), штучних нейронних мереж (Neural Network) та їх гібридних комбінацій (Hybrid Systems). Застосування цих підходів отримало широке розповсюдження не лише у нафтогазовому секторі, а й у багатьох інших галузях світової промисловості, що підтверджує їхню високу ефективність і універсальність у розв’язанні складних задач керування.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сфера застосування технологій нечіткої логіки, штучних нейронних мереж та їх гібридних поєднань охоплює надзвичайно широкий спектр завдань - від побутових пристроїв, таких як відеокамери чи пральні машини, до високотехнологічних систем керування ракетами протиповітряної оборони та авіаційними об’єктами. У таких системах база правил для навчання може містити десятки тисяч елементів, які необхідно опрацювати для формування оптимального, зваженого рішення, від якого часто залежить безпека та життя великої кількості людей. Завдяки здатності реалізовувати нелінійні закони керування, зазначені технології отримали широке впровадження і в нафтогазовій промисловості, зокрема під час процесів буріння

нафтових свердловин та керування технологічними комплексами.

У зв'язку з цим тема магістерського дослідження, присвячена розробленню систем автоматичного керування, передбачає не лише використання класичних лінійних регуляторів типу П, ПІ, ПД та ПІД, але й впровадження сучасних підходів, заснованих на інтеграції нейро-нечітких технологій із прогресивними нейромережевими структурами, здатними до самонавчання та адаптації. Такий підхід забезпечує підвищення ефективності регулювання складних нелінійних об'єктів, що визначає високу наукову та практичну актуальність обраної теми дослідження, а також перспективність її подальшого впровадження в промислових системах керування.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є побудова математичної моделі лабораторного теплового об'єкта керування із застосуванням апаратно-програмних засобів автоматизації компанії Rockwell Automation, а також розроблення та порівняльний аналіз ефективності трьох типів регуляторів - класичного ПІД, нечіткого та нейро-нечіткого (гібридного) — для керування тепловим об'єктом-імітатором. Основна увага приділяється оцінюванню якості керування, забезпечуваного кожним із зазначених підходів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести експериментальні дослідження на лабораторному імітаторі теплового об'єкта, детально описати методику проведення експерименту та побудувати перехідну характеристику, що слугуватиме базовою основою для подальшого моделювання.
2. Здійснити моделювання системи керування із застосуванням традиційних методів регулювання та визначити її основні показники ефективності.
3. Розробити й дослідити систему керування на основі нечіткої логіки, з подальшим аналізом отриманих показників якості функціонування.
4. Синтезувати автоматичну систему керування, побудовану на нейро-нечіткій (гібридній) технології, сформувавши початкову базу навчальних даних для її роботи.
5. Провести імітаційне моделювання традиційних, нечітких і гібридних

систем керування та виконати порівняльний аналіз їхніх динамічних характеристик.

Об'єктом дослідження є теплотехнічний стенд-імітатор, інтегрований із промисловим контролером SLC 500 виробництва компанії Allen-Bradley (Rockwell Automation).

Предмет дослідження є підходи та алгоритмічні засоби керування тепловим об'єктом із застосуванням класичних і інтелектуальних методів автоматизації.

Методи дослідження. Дослідження виконано із застосуванням положень теорії автоматичного керування, методів нечіткої логіки та інструментарію інтеграції штучних нейронних мереж із системами нечіткого логічного виведення.

Новизна отриманих результатів.

Здійснено налаштування параметрів нечіткого регулятора, призначеного для керування тепловим об'єктом. Розроблено систему автоматичного керування на основі нейро-нечіткої (гібридної) технології, для якої попередньо сформовано навчальну вибірку, що слугувала базою для подальшого навчання регулятора. Проведено імітаційне моделювання функціонування розроблених систем керування та виконано їх експериментальне дослідження. За результатами отриманих даних здійснено порівняльний аналіз ефективності роботи систем керування тепловим об'єктом, реалізованих на базі нечіткого, гібридного та класичного ПІД-регуляторів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Тематика представленої магістерської роботи повністю узгоджується з положеннями чинного Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». Наукова база дослідження сформована на основі результатів, отриманих у межах виконання науково-дослідних робіт ІФНТУНГ, що реалізовувалися відповідно до плану державних наукових програм. Зокрема, це роботи за темами:

- «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (державний реєстраційний номер №

011U605890);

- «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікації постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» (державний реєстраційний номер № 0115U007099).

Практичне значення отриманих результатів. На основі розроблених і змодельованих структур традиційних, нечітких та гібридних регуляторів створено автоматизовану систему керування теплотехнічним об'єктом.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 8 додатків. Повний обсяг магістерської роботи становить 88 сторінок: обсяг основного тексту - 72 сторінки, 42 рисунки; список використаних джерел, що включає 16 найменувань та займає 2 сторінки; 8 додатків на 14 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМИ ОБ'ЄКТАМИ

1.1. Основні методи регулювання технологічних процесів в теплових об'єктах

На сьогоднішній день одним з методів управління різноманітними технологічними процесами являється підтримування в заданих межах, а також зміна по визначеному закону значення однієї чи декількох фізичних величин. Це є однією з ключових задач автоматизації.

В реальних умовах на об'єкт управління здійснюють вплив зовнішні дії, які називаються збуреннями $Z(t)$ - дані дії викликають зміни внутрішнього стану об'єкта і як наслідок – робочих і контрольованих параметрів. Вектор збурюючих дій поділяється на дві складові:

- Вимірюваний збурюючий вплив.
- Невимірюваний.

В зв'язку з цим, для виконання поставлених задач по заданому алгоритму, необхідно на об'єкт керування організувати подачу сигналу керуючої дії $U(t)$. (Рис.1.1.)

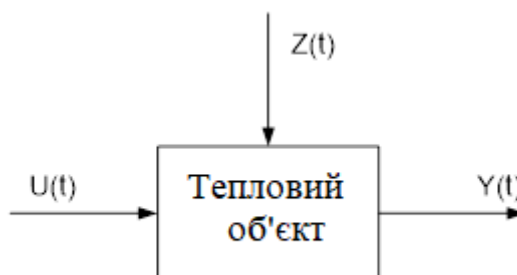


Рис. 1.1. Структурна схема об'єкта керування

$Y(t)$ – параметр, що характеризує стан процесу, даний параметр потрібно підтримувати постійно в часі або ж змінювати по-визначеному відомому закону.

$U(t)$ – сигнал керуючої дії на об'єкт керування. Зміна даного сигналу, як правило, може призвести до зміни витрати матеріальних чи енергетичних потоків.

Задача керування, зводиться до формування певного закону зміни керуючого впливу таким чином, щоб забезпечити відповідне виконання алгоритму керування при наявності збурюючих дій [2].

Для вирішення даної задачі використовують три фундаментальні принципи керування: керування з розімкнутим контуром системи, керування за збуренням і керування за зворотним зв'язком.

Теплові об'єкти є складовою частиною багатьох технологічних процесів і виробництв. Дані об'єкти пов'язані з підігрівом, охолодженням речовин (рідин чи газів) зберіганням їх при певному температурному режимі, тощо.

На сьогоднішній день важко знайти виробництво у тій чи іншій галузі промисловості, яке функціонує без участі теплових об'єктів. До них належать: теплообмінні апарати, трубчасті печі, холодильники, холодильники-конденсатори, різного роду установки підтримання мікроклімату, установки вентиляції, котли і котлоагрегати, теплообмінники змішування і т.д. Нафтогазова галузь має чималу кількість прикладів використання теплових об'єктів, починаючи від бурових установок технологічних розчинів і закінчуючи нафто - і газопереробними заводами.

З точки зору автоматизації процес регулювання тепловим об'єктом може бути досить складним, враховуючи розміри апаратів, робочі тиски та витрати, а також рівень складності об'язки об'єкта в технологічному процесі. Завданням автоматизації при регулюванні тепловими об'єктами є підтримання сталої температури – задача стабілізації температури, або супервізорне регулювання: «підтягування» температури речовини до завдання, яке змінюється за наперед заданою програмою (програмний задатчик).

Температура як технологічний параметр, є показником нагріву об'єкта. Як правило, температура є одним із ключових параметрів у системах, що характеризуються значними енергетичними потоками. У таких системах здійснюється вимірювання основних технологічних величин — тиску,

температури, витрати тощо - для різних типів робочих середовищ. До них належать:

- свіжа, перегріта, відбірна та відпрацьована пара;
- живильна, охолоджена, хімічно очищена, мережева вода та конденсат;
- димові гази, що відводяться з топкових камер і газоходів котлоагрегатів;
- атмосферне повітря, а також повітря, що подається для охолодження турбогенераторів;
- робочі середовища насосних, вентиляторних, димососних установок і систем перетворення енергії;
- тверді, рідкі та газоподібні види палива [3].

Температурний контроль у таких процесах має вирішальне значення для забезпечення енергоефективності, стабільності режимів роботи та безпеки технологічного обладнання.

В залежності від потрібної точності підтримання температури, існують різні способи регулювання.

Метод 1. Позиційне (релейне) керування. При даному виді керування забезпечується досить хороша якість регулювання для об'єктів з малим запізненням. Регулятори позиційних систем керування використовують для управління елементами, що перемикаються – дискретними виконавчими пристроями.

Наприклад, регулювання температури, шляхом наявності чи відсутності потужності, що подається на нагрівний елемент (нагрівач повністю увімкнений, або повністю вимкнений). Опис роботи даної системи можна представити наступним чином:

Нагрівач увімкнено, поки температура на об'єкті не досягне заданого значення SP .

Вихід регулятора Y (нагрівач) вимкнеться, якщо регульована величина (температура) досягне значення вищого ніж задана точка SP .

Повторна активація нагрівального елемента здійснюється після зниження температури до рівня, що дорівнює $(SP - H)$, тобто з урахуванням заданої

величини гістерезису перемикального елемента. Такий підхід запобігає частим спрацюванням нагрівача, забезпечуючи стабільність температурного режиму та підвищуючи надійність роботи системи автоматичного регулювання.

Параметр H (гістерезис) вводиться для того, щоб запобігти занадто частому увімкненню/вимкненню нагрівача [4].

Статична характеристика позиційної системи керування наведена на рис.1.2.

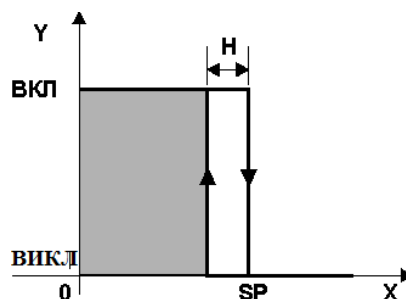


Рис. 1.2. Статична характеристика позиційної системи керування

Метод 2. Аналогове (неперервне) керування. При даному виді керування забезпечується стабілізація температури згідно заданого значення або ж завдання яке змінюється програмно. У випадку коли ставляться точні вимоги до підтримання температури використовують традиційні ПД, нечіткі або нейромережеві регулятори. На рис.1.3. показана схема регулювання температури підігрітої в теплообміннику реакційної суміші, шляхом зміни витрати палива, що подається в теплообмінник.

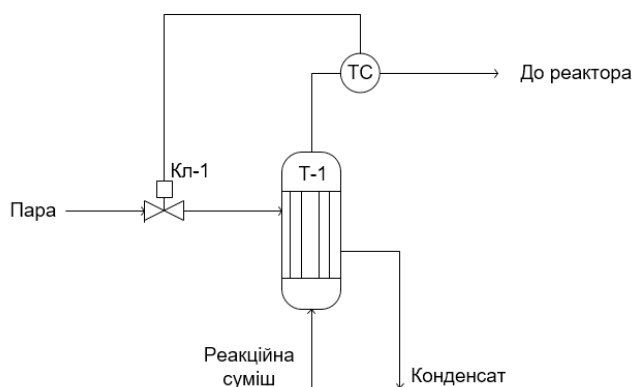


Рис. 1.3. Схема аналогового керування температурою

Метод 3. Каскадне (багатоконтурне) керування. Даний спосіб регулювання температури передбачає подачу на основний регулятор температури (регулятор температури основного контуру) сигналу виходу додаткового (коректуючого) регулятора.

Каскадні системи керування застосовуються для об'єктів, для яких характерна значна інерційність по каналу регулювання. На рисунку 1.4 подано каскадну схему регулювання температури реактора, де основною регульованою величиною виступає температура всередині реактора, а допоміжною - температура суміші, розташованої між теплообмінником і реактором.

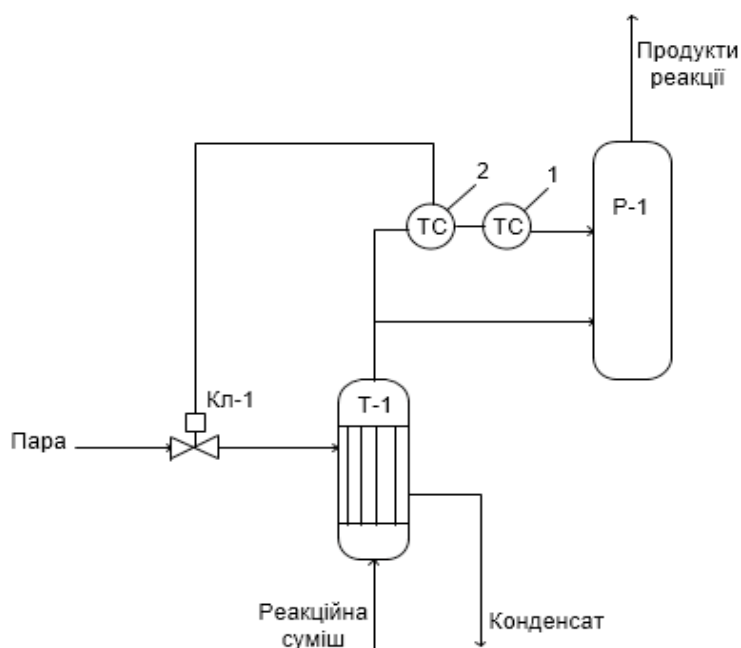


Рис. 1.4. Каскадна схема підтримання температурного режиму в реакторі P-1

Порівняльний аналіз одноконтурних та каскадних автоматичних систем керування свідчить, що завдяки підвищеній швидкодії внутрішнього контуру каскадна система забезпечує кращу якість перехідних процесів, особливо за наявності збурень у каналі регулювання. Це пояснюється тим, що введення внутрішнього контуру зменшує еквівалентну інерційність об'єкта порівняно з інерційністю основного контуру керування. [5].

1.2. Системи автоматичного керування на базі методів фазі логіки

Інтенсивний розвиток сучасних систем автоматичного керування зумовив усвідомлення того, що традиційні підходи до контролю та регулювання технологічних процесів мають суттєве обмеження - вони не враховують неповноту наявної інформації та лінгвістичну невизначеність у прийнятті рішень оператором або експертом. Це призводить до зниження ефективності управління в умовах мінливої динаміки процесів. Тому виникає потреба у створенні таких інтелектуальних засобів підтримки оператора, які б забезпечували аналіз поточної ситуації й сприяли прийняттю обґрунтованих рішень у режимі реального часу.

Складність задачі керування зумовлена високою динамічністю, стохастичністю та невизначеністю технологічних процесів, що потребує впровадження адаптивних і оптимізаційних методів регулювання. Досягнення високої якості функціонування можливе лише за умови комплексного інформаційного забезпечення та реалізації адаптивного керування з урахуванням змін зовнішніх і внутрішніх чинників.

У зв'язку з цим актуальним стає створення високоефективних систем автоматизованого управління, доповнених інтелектуальними модулями підтримки прийняття рішень, здатними функціонувати в умовах невизначеності. Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є використання методів нечіткої логіки та теорії нечітких множин, започаткованих професором Лотфі А. Заде (Lotfi A. Zadeh). Застосування цих підходів, у поєднанні з елементами нейромережевих технологій, відкриває нові можливості для побудови адаптивних архітектур керування та розроблення інтелектуальних алгоритмів їх функціонування.

Відповідно до запропонованої методології, адекватним інструментом математичного опису систем, що функціонують в умовах невизначеності, є теорія нечітких множин та методи нечіткої логіки [6]. Цей апарат забезпечує ефективний підхід до моделювання процесів, у яких класичні детерміновані моделі

виявляються недостатньо гнучкими або непридатними через наявність неточних, неповних чи лінгвістично заданих даних.

Ключовим елементом застосування теорії нечітких множин у різноманітних галузях - від побудови нечітких експертних систем до створення інтелектуальних контролерів - є системи нечіткого логічного виводу. Їх основою слугує сукупність продукційних правил типу «Якщо ..., то ...», у яких як антецедент (умова), так і консеквент (висновок) подані у вигляді нечітких множин. Саме цей підхід відтворює механізм людського мислення, що базується на наближених судженнях і дає змогу приймати рішення в умовах невизначеності та неповної інформації.

Такі логічні структури моделюють природну когнітивну здатність людини сприймати, інтерпретувати та узагальнювати нечіткі знання, розпізнавати складні образи (зокрема, почерк чи голос), а також формувати раціональні рішення у складному, динамічному середовищі. Разом із тим, теорія нечітких множин і її похідні напрями - теорія наближених суджень, теорія можливостей тощо - вимагають розгорнутого апарату додаткових понять, зв'язків і логічних співвідношень для повного й системного опису механізмів функціонування нечітких систем.

Методи побудови інформаційних моделей і систем, розроблені на основі теорії нечітких множин, суттєво розширюють межі традиційного застосування обчислювальних засобів, формуючи новий самостійний науково-практичний напрям - нечітке моделювання. Цей підхід характеризується здатністю відтворювати та аналізувати складні процеси, у яких присутні невизначеність, неповнота або лінгвістичний характер інформації, що є типовим для більшості реальних технічних та соціально-економічних систем.

У сучасних умовах нечітке моделювання розглядається як один із найбільш перспективних і науково значущих напрямів прикладних досліджень у сфері автоматичного керування та підтримки прийняття рішень. Його застосування дає змогу ефективно моделювати поведінку систем, де класичні математичні методи не забезпечують достатньої точності через стохастичність або невизначеність вихідних даних.

Зокрема, у галузі керування технічними об'єктами використання нечіткого моделювання дозволяє отримувати моделі, що більш повно відображають реальні властивості об'єктів та процесів. У результаті це забезпечує підвищення адекватності моделювання, стійкості та ефективності систем автоматичного керування порівняно з традиційними аналітичними підходами, побудованими на суворо детермінованих залежностях.

Базою для реалізації методів нечіткого керування є нечітка логіка, яка більш природно відображає особливості людського мислення та процесу міркувань порівняно з традиційними формально-логічними підходами. Саме завдяки цьому використання математичних інструментів для подання нечіткої інформації забезпечує можливість побудови моделей, що адекватно відтворюють різноманітні форми невизначеності, властиві реальним об'єктам і процесам [7].

Розв'язання задач керування різними технічними системами, об'єктами чи процесами становить один із ключових напрямів практичного застосування систем нечіткого логічного виведення. У такому випадку побудова нечіткої моделі ґрунтується на формалізованому описі параметрів і характеристик досліджуваної системи за допомогою лінгвістичних змінних. Оскільки в системах керування головними компонентами є вхідні та вихідні змінні, саме вони виступають лінгвістичними змінними під час формування бази правил нечіткого виведення.

Основним завданням керування є визначення значень керуючих вихідних змінних на підставі аналізу поточного стану об'єкта, що дозволяє забезпечити задану поведінку або підтримку необхідного стану системи. На сучасному етапі для розв'язання таких завдань застосовується загальна теорія керування, в межах якої розроблено різноманітні алгоритми формування оптимальних законів керування об'єктами різної фізичної природи, зокрема в нафтогазовій промисловості.

Типовим прикладом реалізації керування є використання ПІД-регулятора, алгоритм якого базується на порівнянні вихідних параметрів об'єкта з заданими значеннями та визначенні похибки як величини їх розбіжності.

Серед ключових обмежень ПД-контролерів виділяють: по-перше, припущення про лінійну залежність між вхідними та вихідними змінними, що може знижувати адекватність моделі при практичних завданнях; по-друге, складність виконання обчислень, що здатна викликати неприпустимі затримки в реалізації керуючих впливів при оперативному керуванні об'єктами з високою динамікою зміни вихідних параметрів.

Розробка нечітких моделей та систем керування здійснюється із застосуванням спеціалізованих програмних продуктів, які реалізують алгоритми управління на основі нечіткої логіки.

Архітектура або модель нечіткого керування передбачає заміну традиційної системи керування на систему, що функціонує за принципами нечіткого виводу, відомого як FIS (Fuzzy Inference System) [6,7].

При формуванні такої системи керування правила визначаються на підставі якісної інформації, а також на основі досвіду та компетенції експертів. Кількість правил користувача прямо залежить від числа значень лінгвістичних змінних, які формалізуються за допомогою нечітких множин. Подальше застосування відповідних формул дозволяє обчислити елементи нечіткого відношення.

Сформована база знань може використовуватися без змін або коригуватися в процесі експлуатації системи керування для підвищення ефективності управлінських рішень.

Методи поточної корекції нечітких відношень умовно класифікують на два основні підходи. Перший підхід передбачає автономне уточнення нечіткого відношення системою керування шляхом вибору правил із заздалегідь визначеного набору варіантів. Другий підхід ґрунтується на корекції моделі на основі даних, отриманих безпосередньо від об'єкта в процесі його керування [8].

1.3. Аналіз програмного продукту MATLAB як середовища для розробки систем керування з використанням нечіткої логіки

На даний час, інформаційні технології включають в себе чисельну кількість різного програмного, які реалізують різні алгоритми нечіткого керування. В даному розділі магістерської роботи проведено характеристичний огляд системи програмного пакету «MATLAB», враховуючи що в подальших розділах даної роботи, здійснено моделювання системи керування лабораторним тепловим «об'єктом-імітатором» в даному програмному середовищі.

Програмний пакет «MATLAB» (з англ. MATrix LABoratory – матрична лабораторія) являє собою інтегроване програмне середовище призначене для виконання різних математичних розрахунків, комп'ютерного моделювання і обчислювальних дослідних експериментів, що охоплюють різні області класичної і новітньої математики, а також широкий спектр інженерних застосунків [7]

Використане програмне забезпечення включає в собі одночасно як останні напрацьовані технології, так і широку базу спадку від попередніх версій – командно-строковий інтерфейс, графічний інтерфейс користувача достатнього рівня. Позитивні якості середовища MATLAB відчуються по мірі його поступового вивчення. Охоплює стандартний набір типів нейронних мереж. Присутні також можливості нечіткого моделювання, реалізуються з використанням пакету Fuzzy Logic Toolbox, в якому реалізовані сотні функцій нечіткої логіки і нечіткого виводу. Також в даному програмному продукті є можливості роботи з нейронними мережами та нейро-регуляторами, та іншими сучасними системами регулювання, на базі останніх наукових відпрацювань команди MATLAB.

До складу програмного пакету MATLAB включені додаткові спеціальні програми і підпрограми, що дають змогу проектувати, синтезувати, налагоджувати, програмувати, вчити та тестувати, моделювати нейро-мережеві, нечіткі та гібридні системи керування, контролю та обробки даних:

1. Neural Network Toolbox – інструментарій для створення та навчання нейронних мереж.

2. Fuzzy Logic Toolbox – набір засобів для моделювання та аналізу систем нечіткої логіки.

3. FIS (Fuzzy Inference System) – система нечіткого виводу для реалізації алгоритмів нечіткого керування.

4. ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) – адаптивна нейро-нечітка система виводу, що поєднує нейронні мережі та нечітку логіку.

Простір для роботи та інтерфейс користувача під час створення та моделювання (нечіткої) системи керування в програмному забезпеченні MATLAB представлений на рис.1.5.

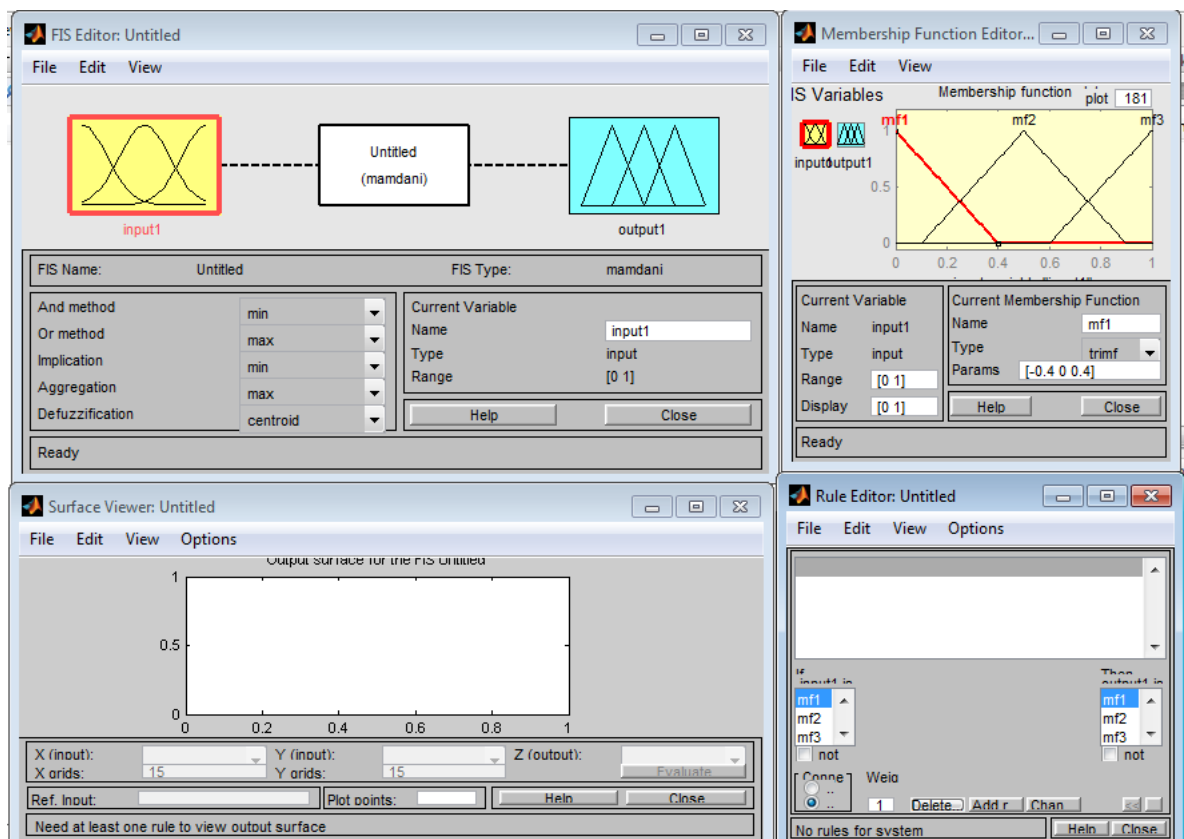


Рис. 1.5. Робочий простір програмного пакету Fuzzy Logic Toolbox

На сьогоднішній день MATLAB є дуже популярним програмним забезпеченням в багатьох країнах. Даний продукт є поширеним в багатьох провідних університетах та науково дослідних лабораторіях, підприємствах, тощо.

1.4. Постановка завдання на магістерську роботу

Проаналізувавши існуючі способи і методи регулювання тепловими об'єктами в технологічних процесах, сформулюємо основні задачі, які необхідно вирішити під час виконання даної магістерської роботи:

- Провести експериментальне дослідження на лабораторному об'єкті-імітаторі в лабораторних умовах, описати проведення експерименту, одержати графік перехідної характеристики ТКО, як базового компонента подальших досліджень.

- Здійснити моделювання системи керування тепловим об'єктом з використанням традиційних методів регулювання.

- Синтезувати і змоделювати систему керування на базі нечіткої логіки.

- Провести розробку автоматичної системи керування, що використовуватиме нейро-нечітку (гібридну) технологію.

- Провести імітаційне моделювання та аналіз результатів роботи традиційних, нечітких та гібридних контролерів.

Висновки до розділу 1

У даному розділі магістерської роботи здійснено аналіз та короткий опис основних методів автоматичного регулювання технологічних процесів при застосуванні в теплових об'єктах, описано три способи даного регулювання. Розглянуто основні поняття та положення, що стосуються систем керування, які базуються на нечіткій логіці. Розкрито суть мети керування даних систем. Здійснено аналіз ПП «MATLAB» як середовища для моделювання і проектування системи керування тепловим об'єктом на основі нечіткої логіки та нейро-нечіткої мережі. Також в даному розділі здійснена постановка задач для подальшої розробки магістерської роботи.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1. Аналіз та виявлення основних вхідних та вихідних величин

Перед початком будь-якого дослідження та здійснення подальшого математичного розрахунку об'єкта керування, є визначення вхідних та вихідних параметрів.

Об'єктом керування в даній магістерській роботі виступає імітаційна модель теплового об'єкта ТКО №10. Для кращого розуміння суті та принципу роботи даного об'єкта призначена структурна схема, що представлена на рис.2.1.

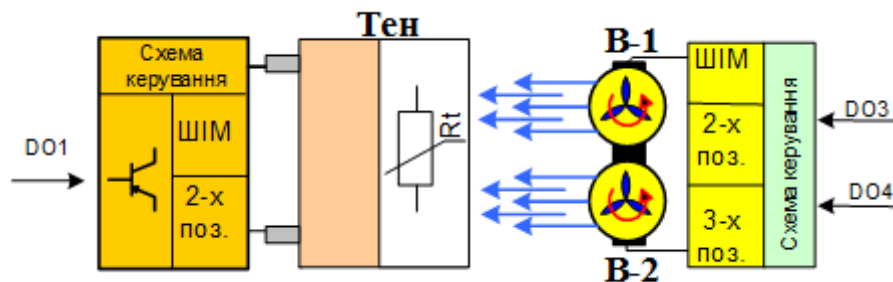


Рис. 2.1. Структурна схема об'єкта керування

Як видно з рисунка, об'єкт керування(ОК) складається з:

- тиристорного регулятора потужності, на вхід якого приходять дискретний сигнал DO1 від контролера Allen-Bradley SLC 500;
- нагрівного елемента лампи розжарювання Rn;
- нагнітача повітря – вентилятора В-1 із схемою керування, на вхід якого подаються дискретні вихідні сигнали DO3 і DO4 від регулятора;
- давач температури – термометр опору ТСП 50, який поміщений між нагрівним і охолоджуючим елементами.

В якості контролера для нашого об'єкта використовується мікропроцесорний промисловий контролер SLC500 американського виробника Allen-Bradley.

Контролер SLC500 являється промисловим модульним пристроєм який зарекомендував себе високою надійністю роботи в промисловості, зокрема в нафтогазовій галузі, широкий набір функціональних модулів розширюють потужності даного контролера – що в кінцевому дозволяє вирішити складні питання зв'язані з автоматизацію ТП.

Проаналізувавши принцип дії та структурну схему об'єкта керування, можемо визначити, що вихідною величиною є температура на об'єкті - T , усталене значення якої необхідно підтримувати. Вхідними величинами є потужність, що подається на нагрівний елемент P_H , та потужність роботи пристрою охолодження - вентилятора P_B . Необхідно звернути увагу, що змінювати потужність вентилятора можна лише в дискретному режимі. При подальших дослідженнях будемо вважати, що даний параметр приймає сталі значення (50% потужності або 100%), тому вважаємо, що $P_B = \text{const}$.

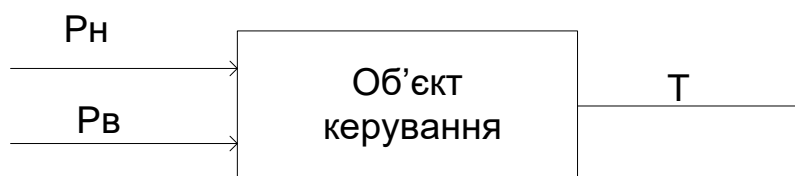


Рис. 2.2. Вхідні та вихідні величини об'єкта керування

Таким чином, заданий температурний режим на тепловому об'єкті можна підтримувати шляхом зміни потужностей нагрівного та охолоджувального компонентів.

2.2. Проведення експериментальних досліджень на об'єкті

Перед тим, як приступити до виконання процедури проведення експерименту на об'єкті керування та отримання перехідної характеристики ОК, яка є базовим і вхідним пунктом у проведенні подальших досліджень, необхідно зрозуміти суть та принципи функціонування системи автоматичного керування (САК), що використовується в даній магістерській роботі. Для цього, на рис.2.3. наведена структурна схема нашої САК.

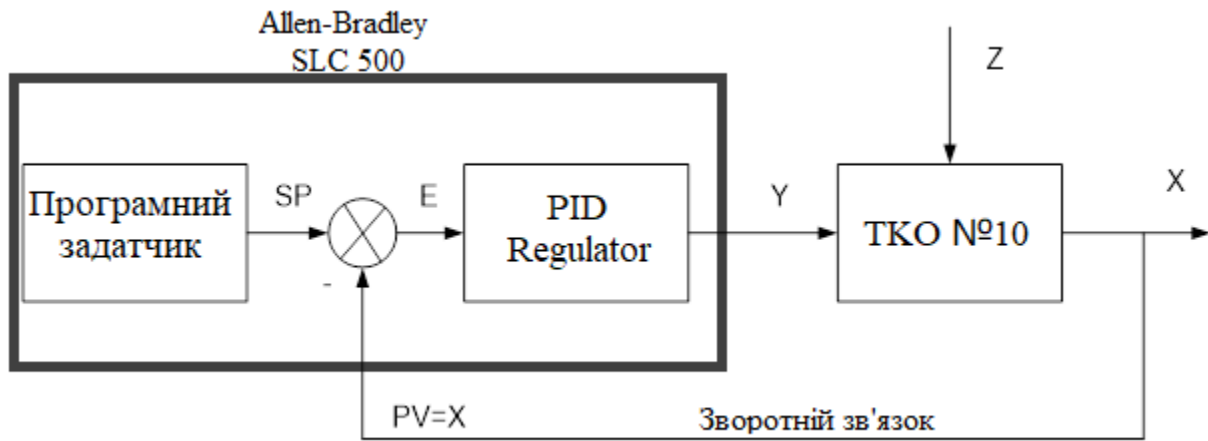


Рис. 2.3. Структурна схема САК: SP – сигнал завдання, ручний чи програмний задатчик (в багатьох випадках оператор системи керування); X – контрольований і технологічний параметр (температура T); $E = SP - PV$ - розбаланс (різниця між заданим і вимірюваним значенням параметра); Y – виконавча дія на об'єкт керування (дискретний вихідний сигнал регулятора); Z – збурення (сигнал з давача температури в ТКО)

В процесі роботи САК порівнює поточне значення вимірюваного параметра X із заданим значенням уставки SP, обчислює і усуває розбаланс E ($E = SP - PV$).

Для одержання перехідної характеристики об'єкта керування використовуємо програму RSLogix 500. Спочатку проводимо певні налаштування для коректного відображення зміни температури в часі.

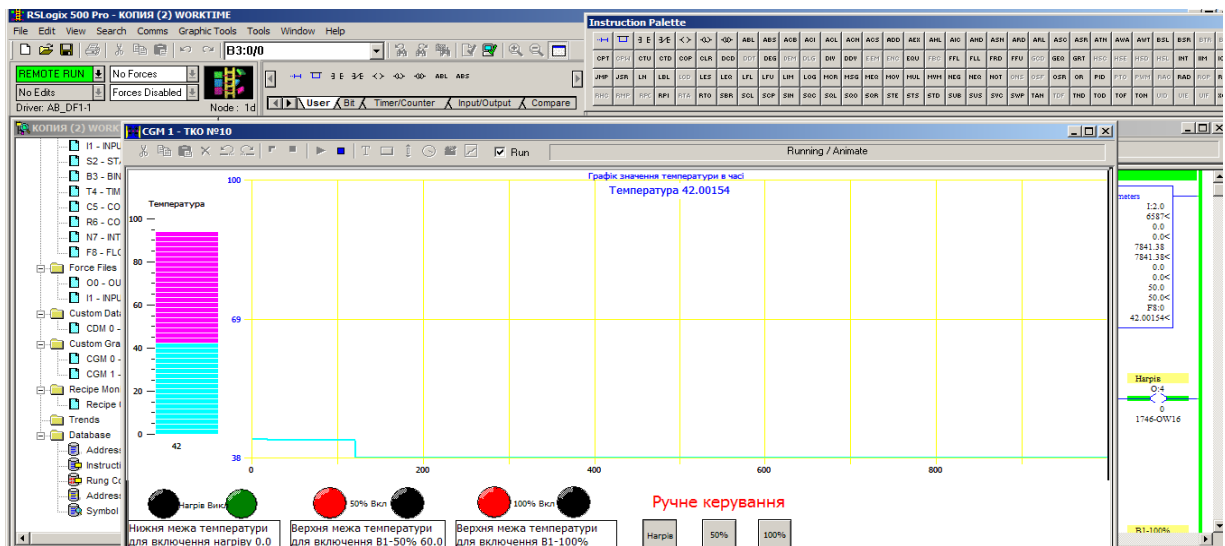


Рис. 2.4. Вікно програми «RSLogix»

Наступним кроком для визначення точки відліку є фіксація температури спокою, це кімнатна температура значення якої фіксується давачем температури що знаходиться в ТКО. Вмикаємо вентилятор В-1 на середнє положення (1-ша ступінь роботи, 50% потужності) і встановлюємо потужність нагріву на 1 % . Температура поступово зростатиме, аж поки через певний час не досягне усталеного значення. Зафіксована температура відповідає 32.431°C. Це точка відліку для правильного обрахунку передавальної функції даного теплового об'єкта.

Наступним етапом нашого експерименту буде встановлення значення ступеня нагріву рівному 51% потужності нагріву. Вводимо, таким чином збурення в систему. Фіксуємо зміну температури до нового усталеного значення. Нове усталене значення складає 56.111 °С.

Таким чином, після введення збурюючого впливу на САК досліджуваного лабораторного комплексу, шляхом зміни потужності на нагрівному елементі, отримуємо підвищення температури на $\Delta T = 56.111 - 32.431 = 23.68$ °С. Отримана перехідна характеристика зображена на рис.2.5.

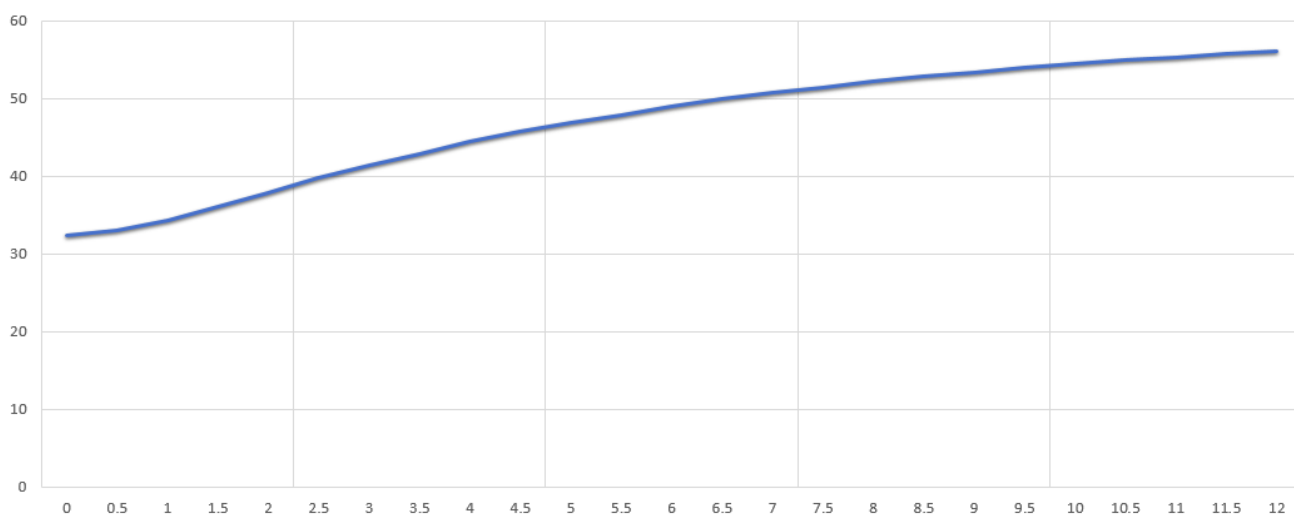


Рис. 2.5. Перехідна характеристика досліджуваного ТКО

Таким чином, було отримано перехідну характеристику об'єкта керування, що дозволить здійснити в подальшому математичний опис ОК, зокрема обчислити передавальну функцію об'єкта керування.

2.3. Визначення передавальної функції керованого об'єкта

Для того, щоб визначити передавальну функцію об'єкта керування, використовуючи зображення перехідної характеристики, необхідно провести оцифрування цих даних і їх обробку вибравши певний крок дискретності що відповідає фіксації зміни температури в часі, $k=0.5$ хв.

Отримані результати експерименту в оцифрованому вигляді заносимо в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Результати експерименту

t, хв	0	0.5	1	1.5	2	2.5	
T, °C	32.431	32.987	34.314	36.147	37.958	39.769	
t, хв	3	3.5	4	4.5	5	5.5	
T, °C	41.428	42.987	44.459	45.772	46.955	47.98	
t, хв	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
T, °C	49.047	49.993	50.808	51.537	52.229	52.879	
t, хв	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12
T, °C	53.449	54.004	54.495	54.942	55.368	55.75	56.111

Перед безпосередньою апроксимацією перехідної функції необхідно здійснити нормалізацію вхідних та вихідних фізичних величин, перевівши їх у безрозмірний вигляд. Це виконують за допомогою таких співвідношень:

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

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

T_{MIN} - початкове (нульове) значення вимірюваного параметра;

T_{MAX} - максимальне значення вибірки;

$y(t)$ - нормалізоване (безрозмірне) значення поточної температури.

Після виконання відповідних обчислень формуються оновлені значення вхідних та вихідних параметрів, які систематизуються у таблиці 2.2.

Вхідні та вихідні фізичні величини в безрозмірних одиницях

t, хв	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
y(t)	0	0.0235	0.0795	0.1569	0.2334	0.3099	0.3799	0.4458	0.5079
x(t)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t, хв	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
y(t)	0.563	0.613	0.657	0.702	0.742	0.776	0.807	0.836	0.864
x(t)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t, хв	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12		
y(t)	0.888	0.911	0.932	0.951	0.969	0.985	1		
x(t)	1	1	1	1	1	1	1		

Проводимо апроксимацію перехідної характеристики, використовуючи програму Арох.

Вікно програми «Арох» та графіки експериментальної та апроксимованої перехідних характеристик керованого об'єкта наведені у додатку А – на рисунках А1 та А2.

В результаті проведення апроксимації, отримуємо наступне значення передавальної функції об'єкта керування.

$$W_{ok}(p) = \frac{133.713 \cdot p^2 + 23.059 \cdot p + 1}{18104.070 \cdot p^3 + 1789.302 \cdot p^2 + 68.910 \cdot p + 1} \quad (2.2)$$

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

Коефіцієнт підсилення визначається як відношення зміни вихідної величини до зміни вхідної величини при нульових початкових умовах.

У нашому випадку, вхідна величина у відносних одиницях змінювалась від $R_{н1} = 1\%$ вхідного сигналу до $P = 51\%$ вхідного сигналу. Отже, $\Delta R_n = 51\% - 1\% = 97,78\%$.

Вихідна величина змінювалась від $T_1 = 32.431$ °С до $T_2 = 56.111$ °С.

У відносних одиницях $\Delta T = T_2 - T_1 / T_2 = 56.111 - 32.431 / 56.111 = 0.422$

Таким чином, коефіцієнт підсилення буде дорівнювати $k(p) = 0.422 / 0.50 = 0.8$

2.4. Визначення параметрів налаштування регулятора

Вибір типу регулятора та оптимальних параметрів його налаштування здійснюється з урахуванням характеристик об'єкта керування, природи та амплітуди збурень, а також вимог до динамічних і статичних властивостей системи автоматичного керування. Для подальшого визначення параметрів налаштування регулятора формується передавальна функція розімкнутої системи:

$$W'_{\text{роз}}(p) = k(p) * W_{ok}(p) = 0.8 * \frac{133.713 * p^2 + 23.059 * p + 1}{18104.070 * p^3 + 1789.302 * p^2 + 68.910 * p + 1} = \quad (2.3)$$

$$= \frac{106.9704 * p^2 + 18.44784 * p + 0.8}{18104.070 * p^3 + 1789.302 * p^2 + 68.910 * p + 1}$$

Знаходимо параметри налаштування регулятора методом параметричної оптимізації в середовищі Matlab. Створюємо модель системи керування в додатку Simulink.

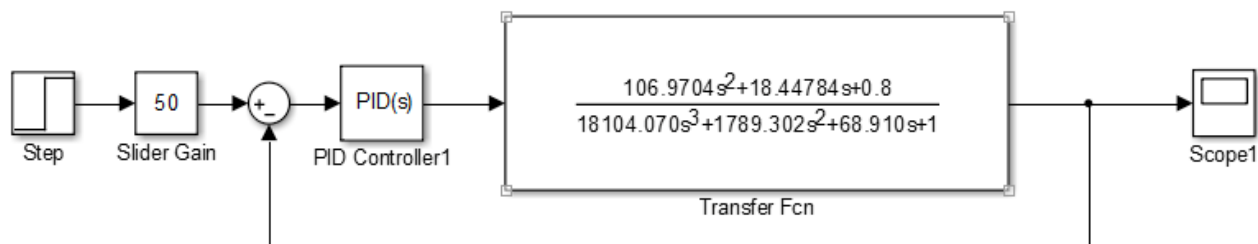


Рис. 2.6. Модель системи керування з застосуванням PID регулятора

В блоці PID Controller проводимо налаштування та вибір типу регулятора. Найбільш оптимальним для даного випадку є PID – регулятор. Отримання графіка перехідного процесу та параметрів налаштування регулятора показане в додатку Б – на рисунках Б1 та Б2.

Таким чином, провівши дослідження, отримуємо наступні значення параметрів PID -регулятора:

- пропорційна складова $k_p = 3.34266553854898$;
- інтегральна складова $k_i = 0.0660222832739565$;
- диференціальна складова $k_D = 6.34491035985691$.

Отже, передавальна функція регулятора має вигляд:

$$W_{\text{рег}}(p) = 3.3426655 + \frac{0.066}{s} + \frac{du}{dt} * 6.3449 \quad (2.4)$$

Таким чином, було отримано параметри налаштування ПІД-регулятора, які в подальшому будуть внесені в блок PID регулятора в середовищі програмування контролера SLC500, що в кінцевому буде використовуватись для керування ТКО об'єктом.

Після розрахунку параметрів налаштування регулятора, переходимо до процесу моделювання створеної системи керування в середовищі Simulink. Запускаємо модель кнопкою Start ►, і отримуємо у вікні Scope графік залежності зміни температури від часу (рис.2.7.), подальші значення часу в графічному матеріалі буде подаватись в масштабних одиницях середовища Matlab, де верхня межа 250 відповідає 25 хв реального часу, тощо.

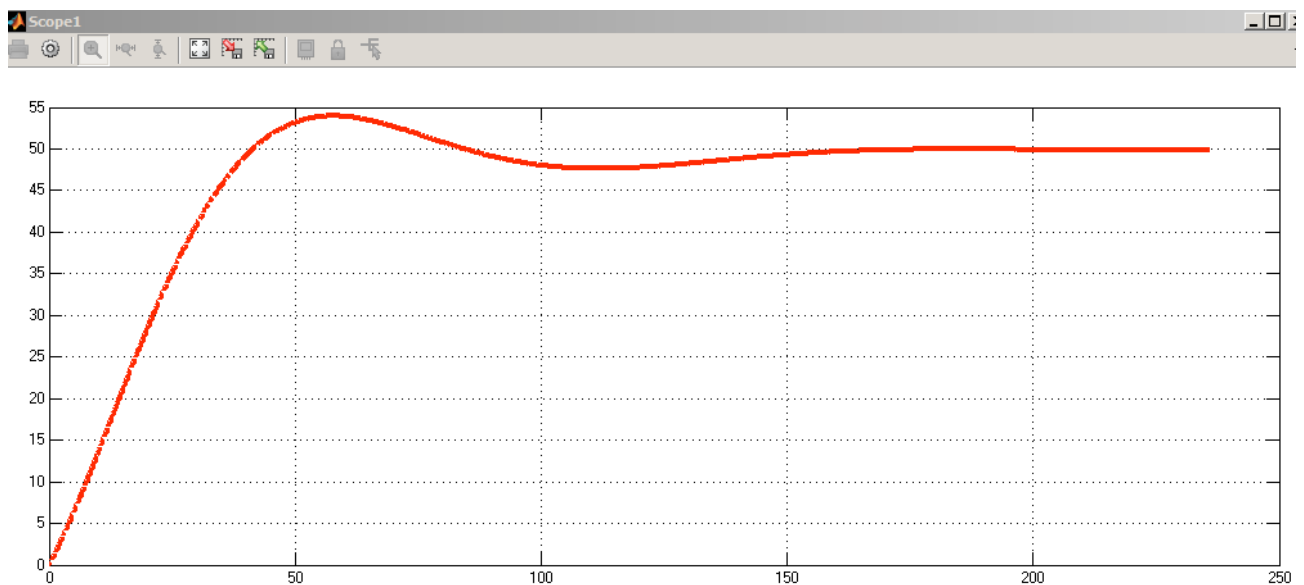


Рис. 2.7. Графік виходу системи (зміни температури в часі)

Аналізуючи графік перехідного процесу, можливо оцінити безпосередні показники ефективності системи керування. Показники якості автоматичної системи керування характеризують комплекс властивостей, що забезпечують

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

Прямі показники визначаються на основі графіка перехідного процесу, що формується при ступеневому зовнішньому впливі. Одним із ключових показників цієї категорії є величина перерегулювання.

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

де $A_1, x(\infty)$ – відповідно, перше характеризується як найбільше відхилення системи від заданого значення, а друге — як встановлене або стабільне значення у кінці перехідного процесу.

Тривалість перехідного процесу (час регулювання) визначається як проміжок часу від моменту прикладання ступінчатого впливу до моменту, коли відхилення керованої величини від її усталеного значення не перевищує заздалегідь встановлену допустиму величину σ_n . У промислових системах автоматизації зазвичай використовують стандартні значення цієї величини $\sigma_n = 0,05x(\infty)$.

Прямим показником якості служить і ступінь затухання:

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

де A_1 та A_3 – підрядні максимальні відхилення амплітуди однакового знаку.

Визначимо прямі показники якості системи:

- час перехідного процесу: $t = 20$ хв;

- перерегулювання: $\sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100\% = \frac{53.9 - 50}{50} \cdot 100\% = 7.8\%$;

- ступінь затухання: $\psi = 1 - \frac{A_3}{A_1} = 1 - \frac{50 - 47.61}{53.9 - 50} = 0.612$.

Отже, з даних прямих показників якості системи можна судити про досить хорошу якість регулювання та правильність вибору і налаштування регулятора. Графічні залежності динаміки роботи системи з ПІД-регулятором наведені у додатку В на рисунках В.1 - В.4.

При здійсненні на систему керування випадкових впливів, може спостерігатися суттєве зниження якості та точності керування.

Вводимо в канал завдання досліджувальної системи змінне ступеневе завдання в часі - ~50-20% зміни SP, $t=250$.

Зміну завдання за синусоїдальним законом – амплітуда 2-5%, частота 0,015 рад/сек.

Шуми в каналі регулювання - 2-3%, $t=5s$.

Збурення в каналі регулювання - сигнал збурення на рівні 30%, $t=400$.

Для моделювання зазначених сигналів у середовищі Simulink застосовується блок Uniform Noise Generator. Спершу сигнали зміни завдання подають у канал SP через відповідні блоки, з'єднані із суматором та блоком Constant. Після запуску симуляції результати переглядаються у вікні Scope. Далі, замінивши блоки генераторів шумів у каналі завдання, ці сигнали підключають до каналу регулювання, а результати моделювання також відображаються у вікні Scope. Загальна структура моделі для дослідження роботи ПІД-регулятора із застосуванням генераторів сигналів наведена на рис. 2.8 та в додатку Г (рис. Г1).

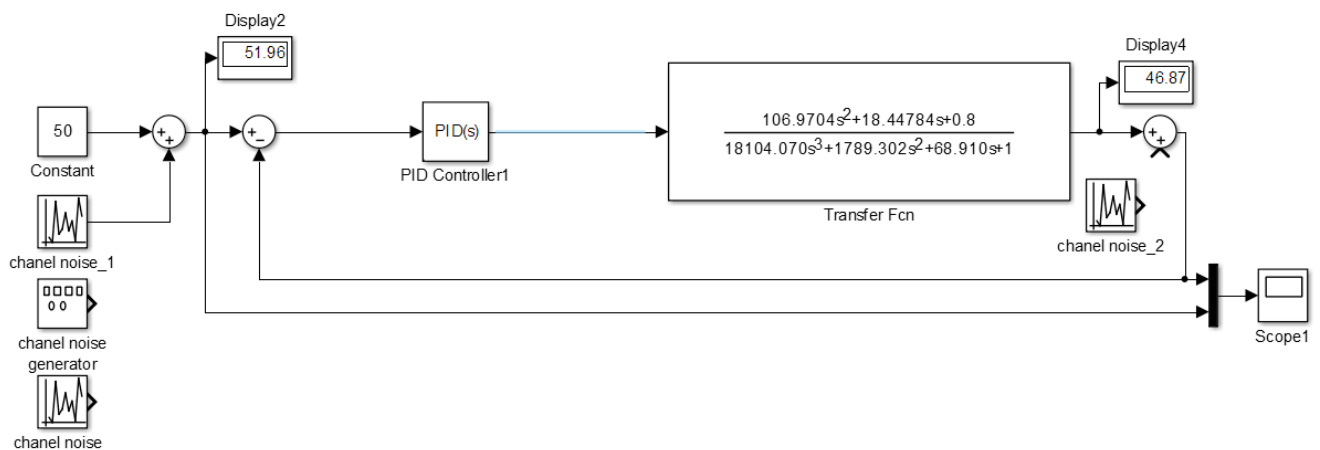
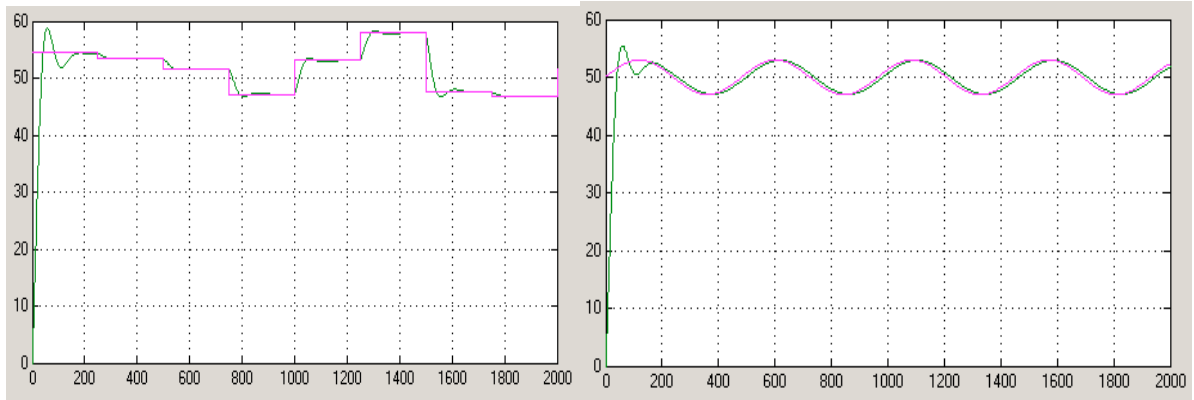


Рис. 2.8. Загальний вигляд імітаційної моделі з використанням ПІД регулятора та генераторів сигналів

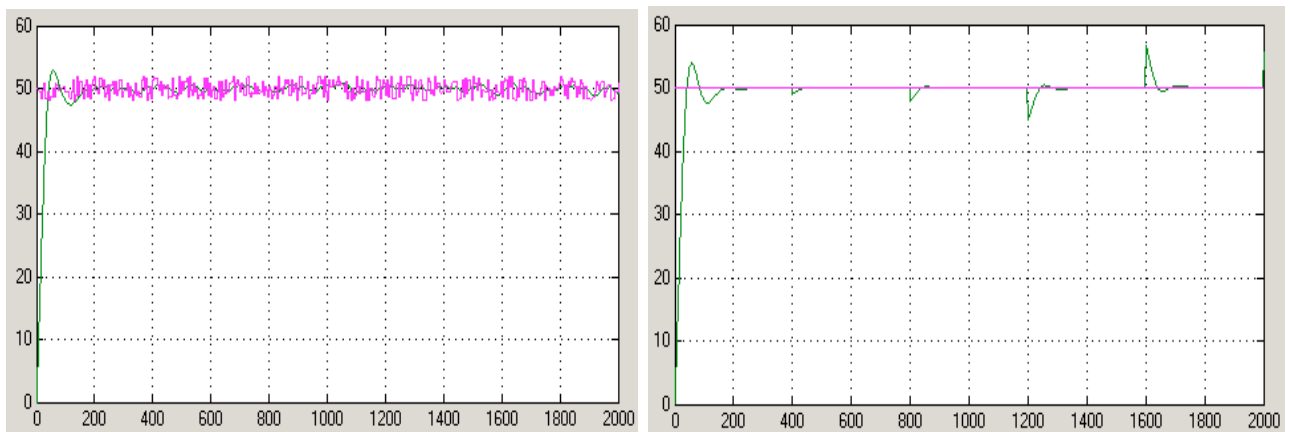
Динаміка зміни регулюючого параметру при використанні різних генераторів сигналів наведена на наступних графіка - рис.2.9-2.10.



а)

б)

Рис. 2.9. Графіки перехідного процесу системи керування з традиційним ПІД-регулятором при введенні: а) змінного ступеневого завдання в часі; б) змінного завдання за синусоїдальним законом



а)

б)

Рис. 2.10. Графіки перехідного процесу системи керування з традиційним ПІД-регулятором при введенні: а) шумів в канал завдання; б) збурення в канал регулювання

Дивлячись на графіки рис.2.9-10, можна говорити, що введення випадкових сигналів в систему впливає на якість і точність керування, однак загалом, в нашому випадку, при ПІД-регулюванні, даний вплив є допустимим і ним можна

знехтувати так як система веде себе коректно враховуючи додаткові введені завади.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі магістерської роботи наведено стислий опис теплового об'єкта системи керування та проведено аналіз його вхідних і вихідних величин. Детально розглянуто експериментальні дослідження безпосередньо на об'єкті керування, під час яких отримано перехідну характеристику та сформовано математичну модель у вигляді передавальної функції, що слугувала основою для подальших досліджень і розробок. За допомогою програмного забезпечення RSLogix500 отримано дані та графічне відображення перехідної характеристики, які були використані для обробки та апроксимації з метою визначення передавальної функції об'єкта керування, таким чином вирішено завдання математичної ідентифікації об'єкта. Використовуючи тулбокс Simulink у середовищі MATLAB, виконано моделювання системи керування тепловим об'єктом та розраховано параметри налаштування ПД-регулятора. Було визначено прямі показники якості перехідного процесу, аналіз яких підтверджує, що застосована традиційна система ПД-регулювання забезпечує необхідні умови керування.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ ОБ'ЄКТОМ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

У зв'язку з динамічним розвитком інформаційних технологій та прагненням підвищити якість функціонування складних автоматизованих систем керування постає питання практичного впровадження нечітких систем для управління та регулювання різноманітних технічних об'єктів і процесів.

У випадках виникнення нових типів задач керування, що базуються на діях та рішеннях оператора в контурі «Людина – ЕОМ», спостерігається необхідність певного поступу від точності та детермінованості. Ефективна організація діалогу в такому контурі вимагає використання мов, близьких до природних, здатних описувати нечіткі категорії, наближені до людських уявлень і понять.

У цьому контексті доцільно застосовувати концепцію лінгвістичних змінних, вперше введenu Л. Заде, що дозволяє відтворювати приблизний мовний опис процесів у ситуаціях, коли точне детерміноване представлення неможливе. При цьому слід зауважити, що багато лінгвістично сформульованих нечітких понять не поступаються за інформативністю точним математичним описам [8].

У порівнянні з класичними системами керування, системи, що базуються на нечіткій логіці, вирізняються рядом переваг, особливо помітних у контексті нечіткого управління. Насамперед, нечітка логіка забезпечує адекватне відтворення особливостей людського мислення, включаючи процес прийняття рішень людиною та моделювання складних об'єктів засобами природної мови.

Для реалізації управління на основі теорії нечітких множин і нечіткої логіки необхідним елементом є пристрій, здатний формувати керуючі впливи на об'єкт – так званий нечіткий регулятор.

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

алгоритмами генетичної оптимізації, і характеризуються високими можливостями формалізації процесів проектування.

3.1. Теоретичні основи та особливості керування на базі нечіткої логіки

В даному розділі розглянуто основні підходи і етапи процесу формування, налаштування, програмування, синтезу і роботи систем керування на базі нечіткої логіки.

При побудові моделей систем керування технологічними об'єктами з дискретними та неперервними вихідними величинами на основі нечіткої логіки використовується концепція нечіткого логічного виводу.

Нечіткий логічний вивід являє собою метод апроксимації функціональної залежності «вхід–вихід» за допомогою лінгвістичних правил типу «ЯКЩО..., ТО...» та операцій над нечіткими множинами.

Функціональна схема процесу нечіткого логічного виводу в спрощеному вигляді зображена на рисунку 3.1.

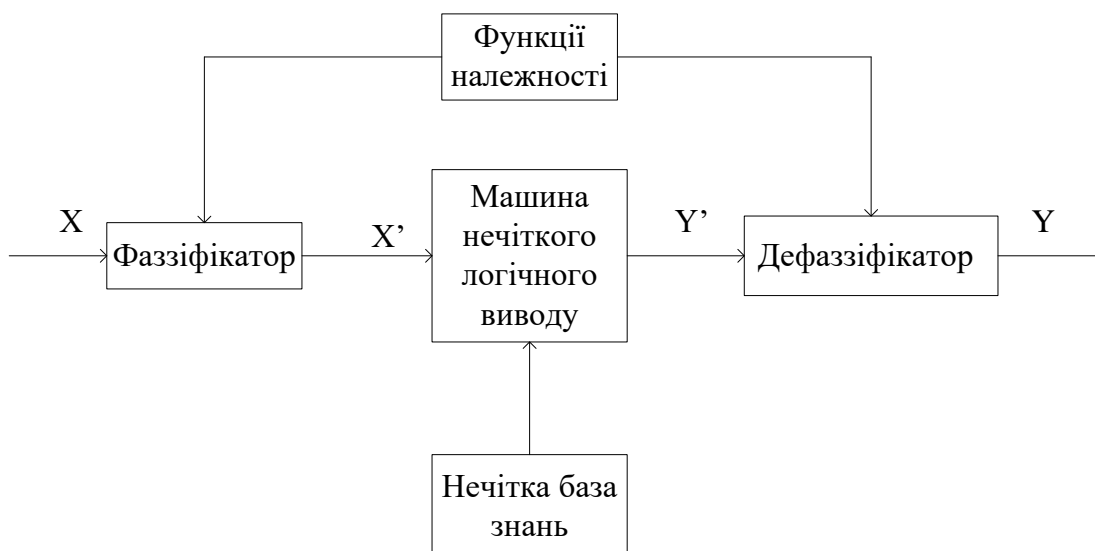


Рис. 3.1. Схема нечіткого логічного виводу

На даній схемі, виконання першого етапу нечіткого виводу виконує фаззифікатор, який перетворює чітке значення входу X у нечітку множину X' . Процедуру безпосереднього нечіткого виводу здійснює машина нечіткого

логічного виводу, яка на основі заданої нечіткої бази знань (набору правил) формує вихідну нечітку змінну Y' . Дефаззифікатор здійснює зворотне перетворення нечіткої змінної у чітку Y . Графіки функцій належності використовуються на етапах фаззифікації та дефаззифікації.[11]

На сучасному етапі розвитку нечітких систем запропоновано низку алгоритмів нечіткого логічного виводу, серед яких найбільш поширеними є:

- Алгоритм Мамдані (Mamdani) – один із перших алгоритмів, впроваджених у практику нечіткого керування. Запропонований у 1975 році англійським математиком Ебрахімом Мамдані як новий підхід до регулювання парових двигунів.

- Алгоритм Цукамото (Tsukamoto).

- Алгоритм Ларсена (Larsen).

- Алгоритм Сугено (Sugeno) – розроблений Сугено та Такагі.

- Спрощений алгоритм нечіткого виводу.

Кожен із зазначених методів відрізняється підходом до апроксимації правил «ЯКЩО..., ТО...» та обробки нечітких множин, що визначає їх ефективність у різних прикладних задачах керування.

Нечіткий інференц метод Mamdani – це найбільш звична нечітка методологія, що використовується. Метод Mamdani був серед перших сформованих систем керування, які використовували теорію нечітких множин. Це було запропоновано в 1975 Ебрагімом Мамдані як спроба керувати паровим механізмом, синтезуючи набір лінгвістичних правил керування, отриманих від досвідчених операторів. Спроба Мамдані базувалася на документі Лотфі А. Заде (1973) і на нечітких алгоритмах для складних систем і вирішальних процесів. Хоча інференц процес, який описуємо в наступних розділах, відрізняється від методів, описаних у первісному документі, основна ідея аналогічна.

Mamdani -тип передбачає, що вихідні функції належності будуть нечіткими множинами. Системи Sugeno-типу підтримують цей тип моделі, але можуть використовуватися, щоб моделювати будь-яку інференц систему, в якій вихідні функції належності є тільки лінійними або постійними.

Порівнюючи розробку та моделювання системи керування з використанням традиційних методів та з використанням нечіткої логіки, на користь фаззі-логіки можна навести певні аргументи та особливості, зокрема:

- по-перше – нечітка логіка базується в основному на інтуїцію експерта та досвіді і знаннях інженера. Фаззі-логіка використовує елементи повсякденної мови для опису поведінки системи на відміну від складного математичного опису при проектуванні звичайних систем на основі моделей;

- по-друге це ефективний шлях розробки, оптимізації і побудови дуже складних систем;

- по-третє – це метод системного підходу, що дозволяє розробляти стійкі і безпомилкові системи.

Фаззі-логіку краще використовувати в наступних випадках:

- коли важко або неможливо побудувати математичну модель для поставленої задачі;

- якщо є наявність великої кількості параметрів, в тому числі і нелінійних або незалежних від часу.

Однак, у деяких ситуаціях доцільніше все ж використовувати традиційні системи керування. Без фаззі-логіки краще обійтися в наступних випадках:

- коли задача проста і легко вирішується класичними методами;

- коли існує адекватна і добре вивчена модель поставленої задачі;

- коли проблема зовсім неординарна і не може бути вирішена як звичайними методами так і методами фаззі-логіки тобто характер і степінь впливу одних змінних на інші невідомий.

Розробка та моделювання систем на основі нечіткої логіки ґрунтується на використанні знань експерта-технолога у відповідній предметній області. Наявність практичного досвіду щодо характеристик процесу та взаємодії ключових параметрів дозволяє інтегрувати фаззі-логіку як засіб розширення функціональних можливостей існуючого процесу проектування. Використання сучасних інструментів підтримки розробки значно скорочує цикл створення системи.

Процес розробки проектів з застосуванням нечіткої логіки включає п'ять основних етапів:

1. Формалізація задачі – визначення керованих і контрольованих змінних, зіставлення словесного опису процесу з конкретними фізичними величинами;
2. Створення бази правил управління – формулювання фазі-правил та визначення методів дефазіфікації вихідних даних;
3. Оптимізація в режимі offline – інтерактивний аналіз поведінки системи із застосуванням підготовлених даних або програмної моделі об'єкта управління;
4. Оптимізація в режимі online – підключення системи до реального об'єкта та корекція компонентів системи безпосередньо в експлуатаційних умовах, що дозволяє врахувати нюанси, недоступні при моделюванні;
5. Реалізація проекту – впровадження розробленої системи на базі нечіткої логіки для експлуатації в управлінні процесами.

3.2. Розробка регулятора на основі нечіткої логіки

У більшості випадків автоматизоване керування технологічними процесами відбувається в умовах неповної або нечіткої визначеності, коли на систему впливають фактори, що складно піддаються формалізації. Такі системи відзначаються високим рівнем структурної та динамічної складності, через що застосування традиційних детермінованих або стохастичних моделей не забезпечує отримання необхідних експлуатаційних характеристик. За таких умов побудова адекватних математичних моделей об'єктів керування можлива на основі теорії нечітких множин, яка створює передумови для синтезу інтелектуальних систем управління [12].

Проектування інтелектуальних нечітких логічних регуляторів (фазі-регуляторів) ґрунтується на побудові та формалізації системи «знань», що реалізується за допомогою методів пошуку, представлення й обробки знань. Таким чином, розроблення нечітких промислових регуляторів базується на

засадах штучного інтелекту - напрямку сучасної кібернетики, який активно розвивається у США та інших науково розвинених країнах світу [13].

3.2.1. Алгоритм процесу розробки нечіткого регулятора, як складової нечіткого проекту

Моделювання системи керування тепловим об'єктом використовуючи нечітку логіку, вимагає користувача розробити нечіткий проект (фаззі-проект), який як і будь-який проект системи керування складається з окремих системоутворюючих елементів.

Типова загальна структура фаззі-проекту зображена на рис. 3.2.

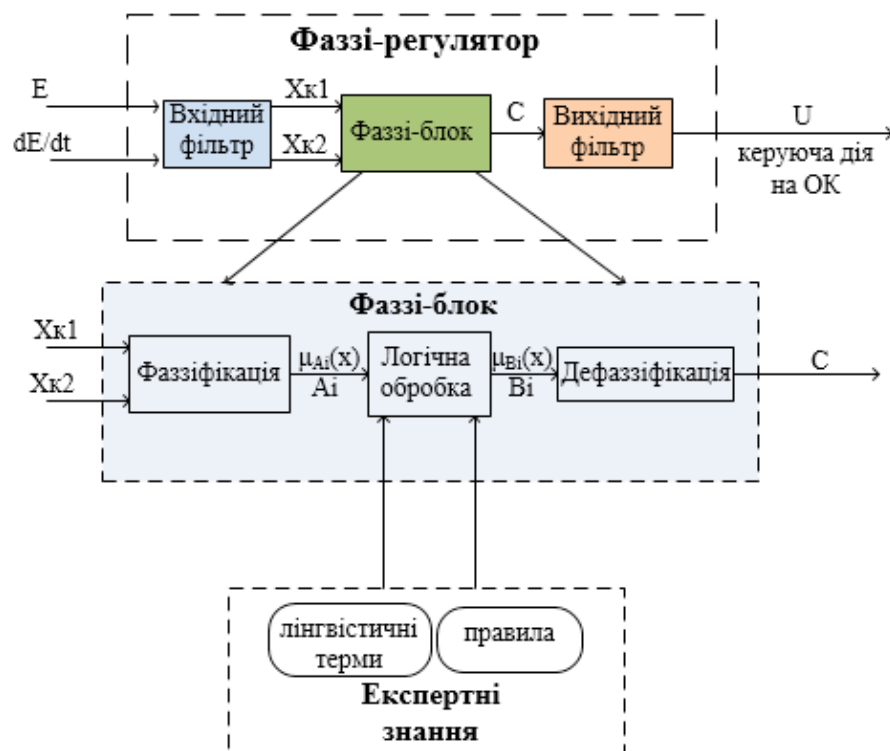


Рис. 3.2. Структура фаззі-проекту

Сигнали розбалансу E та швидкості зміни розбалансу dE/dt надходять на вхід фаззі-регулятора, пройшовши обробку вхідного фільтра поступають на блок фаззіфікації.

Етап фаззіфікації передбачає отримання з чітких значень сигналів на вході відповідні нечіткі діапазони. Така процедура дозволяє отримати інформацію про

належність чіткого значення сигналу тому чи іншому терму, а також інформацію про ступінь його належності в частках одиниці.

Для нашого випадку для теплового об'єкта лінгвістична змінна «Температура» матиме множину із п'яти термів: «досить холодно», «холодно», «нормально», «тепло» і «досить тепло».

За допомогою побудови функцій належності, можемо для довільного елемента універсальної множини обчислити його ступінь належності.

Нечіткі діапазони, отримані в результаті фазифікації, слугують вхідними даними для подальшої логічної обробки, тобто етапу інференції.

Відповідно, головними завданнями процесу фазифікації є: перевірка коректності та узгодженості сформованих нечітких діапазонів; перетворення вимірюваних або контрольованих параметрів у їх нечіткі еквіваленти; а також формування інформаційної бази для подальшої логічної обробки результатів.

На блок логічної обробки, як бачимо на схемі, дані надходять із блоку фазифікації, уже перетворені у нечіткі діапазони значень, а також інформація від блоку користувача (експертні знання). Інформація, що надходить від користувача, подається у формі набору правил, які мають таку загальну структурну організацію:

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

У системі нечіткого керування правила відображають експертні знання про те, які дії необхідно здійснювати за умови істинності певних властивостей, визначених на етапі фазифікації. На цьому етапі виконується перетворення вхідних нечітких даних у відповідні керуючі впливи (B_i), що також мають нечіткий характер [7].

Таким чином, вхідними даними для блоку логічної обробки є результати фазифікації, набір користувацьких правил і вихідні нечіткі керуючі сигнали.

Подальше перетворення виконується у блоці дефазифікації, де нечіткі результати, отримані після логічного висновку, трансформуються в чіткі кількісні значення, придатні для безпосереднього керування об'єктом. Задачі дефазифікації є оберненими до фазифікації: маючи набір нечітких діапазонів, необхідно

отримати однозначне, формалізоване значення, зрозуміле для обчислювальної системи.

Процедура дефазифікації є доволі складною, оскільки вимагає точного відображення нечітких результатів у детерміновану форму. Для цього застосовуються різні методи, серед яких найпоширенішим є метод центра ваги (метод Мамдані), що забезпечує узгоджене перетворення нечітких оцінок у конкретні керуючі дії.

Як видно із схеми 3.2, ключовим вузлом нечіткого регулятора (фаззі-регулятора) виступає фаззі-блок, який являє собою поєднання трьох складових: фаззіфікації, логічної обробки та дефаззіфікації. Однак процес розробки фаззі-регулятора включає також ряд інших завдань попереднього аналізу системи керування та перевірки роботи утвореного контуру регулювання.

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

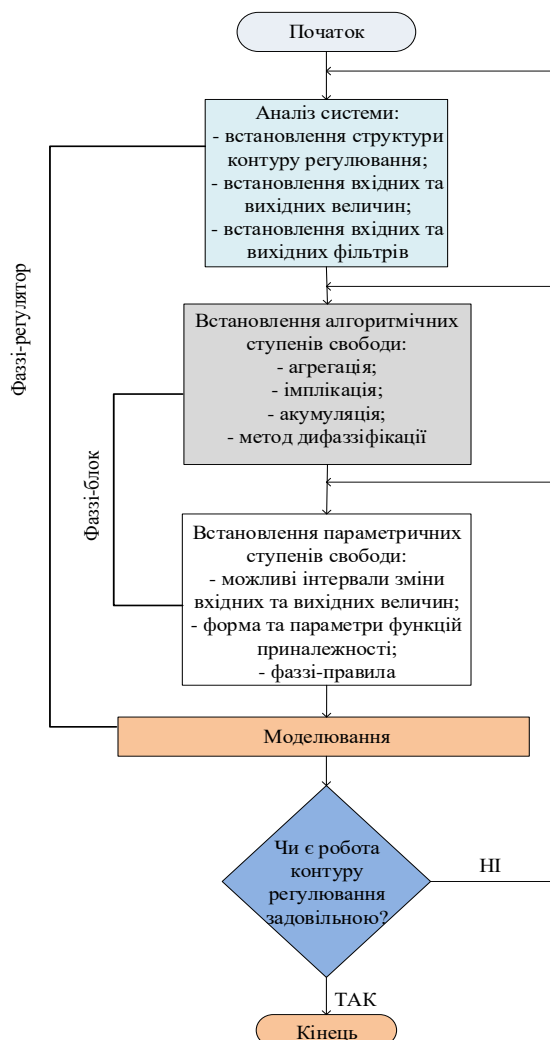


Рис. 3.3. Алгоритм розробки фаззі-регулятора

Процес створення фаззи-регулятора є складним, багатоступеневим і потребує високої кваліфікації та концентрації уваги з боку експерта. Його реалізація включає послідовне виконання взаємопов'язаних етапів, кожен з яких впливає на точність і ефективність функціонування майбутньої системи [14].

Після розроблення та інтеграції нечіткого регулятора в систему автоматичного керування обов'язковим етапом є проведення моделювання, що дозволяє оцінити працездатність, стабільність та відповідність отриманих результатів визначеним технічним вимогам і поставленим завданням.

3.2.2. Розробка нечіткого регулятора в середовищі MATLAB

Перед тим, як безпосередньо перейти до розробки нашого фаззи-регулятора, зокрема проведення робіт на першому етапі, в середовищі FIS Editor, необхідно визначитися з найменуванням лінгвістичних змінних та відповідних їм терм-множин.

В якості вхідних параметрів системи нечіткого виводу будемо розглядати 2 нечіткі лінгвістичні змінні: *«Різниця заданого і фактичного значень температури»* та *«Швидкість зміни розузгодження»*.

Переходимо безпосередньо до налаштувань структури фаззи-регулятора у середовище FIS Editor, що викликається командою <fuzzy> в командному вікні MATLAB. Редактор систем нечіткого виводу FIS Editor є основним засобом, що використовується для створення і редагування нечітких систем керування в графічному режимі.

Після відкриття вікна відповідного програмного додатка здійснюється налаштування основних параметрів системи нечіткого регулювання, зокрема:

- визначається кількість вхідних сигналів - два (що відповідають відхиленню керованої величини та її часовій похідній);
- встановлюється кількість вихідних сигналів - один;
- задаються назви вхідних змінних - “Error” та “dError”;
- визначається назва вихідної змінної - “Control”;

- обирається тип нечіткого регулятора - “Mamdani”;
- задаються методи нечіткого логічного виводу: and method - min, or method - max, implication - min, aggregation - max;
- для етапу дефазифікації використовується метод centroid (центр ваги).

Таке налаштування забезпечує коректне функціонування моделі нечіткого регулятора та створює основу для подальшого моделювання і тестування системи.

Після проведення налаштувань та редагувань вікно редактора FIS матиме наступний вигляд:

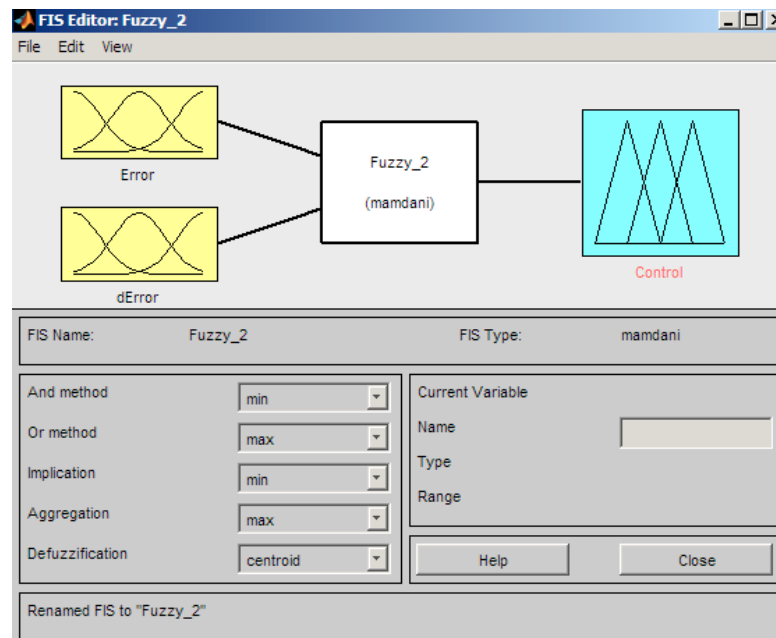


Рис. 3.4. Структура нечіткого регулятора в середовищі FIS Editor

Зберігаємо отриману модель нечіткої системи, та переходимо до другого, не менш важливого, етапу побудови функцій належності.

Побудову функцій належності здійснюватимемо у редакторі Membership Function Editor. Даний редактор функцій належності дозволяє користувачу аналізувати і модифікувати функції належності деякої структури FIS в графічному режимі. Для кожної функції належності можна змінити її ім'я, тип і параметри. В редакторі представлено можливість вибору будь-якої з 11 вбудованих функцій належності, або ж, навіть, задати власну функцію належності.

Переходимо до присвоєння функцій належності вхідним і вихідним лінгвістичним змінним.

Для входу «Error», скориставшись даними перехідної характеристики, вважатимемо задане значення температури на об'єкті керування рівним 50°C , а фактичне значення може коливатися в діапазоні від 45°C до 55°C . Таким чином значення різниці SP-PV буде в межах $[-5;5]$. Даний діапазон на графіку функцій належності буде відповідати терму названого як NN(negative- negative) (від'ємне велике) діапазон значень $(-\infty;2.5]$. Графік функції належності терму N(Negative) означає «від'ємне мале», та охоплює діапазон від $[-5;2.5]$. Терм Z(Zero) та відповідає діапазону $[-2.5;2.5]$. Діапазон значень $(0;2.5]$ належить графіку терма P(Positive), що означає «додатне мале». Терм PP(Positive-Positive) означає «додатне велике» і його графік охоплює діапазон значень $[2.5;+\infty)$. Графіки функцій належності для вхідної величини «Error» побудовані в редакторі Membership Function Editor, зображено на рис. 3.5.

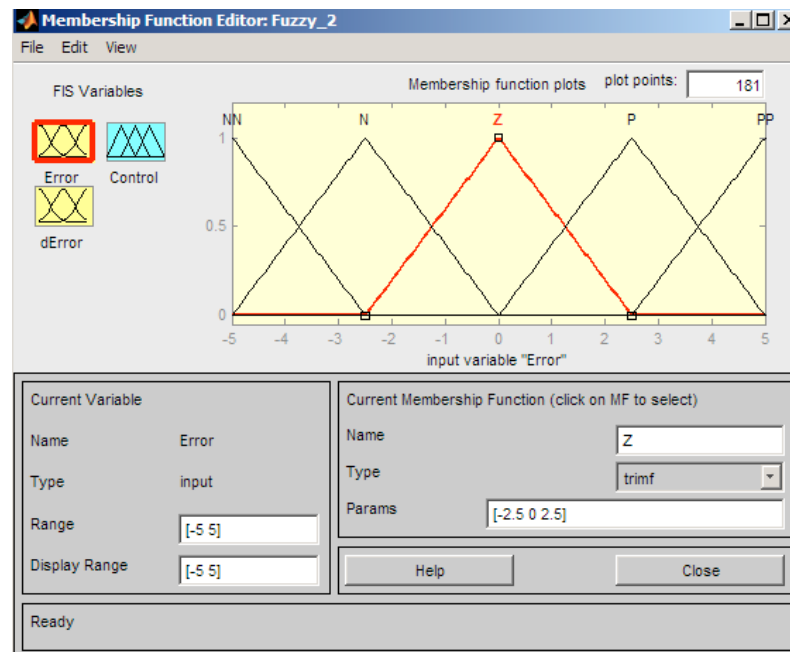


Рис. 3.5. Графік функцій належності для змінної «Error»

Як видно з рисунка, діапазон зміни вхідної змінної «Error» в межах $[-5; 5]$, що взятий на основі багаторазових експериментів на об'єкті керування.

Для вхідної змінної «dError» (швидкість зміни розбалансу) кількість термів рівна 5, через те, що об'єкт керування достатньо інерційний та для підвищення

якості регулювання. Графік функції належності терму Z («близько нуля») охоплює діапазон $[-0.5; 0.5]$, а терми NN (negative- negative) та N(negative), означають відповідно «від’ємне велике» та «від’ємне мале». Графіки їх функцій належності охоплюють проміжки $(-\infty; -0.5]$ та $[-1; 0)$ відповідно. Терми P (Positive) та PP(Positive-Positive), означають відповідно «додатне мале» та «додатне велике». Графіки їх функцій належності охоплюють проміжки $(0; 1]$ та $[0.5; \infty)$ відповідно.

Графіки функцій належності для вхідної величини «dError» побудовані в редакторі Membership Function Editor, зображено на рис.3.6.

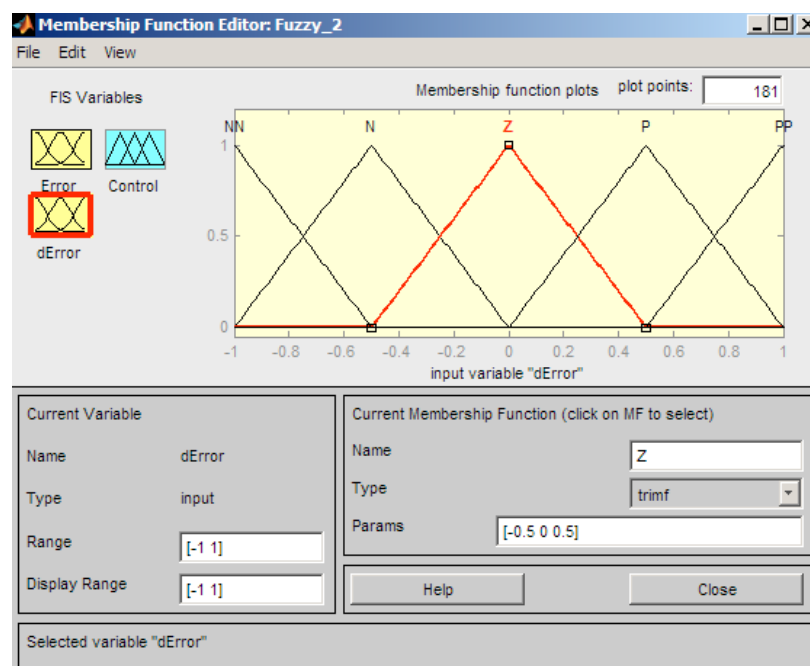


Рис. 3.6. Графік функцій належності для змінної «dError»

Як видно з рисунка, діапазон зміни вхідної змінної «dError» в межах $[-1; 1]$, що взятий на основі багаторазових експериментів на об’єкті керування.

А тепер побудуємо, графіки функцій належності вихідної змінної «Control» (вихідна величина – керуючий вплив регулятора на нагрівний елемент ОК (зміна степеню потужності)).

В результаті експериментів та відомостей про конструктивні особливості об’єкта керування відомо, що в якості виконавчого механізму використовується тиристорний регулятор напруги (потужності), через який можна змінювати

потужність на нагрівному елементі, а відповідно і регулювати температуру. Регулятор може змінювати завдання виконавчому механізму у діапазоні степені потужності на тиристорному регуляторі: 0 – 100%.

Для вихідної змінної «Control» вибираємо наступні терми:

- Z(Zero) – мінімальне значення з вказаного діапазону, відповідає значенням потужності, що відповідає нулю. Охоплює проміжок $[0;0]$, у відсотках в даному і наступних випадках;

- XZ(X-Zero) – відповідає найменшому значенню потужності, що впливає на нагрівний елемент і охоплює діапазон $[0;28.56]$;

- S(Small) – відповідає малому значенню потужності і охоплює діапазон $[14.28;42.84]$;

- XS(X-Small) – відповідає середньому значенню потужності з вищезгаданого діапазону і охоплює значення потужності в діапазоні $[28.56;57.12]$;

- M(Middle) – відповідає дещо більшому середнього значення потужності і охоплює значення потужності в діапазоні $[42.84;71.4]$;

- XM(X-Middle) – відповідає значно більшому середнього значення потужності і охоплює значення потужності в діапазоні $[57.12;85.68]$;

- L(Large) – відповідає великому значенню потужності, включає проміжок $[85.68;100]$;

- XL(X-Large) - максимальне значення з вказаного діапазону потужності, включає проміжок $[100;100]$.

Графіки функцій належності для вихідної величини «Control» побудовані в редакторі Membership Function Editor, зображено на рис. 3.7.

Як видно з рис.3.7. функція належності вихідного сигналу складається з п'яти лінгвістичних змінних типу trimf. Скупчення лінгвістичних змінних в середині функції належності призначено для кращої стабілізації вихідного сигналу та зменшення перегулювання.

Варто підкреслити, що геометрична форма термів вихідної змінної не має вирішального впливу на роботу системи порівняно з формами термів вхідних параметрів. Визначальним чинником для вихідної змінної є положення

максимуму (пікової точки) відповідного терму, яке безпосередньо впливає на результат процесу нечіткого виводу.

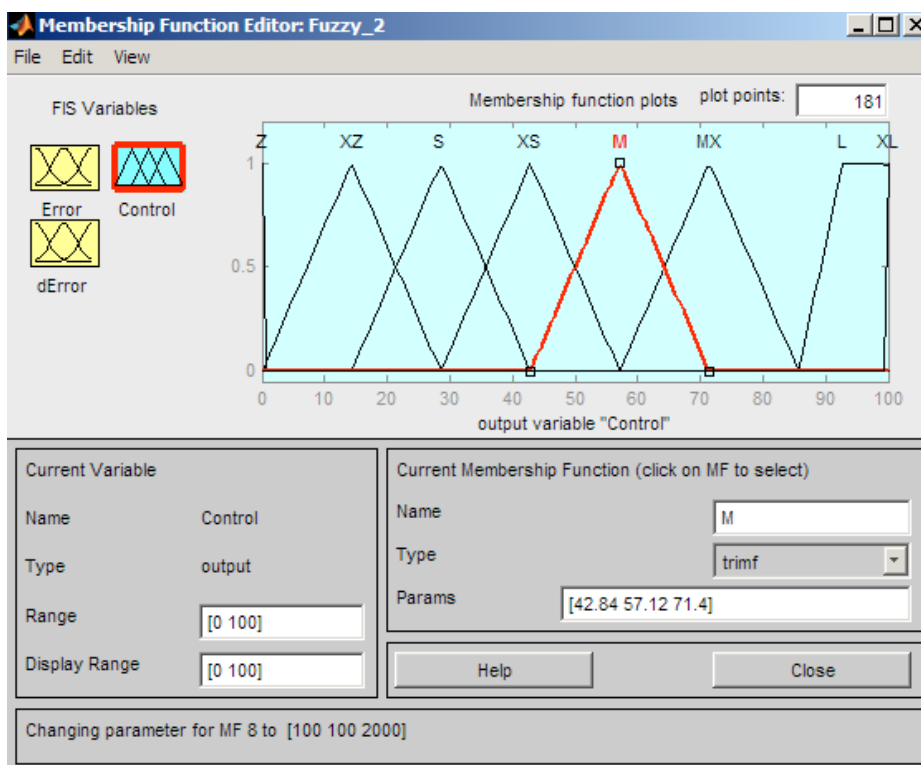


Рис. 3.7. Графік функцій належності для змінної «Control»

Наступним кроком у процесі розробки нашого фаззи-регулятора буде формування і розробка нечітких правил (нечіткої бази знань), типу «ЯКЩО...ТО...», які визначають функціональну залежність між вхідними та вихідними параметрами об'єкта дослідження. Формат нечітких правил наступний:

ЯКЩО <посилка правила> ТО <заключення правила>

Антецедент правила являє собою логічне висловлювання виду «X належить до низького рівня», де терм «низький» описується відповідною нечіткою множиною, визначеною на універсальній множині лінгвістичної змінної X. Для уточнення або зміни ступеня цієї належності застосовуються квантифікатори, такі як «дуже», «майже», «приблизно» тощо, які виконують роль модифікаторів термів антецедента.

Заключення правила (консеквент) це факт, який має вигляд «Y є відкрити», заданий на універсальній множині вихідної лінгвістичної змінної Y.

Побудову правил користувача здійснюємо в середовищі Rule Editor. Даний редактор дозволяє користувачу в графічному режимі аналізувати і проводити модифікацію правил системи нечіткого виводу. Також існує можливість виконувати граматичний аналіз правил, які будуть використовуватися в системі нечіткого виводу.

При розробці бази правил, в нашому випадку необхідно пам'ятати, що антецедент «temperature is NB» і т.п., означає що розбаланс (різниця між заданим і фактичним значенням температури на об'єкті) є «Negative Big», тобто «від'ємне велике», означає що згідно формули

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

фактичне значення PV (сигнал з давача на об'єкті) достатньо більше ніж задане значення SP.

База лінгвістичних правил, які забезпечуватимуть роботу нечіткого регулятора, розроблені в редакторі Rule Editor зображені на рис. 3.8.

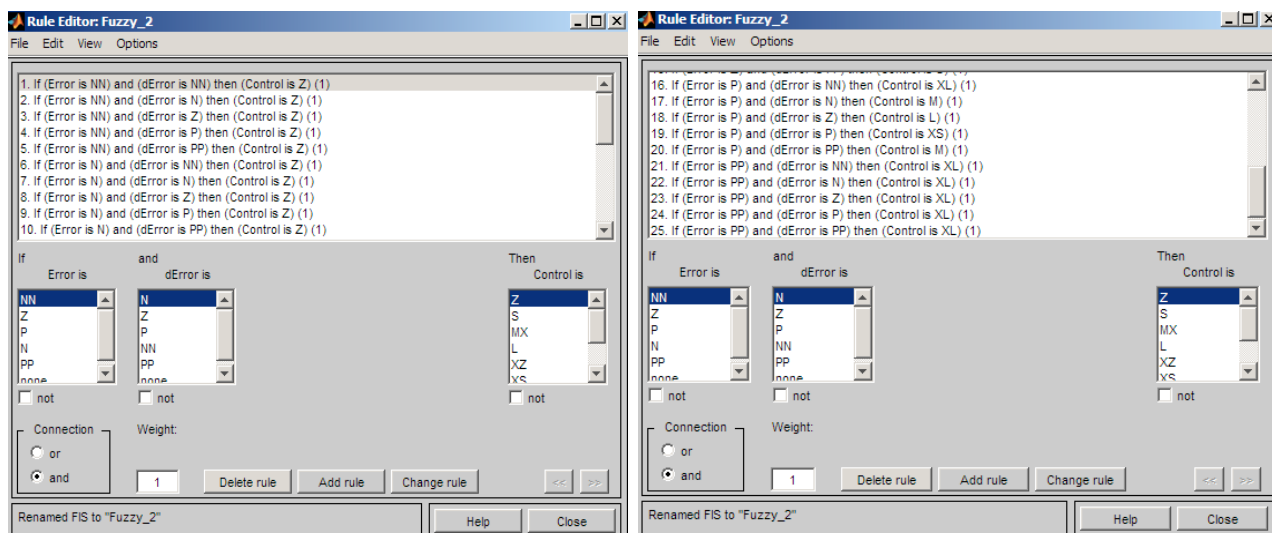


Рис. 3.8. База лінгвістичних правил нечіткого регулятора

Після розроблення бази правил, існує можливість візуалізації результатів нечіткого виводу і отримати значення вихідних змінних в залежності від вихідних в редакторі Rule Viewer.

Переглянемо сформовані нами правила за допомогою функції Rule Viewer (рис. 3.9.).

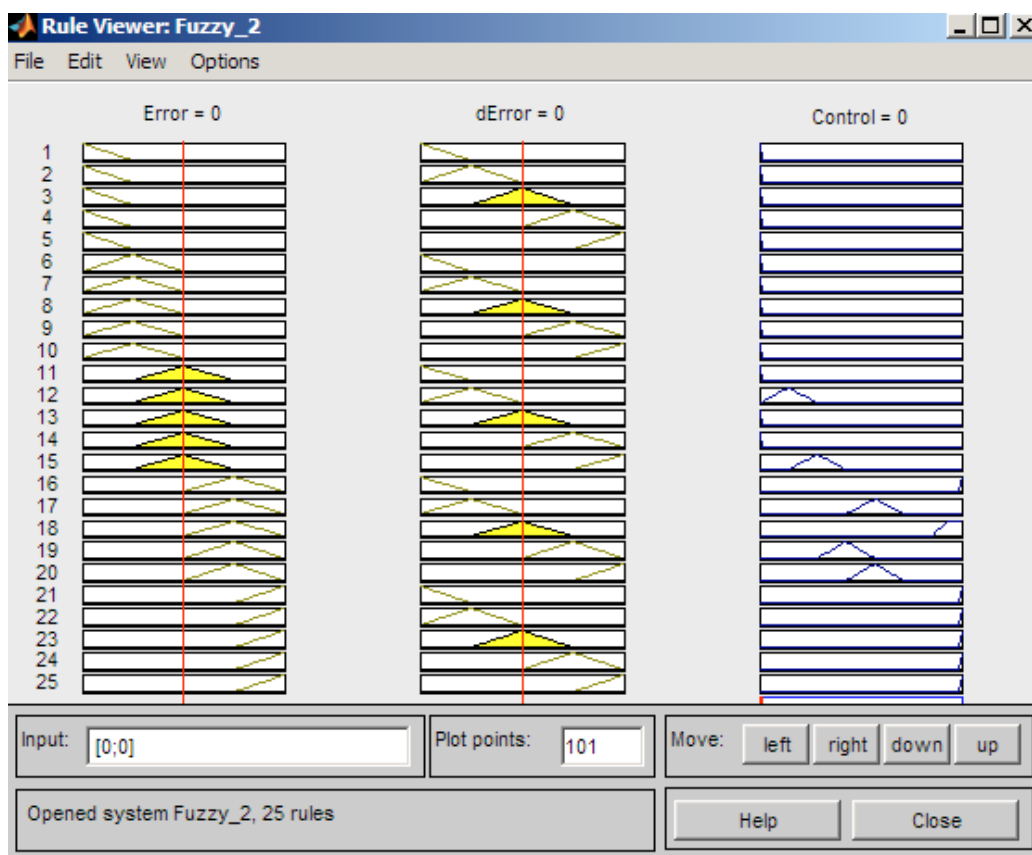


Рис. 3.9. Значення вихідних змінних в залежності від вхідних в середовищі Rule Viewer

Подібна функціональна можливість виявляється надзвичайно корисною у випадках, коли потрібно відтворити повний процес нечіткого виведення – від етапу задання вхідних параметрів до отримання кінцевих результатів. Це дозволяє користувачеві проаналізувати вплив кожного окремого правила на формування вихідних змінних моделі, а також дослідити, як зміна значень вхідних параметрів позначається на кінцевому результаті нечіткого логічного висновку.

Для завершального етапу аналізу створеного нечіткого регулятора, корисною є програма перегляду поверхні нечіткого виводу Surface Viewer. Даний редактор служить для загального аналізу адекватності нечіткої системи і дозволяє оцінити вплив зміни значень вхідних нечітких змінних на значення вихідної змінної.

Поверхня нечіткого виводу в редакторі Surface Viewer зображена на рис.3.10.

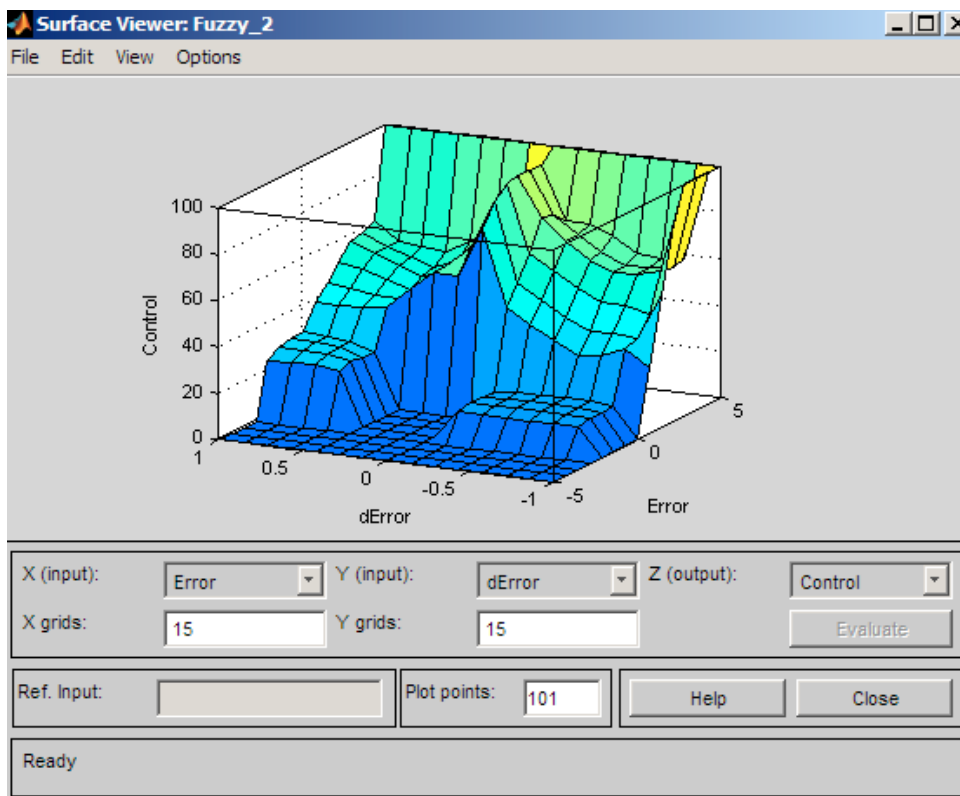


Рис. 3.10. Поверхня нечіткого виводу

При необхідності можна отримати окремі графіки залежності вихідної змінної від однієї з вхідних. Оскільки для нашого випадку маємо дві вхідні змінні, то отримаємо два графіки залежності, що зображені на рис. 3.11.

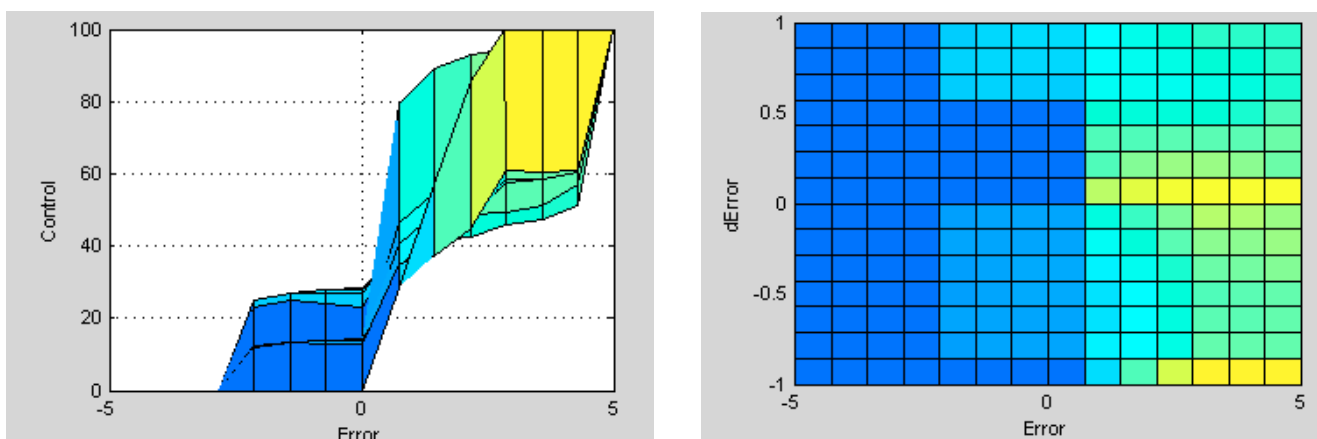


Рис. 3.11. Графіки залежності вихідної змінної від вхідних відповідно

Таким чином, розроблений в ПП «MATLAB» нечіткий регулятор може бути використаний в подальших дослідженнях системи керування тепловим об'єктом.

3.3. Імітаційне моделювання та дослідження системи керування тепловим об'єктом з використанням нечіткого регулятора

Дослідження системи керування тепловим об'єктом з використанням нечіткого регулятора та моделювання даної системи проводимо в програмі Simulink пакету MATLAB.

В якості регулювального пристрою в даній змодельованій системі використовуємо блок Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer. Перед початком симуляції, необхідно також експортувати файл редактора FIS Editor, що містить розроблений нечіткий регулятор, у робочу область програми MATLAB. В налаштуваннях блоку Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer необхідно здійснити прив'язку до файлу нечіткого регулятора, сформованому в редакторі FIS Editor.

Модель системи керування теплового об'єкта з використанням нечіткої логіки зображена на рис. 3.12 та в додатку Д на рисунку Д1.

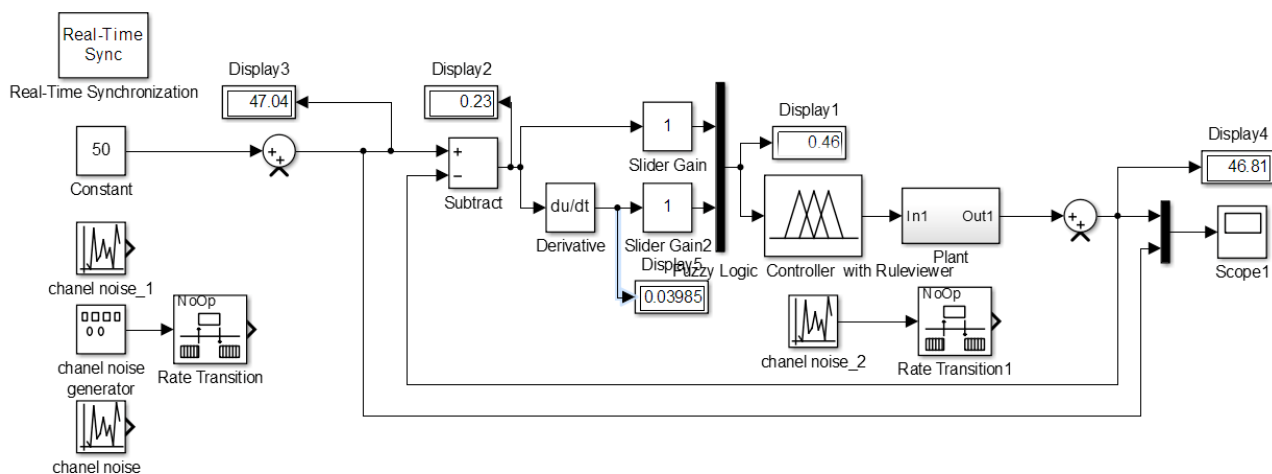


Рис. 3.12. Схема системи керування на базі нечіткої логіки

При натисненні кнопки Start ► відкривається вікно перегляду правил користувача Rule Viewer (рис.3.13.). В даному вікні можна реальному часі роботи системи побачити вхідні величини, спрацювання кожного правила, результат кожного правила, результат роботи системи (вихід) та активність термів.

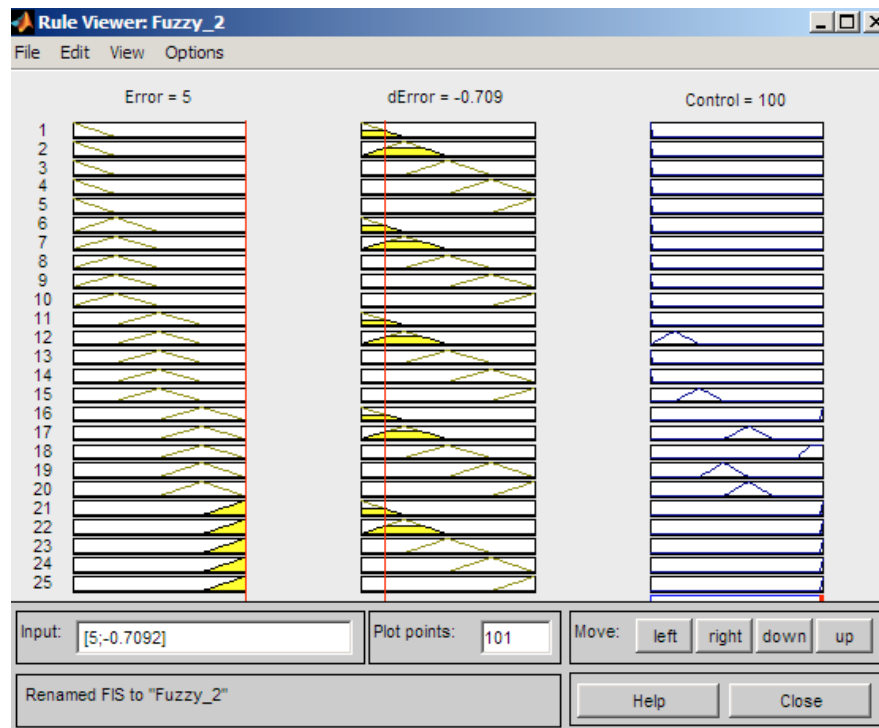


Рис. 3.13. Вікно перегляду правил користувача Rule Viewer

Натиснувши двічі на блок Score, отримуємо зображення графіка залежності зміни температури від часу (рис. 3.14.).

Маючи даний графік перехідного процесу, можна визначити прямі показники якості регулювання за методикою як у попередньому розділі даної роботи.

Таким чином, визначимо прямі показники якості системи:

- час перехідного процесу: $t = 6.3$ хв;

- перерегулювання: $\sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100\% = \frac{50.5 - 50}{50} \cdot 100\% = 1\%$;

- ступінь згасання: $\psi = 1 - \frac{A_3}{A_1} = 1 - \frac{50 - 49.8}{50.5 - 50} = 0.6$.

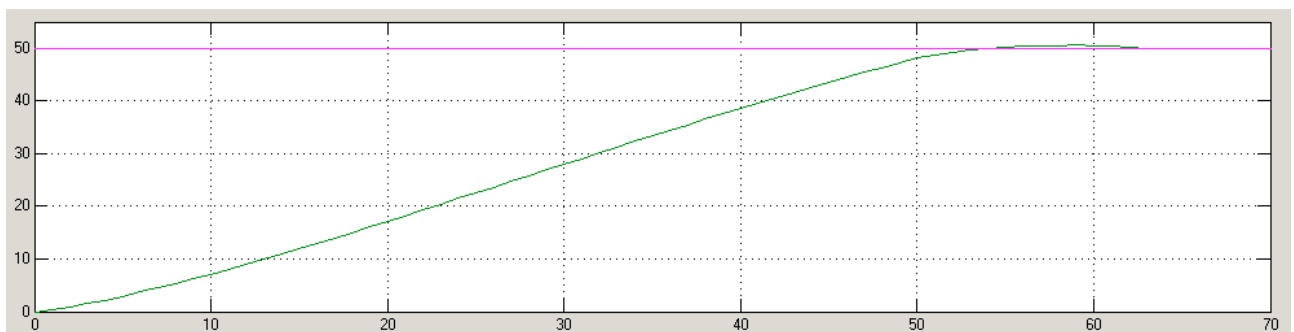


Рис. 3.14. Графік виходу системи (залежність зміни температури від часу)

Отже, з даних прямих показників якості системи можна стверджувати достатньо хорошу якість регулювання системи керування на базі нечіткої логіки. Графічні залежності динаміки роботи системи керування на базі нечіткого регулятора наведені у додатку Е на рисунках Е.1 – Е.5.

При здійсненні на систему керування випадкових впливів, може спостерігатися суттєве зниження якості та точності керування.

1) Вводимо в канал завдання досліджуваної системи змінне ступеневе завдання в часі - $\sim 50\text{-}20\%$ зміни SP , $t=250$;

2) Зміну завдання за синусоїдальним законом – амплітуда $2\text{-}5\%$, частота $0,015$ рад/сек;

3) Шуми в каналі регулювання - $2\text{-}3\%$, $t=5s$;

4) Збурення в каналі регулювання - сигнал збурення на рівні 30% , $t=400$.

Для моделювання даних сигналів в середовищі Simulink використовуємо блок Uniform Noise Generator. Спочатку, як і у попередньому розділі, даний блок підключається через блок суматора до блоку Constant, таким чином вводиться сигнал шуму в канал завдання. Розпочавши симуляцію, переглядаємо результат у вікні Scope. Потім, змінивши блоки генераторів шумів з каналу завдання, вводимо їх в канал регулювання. У вікні Scope переглядаємо результат моделювання. Загальний вигляд моделі для дослідження роботи нечіткого Fuzzy - регулятора з використанням генераторів сигналів зображено на рис.3.15-3.16.

Аналізуючи графіки на рис.3.15-3.16., можна сказати, що введення шумів, збурень та зміна завдання для регулятора різними законами – не призводить до виходу системи з робочого режиму, нечіткий регулятор справляється з достатньо сильними відхиленнями від норми – це значить, що регулятор налаштований правильно та ідеально підходить для даного теплового процесу.

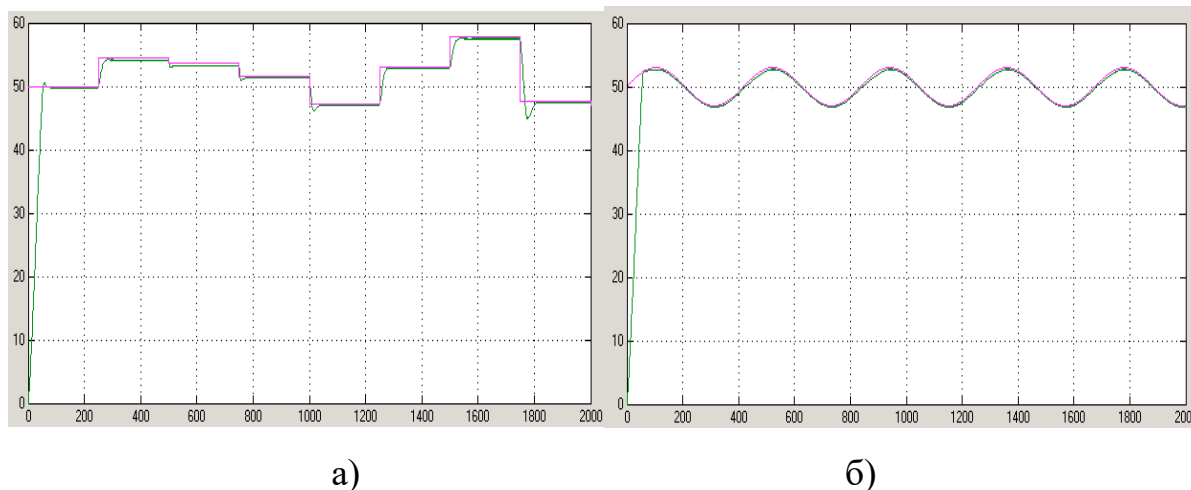


Рис. 3.15. Графіки перехідного процесу системи керування з нечітким Fuzzy-регулятором при введенні: а) змінного ступеневого завдання в часі; б) змінного завдання за синусоїдальним законом

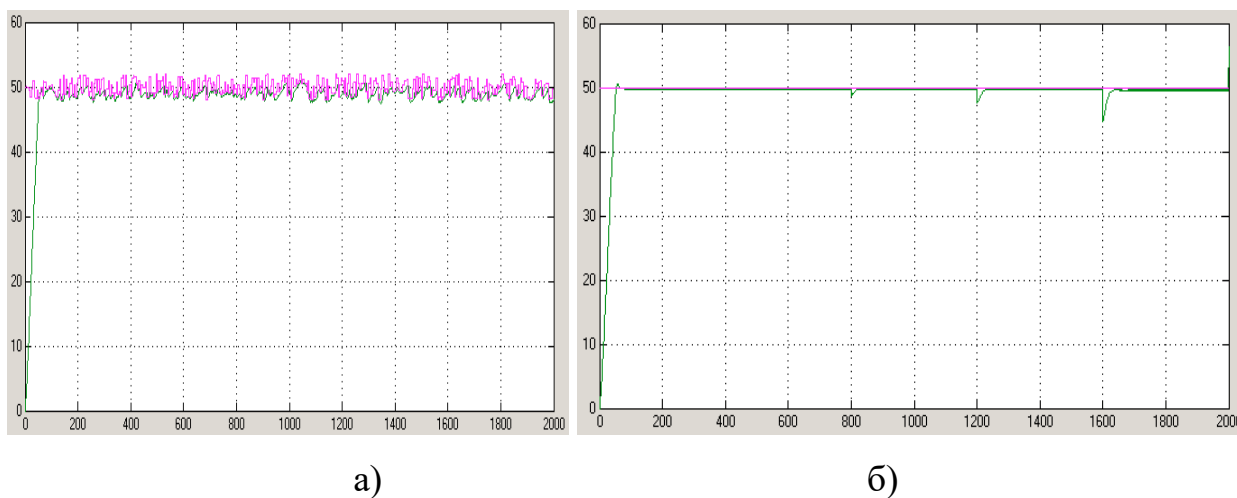


Рис. 3.16. Графіки перехідного процесу системи керування з нечітким Fuzzy-регулятором при введенні: а) змінного ступеневого завдання в часі; б) змінного завдання за синусоїдальним законом

Висновки до розділу 3

Даний розділ присвячений розробці системи керування тепловим об'єктом з використанням нечіткого регулятора. Здійснено опис особливостей регулювання на базі нечіткої логіки та наведено алгоритм процесу розробки нечіткого регулятора, як складової частини фаззі-проекту.

З використанням редактора систем нечіткого виводу FIS Editor, проведено налаштування структури фаззи-регулятора, побудова функцій належності, розробка правил користувача.

Імітаційне моделювання створеної системи виконано у програмі Simulink, отримано характеристики динаміки роботи системи на базі нечіткого ПД-регулятора. На основі одержаних результатів дослідження, можна спостерігати хорошу якість системи керування на базі нечіткого ПД-регулятора. Порівнюючи якість регулювання даної системи та системи на базі традиційного ПД-регулятора, можна відзначити, що в нечіткій системі керування перерегулювання практично відсутнє і показник степеня затухання рівний 0.6 та час регулювання менший практично в 1.5 разів в порівнянні з ПД регулятором.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ СИТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ ОБ'ЄКТОМ

4.1. Теоретичні засади нейро-нечіткого проектування

Бурхливий розвиток нейронних мереж зумовив появу тверджень про можливе об'єднання їх разом з системами нечіткої логіки для покращення якості керування об'єктів технологічних процесів. Обидва підходи досить успішно використовуються окремо для вирішення задач, які традиційні системи керування вирішують не кращим чином. Коли виникає необхідність керування об'єктом, який володіє неоднозначними властивостями, опис якого неповний, внаслідок чого, математичну модель отримати не вдається, то саме в таких випадках, найчастіше, для керування вибираються нейронні мережі або ж системи на базі нечіткої логіки.

Однією із значущих переваг нейронних мереж є їх здатність до адаптації та навчання. Нейронна мережа здатна освоювати алгоритм керування об'єктом, використовуючи інформацію про вхідні сигнали та відповідні еталонні (бажані) значення. Після завершення навчання нейронні мережі стають незамінними засобами для вирішення задач розпізнавання образів, класифікації та апроксимації. Однак, накопичені в процесі навчання знання, в результаті виявляються розподіленими між багатьма її елементами і складовими. Це і є причиною недоступності знань для наглядача (вчителя).

Саме цей недолік став рушієм до впровадження гібридних систем керування. Системи керування на базі нечіткої логіки позбавлені даної проблеми. Дані системи оперують лінгвістичними змінними і, на відміну від традиційних систем керування, використовують не кількісні («скільки?»), а якісні («як?») знання. Система приймає рішення на основі правил записаних у формі IF – THEN, і функцій належності по результатах спостереження за процесом управління.

Однак недоліком даних систем якраз відсутність властивості, яка є головною перевагою нейронних мереж – можливість адаптації і навчання.

Об'єднання обох підходів дозволяє, з одного боку, доповнити системи з нечіткою логікою властивістю навчання і обчислювальною потужністю нейронних мереж, а з іншого боку – підсилити інтелектуальні можливості нейронних мереж властивими «людському» способу мислення нечіткими правилами прийняття рішень [15]

Спроби такого об'єднання стали в останні роки предметом досить інтенсивних досліджень. Їх результатом можна вважати системи прийняття рішень, що в різній мірі реалізують ідею нечіткого мислення в комплексі із взятої від нейронних мереж здатності до навчання.

Для впровадження і використання гібридної системи керування необхідно виконати етапи представлені у алгоритмі поданому у вигляді блок-схеми рис. 4.1.

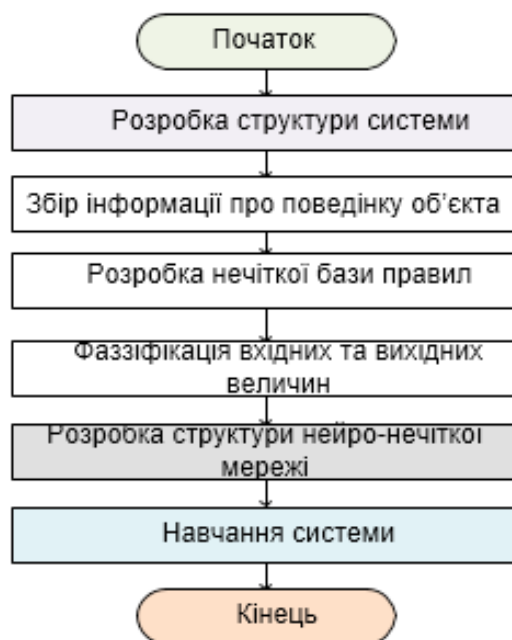


Рис. 4.1. Структурна схема алгоритму розробки нейро-нечіткого регулятора

Математичний апарат нейронних мереж є складним для прямого впровадження в промислових умовах. Поєднання нейронних регуляторів, нечітких множин та експертних знань операторів САУ забезпечує простоту

використання, гнучкість і здатність до нелінійного управління, що робить метод доступним для керування складними технологічними процесами. Зокрема, знання експерта щодо об'єкта управління можуть бути реалізовані через нечітку логіку, проте сама лише нечітка логіка не здатна акумулювати історію дій системи. У цьому випадку доцільне використання нейронної мережі, яка навчається на даних про поведінку об'єкта. Таким чином, нейро-нечітка система керування є ефективним інструментом для реалізації пусконаладжувальних робіт, ПД-регуляторів, адаптивних і інших типів регуляторів [16].

Основна концепція моделі гібридних мереж полягає у використанні наявного набору даних для визначення параметрів функцій належності, що оптимально відповідають певній системі нечіткого виводу. Для цього застосовуються відомі алгоритми навчання нейронних мереж, які дозволяють уточнювати параметри функцій належності.

З одного боку, гібридна мережа ANFIS може розглядатися як нейронна мережа з одним виходом та кількома входами, що представлені нечіткими лінгвістичними змінними. Термінальні множини вхідних змінних описуються стандартними функціями належності, тоді як вихідна змінна моделюється за допомогою лінійної або постійної функції належності (тип Sugeno).

З іншого боку, ANFIS можна інтерпретувати як систему нечіткого виводу типу Sugeno першого або нульового порядку, у якій кожне правило нечітких продукцій має постійну вагу, рівну одиниці [7].

4.2. Методика проектування нейро-нечіткої системи для керування тепловим об'єктом

Розробка нейро-нечіткої системи керування здійснюється у середовищі ANFIS системи MATLAB. Редактор ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) надає можливість створювати або завантажувати конкретні моделі адаптивних систем, проводити їх навчання, візуалізувати структуру,

налаштовувати параметри та використовувати розроблену мережу для отримання результатів нечіткого виводу.

Першим етапом розробки є визначення трьох наборів даних (вбірок), які в подальшому виконуватимуть функції навчальної, перевірконої та тестової вибірки. Дані представлені у вигляді табличних файлів з розділювачами-табуляціями (train.dat, check.dat, test.dat), де перші стовпці містять числові значення вхідних змінних у часовому вимірі, а останній – вихідні величини. Формування цих файлів виконане вручну на основі даних, отриманих під час моделювання процесу в середовищі Simulink із використанням ПД-регулювання: вхідні значення відповідають розбіжності системи та швидкості її зміни у часі, а вихідна величина – керуючий вплив контролера.

	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4
1	21.8959	0	0	73.1907	187	-0.0467	-0.0029	131.4540	8.5046	1	13.3091	-0.4848	155.5148	13.3091
2	10.4006	-0.6188	328.9973	52.5607	188	-0.0751	-4.5436e-04	130.1512	8.3391	2	6.0130	-0.4454	299.6119	6.0130
3	0.9421	-0.3517	432.1746	29.4504	189	26.3598	-0.9248	438.0156	111.1632	3	0.7423	-0.2484	346.5268	0.7423
4	-2.0184	-0.0431	411.6127	20.1551	190	7.7385	-0.8234	771.5432	71.5817	4	-1.4752	-0.0591	337.4598	-1.4752
5	-1.0474	0.0790	377.7238	21.9386	191	-2.0166	-0.2831	810.3792	44.9659	5	-1.4523	0.0456	313.5483	-1.4523
6	0.3969	0.0576	372.3308	26.2747	192	-2.7735	0.0687	752.0716	40.8184	6	-12.7930	0.4040	233.0645	-12.7930
7	0.8688	0.0046	386.7303	28.4665	193	-0.3374	0.1247	720.1386	47.2084	7	-6.2399	0.4236	90.0232	-6.2399
8	0.5927	-0.0204	402.0296	28.3945	194	1.2404	0.0461	732.0253	52.7686	8	-1.0070	0.2600	38.7985	-1.0070
9	0.1972	-0.0171	409.7309	27.6022	195	1.2533	-0.0203	758.9771	54.1702	9	1.4649	0.0778	45.6747	1.4649
10	0.0017	-0.0055	411.3312	27.1278	196	0.6080	-0.0336	777.8300	53.1731	10	1.6766	-0.0343	71.3342	1.6766
11	-0.0118	0.0013	411.0324	27.1065	197	0.1152	-0.0178	784.4712	52.0651	11	51.3851	505.3905	90.7760	51.3851
12	0.0307	0.0020	411.2189	27.2653	198	-0.0275	-0.0019	784.8523	51.7139	12	31.2297	-1.4948	719.7838	31.2297
13	0.0512	3.4963e-04	412.0980	27.3810	199	0.0184	0.0035	784.6253	51.8866	13	10.8414	-1.1349	1.0283e+03	10.8414
14	-12.9124	0.4731	261.4306	-22.8993	200	0.0748	0.0019	785.6276	52.1312	14	-1.4730	-0.5091	1.0867e+03	-1.4730
15	-3.7889	0.4035	98.0646	-3.6305	201	27.0080	5.3851	787.2518	176.4225	15	-5.1315	-0.0243	1.0281e+03	-5.1315
16	0.9912	0.1387	79.0952	9.4153						16	-3.5681	0.1868	958.9310	-3.5681
17	1.3617	-0.0337	107.7232	11.4499						17	-0.5727	0.1825	928.0980	-0.5727
18	0.1672	-0.0611	123.4161	8.3194						18	1.4886	0.0874	936.7826	1.4886

а)

б)

в)

Рис. 4.2. Формування навчальної вибірки: а)перевірочна вибірка; б)тестуюча вибірка; в)навчальна вибірка

Переходимо до операцій в редакторі Anfis Editor. Завантажуємо по черзі дані із трьох вибірок, вказуючи відповідні файли баз відповідними процедурам обробки. Після проведених операцій в графічному полі вікна редактора Anfis Editor з'являться набори точок (рис.4.3.), що відповідають координатам завантажених даних.

У розділі вибору способу генерування Generate Fis, активуємо варіант Grid Partition. Після натискання кнопки генерування системи, з'являється діалогове

вікно, в якому необхідно задати число та кількість функцій належності тільки для вхідних параметрів мережі (рис.4.4.).

В полі введення вхідних величин задаємо кількість термів для наших вхідних параметрів. З попереднього розділу пам'ятаємо, що для вхідної величини «Error» вибрано 5 термів та для параметра «d Error» також - 5.

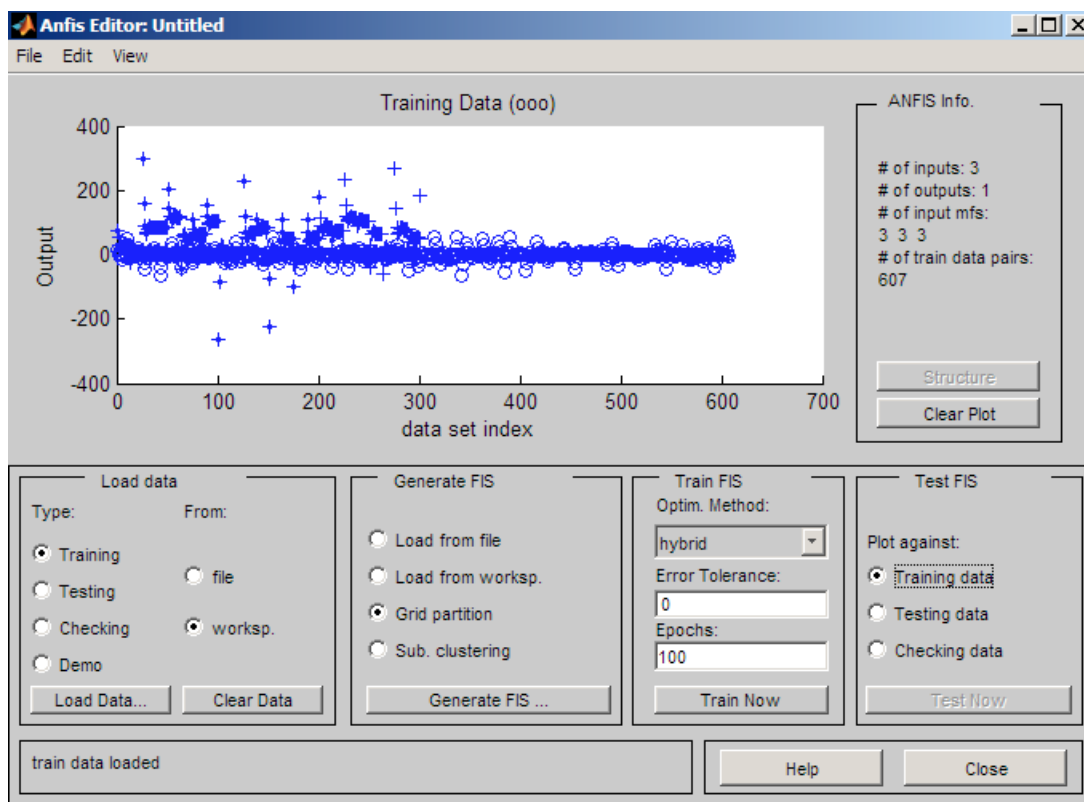


Рис. 4.3. Завантаження даних із вибірок у робочу область редактора Anfis Editor

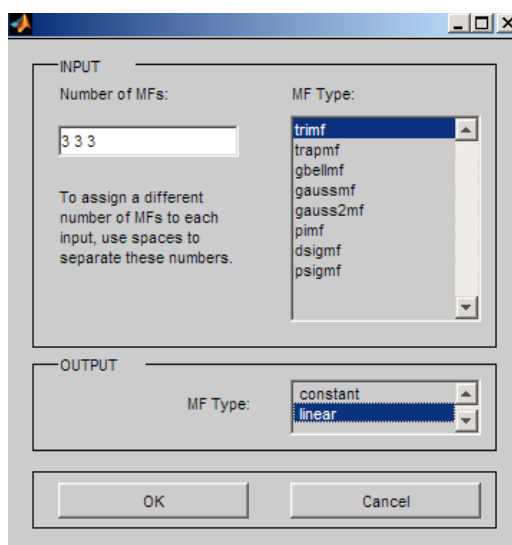


Рис. 4.4. Налаштування параметрів функцій належності гібридної системи

У іконках вибору типу функцій належності для вхідних змінних вибираємо трикутну форму, а для вихідної змінної обираємо лінійну, так як вона є більш точною і якіснішою ніж константна. Трикутну форму функцій належності для вхідних змінних вибираємо з тієї причини, що саме така форма функцій належності була використана у попередньому розділі при розробці нечіткого регулятора.

Таким чином, структура нашої гібридної системи сформована. Можливість її перегляду виконується, натиском кнопки Structure. Структура нейро-нечіткої системи зображена на рис.4.5.

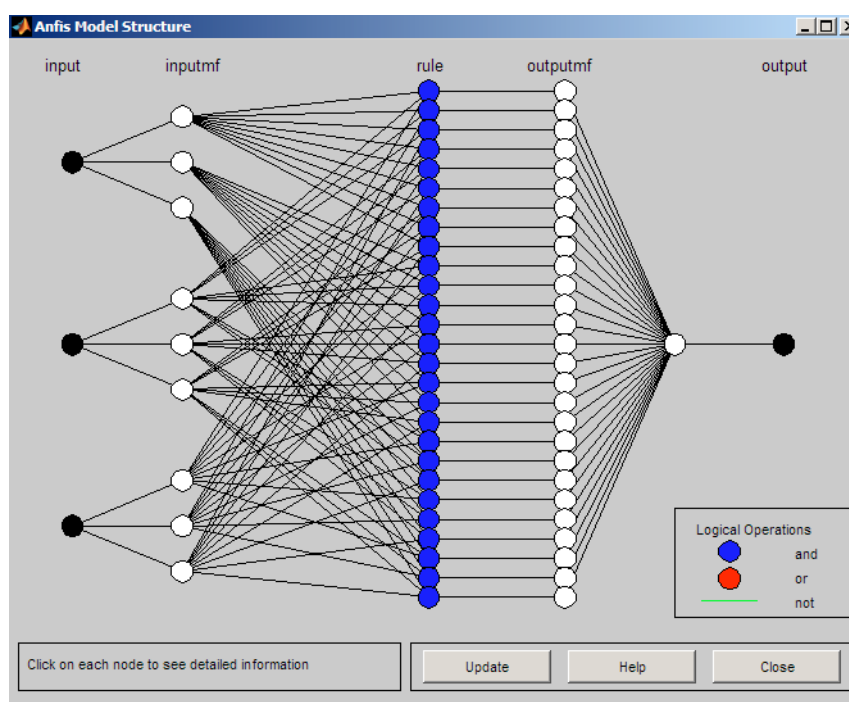


Рис 4.5. Структура гібридної системи керування тепловим об'єктом

Переходимо до етапу навчання гібридної мережі. У відділенні навчання Train FIS, задаємо параметри: метод оптимізації навчання - гібридний, рівень похибки (умова зупинки) – 0, кількість циклів навчання – 100 (рис. 4.6).

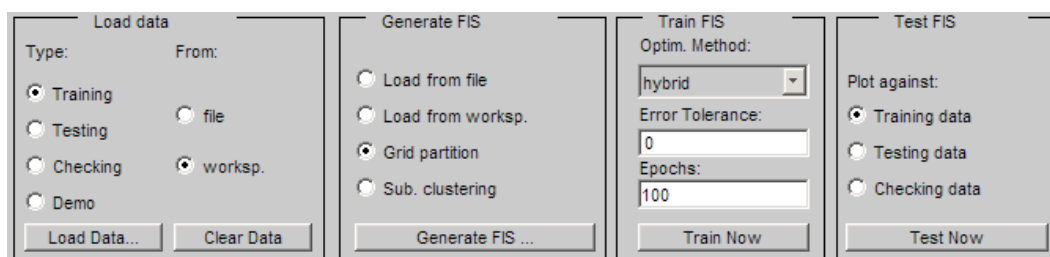


Рис. 4.6. Параметри навчання нейро-нечіткої мережі

Проводимо навчання мережі, натиснувши кнопку «Train Now». Процес навчання зображується у вигляді графіка залежності похибки від кількості циклів навчання. Після цього етапу, мережа є навченою, проводимо її тестування, натиснувши кнопку «Test Now». Результати тестування зображено на рис.4.7.

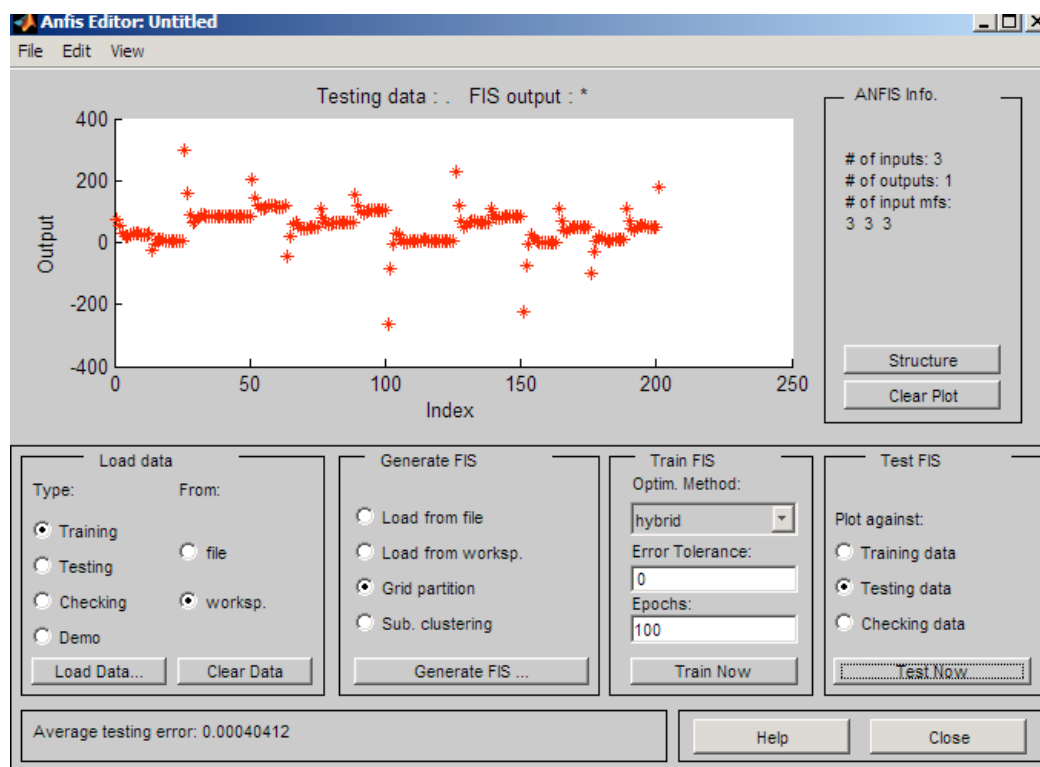


Рис. 4.7. Тестування навченої нейро-нечіткої мережі

Як видно з рисунка, похибка навчання даної мережі складає $\delta=0.00040412$, що є задовільним показником для нашої системи. Для подальшої роботи з створеною, навченою і протестованою мережею, зберігаємо її і експортуємо в робочий простір програми MATLAB.

4.3. Моделювання та дослідження системи керування тепловим об'єктом з використанням нейро-нечіткого регулятора

Для дослідження і моделювання системи автоматичного регулювання температури на об'єкті з використанням нейро-нечіткої системи використовуємо відому підпрограму Simulink програмного пакету MATLAB.

Аналогічно як і в попередньому розділі, перед початком симуляції, необхідно також експортувати файл редактора ANFIS Editor, що містить розроблену нейро-нечітку мережу, у робочу область програми MATLAB. В налаштуваннях блоку Fuzzy Logic Controller with Rule Viewer необхідно здійснити прив'язку до файлу нейро-нечіткого регулятора, сформованому в редакторі ANFIS Editor.

Модель системи керування температурою на об'єкті з використанням нейро-нечіткого (гібридного) регулятора зображена на рис.4.8.

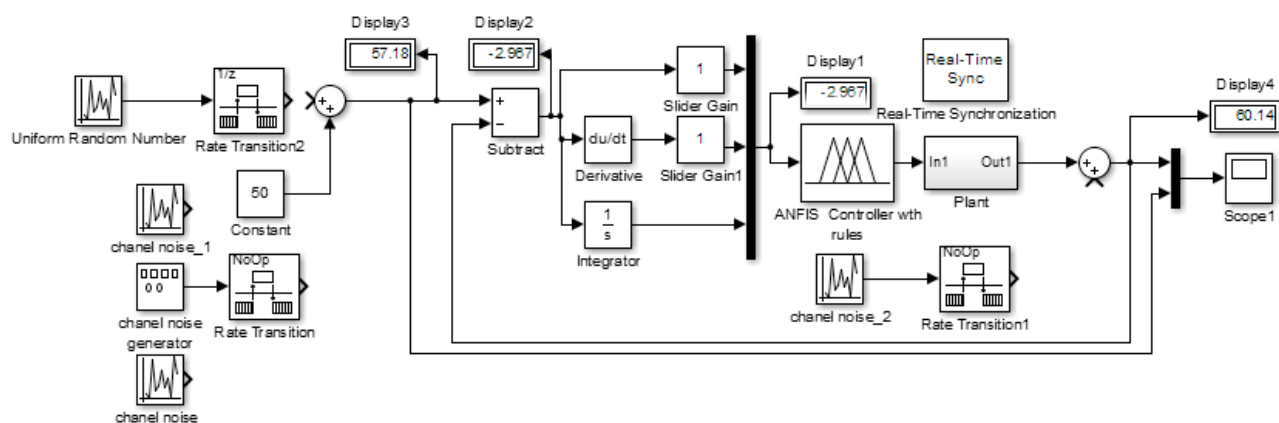


Рис. 4.8. Схема системи керування на базі нейро-нечіткого (гібридного) регулятора

Як і при імітаційному моделюванні системи керування тепловим об'єктом з використанням нечіткого регулятора, в попередньому розділі, так і у випадку з моделюванням нейро-нечіткої системи керування, при натисненні кнопки Start ► відкривається вікно перегляду правил користувача Rule Viewer (рис.4.9.). В даному вікні можна реальному часі роботи системи побачити вхідні величини, спрацювання кожного правила, результат кожного правила, результат роботи системи (вихід) та активність термів.

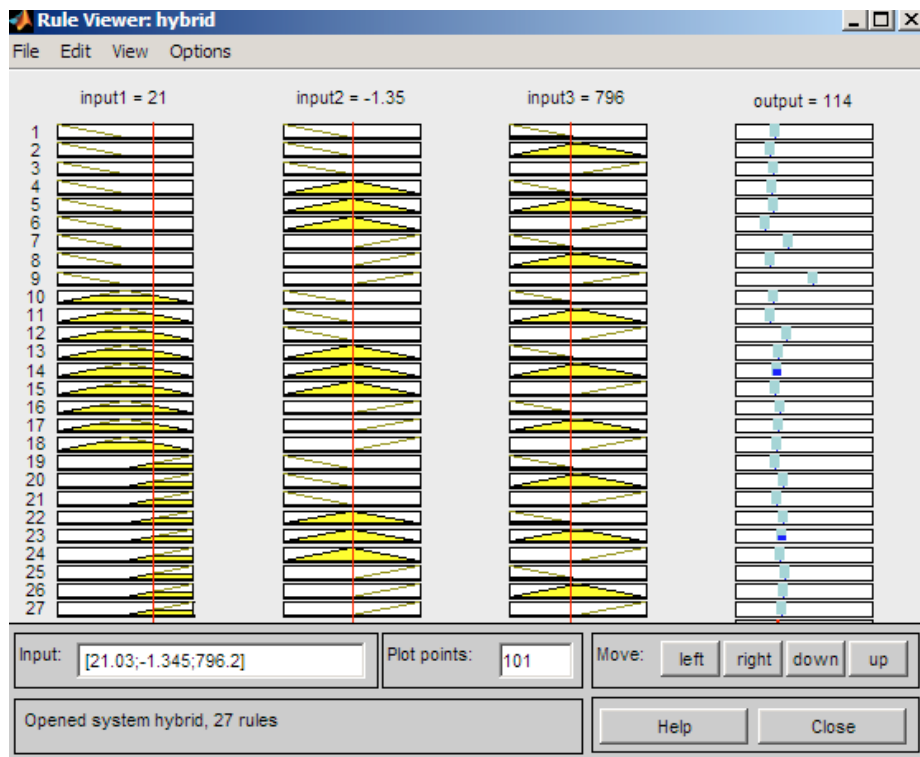


Рис. 4.9. Вікно перегляду правил користувача Rule Viewer

Щоб отримати зображення графіка виходу системи, тобто залежності зміни температури від часу, потрібно після завершення процесу симуляції натиснути двічі на блок Score. Даний графік зображено на рис.4.10.

Маючи даний графік перехідного процесу, можна визначити прямі показники якості регулювання за тією ж методикою, що і у попередніх розділах даної роботи.

Таким чином, визначимо прямі показники якості системи :

- час перехідного процесу: $t = 18\text{хв}$;

- перерегулювання: $\sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100\% = \frac{54.5 - 50}{50} \cdot 100\% = 9\%$;

- ступінь затухання: $\psi = 1 - \frac{A_3}{A_1} = 1 - \frac{50 - 48}{54.5 - 50} = 0.556$.

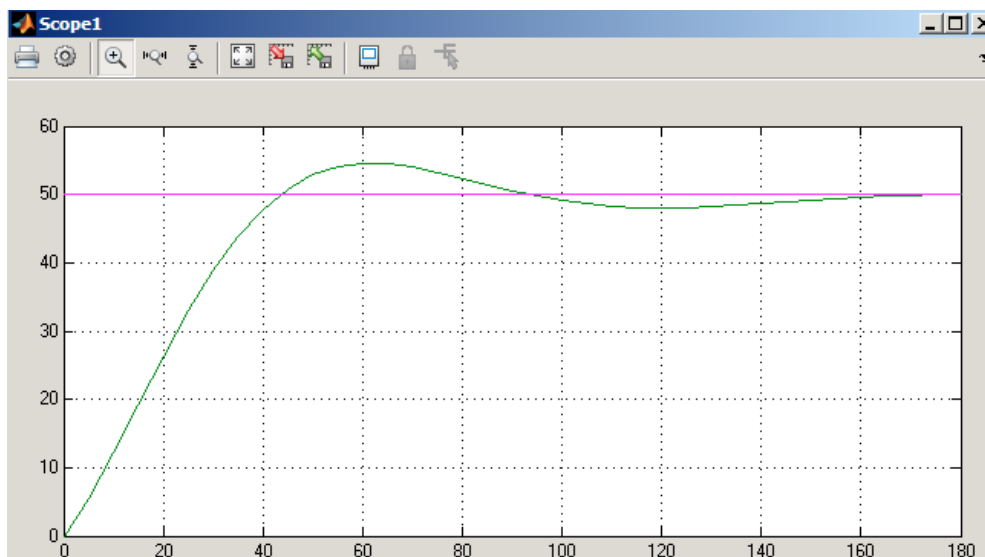


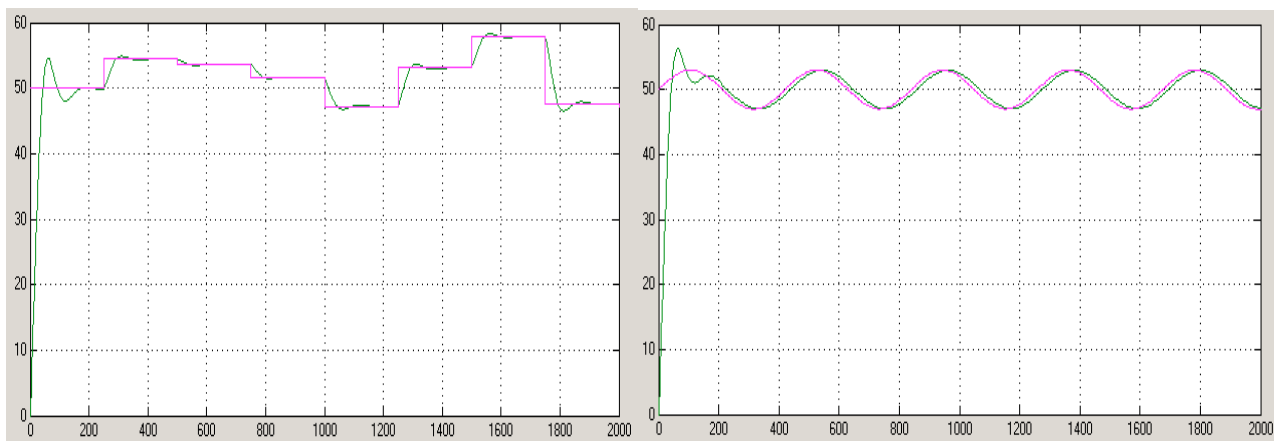
Рис. 4.10. Графік перехідного процесу нейро-нечіткої системи керування

Отже, проаналізувавши розраховані показники системи, можна робити висновок про задовільну якість керування системи на базі гібридного регулятора. Інші характеристики, що описують динаміку роботи системи наведені у додатку Є на рисунках Є.1 – Є.5.

Для подальшого порівняння якості керування даної системи з синтезованими в попередніх розділах системами, вводимо в імітаційну модель системи Simulink додатково ще:

- 1) Вводимо в канал завдання досліджуваної системи змінне ступеневе завдання в часі - $\sim 50\text{-}20\%$ зміни SP, $t=250$;
- 2) Зміну завдання за синусоїдальним законом – амплітуда $2\text{-}5\%$, частота $0,015$ рад/сек;
- 3) Шуми в каналі регулювання - $2\text{-}3\%$, $t=5s$;
- 4) Збурення в каналі регулювання - сигнал збурення на рівні 30% , $t=400$.

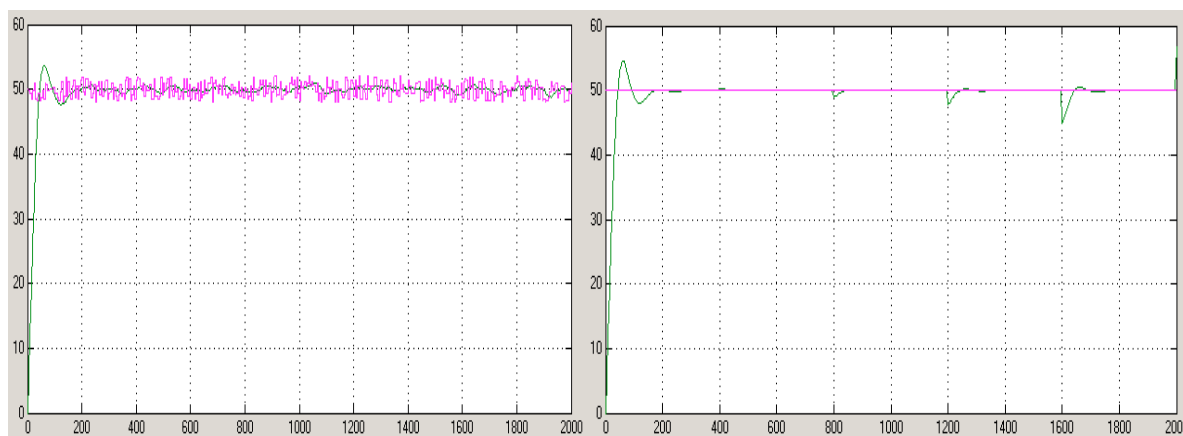
Для моделювання даних сигналів в середовищі Simulink використовуємо блок Uniform Noise Generator. Після початку моделювання у вікні Scope отримуємо результати, що зображені на рис.4.11-4.12. Загальний вигляд моделі для дослідження роботи нечіткого-нейро - регулятора з використанням генераторів сигналів зображено на рис.4.11-4.12;



а)

б)

Рис. 4.11. Графіки перехідного процесу системи керування з нечітким нейро-регулятором при введенні: а) змінного ступеневого завдання в часі; б) змінного завдання за синусоїдальним законом



а)

б)

Рис. 4.12. Графіки перехідного процесу системи керування з нечітким нейро-регулятором при введенні: а) змінного ступеневого завдання в часі; б) змінного завдання за синусоїдальним законом

Як видно з рис.4.11-4.12., введення збурення в систему істотно погіршує характеристики якості та точності регулювання. Порівняльні динамічні характеристики всіх синтезованих в даній роботі систем керування, в т. ч. при введенні шумів і збурень, у формі таблиці наведені в додатку Ж. Робимо аналіз

отриманих результатів. Найефективнішим з синтезованих регуляторів виявляється нечіткий Fuzzy-регулятор, хоча він дає меншу швидкодію ніж традиційний, проте в ньому відсутній показник перерегулювання та даний регулятор досить стійкий до збурень і шумів.

Висновки до розділу 4

У даному розділі магістерської роботи акцентується увага на розробці системи керування тепловим об'єктом з використанням нейро-нечіткого (гібридного) регулятора. Здійснено опис теоретичних засад і особливостей регулювання на базі нейро-нечіткої теорії та наведено алгоритм побудови нейро-нечіткого регулятора.

З використанням редактора систем нечіткого виводу ANFIS Editor, проведено налаштування структури нечіткої нейромережі, здійснено її навчання та тестування.

З використанням програми Simulink, виконано імітаційне моделювання створеної системи, отримано характеристики динаміки роботи системи на базі нейро-нечіткого регулятора. На основі одержаних результатів дослідження, можна спостерігати хорошу якість системи керування на базі гібридного регулятора. Порівнюючи якість регулювання даної системи та системи на базі нечіткого регулятора, можна відзначити, що в системі перерегулювання σ рівне ($\sigma = 9\%$) і показник степені затухання ψ рівний ($\psi = 0.556$), однак час регулювання в системі ($t = 18$ хв) з гібридним регулятором більший ніж в системі з фаззі-регулятором та з використанням класичного ПД-регулятора.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглянуто питання розроблення та дослідження систем автоматичного керування із застосуванням апаратно-програмних засобів компанії Rockwell Automation. Головною метою моделювання є аналіз поведінки системи під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників для оцінювання її здатності досягати визначеного або невизначеного стану за умови неповної інформації чи наявності невизначеностей іншої природи. Процес моделювання дає змогу встановити, чи здатна система забезпечувати стабільне функціонування в таких умовах під час переходу між режимами роботи.

1. Розкрито теоретичні узагальнення проблеми розробки та застосування сучасних технологій керування типовими тепловими об'єктами галузі. Проаналізовано класичні та новітні способи керування з застосуванням нечітких та нейро-нечітких технологій, а також здійснено аналіз середовищ проектування для їх реалізації і моделювання. Сформульовано основні завдання на магістерську роботу.

2. Виявлено основні вхідні та вихідні параметри теплового об'єкта, проведено експериментальне дослідження в лабораторних умовах, одержано графік перехідної характеристики теплового об'єкта, обробивши даний графік з використанням програми "Aprox", було розраховано математичну модель керованого об'єкта у вигляді передавальної функції з подальшим використанням її в синтезі регуляторів.

3. Здійснено моделювання системи керування з використанням традиційного методу. При налаштуванні параметрів ПД-регулятора та моделюванні виявилось, що найбільш оптимальною є структура ПД-регулятора з коефіцієнтами $k_n = 3.3426$, $k_i = 0.066$ та $k_d = 6.345$. При моделюванні даної системи отримано прямі показники якості (перерегулювання $\sigma = 7.8\%$, час регулювання $t = 200$ с та степінь затухання $\psi = 0.612$).

4. Проведено синтез і моделювання системи керування на базі нечіткої логіки. Описано алгоритм розробки нечіткого регулятора та його методіку

розробки в середовищі Matlab. Розроблено імітаційну модель системи та проведено моделювання. Згідно одержаних характеристик динаміки роботи нечіткої системи, бачимо її перевагу над традиційною системою у якості керування (показники перерегулювання $\sigma = 1\%$ та степеня затухання $\psi = 0.6$, час регулювання рівний $t=63\text{с}$) та роботи виконавчого механізму системи. При введенні збурень та шумів у систему дана система найкраще з розглянутих систем керування їх відпрацьовує.

5. Розроблено систему керування на основі нейро-нечіткої (гібридної) технології. На основі представленого алгоритму розробки гібридного регулятора розроблено систему керування та проведено її моделювання. Зафіксовано хороші показники регулювання (перерегулювання $\sigma = 9\%$, степінь затухання $\psi = 0.556$), аналогічні показникам системи з нечітким регулятором, однак час регулювання в даній системі ($t = 180 \text{ с}$), є більшим ніж у двох попередньо-розглянутих системах керування.

6. За результатами проведеної роботи для керування даним лабораторним об'єктом доцільно застосовувати нечіткий регулятор (Fuzzy controller), що має ряд переваг за якісними показниками над іншими розглянутими системами в тому ж числі і час регулювання, що є найменшим в порівнянні з трьома розглянутими регуляторами $t=64\text{с}$, наступним після нечіткого регулятора виступає класична система регулювання з застосуванням ПІД - регулятора яка також має хороші показники якості і може бути використана для керування даним об'єктом у зв'язку з його простотою та малим числом параметрів стану. Найбільш неякісно себе показав нечіткий регулятор на базі нейро – нечіткої – мережі – дана система регулювання має найгірші показники якості, проте для даного лабораторного об'єкта має перспективи вдосконалення так як якість її роботи буде залежати від навчальної вибірки, що є ключовим елементом в даній системі.

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. Чигур, І. І. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами [Текст] : навч. посібник / І. І. Чигур, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2024. – 157 с.
3. Чигур, Л. Я. Теорія автоматичного керування. Цифрові системи. [Текст] : лаборатор. практикум / Л. Я. Чигур, М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2024. – 80 с.
4. Чигур, Л. Я. Теорія інформації та кодування [Текст] : навч. посіб. / Л. Я. Чигур, І. І. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2025. – 102 с.
5. втоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи в нафтогазовій промисловості [Текст] : метод. вказ. для викон. курс. проєк. / М. І. Горбійчук, В. С. Борин, М. І. Когутяк [et al.]. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 14 с.
6. Семенцов Г.Н. Фазі-логіка в системах керування: навчальний посібник / Семенцов Г.Н., Чигур І.І., Шавранський М.В., Борин В.С. - Івано-Франківськ: Факел, 2002. - 84 с.
7. Горбійчук, М. І. Оптимальне та адаптивне керування в нафтогазовій промисловості [Текст] : лаб. практикум / М. І. Горбійчук, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 45 с.
8. Семенцов Г.Н. Фазі-логіка в системах контролю: навчальний посібник / Семенцов Г.Н., Чигур І.І., Шавранський М.В., Борин В.С. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 68 с.
9. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи. [Текст] : лаб. практикум / М. І. Горбійчук, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 64 с.
10. Rockwell Automation SLC 500 Instruction Set: manuals / Rockwell Automation. - USA Milwaukee: Allen-Bradley, 2008. – 694 с.

11. Чигур, І. І. Інтелектуальні методи прийняття рішень в технічних системах [Текст] : лаб. практикум / І. І. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 69 с.

12. Чигур, І. І. Інформаційні технології та системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень [Текст] : навч. посібник / І. І. Чигур, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 107 с.

13. Чигур, Л. Я. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами [Текст] : лаб. практикум / Л. Я. Чигур, І. І. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 64 с.

14. Семенцов, Г. Н. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами [Текст] : лабораторний практикум / Г. Н. Семенцов, Л. І. Фешанич. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. – 59 с.

15. Семенцов, Г. Н. Нечіткі системи контролю [Текст] : лабораторний практикум / Г. Н. Семенцов, Л. І. Фешанич. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. – 45 с.

16. Безуглов А. Нейро-нечіткі регулятори в системах автоматизації технологічних процесів / Безуглов А. // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: матеріали 80 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 10–11 квітня 2014 р. – Київ: НУХТ, 2014. - 390-392 с.

Додатки

Додаток А

Графіки перехідних характеристик

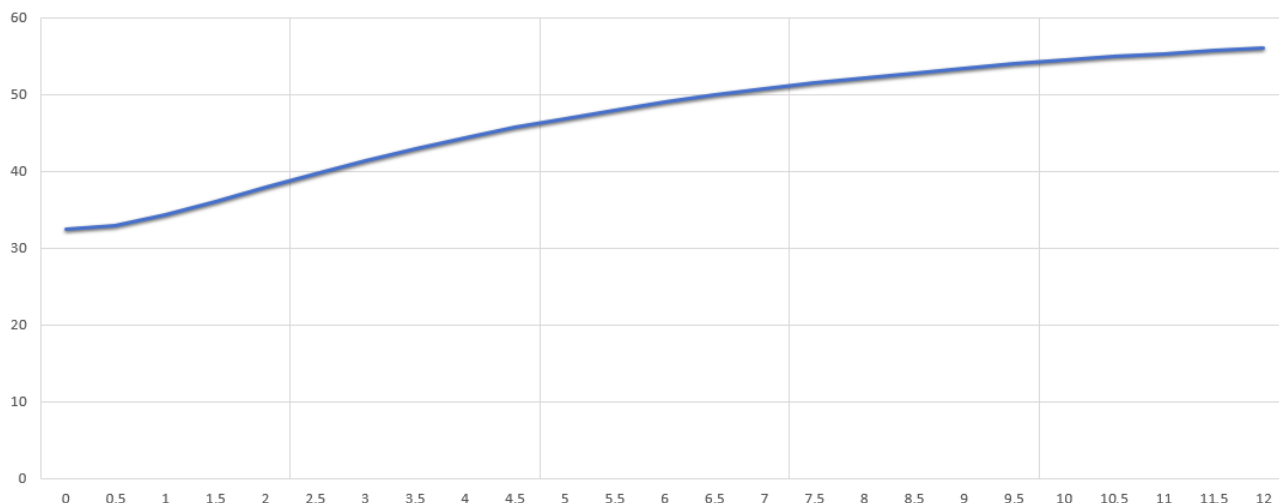


Рис. А1. Графік експериментальної перехідної характеристики

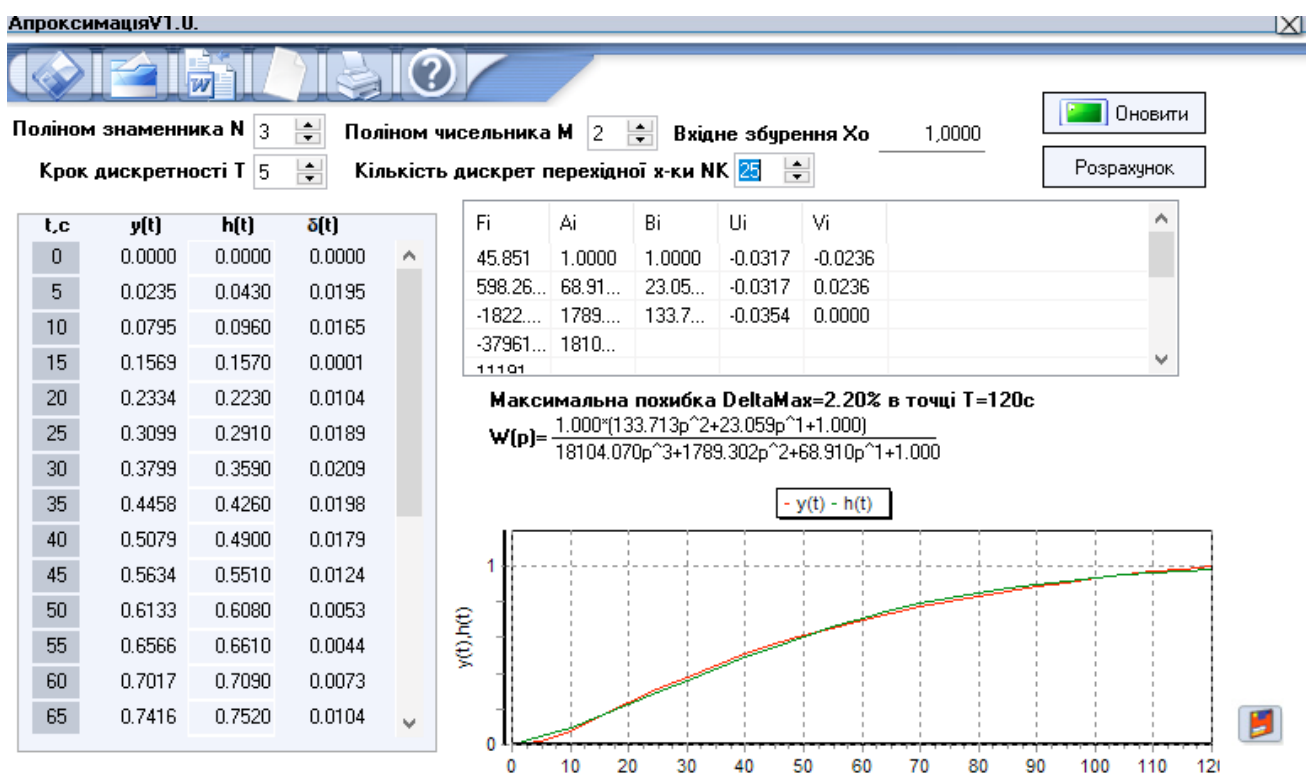


Рис. А2. Вихідні дані апроксимованої перехідної характеристики з програми
Арох

Додаток Б

Налаштування ПІД регулятора та графік перехідного процесу

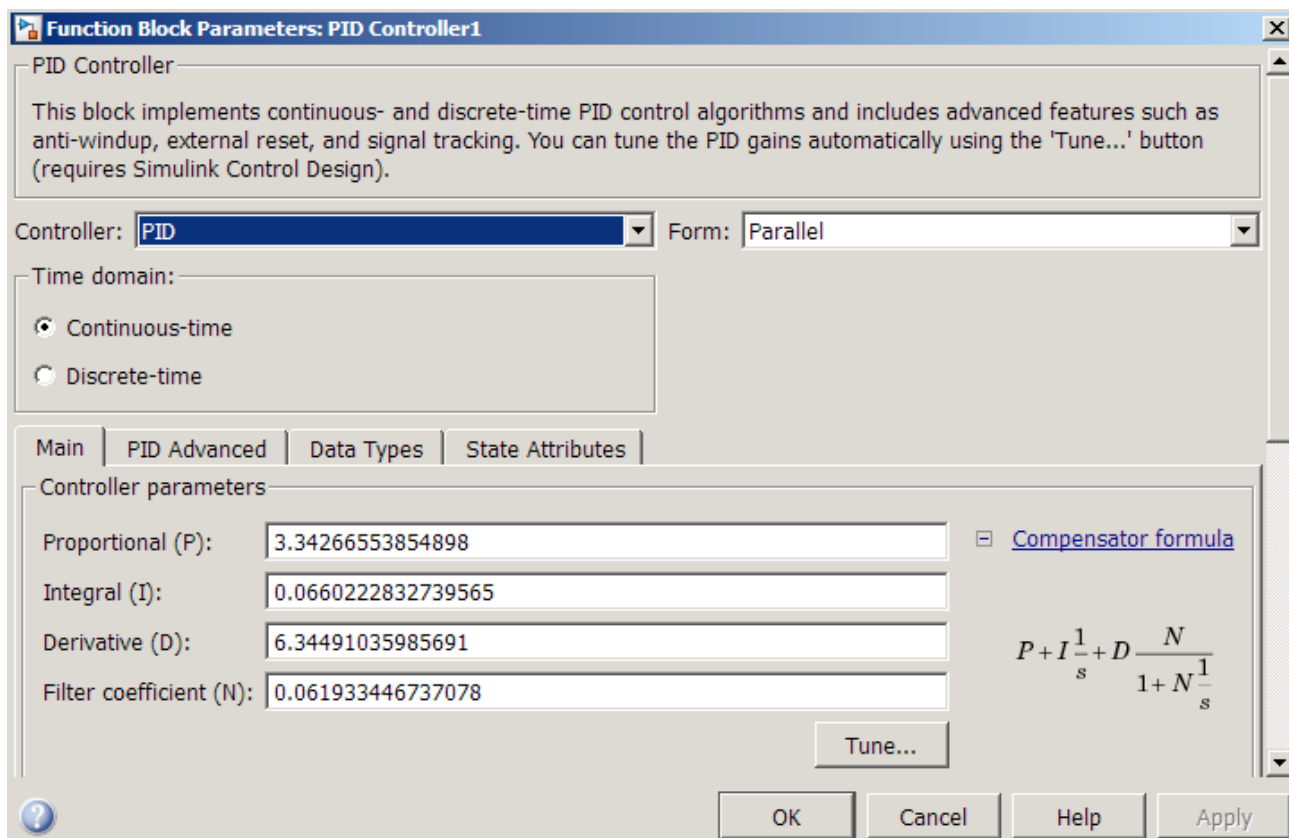


Рис. Б1. Параметри блоку ПІД-регулятора в середовищі MathLab

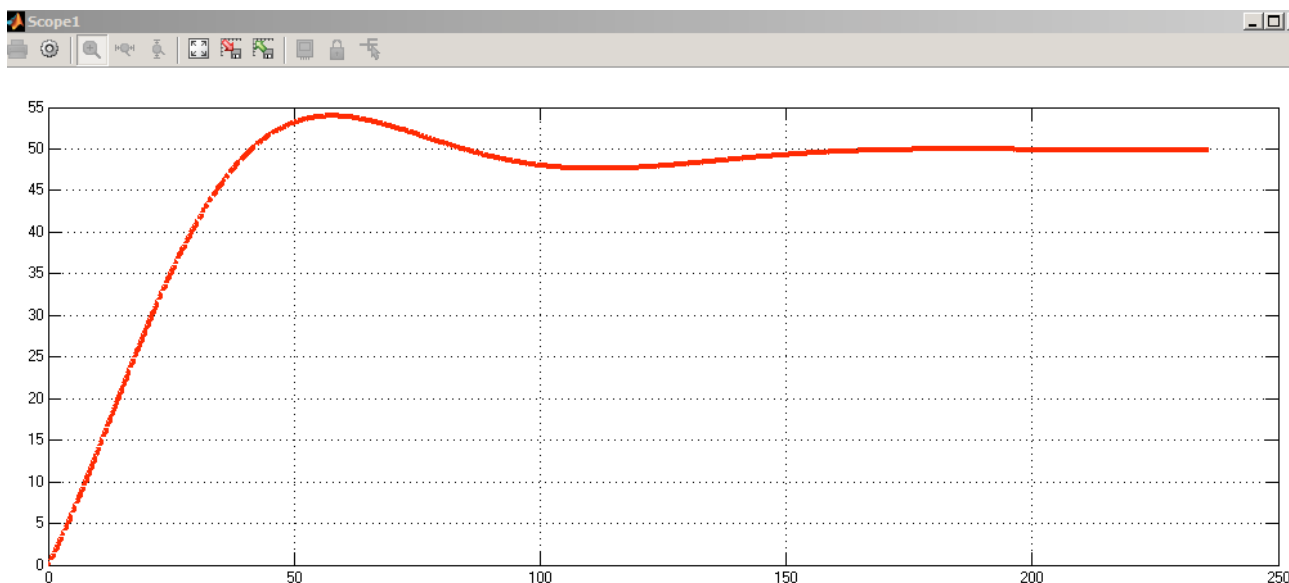


Рис. Б2. Графік перехідного процесу з використанням ПІД – регулятор при SP рівному 50

Додаток В

Зміна динаміки перехідного процесу з використанням ПІД – регулятора та додаткових збурюючих чинників

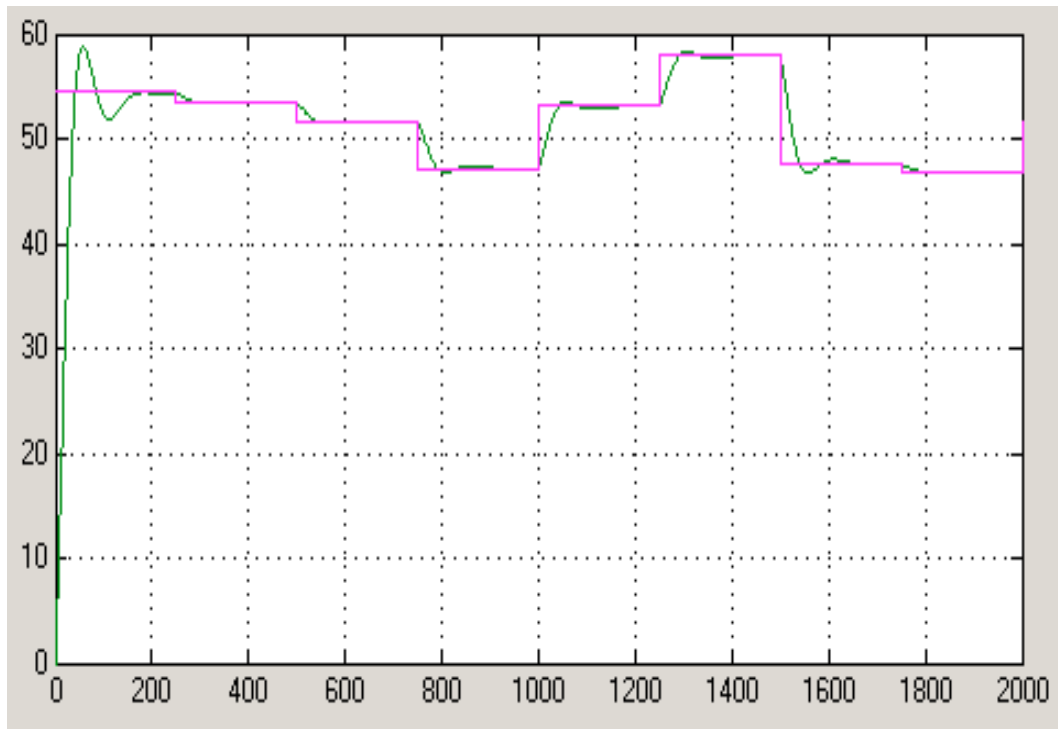


Рис. В1. Графік перехідного процесу системи керування з традиційним ПІД-регулятором при введенні змінного ступеневого завдання в часі

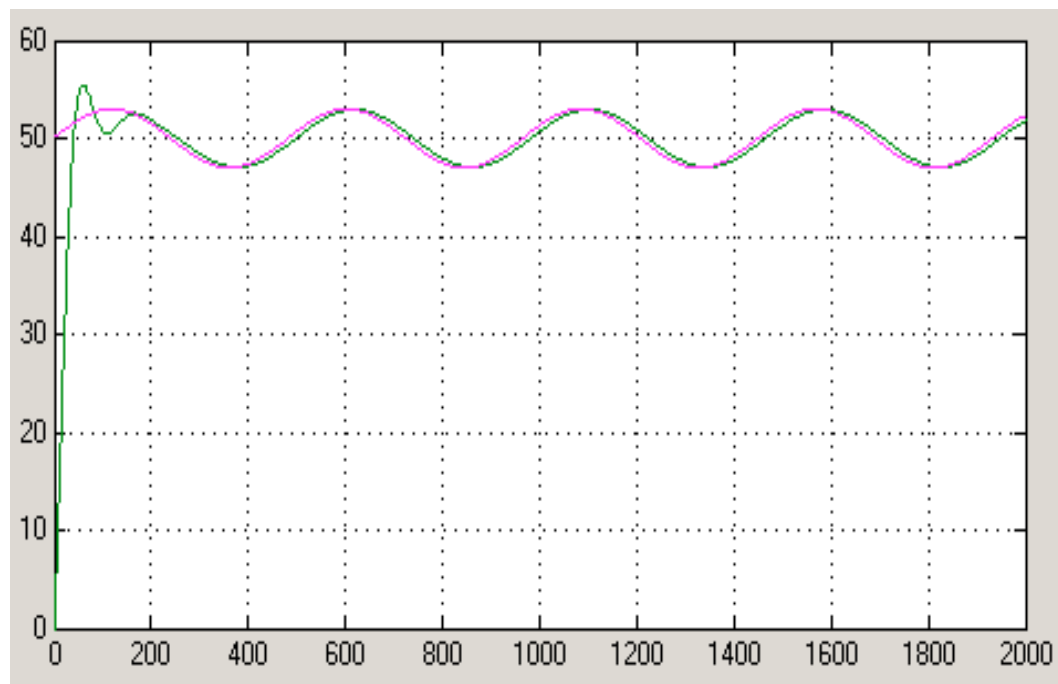


Рис. В2. Графік перехідного процесу системи керування з традиційним ПІД-регулятором при введенні змінного завдання за синусоїдальним законом

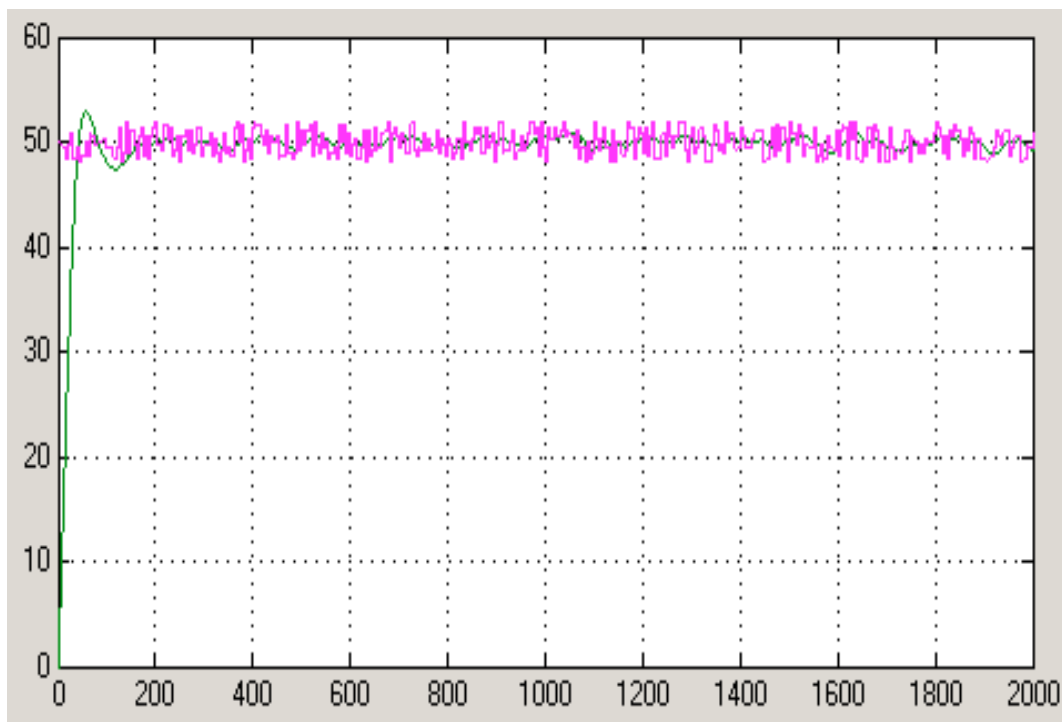


Рис. В3. Графік перехідного процесу системи керування з традиційним ПІД-регулятором при введенні шумів в канал завдання

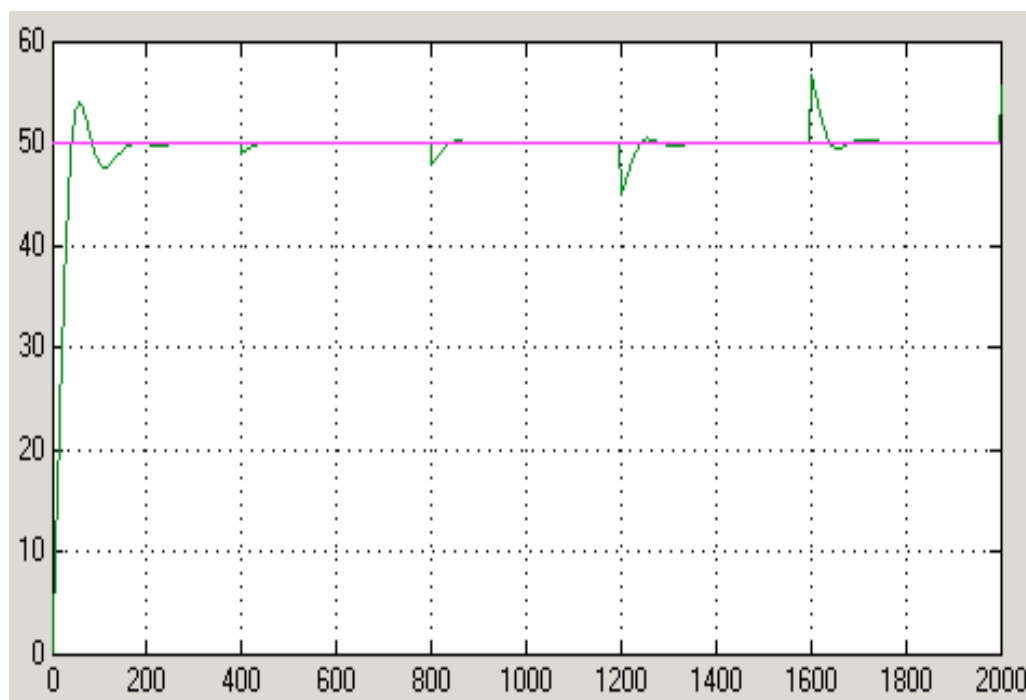


Рис. В4. Графік перехідного процесу системи керування з традиційним ПІД-регулятором при введенні збурення в канал регулювання

Додаток Г

Загальний вигляд моделі теплового об'єкта з використанням ПІД – регулятора

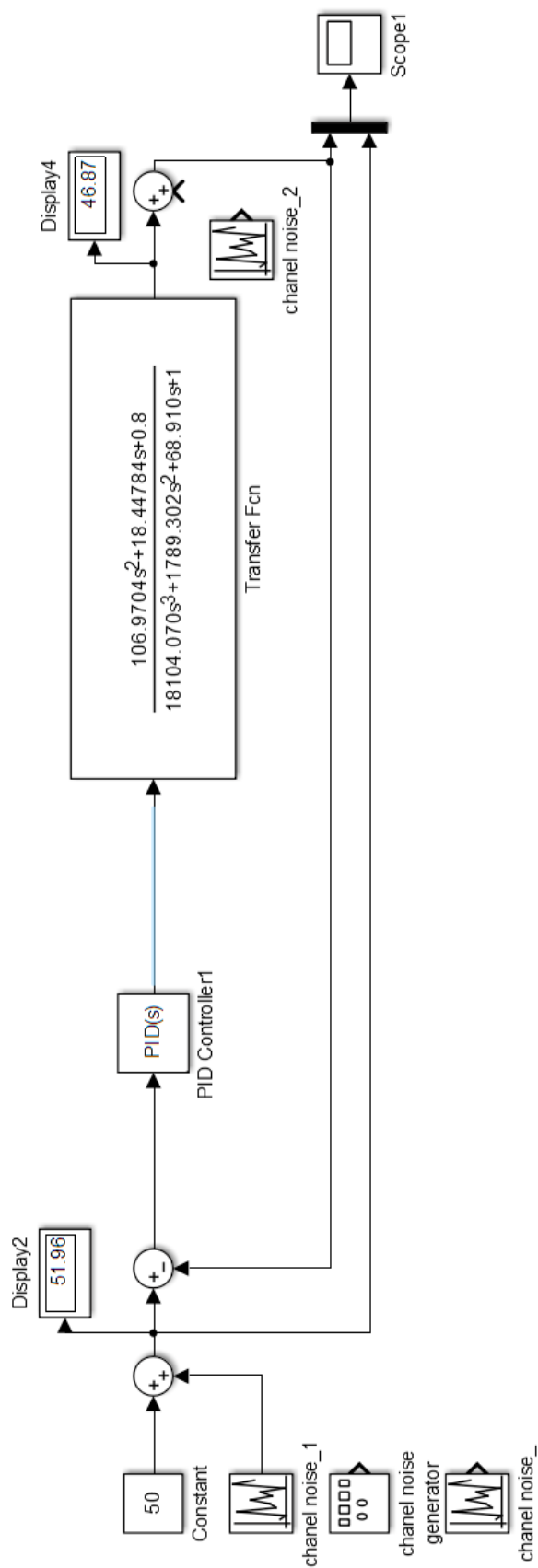


Рис. Г1. Загальний вигляд імітаційної моделі теплового об'єкта з використанням ПІД – регулятора та генераторів сигналів

Додаток Д

Модель системи керування теплого об'єкта з використанням нечіткої логіки

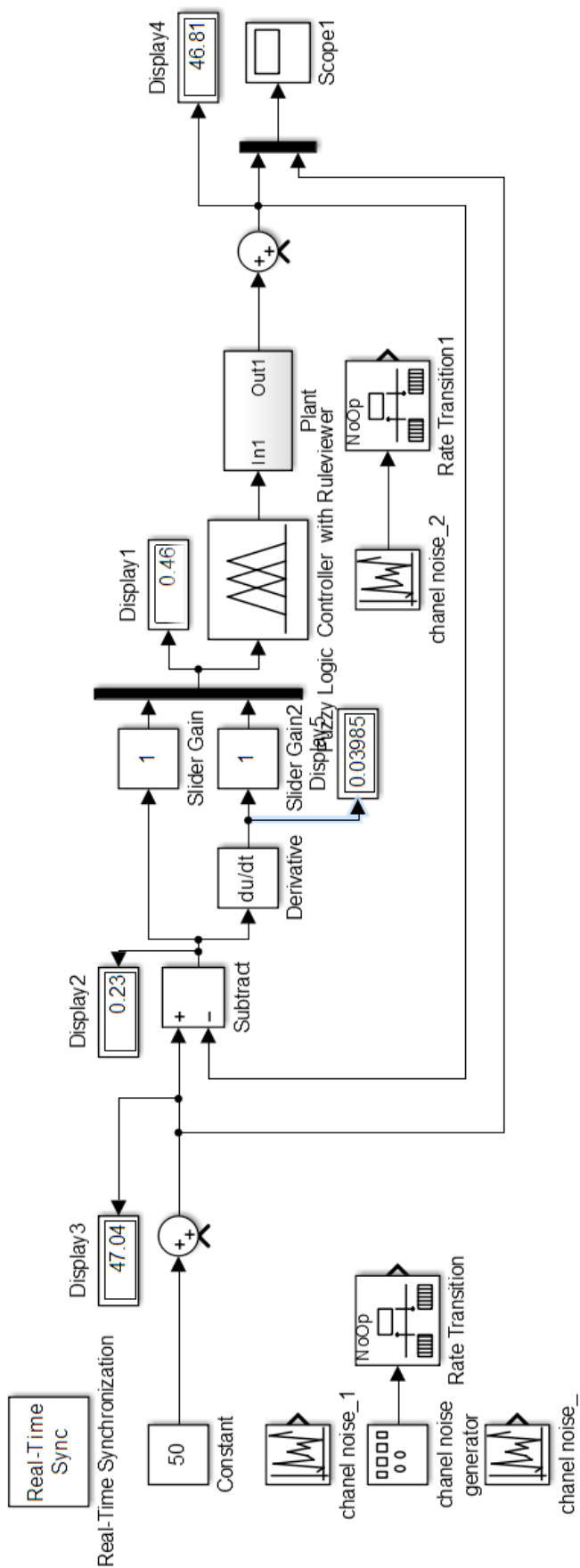


Рис. Д.1. Загальний вигляд імітаційної моделі теплового об'єкта з використанням нечіткого Fuzzy - регулятора та генераторів сигналів

Додаток Е

Зміна динаміки перехідного процесу з використанням нечіткого Fuzzy - регулятора та додаткових збурюючих чинників

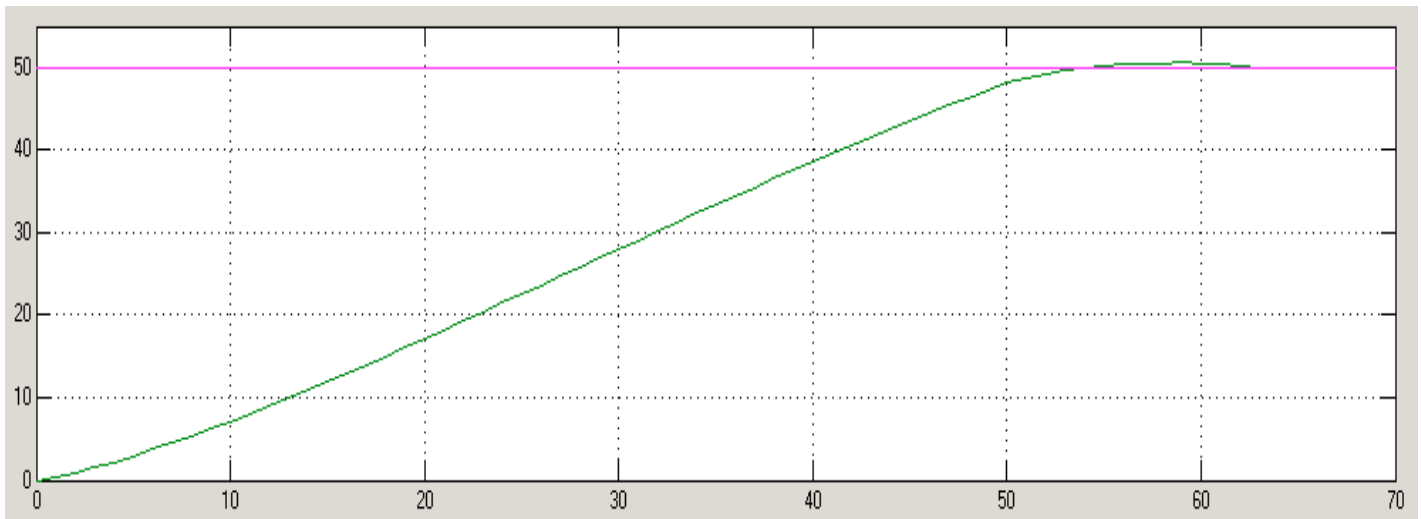


Рис. Е1. Графік перехідного процесу з використанням нечіткого Fuzzy - регулятора при SP рівному 50

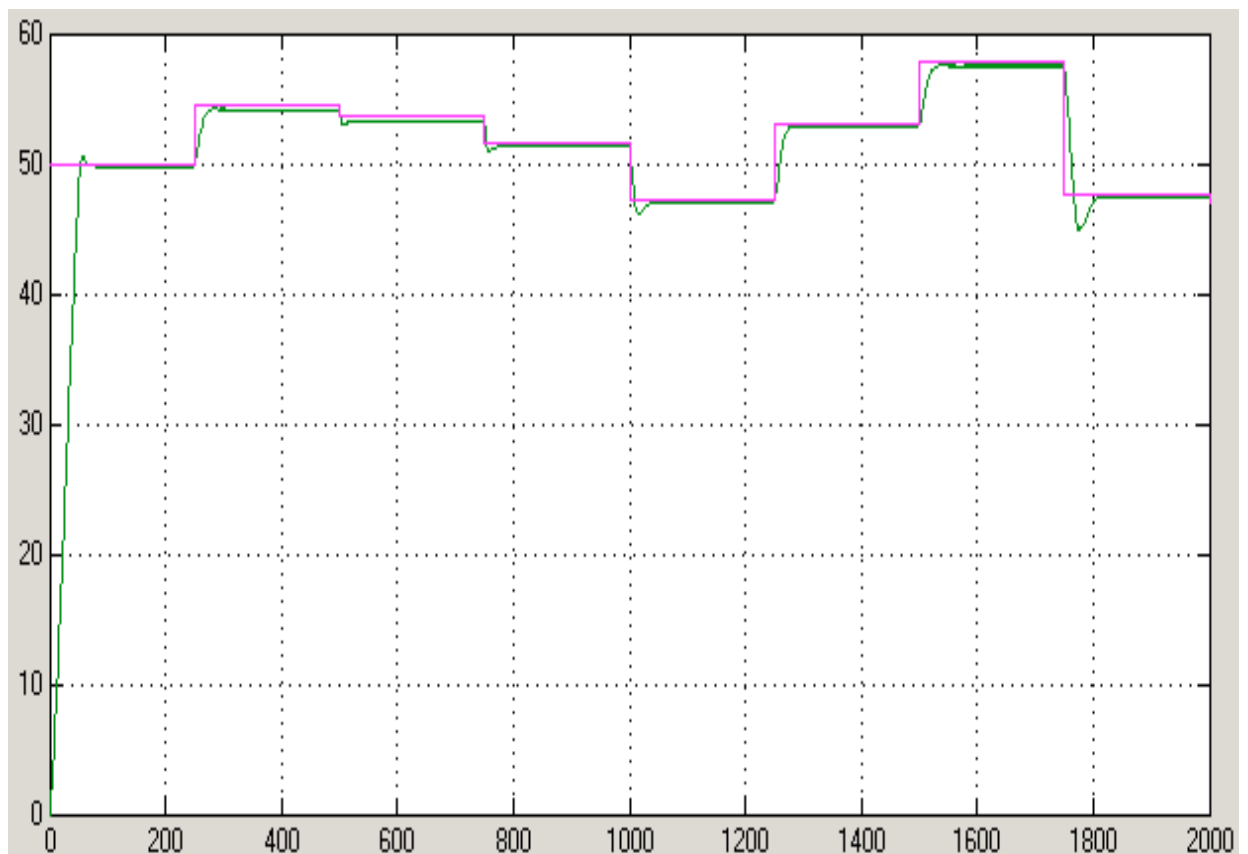


Рис. Е2. Графік перехідного процесу системи керування з використанням нечіткого Fuzzy - регулятора при введенні змінного ступеневого завдання в часі

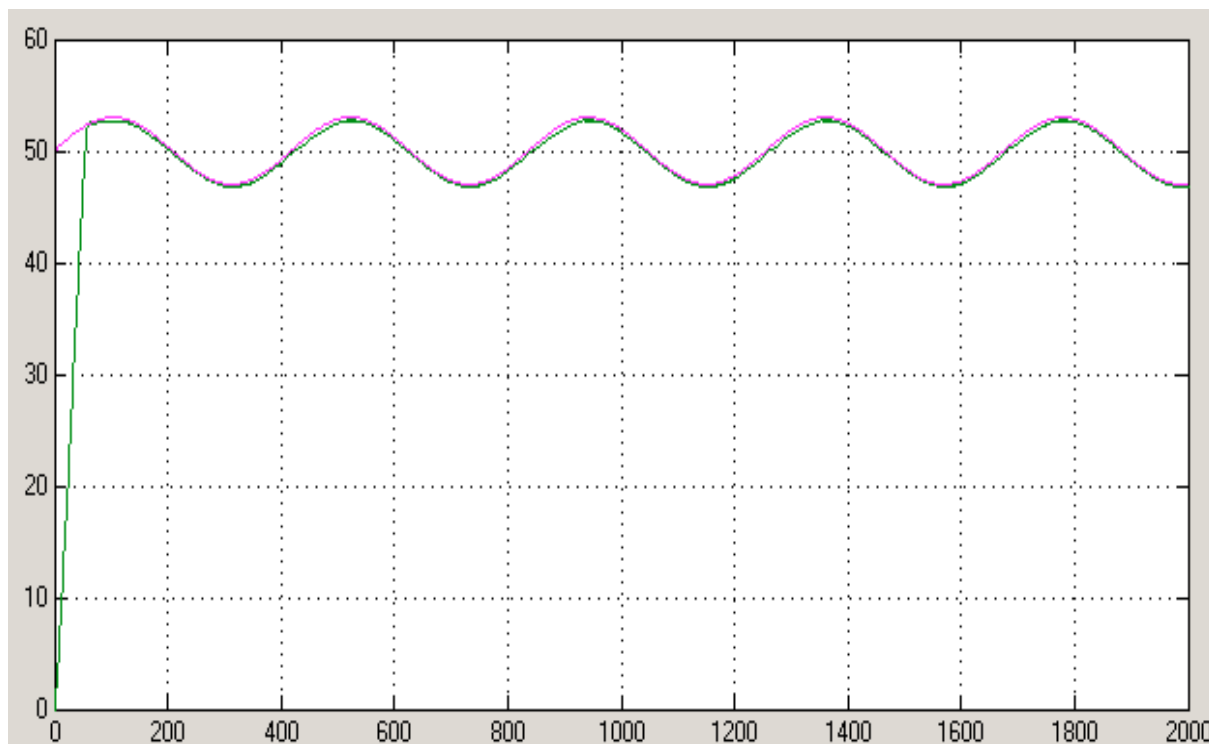


Рис. Е3. Графік перехідного процесу системи керування з використанням нечіткого Fuzzy - регулятора при введенні змінного завдання за синусоїдальним законом

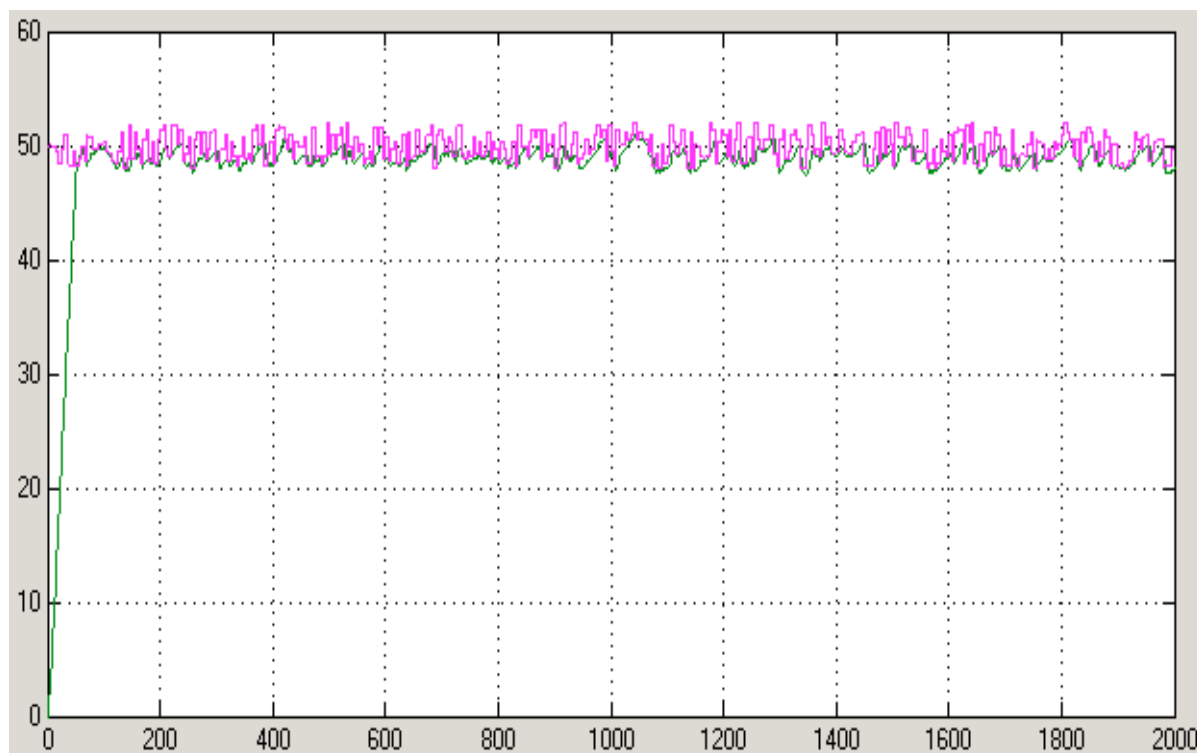


Рис. Е4. Графік перехідного процесу системи керування з використанням нечіткого Fuzzy - регулятора при введенні шумів в канал завдання

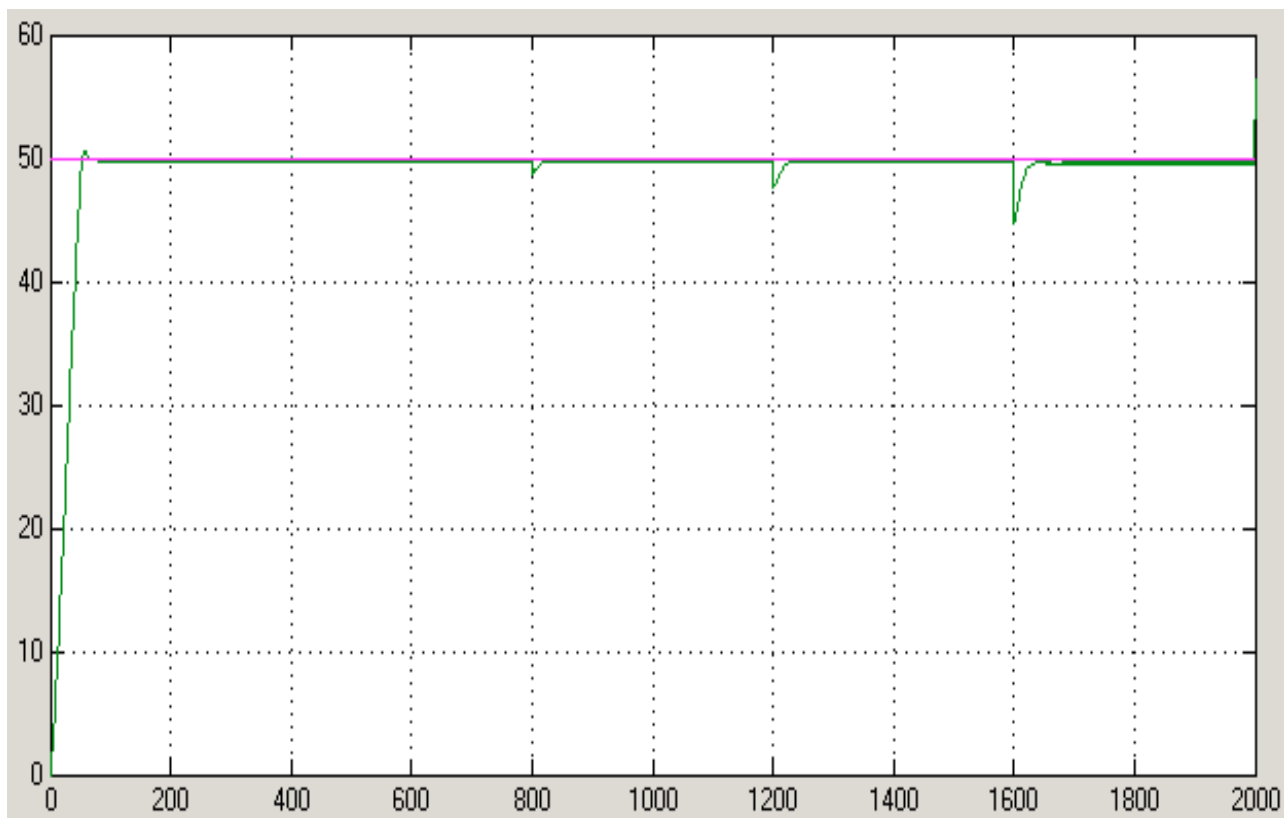


Рис. Е5. Графік перехідного процесу системи керування з використанням нечіткого Fuzzy - регулятора при введенні збурення в канал регулювання

Додаток Є

Зміна динаміки перехідного процесу з використанням нечіткого-нейро - регулятора та додаткових збурюючих чинників

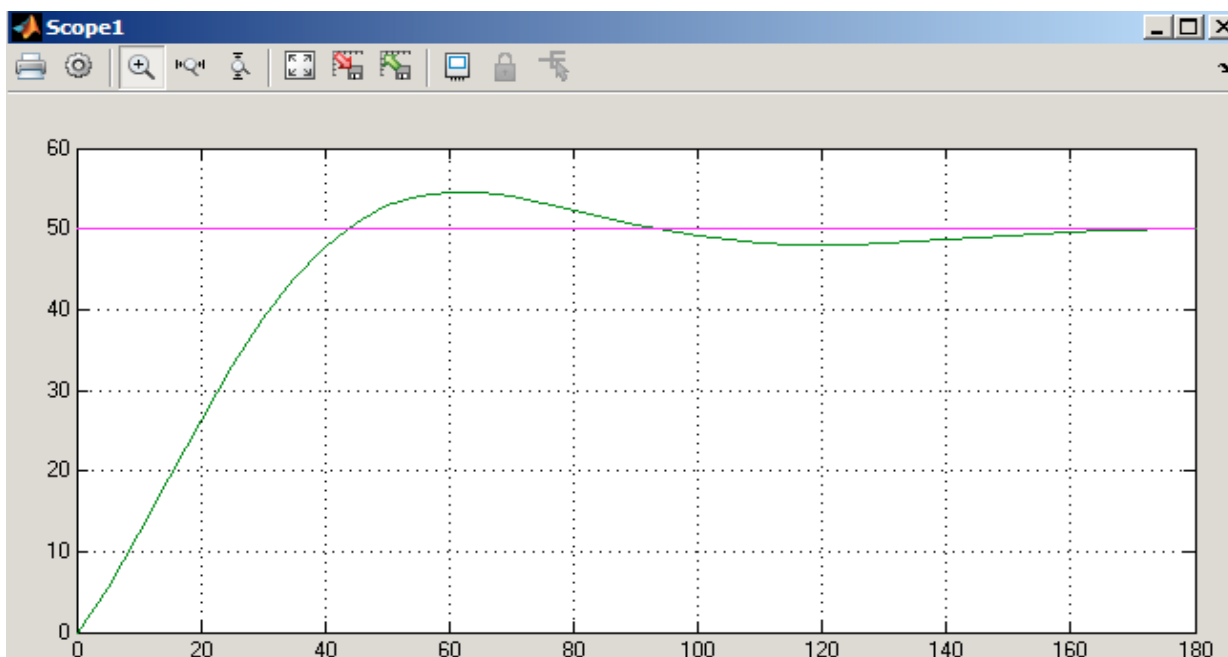


Рис. Є1. Графік перехідного процесу з використанням нечіткого-нейро - регулятора при SP рівному 50

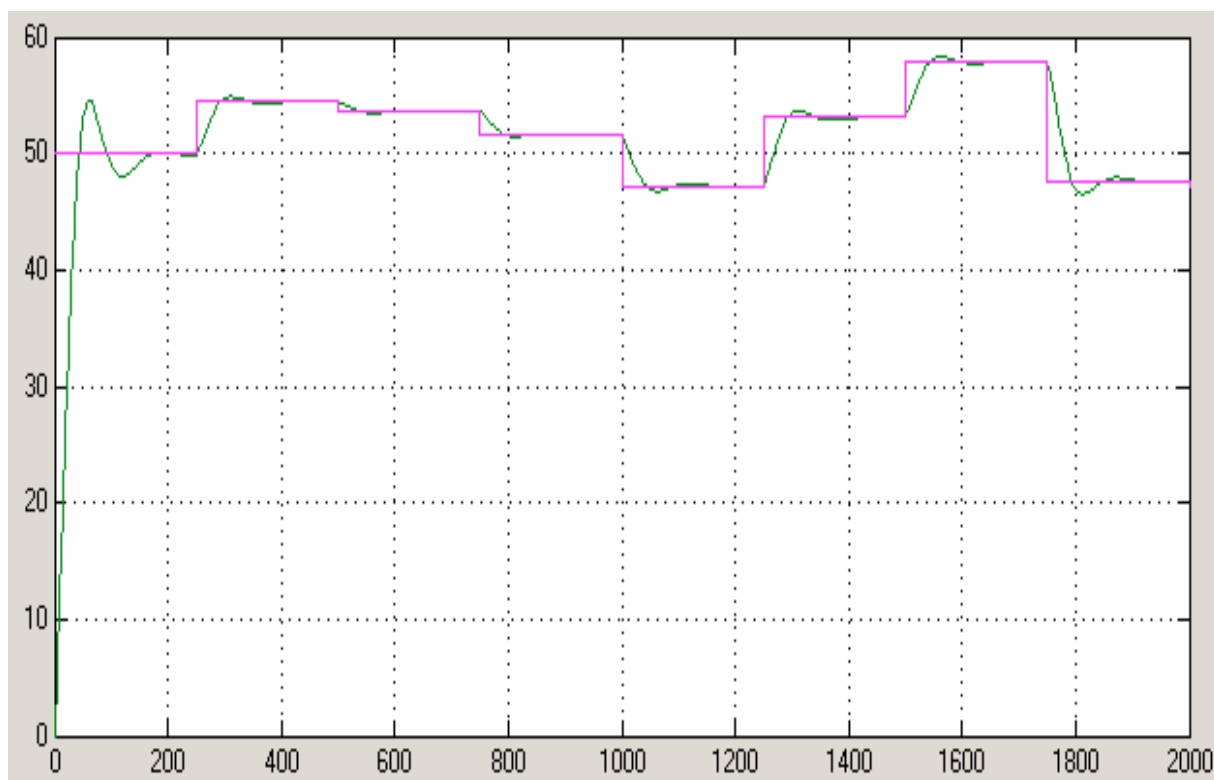


Рис. Є2. Графік перехідного процесу системи керування з використанням нечіткого-нейро - регулятора при введенні змінного ступеневого завдання в часі

Продовження додатка Є

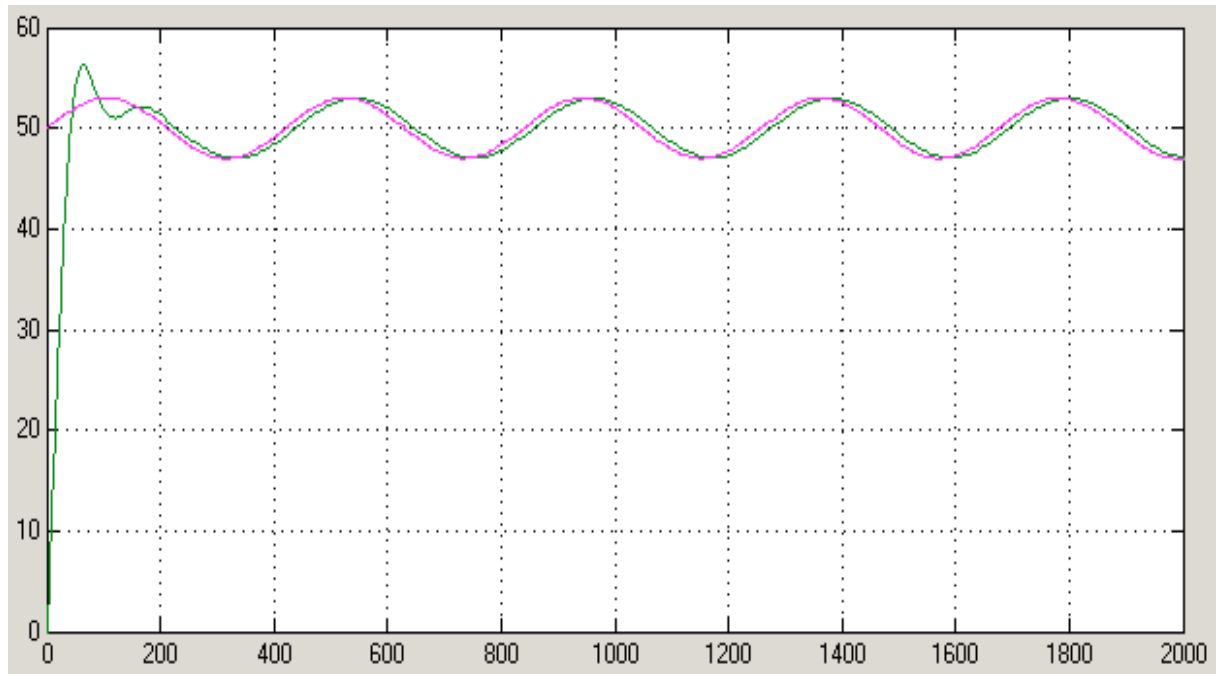


Рис. Є3. Графік перехідного процесу системи керування з використанням нечіткого-нейро - регулятора при введенні змінного завдання за синусоїдальним законом

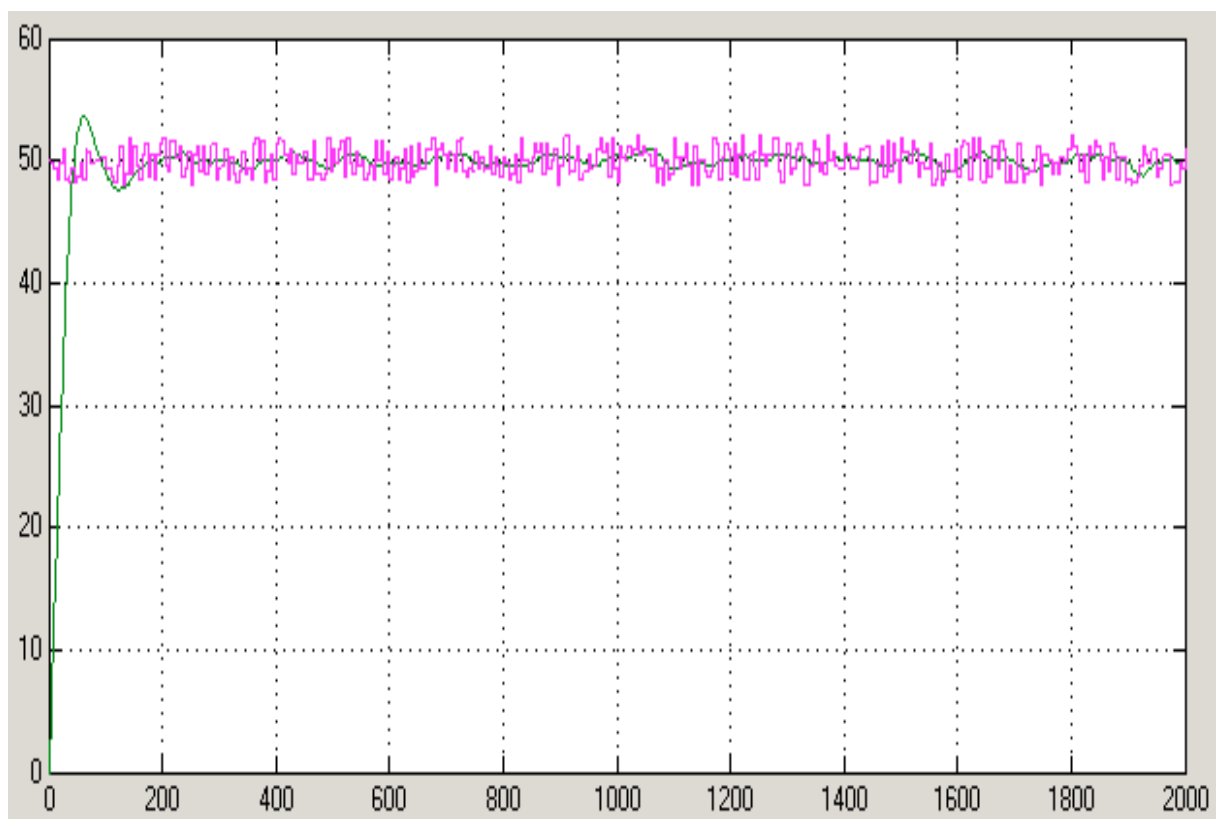


Рис. Є4. Графік перехідного процесу системи керування з використанням нечіткого-нейро - регулятора при введенні шумів в канал завдання

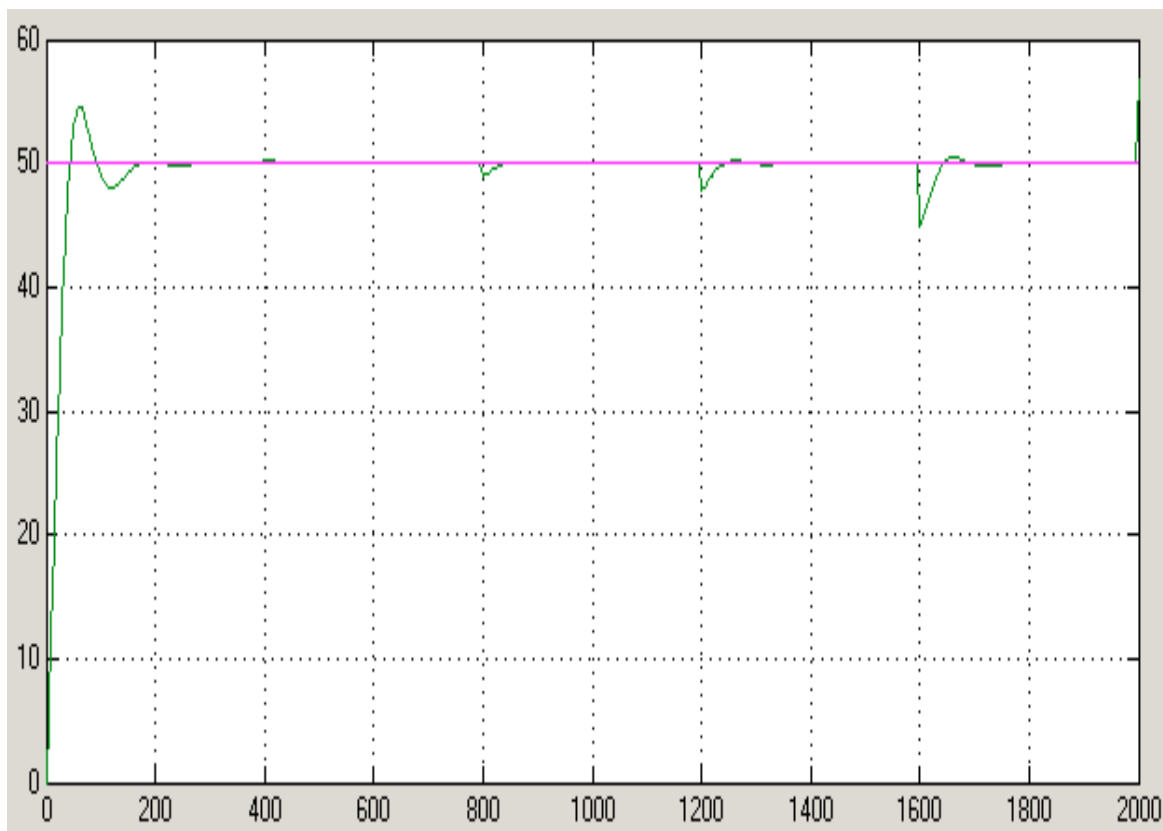
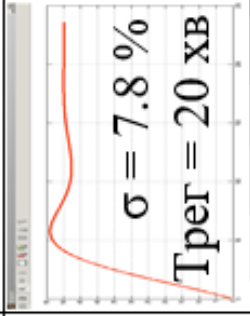
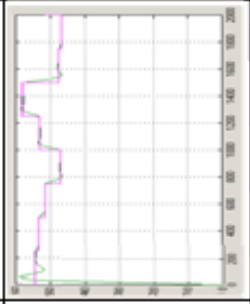
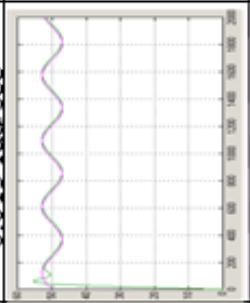
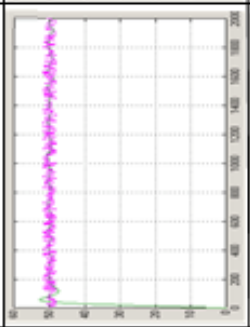
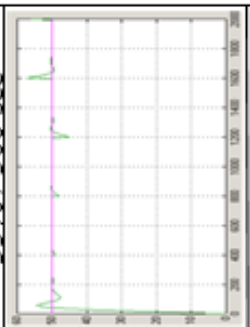
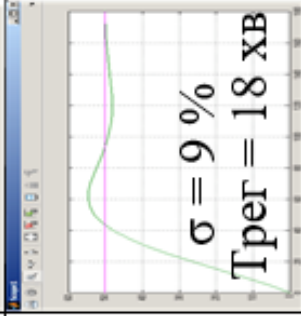


Рис. Є5. Графік перехідного процесу системи керування з використанням нечіткого-нейро-регулятора при введенні збурення в канал регулювання

Додаток Ж

Порівняльний аналіз роботи контролерів

	<p>Усталене завдання SP=50</p>  <p>$\sigma = 7.8\%$ Трег = 20 хв</p>	<p>Змінне ступеневе завдання в часі $55 \pm 25\%$</p>  <p>$\sigma = 1\%$ Трег = 6.3 хв</p>	<p>Змінне синусоїдальне завдання в часі амплітуда 2.5-5% 0.015 rad/sec</p> 	<p>Шуми в каналі завдання 2-3.5% / 5 sec</p> 	<p>Змінне ступеневе збурення об'єкта в каналі регулювання 35% / 500 sec</p> 
<p>PID - регулятор</p>					
<p>Нечіткий Fuzzy-регулятор</p>					
<p>Нейро-нечіткий гібридний регулятор</p>	 <p>$\sigma = 9\%$ Трег = 18 хв</p>				