

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПм-60.00.00.000 ПЗ

Група АКПм-24-2

Володимир Ткаченко

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

Ткаченко Володимир Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.413:621.181.6

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Удосконалення системи автоматизації трубчатої печі з використанням штучних

(назва роботи)

нейронних мереж

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

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-2

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

В.О. Ткаченко

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент

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

Л.І. Фешанич

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

к.т.н., доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С. Борин

(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 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**

Ткаченко Володимир Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення системи автоматизації трубчатої печі з використанням штучних нейронних мереж

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, канд. техн. наук, доцент

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

затвердені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2024 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2024

3. Вихідні дані до роботи Опис технологічного процесу, технологічна схема, статті науково – технічних журналів, збірники, підручники.

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

1. Опис технологічного процесу трубчатої печі

2. Моделювання системи автоматизації трубчатих печей

3. Аналіз системи автоматичного регулювання трубчатих печей

4. Синтез системи автоматичного регулювання трубчатих печей

4. 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 20.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п		Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис технологічного процесу трубчатої печі	1.10.2025	
2	Моделювання системи автоматизації трубчатих печей	1.11.2025	
3	Аналіз системи автоматичного регулювання трубчатих печей	15.11.2025	
	Синтез системи автоматичного регулювання трубчатих печей	05.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Ткаченко В.О. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Фешанич Л.І. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження процесу автоматизації трубчастих печей та ефективності впровадження систем автоматичного керування для підвищення стабільності, якості та продуктивності їх роботи. Показано актуальність використання сучасних методів автоматизації для забезпечення надійного й енергоефективного функціонування теплотехнічного обладнання.

Описано технологічний процес, принцип дії та конструктивні особливості вакуумної трубчастої печі. У другому розділі виконано математичне моделювання системи автоматичного регулювання: визначено всі елементи об'єкта, записано їхні диференціальні рівняння та передавальні функції, сформовано функціональну та технологічну схеми, а також обґрунтовано вибір регулювальних пристроїв.

Проведено аналіз стійкості системи за класичними методами — Ляпунова, Гурвіца, Михайлова та Найквіста. Встановлено область стійкості, визначено граничний коефіцієнт підсилення та оцінено якість перехідних процесів, що дозволило прийняти рішення про необхідність удосконалення регулювання.

Виконано синтез системи автоматичного керування. Розглянуто використання PI- та PID-регуляторів, проведено коригування їхніх параметрів і побудовано порівняльні характеристики роботи системи. Далі застосовано алгоритм оптимального регулювання АКОР (LQR), а також виконано синтез системи на основі нейронної мережі для підвищення адаптивності й точності керування.

Ключові слова: система автоматичного керування, трубчаста піч, регулятор, LQR-алгоритм, нейронна мережа, моделювання, стійкість системи

ANNOTATION

In this master's thesis, a comprehensive study of the automation process of tubular furnaces and the effectiveness of implementing automatic control systems aimed at improving their stability, quality, and productivity was carried out. The relevance of using modern automation methods to ensure reliable and energy-efficient operation of thermal equipment is demonstrated.

The technological process, operating principle, and structural features of the vacuum tubular furnace are described. The second chapter presents the mathematical modeling of the automatic control system: all system elements are identified, their differential equations and transfer functions are derived, and both functional and technological schemes are developed. Additionally, the selection of control devices is substantiated.

The stability of the system is analyzed using classical methods — Lyapunov, Hurwitz, Mikhailov, and Nyquist criteria. The stability region is determined, the critical gain is calculated, and the quality of transient processes is evaluated, which allowed concluding the need for system regulation improvement.

The synthesis of the automatic control system is performed. The use of PI and PID controllers is examined, their parameters are adjusted, and comparative characteristics of the system's performance are obtained. Subsequently, the optimal control LQR - algorithm is applied, and the system based on a neural network is synthesized to enhance adaptability and control accuracy.

Keywords: automatic control system, tubular furnace, controller, LQR algorithm, neural network, modeling, system stability.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТРУБЧАТОЇ ПЕЧІ.....	12
1.1. Загальна характеристика процесу	12
1.2. Принцип дії.....	14
1.3. Переваги трубчастих печей.....	16
1.4. Конструкція вакуумної трубчастої печі	16
Висновки до розділу 1.....	18
РОЗДІЛ 2	
МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРУБЧАСТИХ ПЕЧЕЙ.....	19
2.1. Створення математичної моделі.....	19
2.2. Об'єкт і пристрої керування.....	20
2.3. Вибір регулювальних пристроїв.....	25
2.4. Моделювання технологічного процесу системи	27
Висновки до розділу 2.....	29
РОЗДІЛ 3	
АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ПЕЧЕЙ.....	31
3.1. Аналіз системи на стійкість.....	31
3.1.1. Дослідження стійкості системи першим методом Ляпунова.....	33
3.1.2. Дослідження за критеріями Гурвіца та Михайлова.....	34
3.1.3. Дослідження стійкості за критерієм Найквіста.....	38
3.1.4. Коефіцієнт підсилення за критерієм Гурвіца.....	40
3.2. Прямі оцінки якості замкненої системи.....	42
3.3. Налаштування регулятора за другим методом Циглера–Ніколса.....	43
Висновки до розділу 3.....	43

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ПЕЧЕЙ.....	44
4.1. Впровадження в систему ПІ-регулятора.....	44
4.2. Впровадження ПІД-регулятора в систему.....	50
4.3. Синтез системи оптимального керування на основі алгоритму АКОР (LQR-алгоритм).....	55
4.4. Синтез системи обробки рівня (СОР) на основі нейронної мережі.....	60
Висновки до розділу 4.....	66
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69

ВСТУП

Актуальність теми.

Автоматизація процесів керування трубчастими печами є одним із ключових напрямів підвищення ефективності промислового виробництва у металургійній, хімічній, нафтохімічній, харчовій та інших галузях. Її актуальність зумовлена низкою чинників:

- підвищення ефективності виробництва. Автоматизація забезпечує зростання продуктивності праці, зменшення енерговитрат, скорочення простоїв та підвищення загальної рентабельності виробничих процесів.

- покращення якості продукції. Використання автоматичних систем контролю й регулювання дозволяє підтримувати параметри процесу з високою точністю (температуру, склад газового середовища тощо), що підвищує однорідність та стабільність характеристик готової продукції.

- підвищення рівня безпеки. Застосування автоматизованих систем знижує ризик виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із людським фактором, та підвищує безпечність праці в умовах високих температур і впливу шкідливих речовин.

- раціональне використання ресурсів. Автоматизація сприяє оптимізації витрат сировини, палива й енергії, що забезпечує зменшення екологічного навантаження на довкілля та зниження собівартості продукції.

Обґрунтування вибору теми дослідження

Вдосконалення систем автоматичного керування трубчастими печами є актуальним завданням через зростання вимог до енергоефективності, надійності та екологічної безпеки промислового обладнання. Сучасні підприємства потребують стабільних теплотехнічних процесів, які неможливо забезпечити без високоточної автоматизації. Використання інтелектуальних методів, зокрема оптимального керування та нейронних мереж, відкриває нові можливості для підвищення точності та адаптивності систем регулювання. Актуальність теми зумовлена також необхідністю зменшення впливу людського фактора та підвищення рівня

промислової безпеки. Саме тому дослідження автоматизації трубчастих печей є важливим і практично значущим напрямом сучасної інженерії.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності, продуктивності та безпеки процесу теплової обробки в трубчастих печах шляхом розроблення та впровадження системи автоматизованого керування.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

- визначення об'єкта автоматизації та елементів системи керування;
- вибір і обґрунтування регулювальних пристроїв;
- математичне моделювання процесу керування;
- аналіз системи автоматичного регулювання;
- синтез регулятора за допомогою різних методів.

Об'єктом дослідження

Зміна температури теплоносія в трубчатій печі.

Предметом дослідження

Методи й засоби удосконалення системи автоматизації трубчатої печі, зокрема алгоритми регулювання та застосування штучних нейронних мереж для підвищення точності й ефективності керування.

Методи дослідження

У роботі застосовано математичне та комп'ютерне моделювання для побудови й аналізу системи автоматичного керування трубчастою піччю. Стійкість системи досліджувалась за класичними критеріями. Для синтезу регуляторів використано методи PI-, PID- та LQR-керування, а також елементи нейромережевого підходу.

Дослідження базується на положеннях теорії технологічних процесів трубчастих печей, теорії автоматичного керування та теплопередачі (конвекційної й радіаційної). Методологічну основу становлять системний аналіз, моделювання, математичний апарат теорії стійкості та методи оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна магістерської роботи полягає у використанні нейронних мереж як одного з методів аналізу, синтезу та оптимізації системи автоматичного керування трубчастими печами. Це дозволяє підвищити адаптивність та точність регулювання у змінних виробничих умовах.

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

Тема «Удосконалення системи автоматизації трубчатої печі з використанням штучних нейронних мереж» узгоджується з напрямками науково-дослідних робіт кафедри, що стосуються підвищення ефективності та інтелектуалізації систем автоматичного керування технологічними процесами. Робота є складовою планових досліджень з модернізації промислових теплотехнічних установок та розроблення адаптивних систем керування на основі сучасних методів моделювання та штучного інтелекту.

Практичні значення отриманих результатів

Результати дослідження мають важливе практичне значення, оскільки доведено ефективність впровадження автоматизованих систем керування трубчастими печами в умовах сучасного виробництва. Побудовані моделі, передатні функції та функціональна схема дають можливість точно аналізувати та оптимізувати роботу печі. Проведений аналіз стійкості забезпечує підвищення надійності та безпеки технологічного процесу. Синтез PI-, PID- та LQR-регуляторів, а також їх порівняльна оцінка дозволяють вибрати оптимальний варіант керування. Досвід застосування нейронної мережі відкриває перспективи для подальшої адаптації та інтелектуалізації систем керування у промислових умовах.

Структура та обсяг магістерської роботи.

Робота складається зі вступу, трьох основних розділів, висновків і списку використаних джерел, що охоплює 78 сторінку основного тексту, включає 58 рисунків, 1 таблицю, і 12 літературних джерел.

РОЗДІЛ 1

ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТРУБЧАТОЇ ПЕЧІ

1.1. Загальна характеристика процесу

Трубчаста піч — це високотемпературний технологічний агрегат із теплоізолюваною робочою камерою, яка повністю відокремлена від навколишнього середовища. Основним призначенням такої печі є нагрівання сировини за рахунок теплопередачі від теплоносія, а також здійснення хімічних реакцій, які відбуваються під дією тепла, що утворюється під час спалювання паливної суміші безпосередньо в печі.

Трубчасті печі застосовують у випадках, коли необхідно нагріти середовище (зокрема, вуглеводневі суміші) до дуже високих температур — понад 230 °С, тобто до значень, яких неможливо досягти за допомогою пари чи традиційних теплообмінних установок. Незважаючи на порівняно високу вартість встановлення, передача тепла в навколишнє середовище при раціональному проектуванні трубчастої печі є економічно вигіднішою порівняно з альтернативними методами високотемпературного нагрівання.

Крім того, такі печі можуть використовувати побічні продукти промислових процесів як паливо. Це дає змогу не лише ефективно утилізувати відходи, а й перетворювати їх на додаткове джерело енергії, що зменшує витрати на основне паливо та сприяє екологічній безпеці виробництва [1].

Трубчасті печі широко використовуються у нафтопереробній та нафтохімічній промисловості для високотемпературного нагрівання і здійснення хімічних перетворень рідких та газоподібних вуглеводневих сумішей (наприклад, у процесах крекінгу та піролізу). Вони також знаходять застосування в інших галузях хімічної промисловості.

Сучасна трубчаста піч являє собою складний технологічний комплекс, який включає:

- безпосередньо пічний агрегат;
- систему подачі, спалювання та відведення газів;
- систему автоматичного керування, контролю та моніторингу параметрів процесу.



Рис. 1.1 – Трубчата піч

Історично перші конструкції трубчастих печей були розроблені українськими інженерами В. Г. Шуховим і С. П. Гавриловим, які застосували їх у нафтодобувній промисловості для процесів деемульгації нафти. Сучасні ж модифікації — це високотехнологічні комплекси, інтегровані з цифровими системами автоматизації, що забезпечують точне керування процесом, підвищення енергоефективності та безпеки виробництва [2].

Такі печі оснащуються системами діагностики й моніторингу, які дозволяють здійснювати безперервний контроль за станом обладнання та оперативно реагувати на будь-які відхилення в роботі. Це суттєво підвищує надійність, довговічність та безпечність експлуатації.

Основними конструктивними елементами трубчастої печі є:

- робоча камера (радіаційна та конвекційна зони);
- трубчастий змеївик (теплообмінний контур);

- вогнетривка футеровка;
- пальникове обладнання (форсунки для подачі та спалювання палива);
- газохід і димова труба [2].

1.2. Принцип дії

Принцип роботи трубчастої печі полягає у спалюванні палива (газоподібного або рідкого) у форсунках, розташованих на стінках або у підпаленому просторі радіаційної камери. Продукти згоряння, що утворюються в цій камері, далі спрямовуються у конвекційну секцію печі, де віддають залишкове тепло, після чого виводяться через димохід в атмосферу.

Теплоносій (сировина, яку необхідно нагріти) надходить спочатку до трубчастого теплообмінника конвекційної зони, а потім — до труб радіаційної секції, де досягає заданої температури. Після цього нагріта суміш виводиться з печі для подальшої обробки.

Основним функціональним елементом печі є радіаційна секція, яка одночасно виконує роль камери згоряння. У цій зоні тепло передається переважно шляхом випромінювання, що зумовлено високими температурами продуктів згоряння. Частка тепла, переданого конвекцією, є незначною, оскільки швидкість руху газів навколо труб змеївика залежить від локальних відмінностей густини газового середовища.



Рис. 1.2 – Змійовикк трубчатої печі

У конвекційній секції теплообмін відбувається переважно за рахунок конвекції. Її параметри розраховуються так, щоб температура димових газів, які виходять у димову трубу, перевищувала температуру вхідної сировини приблизно на $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. Це забезпечує оптимальне використання тепла продуктів згоряння та знижує теплове навантаження на стінки труб.

Для підвищення ефективності теплообміну зовнішні поверхні труб можуть оснащуватися додатковими елементами — ребрами, шипами або оребренням, які збільшують площу теплообміну.

Процес нагрівання сировинної суміші відбувається послідовно:

1. Суміш проходить через трубні змеївки конвекційної секції, де здійснюється попередній нагрів.
2. Далі вона надходить у трубні змеївки радіаційної камери, де досягає робочої температури.
3. Рух сировини і продуктів згоряння організовано у зустрічному потоці, що забезпечує максимальне використання теплової енергії.

1.3. Переваги трубчастих печей

У нафтопереробній промисловості трубчасті печі мають значні переваги над традиційними методами нагрівання, зокрема над перегінними кубами. Основні з них:

- висока теплова ефективність — завдяки поєднанню випромінювального та конвекційного теплообміну.
- компактність конструкції, що дозволяє отримати високу теплову потужність при мінімальних габаритах.
- короткий час перебування сировини у печі (кілька хвилин), що запобігає її термічному розкладанню та утворенню коксу на внутрішніх поверхнях труб.
- зниження ризику займання, оскільки об'єм вуглеводневої суміші в зоні нагріву є обмеженим.
- можливість використання принципу одноразового випаровування сировини, який забезпечує повніше випаровування при заданій температурі або ту саму ступінь випаровування за нижчої температури [4].

1.4. Конструкція вакуумної трубчастої печі

Розглянемо конструкцію трубчастої печі на прикладі вакуумної трубчастої печі, що наведена на рисунку 1.3.

Позначення елементів: 1 – змеївик конвекційних труб; 2 – змеївик радіаційних труб; 3 – пальник; 4 – димова труба.

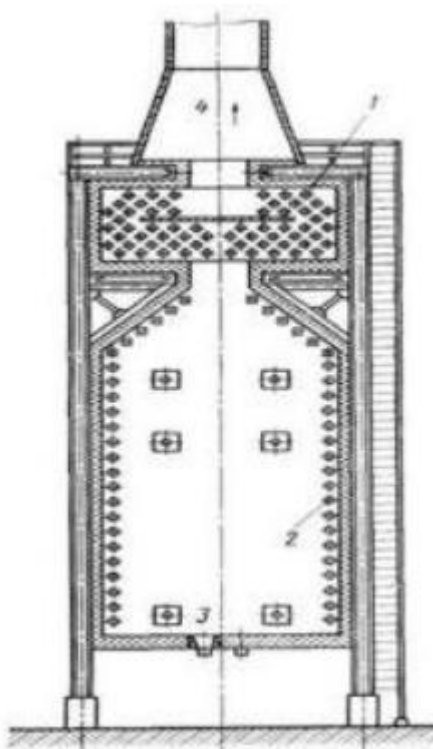


Рис. 1.3 – Вакуумна трубчаста піч

Усі основні елементи вакуумної трубчастої печі розміщені у корпусі, виготовленому з термостійких металів. Конструкція змеївика може виконуватися у горизонтальному або вертикальному варіанті, що визначає просторову конфігурацію агрегату. Обидві схеми застосовуються у промисловості, однак найбільш поширеною є вакуумна трубчаста піч горизонтального типу, оскільки вона має компактні розміри, що спрощує експлуатацію та технічне обслуговування.

Серед промислових зразків трубчастих печей найбільш економічним варіантом є агрегат потужністю близько 3 МВт.

Сучасні вакуумні трубчасті печі можуть працювати як на рідкому, так і на газоподібному паливі [6]. У лабораторних умовах нагрів теплоносія зазвичай здійснюється з використанням електричної енергії, що дозволяє забезпечити стабільність і точність температурного режиму.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто основні аспекти технологічного процесу роботи трубчастої печі, її роль у нафтопереробному виробництві та особливості конструкції. Проведений аналіз показав, що трубчасті печі є ключовою ланкою під час попереднього нагрівання вуглеводневої сировини перед її подальшою переробкою.

Наведено загальну характеристику процесу, згідно з якою трубчаста піч забезпечує стабільне й контрольоване підвищення температури сировини до необхідних значень, що є критично важливим для ефективності наступних технологічних стадій.

Розглянуто принцип дії установки, який ґрунтується на поєднанні випромінювального та конвекційного теплообміну. Такий підхід дає змогу досягти високої теплової ефективності та рівномірного прогрівання труб, що сприяє стабільності технологічного процесу.

Проведено аналіз переваг трубчастих печей. Встановлено, що ці агрегати мають значні експлуатаційні переваги: компактність конструкції, короткий час перебування сировини в зоні нагріву, високу енергоефективність та підвищену безпеку. Такі характеристики забезпечують надійну роботу обладнання та зменшення ризику термічного розкладання або утворення коксу в трубах.

Розглянуто конструкційні особливості вакуумної трубчастої печі. Детальний аналіз показав, що її конструкція спрямована на забезпечення оптимальних умов нагріву та можливість роботи за знижених тисків, що необхідно для переробки важких фракцій нафти. Особливу увагу приділено компонованню камер, теплообмінних поверхонь та пальникових пристроїв.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРУБЧАСТИХ ПЕЧЕЙ

Моделювання процесів автоматизації трубчастих печей є ключовим етапом їх проектування, оптимізації та подальшого впровадження у виробництво. Воно дозволяє передбачити поведінку системи, оцінити ефективність запропонованих технічних рішень, а також протестувати їх до етапу реальної експлуатації.

2.1. Створення математичної моделі

Першим кроком є розроблення математичної моделі трубчастої печі, яка базується на фізичних законах, що описують процеси теплопередачі, масопереносу та хімічних реакцій, які відбуваються всередині агрегату. Модель також повинна враховувати вплив системи автоматичного керування, її параметри, структуру та алгоритми регулювання.

На цьому етапі визначаються:

- початкові та граничні умови;
- фізичні параметри матеріалів (теплоємність, теплопровідність, густина тощо);
- технологічні характеристики процесу;
- параметри системи керування та автоматизації [7].

Коректна параметризація забезпечує адекватність моделі реальному технологічному процесу та підвищує достовірність результатів симуляції.

Після задання параметрів модель реалізується на комп'ютері з використанням спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, Matlab/Simulink). У процесі симуляції проводиться обчислення динамічних характеристик системи:

- температурних розподілів у трубах;
- швидкості потоків газів і теплоносія;
- зміни концентрацій реагентів;

- енергетичних балансів печі.

Результати моделювання дають змогу оцінити ефективність теплопередачі, стійкість системи керування та визначити оптимальні режими роботи печі.

На основі отриманих результатів виконується оптимізація параметрів системи керування. Це дає змогу мінімізувати енергетичні втрати, забезпечити рівномірність нагріву сировини та стабільність технологічного процесу. За допомогою моделі також можуть розроблятися нові стратегії регулювання (наприклад, на основі PID-, LQR- або нейронних алгоритмів), що підвищують точність і адаптивність системи.

Після завершення етапів моделювання та оптимізації система підлягає тестуванню на реальному обладнанні. Це дозволяє перевірити працездатність автоматизованих рішень, оцінити їхню безпеку та узгодженість із технологічними вимогами.

Таким чином, моделювання виступає невід'ємною частиною розроблення сучасних автоматизованих систем керування трубчастими печами, забезпечуючи зменшення часу на впровадження, скорочення витрат і підвищення ефективності промислового процесу.

2.2. Об'єкт і пристрої керування

Основним об'єктом керування у системі автоматизації трубчастої печі є температура теплоносія та нагріваного матеріалу, що визначає енергоефективність і якість технологічного процесу. Для опису теплових процесів у печі використовується рівняння теплопровідності, яке характеризує розподіл температури в матеріалі залежно від часу та просторових координат.

У одновимірному випадку (поширення тепла вздовж однієї осі) рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial s^2} \quad (2.1)$$

Де T – температура матеріалу, °C; α – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, м²/с [7].

Датчики вимірювання температури

Для вимірювання температури в системі використовується термопара, динамічні властивості якої описуються рівнянням:

$$k_t = T_t \frac{ds}{dt} + 1 \quad (2.2)$$

Де k_t – коефіцієнт передавання термопарі; T_t – стала часу термопарі.

Це рівняння описує інерційні властивості вимірювального елемента, що враховуються при побудові моделі автоматичної системи регулювання.

Модель регулювального клапана

Динаміку регулювального клапана, який змінює витрату палива або теплоносія, можна подати диференціальним рівнянням першого порядку:

$$k_{pk} = T_{pk} \frac{ds}{dt} + 1 \quad (2.3)$$

де k_{pk} – коефіцієнт підсилення регулювального клапана; T_{pk} – стала часу клапана.

Це рівняння відображає інерційність виконавчого механізму системи автоматичного регулювання.

Математична модель вакуумної трубчастої печі

Вакуумна трубчаста піч поділяється на дві основні зони:

- конвекційну камеру, де тепло передається переважно конвекцією від продуктів згоряння до стінок труб і матеріалу;
- радіаційну (зону горіння), де основна частина тепла передається випромінюванням від полум'я.

Для опису теплових процесів у кожній зоні застосовуються рівняння енергетичного балансу.

Конвекційна зона

$$m_2 c_m \frac{dT_2}{dt} = S \alpha_{k1} (T_2 - T_{дим1}) - F_1 \alpha_{k2} (T_2 - T_{cm2}) + K(T_1 - T_2);$$

$$(F_1 + F_2) \rho_2 c_{cm} \frac{dT_{ст2}}{dt} = F_1 \alpha_{k2} (T_{cm2} - T_2) - (F_1 + F_2) \alpha_{k3} (T_{ст2} - T_{пов});$$

$$\frac{dm_2}{dt} = m_2 + m_1 \quad (2.4)$$

Зона горіння (радіаційна секція)

$$m_3 c_m \frac{dT_3}{dt} = S \alpha_{k1} (T_3 - T_{\text{дим1}}) - S \varepsilon_0 (T_3^4 - T_{\text{дим1}}^4) + F_1 \alpha_{k2} (T_3 - T_{\text{см3}}) + K(T_2 - T_3);$$

$$\begin{aligned} (F_1 + F_2) \rho_3 c_{\text{см}} \frac{dT_{\text{см3}}}{dt} &= F_1 \alpha_{k1} (T_{\text{см3}} - T_3) - F_2 \varepsilon_0 (T_{\text{см3}}^4 - T_{\text{дим1}}^4) \\ &- (F_1 + F_2) \alpha_{k3} (T_{\text{см3}} - T_{\text{пов}}); \\ \frac{dm_3}{dt} &= m_3 + m_2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

де T_1 – температура матеріалу на вході в піч; T_2 – температура матеріалу на виході з I зони; T_3 – температура матеріалу на виході з II зони; m_1, m_2, m_3 – маси матеріалу відповідно на вході, у першій та другій зонах; c_m – теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К); (S) – площа теплообміну між матеріалом і газовим середовищем, м²; $\alpha_{k1}, \alpha_{k2}, \alpha_{k3}$ – коефіцієнти теплообміну між відповідними середовищами; F_1, F_2 – площі теплообміну між матеріалом, кожухом і навколишнім середовищем, м²; ρ – густина матеріалу; $T_{\text{дим1}}$ – температура димових газів; $T_{\text{пов}}$ – температура повітря навколишнього середовища.

Оскільки рівняння для окремих зон мають перший порядок, для спрощення аналізу та побудови передаточної функції печі вони можуть бути зведені до єдиного узагальненого рівняння:

$$k_{\Pi} = T_{\Pi} \frac{ds}{dt} + 1 \quad (2.6)$$

Це узагальнене рівняння описує динамічну реакцію трубчастої печі на зміну керувального впливу (подачі палива або теплоносія) та використовується для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання температури.

Таблиця 2.1

Моделі

№	Назва	Математична модель	
		Диференціальне рівняння	Передавальна функція
1	Задаючий пристрій	U_0	-
2	Об'єкт керування (піч)	$k_{\Pi} = T_{\Pi} \frac{ds}{dt} + 1$	$W_1(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1}$
3	Клапан	$k_{\text{рк}} = T_{\text{рк}} \frac{ds}{dt} + 1$	$W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}$
4	Давач	$k_t = T_t \frac{ds}{dt} + 1$	$W_3(s) = T_3$
4	Насос	$k = T_H \frac{ds}{dt} + 1$	$W_4(s) = \frac{k_4}{T_4 s + 1}$

У наведеній табл. 2.1 представлено математичні моделі ланок системи автоматизації трубчастої печі. Для кожної ланки подано диференціальні рівняння, які описують динаміку окремих елементів системи керування, а також передаточні функції, що були отримані на основі цих рівнянь за допомогою математичного моделювання [8].

Отримані передаточні функції є необхідними для подальших аналітичних розрахунків параметрів системи автоматичного регулювання (САР), а також для побудови структурної та функціональної схем системи.

На рисунку 2.1 подано функціональну схему системи автоматичного регулювання температури трубчастої печі, яка відображає основні зв'язки між об'єктом керування, вимірювальними, регулюючими та виконавчими елементами.

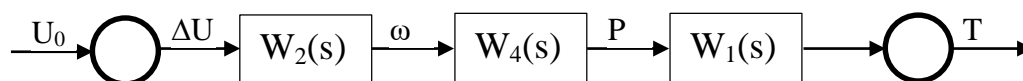


Рис. 2.1 – Структурна схема САР

На наступному рисунку показана замкнута схема

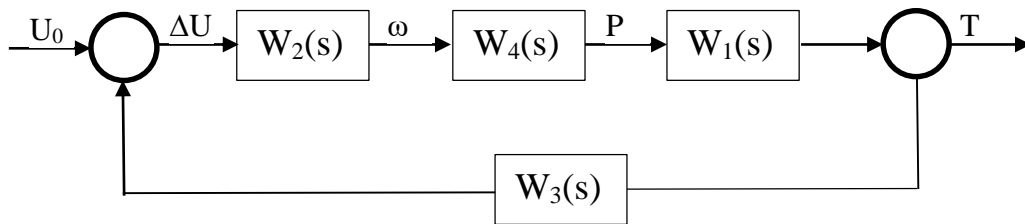


Рис. 2.2 – Замкнута схема САР

Тепер можна скласти передавальну функцію замкненої системи автоматичного регулювання відносно початкової напруги згідно з наведеною вище принциповою схемою, як показано на рисунку 2.2.

$$G = \frac{W_2 \times W_4 \times W_1}{W_2 \times W_4 \times W_1 \times W_3 + 1} \quad (2.7)$$

Далі підставимо отримані передавальні функції:

$$G(s) = \frac{\frac{k_2}{T_2 s + 1} \times \frac{k_4}{T_4 s + 1} \times \frac{k_1}{T_1 s + 1}}{\frac{k_2}{T_2 s + 1} \times \frac{k_4}{T_4 s + 1} \times \frac{k_1}{T_1 s + 1} \times T_3 + 1}. \quad (2.8)$$

Тепер числові значення:

$$G(s) = \frac{\frac{2.3}{1.7s + 1} \times \frac{1.44}{3.4s + 1} \times \frac{1}{1.8s + 1}}{\frac{2.3}{1.7s + 1} \times \frac{1.44}{3.4s + 1} \times \frac{1}{1.8s + 1} \times 1.4 + 1}.$$

$$G(s) = \frac{0.66}{2.08s^3 + 2.9s^2 + 1.38s + 1.19}. \quad (2.9)$$

Розімкнута САР:

$$G(s) = \frac{2.3}{1.7s + 1} \times \frac{1.44}{3.4s + 1} \times \frac{1}{1.8s + 1} = \frac{3.33}{10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1} \quad (2.10)$$

2.3. Вибір регулювальних пристроїв

Продукт, що прокачується через змійовик трубчастої печі, нагрівається за рахунок тепла, яке утворюється під час спалювання паливного газу. На рисунку 2.3 показано схему трубчастої печі.

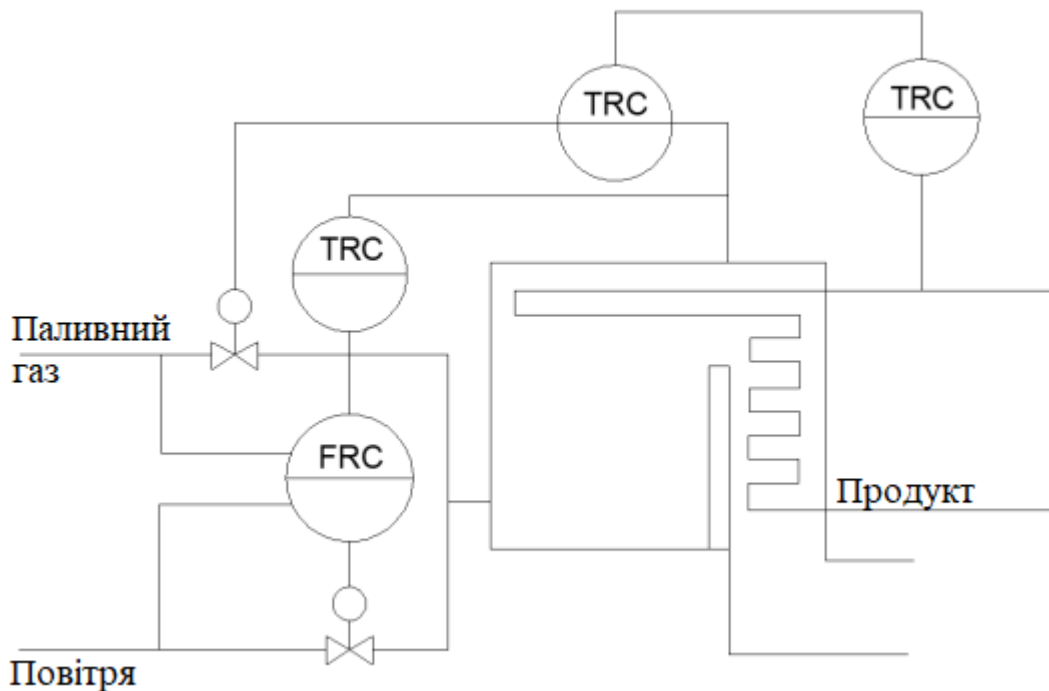


Рис. 2.3 – Функціональна схема трубчастої печі

Завдання регулювання трубчастих печей

Поставленим завданням регулювання трубчастих печей є забезпечення постійної температури продукту, що виходить із печі.

Об'єктом збурення виступають такі параметри, як витрата і температура вихідного продукту, а також теплотворна здатність палива, що використовується, кількість і температура повітря для подачі, тепловтрати в навколишнє середовище та інші фактори [8].

Ці збурення можуть бути скомпенсовані за допомогою автоматичної системи регулювання (АСР), яка керує подачею палива в піч, щоб підтримувати необхідну температуру продукту.

Однак через затримки передачі тепла через стінки печі та тривалий перехідний процес використання лише однієї АСР може призводити до значних динамічних похибок і тривалого часу реакції.

Щоб підвищити якість регулювання температури продукту, можна застосувати каскадну систему регулювання. Ця система містить два регулятори:

- перший регулює температуру продукту на виході з печі — його називають коригувальним регулятором;

- другий керує температурою газів над перевальною (сводовою) стінкою — це стабілізувальний регулятор, який також впливає на подачу палива в піч.

Стабілізувальний регулятор компенсує збурення, що впливають на процес згоряння палива, до того, як вони почнуть впливати на температуру продукту.

Для підтримання оптимального співвідношення палива й повітря у печі з примусовою подачею первинного повітря використовується регулятор співвідношення паливо–газ–повітря, який забезпечує задане значення коефіцієнта надлишку повітря, що впливає на потужність полум'я.

При зміні теплоти згоряння палива на регулятор витрати подається коригувальний сигнал від стабілізатора вмісту кисню у димових газах, щоб забезпечити повне згоряння палива та високу якість контролю.

Зміни тиску паливного газу вважаються істотним збуренням, тому в автоматичну систему керування печі вводять додатковий регулятор тиску, що впливає на нагрівання продукту на виході з печі.

Цей регулятор працює від регулятора температури в камері згоряння та компенсує коливання тиску газу, що сприяє кращому керуванню подачею палива.

З огляду на сильну залежність температури печі від співвідношення паливо–повітря, системи керування трубчастими печами часто доповнюють системами надрегулювання.

Такі системи виявляють підвищену температуру вихлопних газів над перевальною стінкою й впливають на регулятор співвідношення паливний газ–повітря, коригуючи подачу первинного повітря.

Під час контролю співвідношення палива й газу важливо дотримуватись заходів безпеки, щоб уникнути утворення вибухонебезпечних сумішей через нестачу повітря в топці. Для цього витрата палива повинна бути обмежена таким чином, щоб не перевищувати максимально допустимого значення, яке відповідає поточній витраті повітря [9]. Якщо швидкість потоку повітря зменшується нижче певного рівня, подача палива в топку повинна автоматично зменшитися.

2.4. Моделювання технологічного процесу системи

Моделювання системи автоматичного регулювання температури трубчастих печей включає аналіз теплових процесів, використання математичних моделей, оптимізацію параметрів та забезпечення ефективної автоматизації для досягнення точного й стабільного теплового режиму.

Передавальні характеристики системи вже були виведені раніше, далі представлено модель технологічного процесу, зібрану в середовищі Matlab Simulink, як показано на рисунку 2.4.

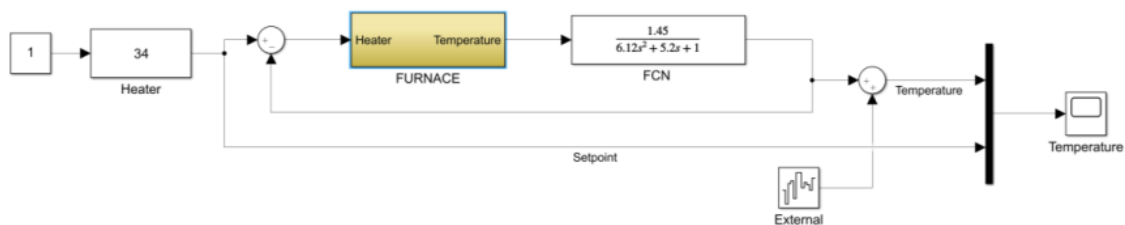


Рис. 2.4 – Модель технологічного процесу

Модель складається з кількох частин: нагрівача, печі, функції теплоємностей та зовнішнього впливу [10]. Піч виділено в окремий функціональний блок, як показано на рисунку 2.4.

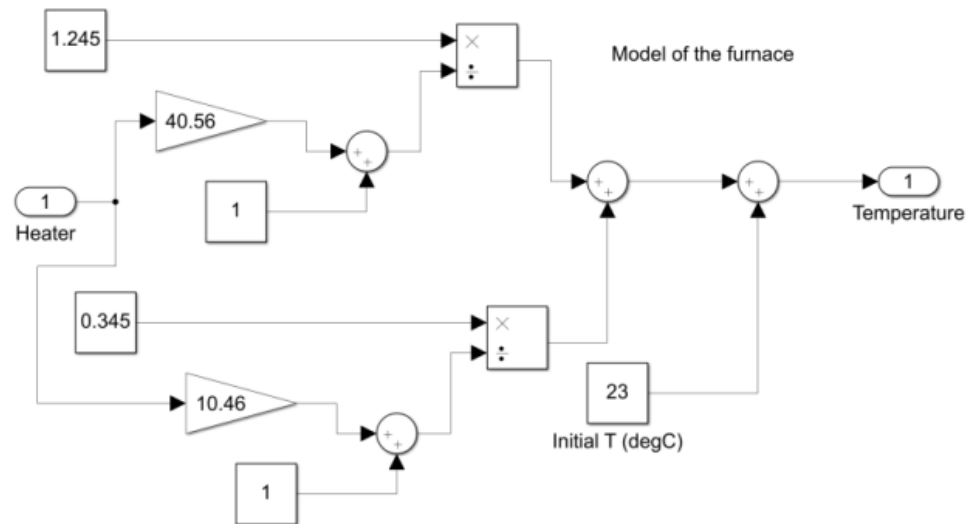


Рис. 2.4 – Модель печі

Далі наведено результати моделювання

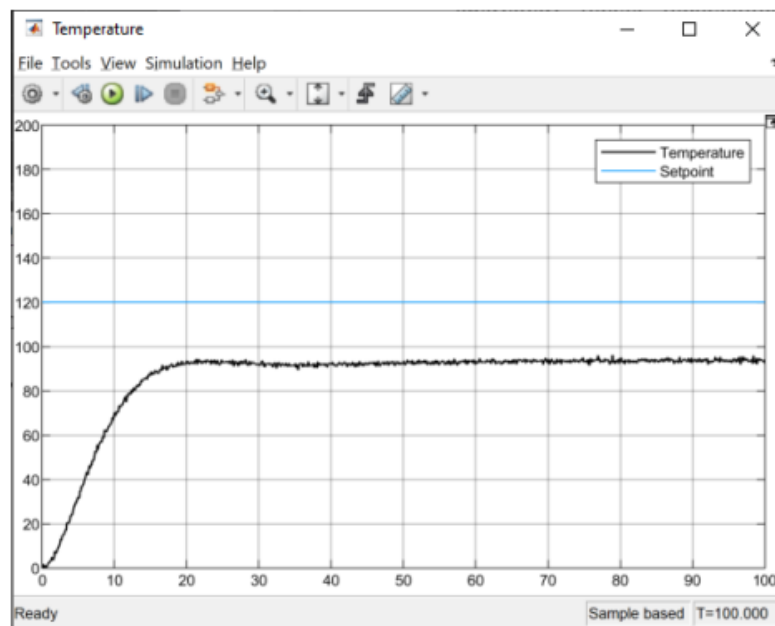


Рис. 2.6 – Результат моделювання

Згідно з отриманими результатами моделювання, температура не досягає початкового заданого значення (уставки), спостерігається похибка, тому необхідно провести аналіз системи та впровадити регулятор для усунення помилки системи.

Впровадження регулятора буде виконано послідовним способом. Розрахунок параметрів регулятора здійснюватиметься різними методами.

Висновки до розділу 3

У другому розділі було проведено комплексне моделювання системи автоматизації трубчастих печей, що дозволило отримати повне уявлення про динаміку об'єкта, особливості його керування та вплив вибраних регулювальних елементів на якість технологічного процесу. Результати моделювання є необхідною основою для подальшого вдосконалення алгоритмів автоматичного керування.

Створено математичну модель трубчастої печі, яка описує основні процеси теплообміну, динаміку зміни температури теплоносія та поведінку об'єкта при різних режимах роботи. Модель враховує інерційність системи, нелінійність теплотехнічних характеристик і взаємозв'язок між зонами нагрівання. Розроблена модель є достатньо точною для аналізу як перехідних процесів, так і сталих режимів.

Визначено об'єкт керування та описано пристрої, які беруть участь у процесах регулювання — датчики температури, витратоміри, приводи пальників, контролери. Проаналізовано їх функціональні можливості, принципи дії та взаємодію в рамках системи автоматизації. Особливу увагу приділено характеристикам виконавчих механізмів, які визначають швидкодію та точність регулювання.

Розглянуто процедуру вибору регулювальних пристроїв, що включає аналіз типу регульованих параметрів, характеру збурень і вимог до стабільності системи. Було обґрунтовано застосування відповідних регуляторів для підтримання необхідної температури та забезпечення оптимального режиму горіння. Вибір регуляторів ґрунтувався на критеріях надійності, простоти реалізації та можливості подальшої адаптації системи.

Проведено моделювання технологічного процесу, яке дозволило оцінити роботу системи у різних режимах та визначити поведінку системи при змінах зовнішніх і внутрішніх збурень. Моделювання показало, що ефективність

регулювання істотно залежить від точності математичної моделі та правильно підібраних параметрів регуляторів. Аналіз отриманих графіків та перехідних процесів підтвердив працездатність системи автоматизації та виявив напрями її подальшого вдосконалення.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ПЕЧЕЙ

3.1. Аналіз системи на стійкість

Спочатку необхідно обчислити перехідні характеристики. Перехідна характеристика — це графічне представлення часової поведінки системи у відповідь на зовнішнє збурення або зміну внутрішніх параметрів.

Вона показує, як вихідний сигнал системи змінюється з часом після появи вхідного сигналу або зміни умов роботи.

Перехідна характеристика дає змогу оцінити наскільки швидко та стабільно система досягає усталеного стану, а також визначити її динамічні властивості.

Графічно вона зображується у вигляді залежності вихідного сигналу від часу на горизонтальній осі відкладається час, а на вертикальній — вихід системи.

Побудова перехідних характеристик виконується у програмі Matlab, що показано на рисунках 3.1, 3.2, 3.3 і 3.4.

```
>> Zm=tf([0.66],[2.08 2.9 1.38 1.19])
Zm =
          0.66
-----
2.08 s^3 + 2.9 s^2 + 1.38 s + 1.19
Continuous-time transfer function.
```

Рис. 3.1 – Скрипт отримання перехідної характеристики ЗСАР

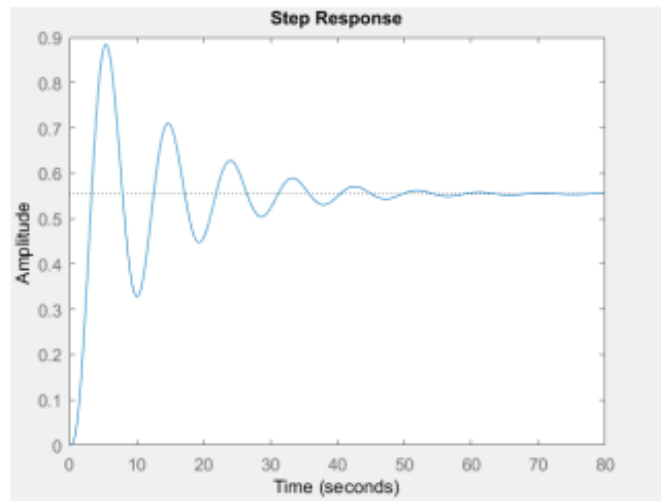


Рис. 3.2 – Графік перехідної характеристики ЗСАР

```
>> Rz=tf([3.33],[10.4 14.9 6.9 1])

Rz =

          3.33
-----
10.4 s^3 + 14.9 s^2 + 6.9 s + 1

Continuous-time transfer function.
```

Рис. 3.3 – Скрипт отримання перехідної характеристики РСАР

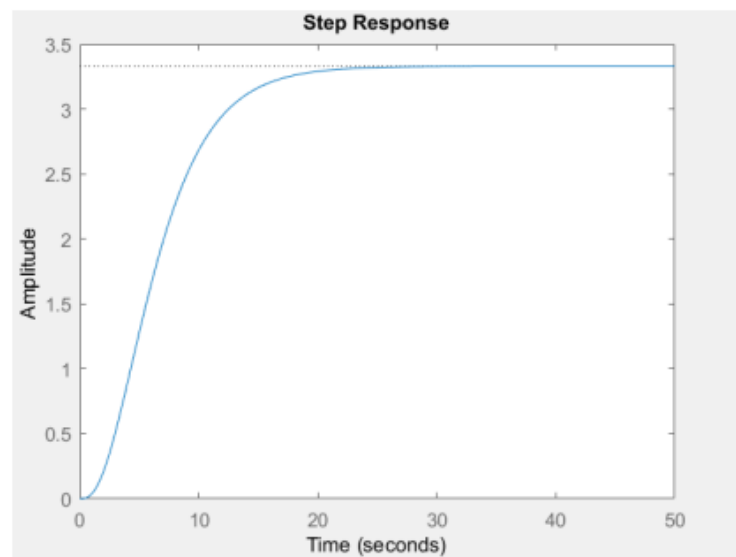


Рис. 3.4 – Графік перехідної характеристики РСАР

3.1.1. Дослідження стійкості системи першим методом Ляпунова

Перший метод Ляпунова є одним із основних способів аналізу стійкості та нестійкості динамічних систем. Він ґрунтується на використанні функцій Ляпунова, за допомогою яких визначають поведінку системи в околі її стійкого або нестійкого рівноважного стану.

Суть методу полягає в наступному: припустімо, що маємо диференціальне рівняння, яке описує динаміку системи. За допомогою методу Ляпунова можна знайти функцію Ляпунова, яка задовольняє певним умовам і використовується для аналізу стійкості системи.

Для проведення дослідження стійкості системи цим методом спочатку необхідно обчислити полюси передавальної функції. Для цього буде використано програму Matlab, як показано на рисунку 3.4 [11].

```
>> Zm=tf([0.66],[2.08 2.9 1.38 1.19])

Zm =

          0.66
-----
 2.08 s^3 + 2.9 s^2 + 1.38 s + 1.19

Continuous-time transfer function.

>> pole(Zm)

ans =

-1.2325 + 0.0000i
-0.0808 + 0.6765i
-0.0808 - 0.6765i
```

Рис. 3.4 – Знаходження полюсів замкнутої системи

Слід зазначити, що полюси замкненої системи мають як уявні, так і дійсні частини. Відсутні полюси, що мають лише уявну або лише дійсну складову. Усі дійсні полюси — від’ємні, звідки випливає, що замкнена система є стійкою.

Також спостерігається коливальний, але збіжний процес, а визначення полюсів наведено на рисунку 3.4.

```

>> Rz=tf([3.33],[10.4 14.9 6.9 1])

Rz =

          3.33
-----
10.4 s^3 + 14.9 s^2 + 6.9 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> pole(Rz)

ans =

-0.5722 + 0.0783i
-0.5722 - 0.0783i
-0.2883 + 0.0000i

```

Рис. 3.6 – Знаходження полюсів розімкнутої системи

Полюси розімкненої системи є дійсними та від’ємними, при цьому спостерігається наявність уявних складових. Також відсутні нульові полюси.

Звідси можна зробити висновок, що розімкнена система є стійкою і характеризується коливальним, але збіжним процесом, що показано на рисунку 3.6.

3.1.2. Дослідження за критеріями Гурвіца та Михайлова

Для початку розглянемо критерій Гурвіца. Критерій Гурвіца — це метод, який застосовується для аналізу стійкості лінійних динамічних систем із параметрами, що можуть зазнавати випадкових коливань. Він ґрунтується на побудові характеристичного полінома системи та оцінюванні її стійкості за коефіцієнтами цього полінома.

Спершу необхідно визначити характеристичне рівняння розімкненої системи:

$$10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1$$

Після цього будується матриця Гурвіца, на основі якої обчислюються визначники головних мінорів. Всі коефіцієнти характеристичного рівняння

використовуються для заповнення елементів цієї матриці згідно з класичним алгоритмом методу.

Для побудови матриць та обчислення визначників було використано програмне забезпечення “Matlab”, що дозволило автоматизувати процес перевірки стійкості системи. Результати наведені на рисунках 3.7, 3.8, 3.9.

```
>> MR3=[14.9 1 0; 10.4 6.9 0; 0 14.9 1]

MR3 =

    14.9000    1.0000         0
    10.4000    6.9000         0
         0    14.9000    1.0000

>> det(MR3)

ans =

    92.4100
```

Рис. 3.7 – Матриця 3x3 та визначники

```
>> MR2=[14.9 1; 10.4 6.9]

MR2 =

    14.9000    1.0000
    10.4000    6.9000

>> det(MR2)

ans =

    92.4100
```

Рис. 3.8 – Матриця 2x2 та її визначники

```

>> MR1=[14.9]

MR1 =

    14.9000

>> det(MR1)

ans =

    14.9000

```

Рис. 3.9 – Матриця 1x1 та її визначник

Виходячи з отриманих даних, робимо висновок, що система стійка, оскільки всі визначники матриць Гурвіца є додатними.

Тепер скористаємося критерієм Михайлова. Критерій Михайлова, також відомий як критерій відсутності коренів у правій (або, точніше, перевірка розташування коренів у лівій) половині комплексної площини, є методом аналізу стійкості лінійних систем з параметрами, що піддаються випадковим коливанням. Він базується на перевірці умов, за яких усі корені характеристичного полінома системи розташовані в лівій півплощині комплексної площини.

Спочатку необхідно визначити характеристичний поліном розімкненої системи [7]:

$$F(s) = 10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1$$

Далі замінити s на $j\omega$:

$$F(j\omega) = -10.4j\omega^3 - 14.9\omega^2 + 6.9j\omega + 1$$

Тепер можна визначити частотний характеристичний поліном:

$$F(j\omega) = j(6.9\omega + 10.4\omega^3) - 14.9\omega^2 + 1$$

$$Re(\omega) = 1 - 14.9\omega^2$$

$$Im(\omega) = 6.9\omega - 10.4\omega^3$$

Далі, на основі отриманих даних, необхідно побудувати годограф Михайлова. Для побудови цього годографа було використано програмне

забезпечення “Matlab”, що дало змогу візуалізувати частотну характеристику системи та перевірити її стійкість згідно з критерієм Михайлова.

Результати побудови годографа наведено на рисунку 3.10.

```
>> W=0:0.01:1;
>> D=1-14.9*W.^2+j*(6.9*W-10.4*W.^3);
>> plot(real(D),imag(D))
>> grid on
```

Рис. 3.10 – Скрипт побудови годографа Михайлова

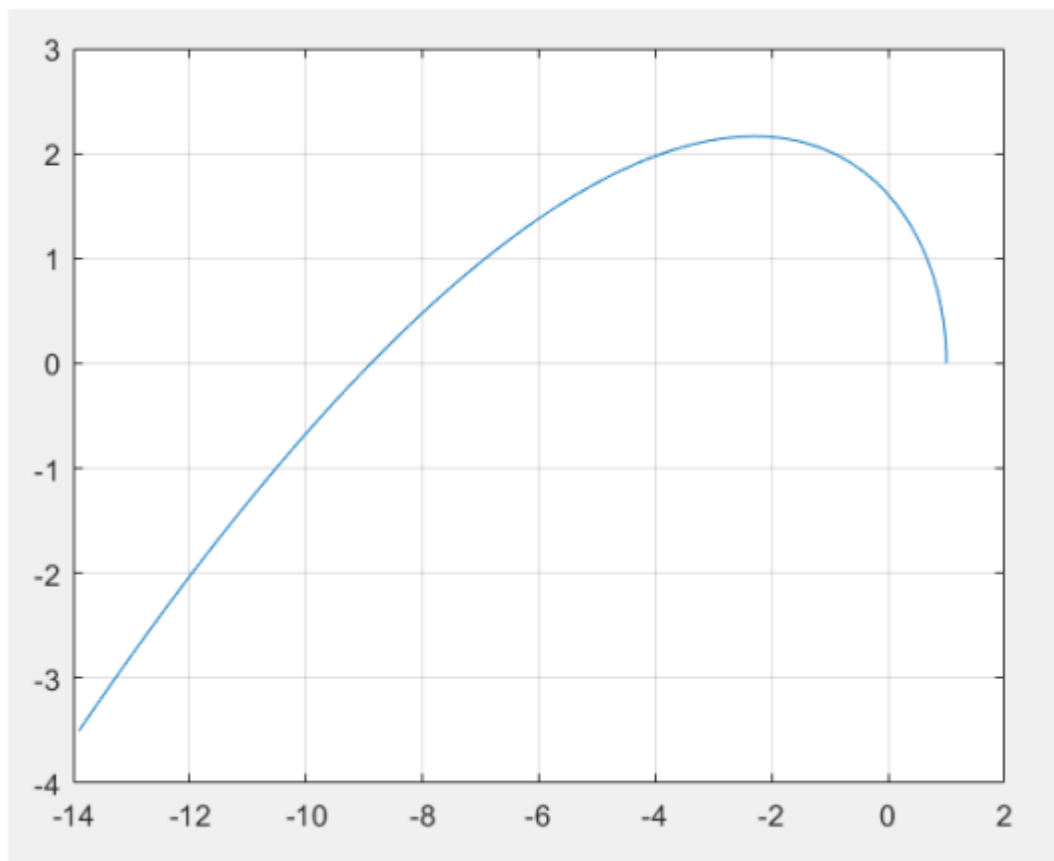


Рис. 3.11 – Графік годографа Михайлова (розімкнута система)

На графіку годографа Михайлова слід відзначити, що крива починається не з нульової точки при частоті $\omega \in [0, \infty)$ та охоплює три квадранти комплексної площини.

З цього випливає висновок, що система є стійкою, оскільки кількість пройдених квадрантів дорівнює порядку (ступеню) системи, тобто числу коренів характеристичного рівняння.

3.1.3. Дослідження стійкості за критерієм Найквіста

Критерій Найквіста — це метод аналізу стійкості лінійних систем автоматичного керування, який базується на побудові частотної (комплексної) характеристики відкритої системи на комплексній площині. Цей метод дозволяє визначити стійкість замкненої системи, виходячи з кількості обходів годографом Найквіста точки $(-1, 0)$ на комплексній площині.

Для дослідження стійкості замкненої системи за критерієм Найквіста спочатку необхідно проаналізувати відкриту систему будь-яким іншим методом, аби переконатися у правильності її математичної моделі.

Характеристичне рівняння розімкненої системи має вигляд:

$$G(s) = \frac{3.33s}{2.14s^3 + 24.72s^2 + 80.89s + 1} \quad (3.1)$$

На основі цієї передавальної функції було проведено дослідження стійкості системи за допомогою теореми Ляпунова, результати якого подано на рисунку 3.12.

```

>> Rz=tf([3.33],[10.4 14.9 6.9 1])

Rz =

          3.33
-----
10.4 s^3 + 14.9 s^2 + 6.9 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> pole(Rz)

ans =

-0.5722 + 0.0783i
-0.5722 - 0.0783i
-0.2883 + 0.0000i

```

Рис. 3.12 –Полюси розімкнутої системи

Всі полюси розімкненої системи розташовані в лівій півплощині комплексної площини: їхні дійсні частини від’ємні. Серед полюсів присутні як дійсні, так і комплексно-спряжені корені; нульових полюсів у системі не виявлено. Із цього випливає висновок, що замкнена система є стійкою. Наявна коливально згасна перехідна характеристика, що ілюструється на рисунку 3.4.

Далі побудовано графіки амплітудно-фазо-частотної характеристики (АФЧХ) розімкненої системи. Для цього використано програмне забезпечення Matlab; результати наведено на рисунку 3.13.

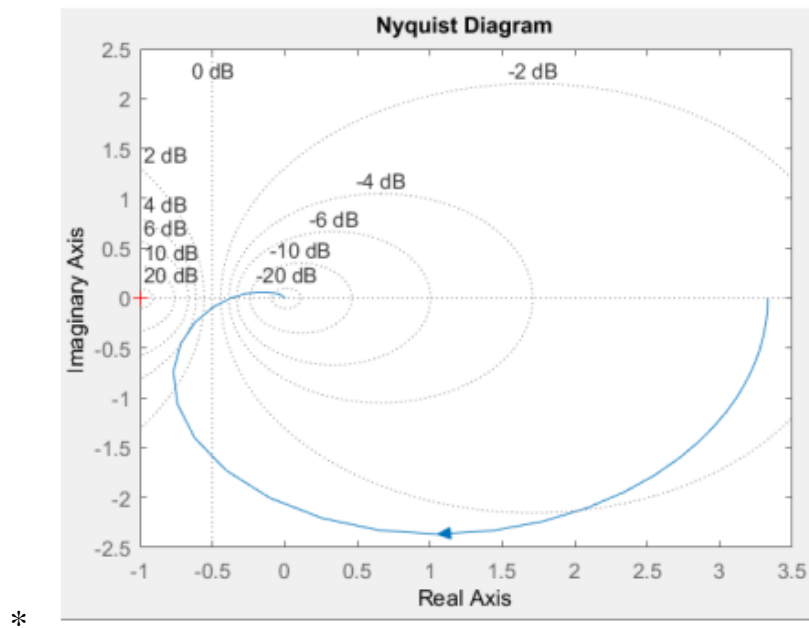


Рис. 3.14 – Частотна характеристика

Графік системи РСАР (АФЧХ) не перетинає точку $(-1; j0)$. Таким чином, замкнута САР, відповідно критерія Найквіста, є стійкою.

3.1.4. Коефіцієнт підсилення за критерієм Гурвіца

Критерій Гурвіца безпосередньо не визначає коефіцієнт підсилення системи, адже його основна мета — оцінити стійкість системи на основі аналізу характеристичного полінома. Проте за допомогою критерію Гурвіца можна з'ясувати, як зміна коефіцієнта підсилення впливає на стійкість системи.

Спочатку необхідно задати розімкнену систему регулювання з коефіцієнтом:

$$G(s) = k \times \frac{2.3}{1.7s+1} \times \frac{1.44}{3.4s+1} \times \frac{1}{1.8s+1} = \frac{3.33k}{10.4s^3+14.9s^2+6.9s+1} \quad (3.2)$$

Далі потрібно замкнути розімкнену

$$G(s) = \frac{3.33k}{10.4s^3+14.9s^2+6.9s+1+3.33k} \quad (3.3)$$

Отже, рівняння замкненої системи матиме вигляд:

$$10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1 + 3.33k = 0$$

Після цього складаємо матрицю Гурвіца, щоб обчислити визначники (як показано на рисунку 3.14):

```
>> syms k
>> M33=[14.9 1+3.33*k 0; 10.4 6.9 0; 0 14.9 1+3.33*k]

M33 =

[ 149/10, (333*k)/100 + 1,      0]
[  52/5,      69/10,      0]
[      0,      149/10, (333*k)/100 + 1]

>> det(M33)

ans =

(2730933*k)/10000 - (1441557*k^2)/12500 + 9241/100
```

Рис. 3.14 – Побудова матриці та знаходження визначника

Далі застосовуємо критерій Гурвіца й розв'язуємо рівняння (як показано на рисунку 3.16):

$$\frac{2730933*k}{10000} - \frac{1441447*k^2}{12400} + \frac{9241}{100} > 0 \quad (3.4)$$

```
ans =

(2730933*k)/10000 - (1441557*k^2)/12500 + 9241/100

>> solve(ans)

ans =

-100/333
46205/17316

>> a=-100/333

a =

-0.3003

>> b=46205/17316

b =

2.6683
```

Рис. 3.16 – Розв'язання рівняння

Числові значення граничних коефіцієнтів становлять 2.6683 і -0.3003. Отже, система буде стійкою в межах інтервалу (-0.3003; 2.6683).

При коефіцієнті -0.3003 система перебуватиме на нейтральній межі стійкості, а при коефіцієнті 2.6683 — на коливальній межі стійкості.

3.2. Прямі оцінки якості замкненої системи

Такі оцінки дають можливість інженерам і проєктувальникам аналізувати та вдосконалювати систему автоматичного керування, щоб забезпечити відповідність вимогам проєкту, досягти необхідної продуктивності та якості регулювання [5]. На основі отриманих результатів вони можуть коригувати параметри, оптимізувати алгоритми керування та гарантувати стабільну й ефективну роботу системи за різних умов, як показано на рисунку 3.17:

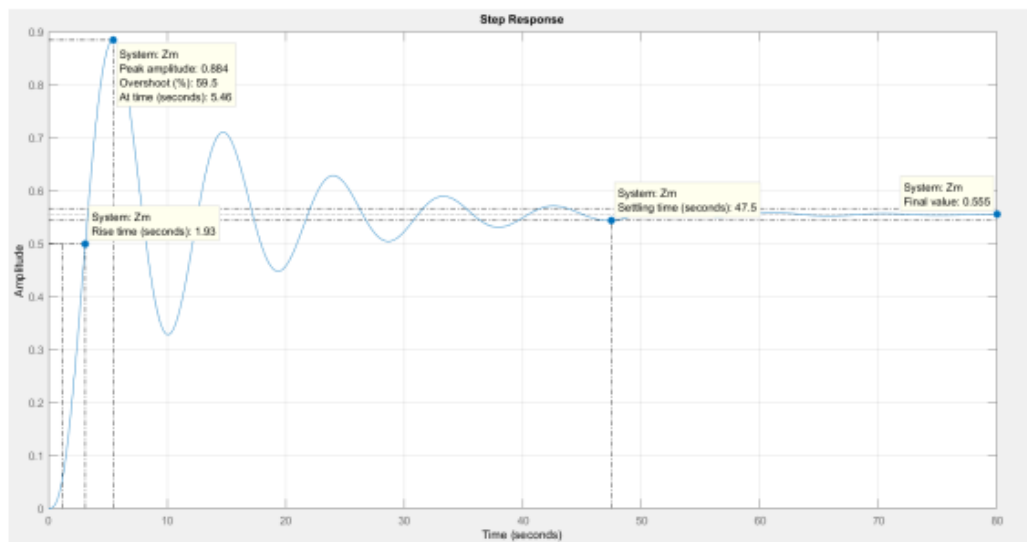


Рис. 3.17 – Перехідна характеристика ЗСАР

- Час регулювання: 47,4 с
- Усталене значення: 0,444
- Границі (відносно 2% від y_{ss}): 0,011128
- Перерегулювання $= \frac{Y_{\max} - Y_{ss}}{Y_{ss}} \times 100 = \frac{0.884 - 0.444}{0.444} \times 100 = 49.4\%$
- Кількість коливань: 4
- Коливальність $= \frac{\Delta Y_{\max 2}}{\Delta Y_{\max 1}} \times 100\% = \frac{0.71}{0.884} \times 100 = 80.31\%$
- Час першого максимуму: 4,46 с

- Проміжок наростання: 1,93 с
- Декремент затухання: $= \frac{|Y_{\max 1} - Y_{ss}|}{|Y_{\max 2} - Y_{ss}|} = \frac{|0.884 - 0.444|}{|0.71 - 0.444|} = 2.12$
- Період коливань: 9,3 с
- Частота коливань $= \frac{2\pi}{T_{osc}} = 0.674$ Гц

3.3. Налаштування регулятора за другим методом Циглера–Ніколса

Метод Циглера–Ніколса є класичним підходом до налаштування ПД-регуляторів у системах автоматичного керування. Його суть полягає у визначенні коефіцієнтів пропорційної (P), інтегральної (I) та диференціальної (D) складових регулятора на основі параметрів часової реакції системи.

Виходячи з попередніх результатів прямих оцінок якості, систему необхідно відрегулювати. Зокрема:

- зменшити перерегулювання,
- знизити коливальність,
- підвищити точність системи,
- а за можливості — скоротити час регулювання.

Висновки до розділу 3

Виконаний комплексний аналіз стійкості дав можливість всебічно оцінити роботу системи автоматичного регулювання трубчастої печі. Усі три використані підходи — метод Ляпунова, алгебраїчні критерії Гурвіца і Михайлова, а також частотний критерій Найквіста — підтвердили, що система є стійкою в рамках визначених параметрів та має достатні запаси для надійного функціонування. Знайдено прямі оцінки якості замкненої системи. Отримані результати створюють підґрунтя для подальшого вдосконалення системи, зокрема з урахуванням сучасних методів інтелектуального та адаптивного керування.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ПЕЧЕЙ

Синтез системи автоматичного регулювання трубчастих печей є складним і багатозадачним процесом, що потребує інтеграції численних технічних та інженерних компонентів. Проте результатом такого процесу є значне підвищення ефективності роботи печей. Ефективна система автоматичного регулювання дає змогу оптимізувати процеси нагрівання, підтримувати стабільні температурні режими, зменшувати енерговитрати та підвищувати якість продукції. У підсумку це сприяє зниженню експлуатаційних витрат і зростанню загальної продуктивності системи.

4.1. Впровадження в систему ПІ-регулятора

Саме тому доцільно впровадити ПІ-регулятор. Він потрібен для усунення недоліків системи, а саме — для підвищення швидкодії та точності роботи. Параметр P у цій системі відповідає за швидкість регулювання, тоді як параметр I (інтеграл сигналу розузгодження) забезпечує досягнення більшої точності [8].

Під час експерименту застосовується ідеальна форма регулятора, що описується рівнянням:

$$C(s) = P \left(1 + \frac{I}{s} \right). \quad (4.1)$$

Регулятор у даній системі вмикається послідовним способом, як показано на рисунку 4.1:

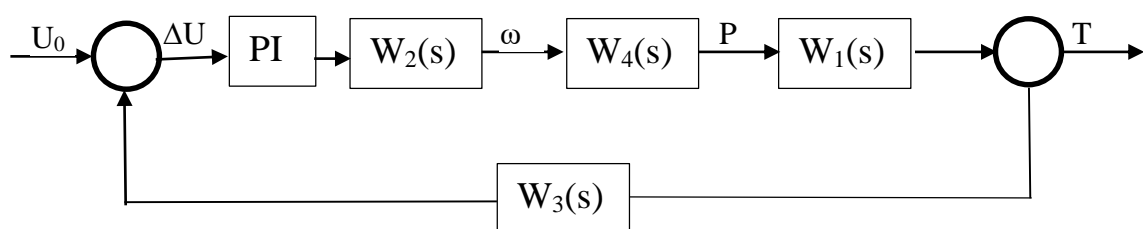


Рис. 4.1 – Схема послідовного підключення ПІ-регулятора до системи

Для того, щоб розпочати налаштування регулятора за методом Циглера–Ніколса, першим кроком необхідно визначити розімкнену передавальну функцію системи:

$$G(s) = \frac{3.33}{10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1} \quad (4.2)$$

Тепер можна увімкнути (P)-регулятор у систему з параметром K_{cr} :

$$C(s) = K_{cr}$$

Отримаємо замкнену систему:

$$G(s) = \frac{3.33K_{cr}}{10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1 + 3.33K_{cr}} \quad (4.3)$$

Далі потрібно знайти K_{cr} , що відповідав би граничній стійкості за критерієм Гурвіца, тобто розв'язати характеристичне рівняння:

$$10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1 + 3.33K_{cr} = 0 \quad (4.5)$$

Для обчислень також використовувалися засоби «Matlab» (рис. 4.2).

```
>> syms k
>> M33=[14.9 1+3.33*k 0; 10.4 6.9 0; 0 14.9 1+3.33*k]

M33 =

[ 149/10, (333*k)/100 + 1,          0]
[   52/5,           69/10,          0]
[         0,       149/10, (333*k)/100 + 1]

>> det(M33)

ans =

(2730933*k)/10000 - (1441557*k^2)/12500 + 9241/100
```

Рис. 4.2 – Знаходження коефіцієнта

Застосувавши критерій Гурвіца та розв'язавши відповідне нерівність (див. Рис. 4.3):

$$\frac{2730933 * k}{10000} - \frac{1441447 * k^2}{12400} + \frac{9241}{100} > 0$$

```
ans =
(2730933*k)/10000 - (1441557*k^2)/12500 + 9241/100
>> solve(ans)
ans =
-100/333
46205/17316
>> a=-100/333
a =
-0.3003
>> b=46205/17316
b =
2.6683
```

Рис. 4.3 – Розв'язок рівняння

Отримано граничні значення коефіцієнта: 2.6683 та -0.3003 . Отже, система стійка для інтервалу $(-0.3003; 2.6683)$. При $k = -0.3003$ система перебуває на нейтральній межі стійкості, а при $k = 2.6683$ — на коливальній межі стійкості.

Підставивши значення коефіцієнта, отримуємо:

$$G(s) = \frac{8.884}{10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 9.884} \quad (4.6)$$

Щоб одержати коливальний процес, скористалися програмою «Matlab» (рис. 4.4 і 4.4):

```

>> Gk=tf([8.885],[10.4 14.9 6.9 9.885])

Gk =

          8.885
-----
10.4 s^3 + 14.9 s^2 + 6.9 s + 9.885

Continuous-time transfer function.

>> step(Gk)

```

Рис. 4.4 — Скрипт для побудови коливального процесу

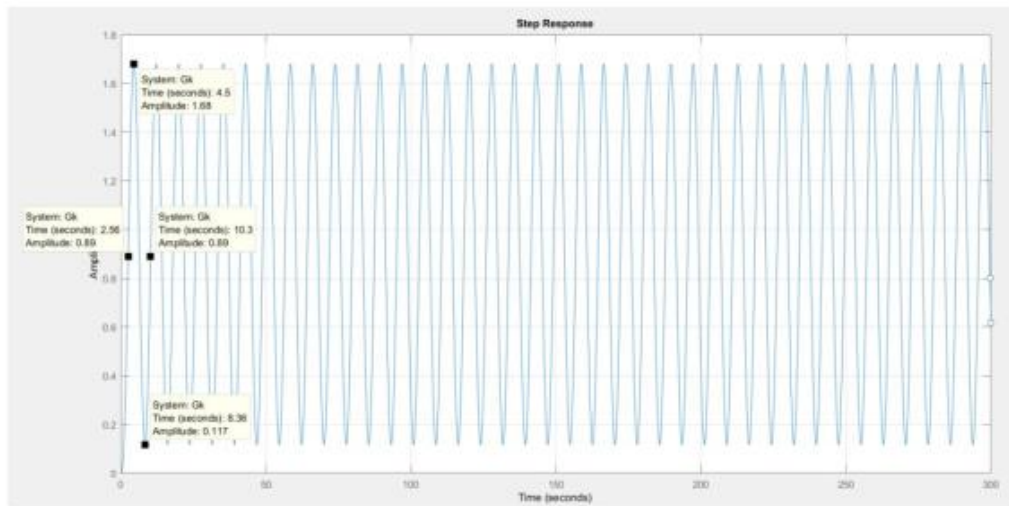


Рис. 4.4 — Графік коливального процесу

$$P_{cr} = 10.3 - 2.46 = 7.74$$

Далі слід розрахувати параметри для типових регуляторів за наведеною таблицею.

Таблиця 4.1

Налаштування регуляторів

	P	1/I	D
P	$0.4 * K_{cr}$	-	-
PI	$0.44 * K_{cr}$	$P_{cr}/1.2$	-
PID	$0.6 * K_{cr}$	$P_{cr}/2$	$P_{cr}/8$

$$P = 0.44 * (2.6683) = 1.2$$

$$1/I = 7.74/1.2 = 6.44 ; I = 1/6.44 = 0.144$$

Далі отримуємо наступні результати:

$$G(s) = \frac{0.66 * P(1 + I * \frac{1}{s})}{2.08s^3 + 2.9s^2 + 1.38s + 1.19 + 0.66 * P(1 + I * \frac{1}{s})}$$

$$G(s) = \frac{0.66 * 1.2(1 + 0.144 * \frac{1}{s})}{2.08s^3 + 2.9s^2 + 1.38s + 1.19 + 0.66 * P(1 + 0.144 * \frac{1}{s})}$$

$$G(s) = \frac{0.792 + 0.123 \frac{1}{s}}{2.08s^3 + 2.9s^2 + 1.38s + 1.19 + 0.792 + 0.123 \frac{1}{s}}$$

$$G(s) = \frac{0.792s + 0.123}{2.08s^4 + 2.9s^3 + 1.38s^2 + 1.982s + 0.123}$$

Тепер, щоб визначити, чи справді впровадження ПІ-регулятора покращило роботу системи, необхідно побудувати перехідний процес, як показано на рисунках 4.6 і 4.7:

```
>> Gpi=tf([0.792 0.123],[2.08 2.9 1.38 1.192 0.123])
Gpi =
          0.792 s + 0.123
-----
2.08 s^4 + 2.9 s^3 + 1.38 s^2 + 1.192 s + 0.123
Continuous-time transfer function.
>> step(Gpi)
```

Рис. 4.6 – Побудова перехідного процесу

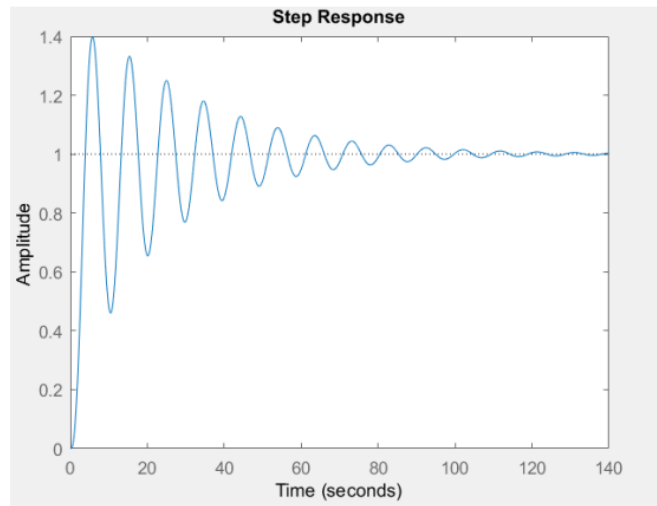


Рис. 4.7 – Перехідна характеристика

Відомо, що в програмі Matlab перехідний процес можна побудувати не лише за допомогою команд у консолі, але й виконати моделювання в середовищі Simulink. Це дає змогу наочно перевірити правильність проведених розрахунків. Отриманий графік може мати незначні відмінності через особливості моделювання [14].

Далі на рисунках 4.8 і 4.9 наведено процес побудови перехідного процесу в Simulink:

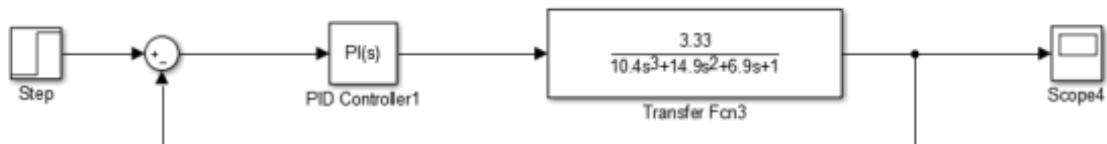


Рис. 4.8 – Модель у Simulink

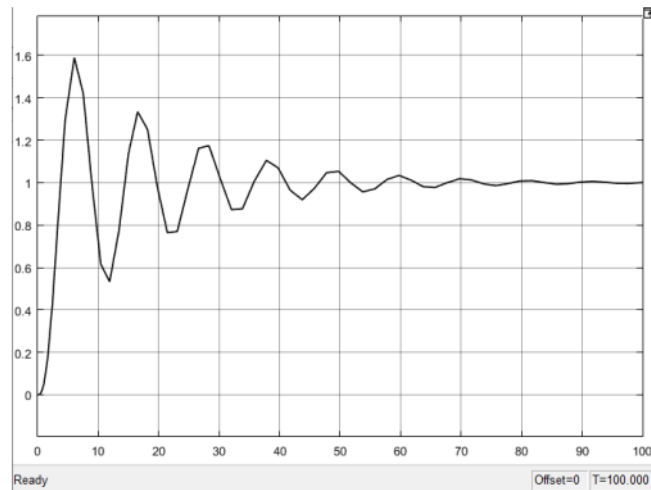


Рис. 4.9 – Перехідний процес САР із ПІ-регулятором

4.2. Впровадження ПІД-регулятора в систему

Попередній регулятор продемонстрував результати, які не повністю задовольнили поставлені вимоги, тому було прийнято рішення впровадити в систему ПІД-регулятор.

У ПІД-регуляторі додається складова D — диференціал сигналу розузгодження, що зазвичай застосовується для підвищення ступеня затухання. Водночас диференціальна складова може підсилювати шум, що іноді призводить до нестабільності системи [10].

Регулятор підключається послідовно, як показано на рисунку 4.10:

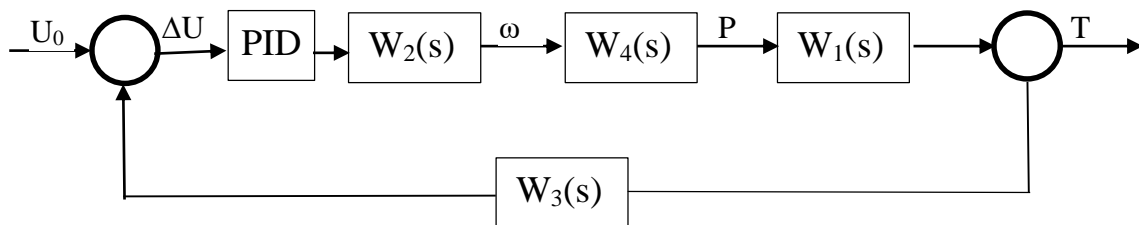


Рис. 4.10 – Послідовне підключення регулятора

У даному експерименті використовується ідеальна форма регулятора, яка описується рівнянням:

$$C(s) = P \left(1 + I \frac{1}{s} + Ds \right)$$

Оскільки значення K_{cr} і P_{cr} були визначені в попередньому підрозділі, підставимо їх у таблицю 2 та розрахуємо параметри регулятора:

$$P = 0.6 * (2.6683) = 1.601$$

$$1/I = 7.74/2 = 3.87; I = 1/3.87 = 0.248$$

$$D = 7.74/8 = 0.967$$

Підставивши отримані значення, одержуємо кінцеві результати налаштування регулятора.

$$G(s) = \frac{0.66 * P(1 + I * \frac{1}{s} + Ds)}{2.08s^3 + 2.9s^2 + 1.38s + 1.19 + 0.66 * P(1 + I * \frac{1}{s} + Ds)}$$

$$G(s) = \frac{0.66 * 1.601(1 + 0.248 * \frac{1}{s} + 0.967s)}{2.08s^3 + 2.9s^2 + 1.38s + 1.19 + 0.66 * 1.601(1 + 0.248 * \frac{1}{s} + 0.967s)}$$

$$G(s) = \frac{1.046 + 0.273 * \frac{1}{s} + 1.022s}{2.08s^3 + 2.9s^2 + 1.38s + 1.19 + 1.046 + 0.273 * \frac{1}{s} + 1.022s}$$

$$G(s) = \frac{1.022s^2 + 1.046s + 0.273}{2.08s^4 + 2.9s^3 + 1.38s^2 + 1.19s + 1.022s^2 + 1.046s + 0.273}$$

$$G(s) = \frac{1.022s^2 + 1.046s + 0.273}{2.08s^4 + 2.9s^3 + 2.402s^2 + 2.24s + 0.273}$$

Далі отримаємо перехідну характеристику в середовищі Matlab, як показано на рисунках 4.11 і 4.12:

```
>> Gpid=tf([1.022 1.056 0.273],[2.08 2.9 2.402 2.246 0.273])
Gpid =
      1.022 s^2 + 1.056 s + 0.273
-----
      2.08 s^4 + 2.9 s^3 + 2.402 s^2 + 2.246 s + 0.273
Continuous-time transfer function.
>> step(Gpid)
```

Рис. 4.11 – Побудова перехідного процесу

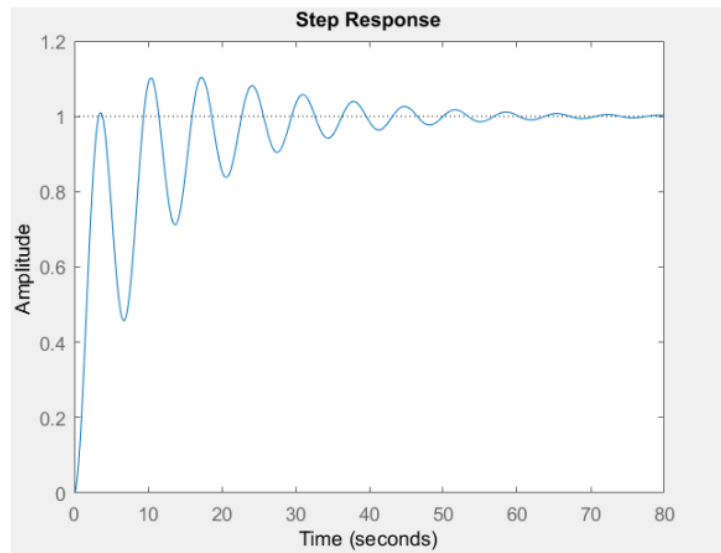


Рис. 4.12 – Перехідна характеристика

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що ПІД-регулятор, налаштований за даним методом, не забезпечив очікуваної якості регулювання. Отже, його параметри потребують подальшого уточнення та корекції.

Цей експеримент було виконано у середовищі Simulink, як показано на рисунках 4.13 і 4.14:

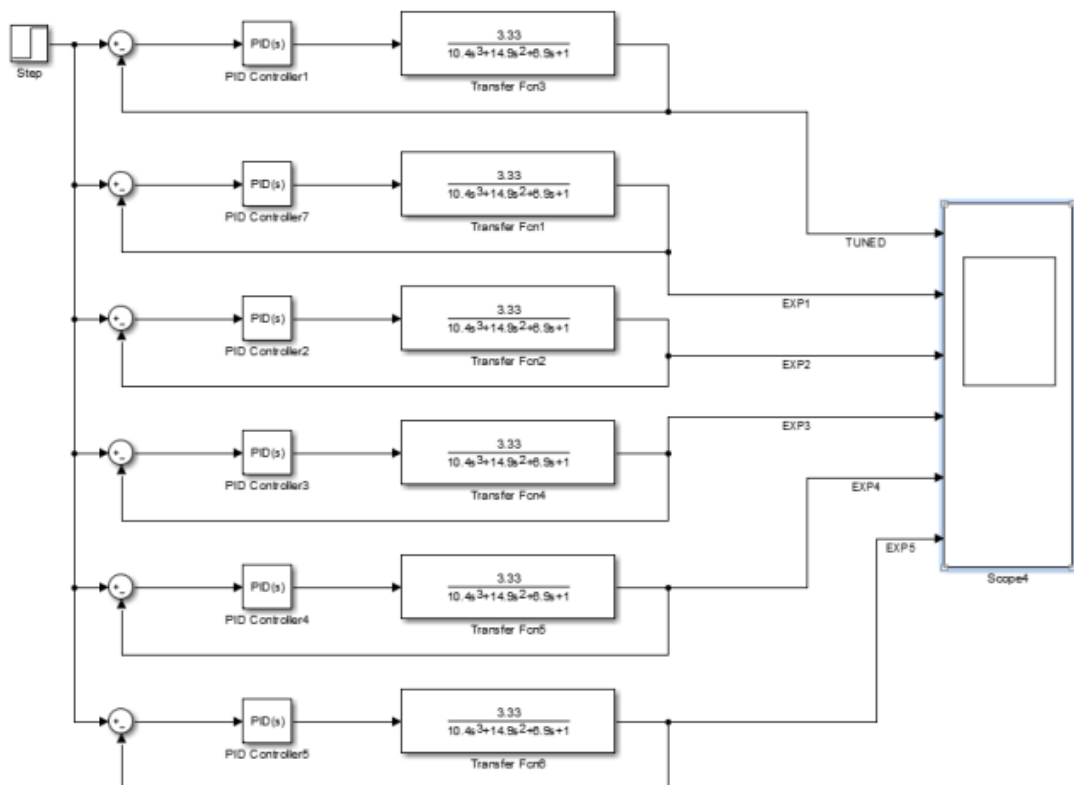


Рис. 4.13 – Експериментальна модель у Simulink

Мета цього експерименту — дослідити роботу системи при різних числових значеннях коефіцієнтів ПД-регулятора. У ході дослідження було проведено п'ять експериментальних варіантів, а також один додатковий експеримент, у якому параметри ПД-регулятора були визначені за допомогою автотюнера (Auto Tune) [17].

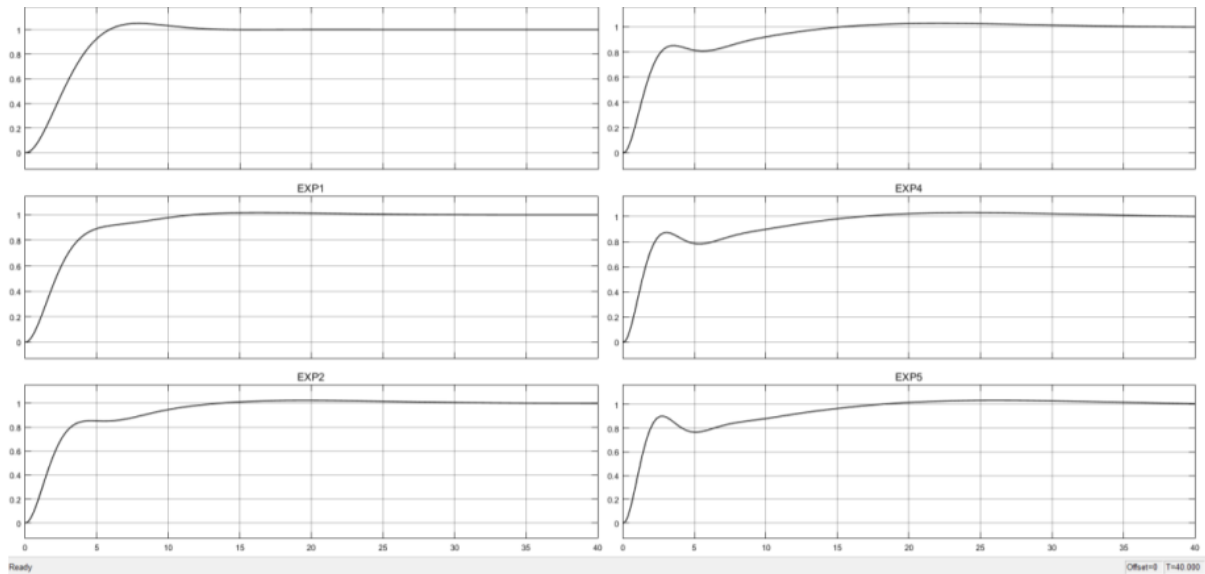


Рис. 4.14 – Перехідні характеристики

Відповідно до результатів дослідження, при різних варіаціях числових значень коефіцієнтів ПД-регулятора найкращим слід вважати результат автотюнінгу (tuned). На цьому графіку перехідного процесу спостерігається найменше перерегулювання, відсутня коливальність, а час регулювання менший порівняно з іншими варіантами. Тепер можна отримати кінцеву передавальну функцію:

$$G(s) = \frac{3.33k_{cr}}{10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1 + 3.33k_{cr}}$$

$$G(s) = \frac{3.33 * P(1 + I * \frac{1}{s} + Ds)}{10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1 + 3.33 * P(1 + I * \frac{1}{s} + Ds)}$$

$$G(s) = \frac{3.33 * 0.649(1 + 0.182 \frac{1}{s} + 1.363s)}{10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1 + 3.33 * 0.649(1 + 0.182 \frac{1}{s} + 1.363s)}$$

$$G(s) = \frac{2.161 + 0.393 \frac{1}{s} + 2.944s}{10.4s^3 + 14.9s^2 + 6.9s + 1 + 2.161 + 0.393 \frac{1}{s} + 2.944s}$$

$$G(s) = \frac{2.944s^2 + 2.161s + 0.393}{10.4s^4 + 14.9s^3 + 6.9s^2 + 1s + 2.944s^2 + 2.161s + 0.393}$$

$$G(s) = \frac{2.944s^2 + 2.161s + 0.393}{10.4s^4 + 14.9s^3 + 9.844s^2 + 3.161s + 0.393}$$

Тепер можна побудувати перехідні характеристики системи з регулятором і без нього для порівняння отриманих результатів. Характеристики будуть побудовані в консолі, як показано на рисунках 4.14 і 4.16 [17]:

```
>> GPID=tf([2.945 2.161 0.393],[10.4 14.9 9.845 3.161 0.393])
GPID =
          2.945 s^2 + 2.161 s + 0.393
-----
10.4 s^4 + 14.9 s^3 + 9.845 s^2 + 3.161 s + 0.393
Continuous-time transfer function.
>> Zm=tf([0.66],[2.08 2.9 1.38 1.19])
Zm =
          0.66
-----
2.08 s^3 + 2.9 s^2 + 1.38 s + 1.19
Continuous-time transfer function.
>> step(GPID, 'b', Zm, 'r')
```

Рис. 4.14 – Побудова перехідних характеристик

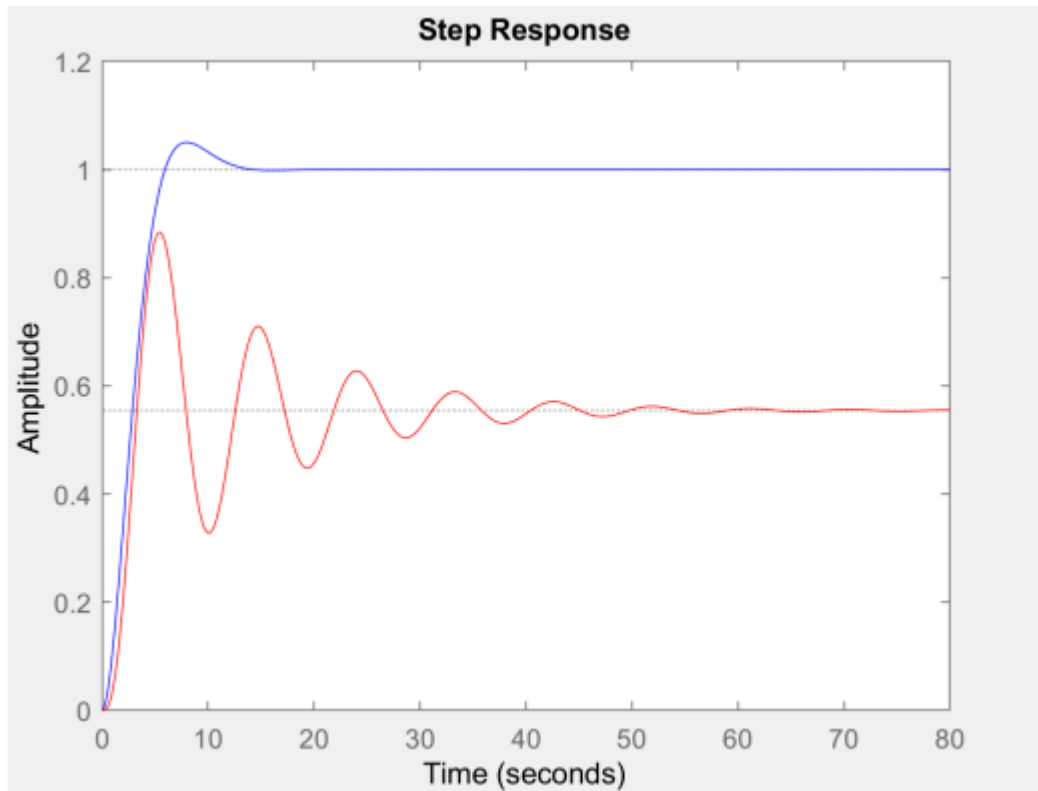


Рис. 4.16 – Перехідні характеристики (червоний — без регулятора, синій — з регулятором)

4.3. Синтез системи оптимального керування на основі алгоритму АКОР (LQR-алгоритм)

LQR (Linear Quadratic Regulator) — це алгоритм оптимального керування для лінійних динамічних систем із квадратичним критерієм якості. Він розроблений на основі теорії оптимального керування та використовує методи лінійної алгебри.

Для початку необхідно представити передатну функцію у вигляді диференціального рівняння:

$$G(s) = \frac{0.66}{2.08s^3 + 2.9s^2 + 1.38s + 1.19}$$

$$2.08 \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + 2.0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 1.38 \frac{dy(t)}{dt} + 1.19 y(t) = 0.66 U(t)$$

Тепер представимо рівняння у матричній формі:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = -1.394x_3 - 0.662x_2 - 0.472x_1 + 0.317U(t) \end{cases} \quad (4.8)$$

Отримаємо модель у просторі станів у формі Фробеніуса:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1.394 & -0.663 & -0.472 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.66 \end{pmatrix} \cdot U(t) \\ y(t) = c^T x(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} \end{cases} =$$

$$= \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1.394 & -0.663 & -0.472 \end{bmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.66 \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.9)$$

Далі виконується аналітичне конструювання оптимального регулятора на основі динамічного програмування Белмана (LQR controller). Першим етапом є задача Лагранжа:

$$I(t) = \int_0^{\infty} (x^T Q x(t) dt + u^T(t) R u(t)) dt$$

Далі у скрипті MATLAB задаються початкові дані та отримується відповідне розв'язання, як показано на рисунку 4.17.

```

>> A=[0 1 0; 0 0 1; -1.394 -0.663 -0.572];
>> B=[0; 0; 0.66];
>> C=[1 0 0];
>> D=0;
>> sys=ss(A,B,C,D);
>> Q=eye(3);
>> R=1;
>> [K,s,e]=lqr(sys,Q,R)

K =

    0.2248    2.5712    2.2224

s =

    6.2344    5.3884    0.3406
    5.3884    9.8347    3.8958
    0.3406    3.8958    3.3673

e =

-1.1523 + 0.0000i
-0.4432 + 1.0686i
-0.4432 - 1.0686i

>> A-B*K

ans =

     0     1.0000     0
     0         0     1.0000
-1.5423 -2.3600 -2.0388

```

Рис. 4.17 – Розв’язання алгоритму АКОР

Після цього систему з регулятором було промодельовано у середовищі Simulink, як показано на рисунках 4.18 і 4.19.

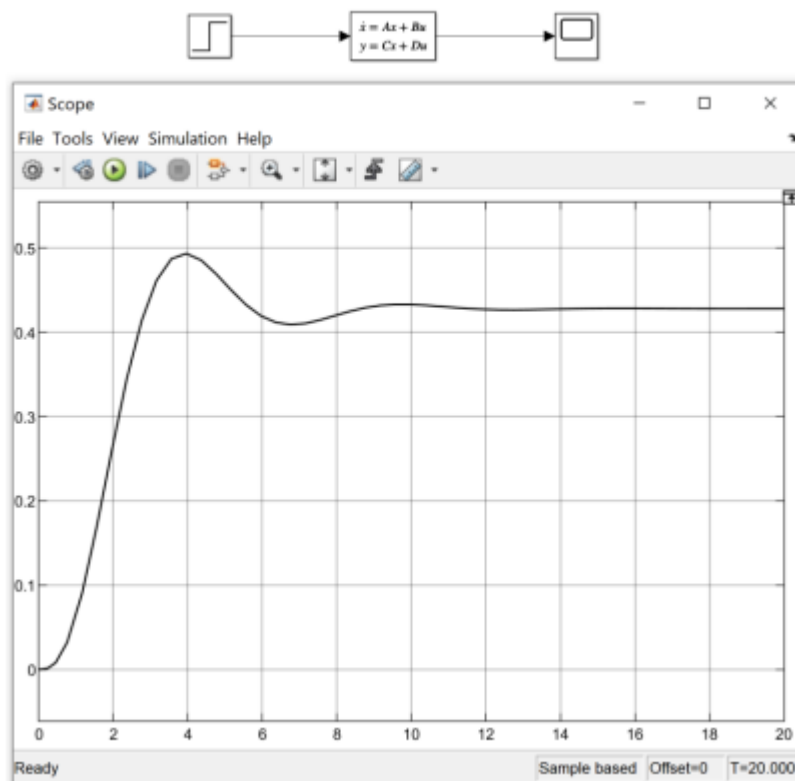


Рис. 4.18 – Модель та результат моделювання

The figure shows the 'Block Parameters: State-Space' dialog box. It contains the following information:

- State Space**
- State-space model:**

$$\dot{x}/dt = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$
- Parameters**
- A:** $[0 \ 1.0000 \ 0; 0 \ 0 \ 1.0000; -1.5423 \ -2.3600 \ -2.0388]$
- B:** $[0; 0; 0.66]$
- C:** $[1 \ 0 \ 0]$
- D:** 0
- Initial conditions:** 0
- Absolute tolerance:** $auto$
- State Name:** (e.g., 'position') $''$

Buttons at the bottom include 'OK', 'Cancel', 'Help', and 'Apply'.

Рис. 4.19 – Параметри блоку

Відповідно до отриманих результатів можна зробити висновок, що система є стійкою. Спостерігається незначне перерегулювання та коливальний характер процесу, однак похибка усунута, а час регулювання залишається невеликим.

Далі можна провести порівняння отриманих результатів, зібравши модель у середовищі Simulink, як показано на рисунках 4.20 і 4.21.

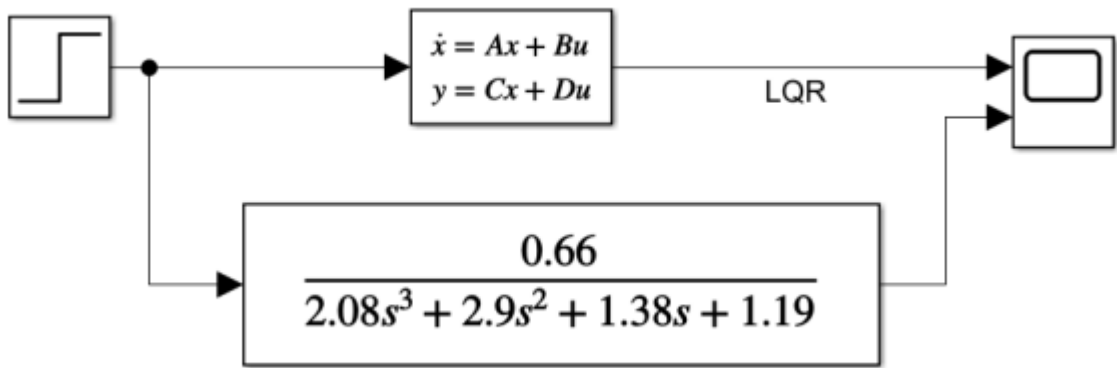


Рис. 4.20 – Модель для порівняння

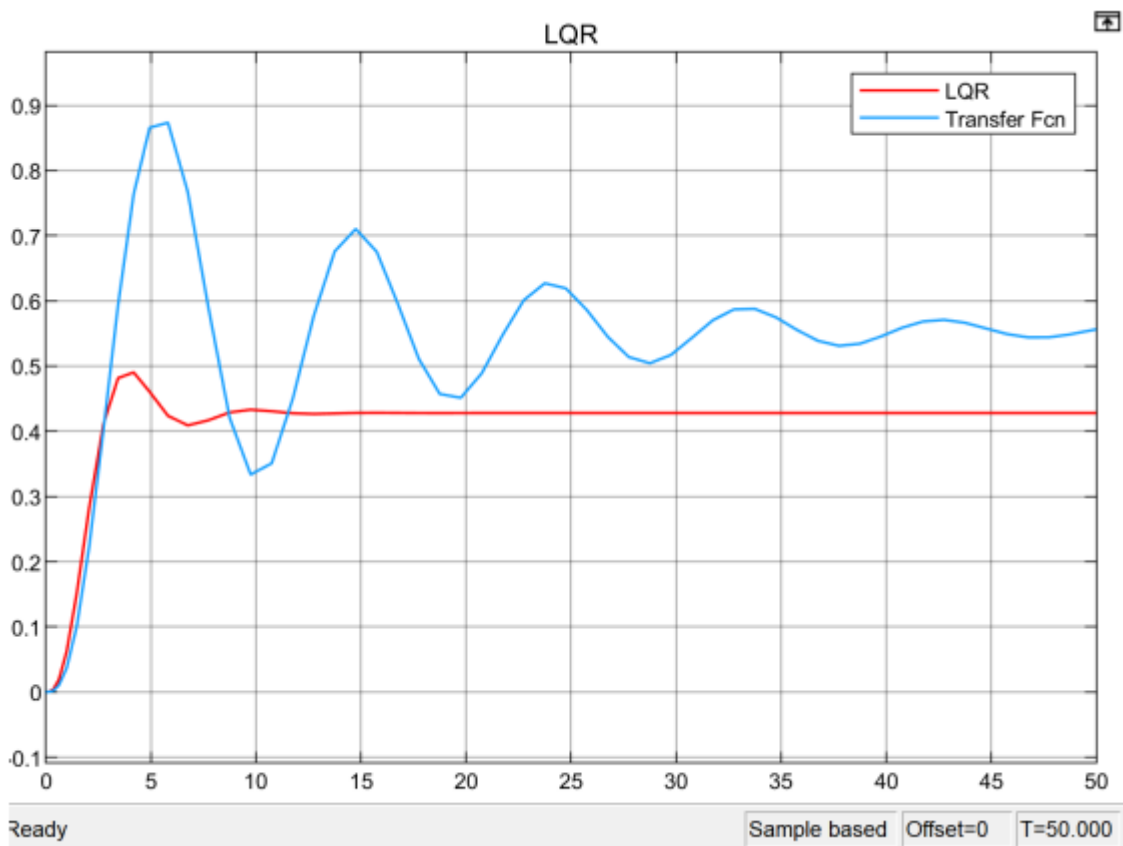


Рис. 4.21 – Модель для порівняння

4.4. Синтез системи обробки рівня (COP) на основі нейронної мережі

Синтез системи обробки рівня (COP) на основі нейронної мережі являє собою методологію, що включає розроблення та інтеграцію нейронних мереж для обробки даних на певному рівні. Нейромережевий підхід до створення COP може застосовуватись у різних сферах, таких як обробка зображень, аудіосигналів, текстової інформації та інших типів даних.

У контексті синтезу COP із використанням нейронних мереж основними етапами є:

1. Вибір рівня обробки. Визначення рівня, на якому необхідно побудувати систему. Це може бути, наприклад, рівень розпізнавання об'єктів на зображеннях, аналізу тональності тексту тощо.

2. Вибір архітектури нейронної мережі. Вибір відповідної архітектури залежно від характеру задачі та типу даних. Наприклад, для обробки зображень застосовується згорткова нейронна мережа (CNN), а для послідовних даних — рекурентна нейронна мережа (RNN).

3. Навчання нейронної мережі. Процес навчання моделі на тренувальному наборі даних із використанням методів оптимізації та функції втрат. Важливо забезпечити адекватне навчання для ефективного виконання завдань на вибраному рівні.

4. Тестування та оптимізація. Оцінювання продуктивності нейромережевої моделі на тестових даних та, за потреби, оптимізація параметрів для досягнення кращих результатів.

4. Інтеграція в систему обробки рівня. Впровадження навченої нейронної моделі в робочу систему, де вона може бути використана для розв'язання конкретних прикладних задач.

6. Моніторинг і підтримка. Створення механізмів моніторингу продуктивності та актуальності моделі в динамічному середовищі. За потреби проводиться регулярне оновлення або перенавчання мережі.

Синтез СОР на основі нейронних мереж дає змогу створювати гнучкі та адаптивні системи обробки даних, здатні ефективно вирішувати широкий спектр завдань на вибраному рівні.

Даний експеримент також було виконано в середовищі MATLAB. На початковому етапі були відібрані дані з наявної системи, як показано на рисунку 4.22.

Далі дані були імпортовані до MATLAB і оброблені, як показано на рисунку 4.23.

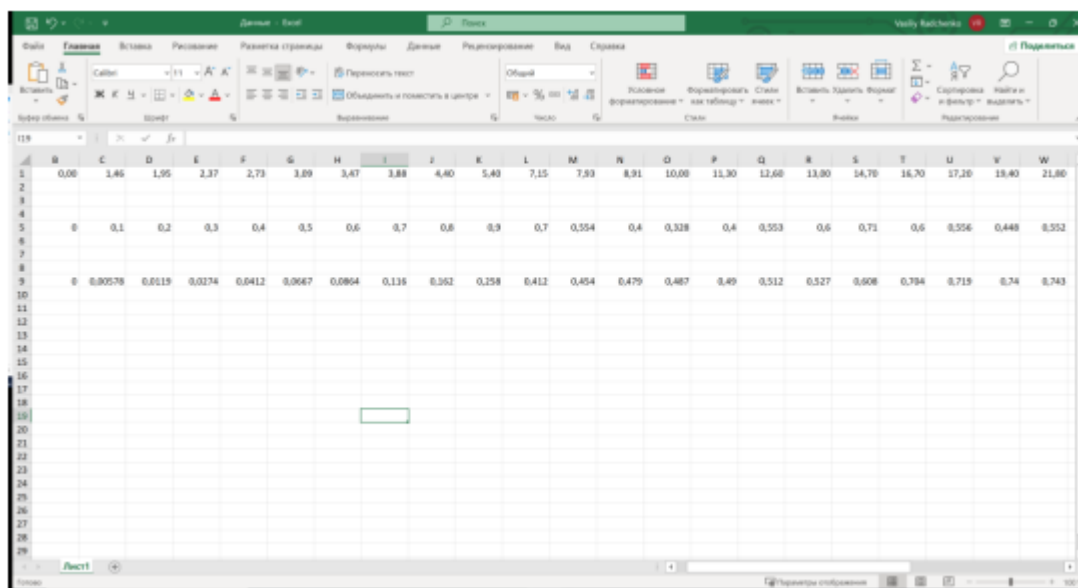


Рис. 4.23 – Обробка даних

Після цього за допомогою команди `nnstart` було відкрито вікно для введення даних та навчання нейронної мережі. У процесі численних експериментів було встановлено, що оптимальна кількість прихованих нейронів становить 4. На рисунках 4.24–4.30 наведено різні графіки, що відображають етапи та результати навчання нейронної мережі.

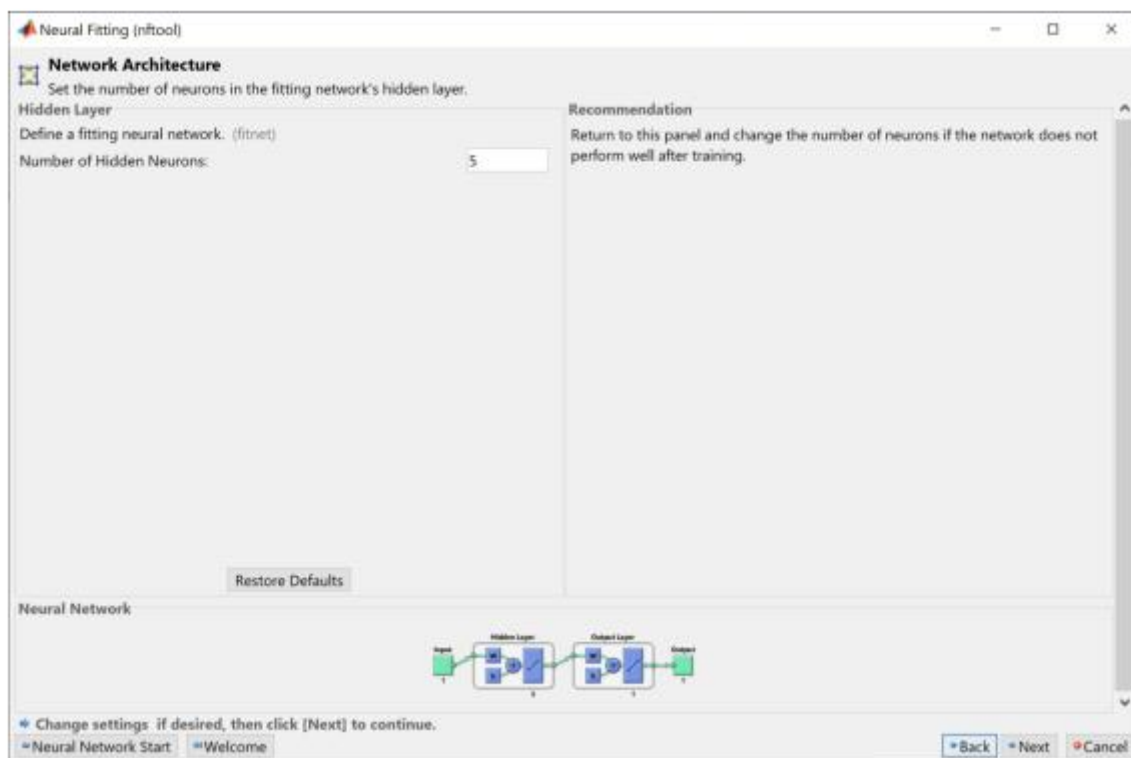


Рис. 4.24 – Налаштування для навчання нейронної мережі

Виходячи з отриманих результатів, було прийнято рішення використати алгоритм Левенберга–Марквардта для навчання нейронної мережі.

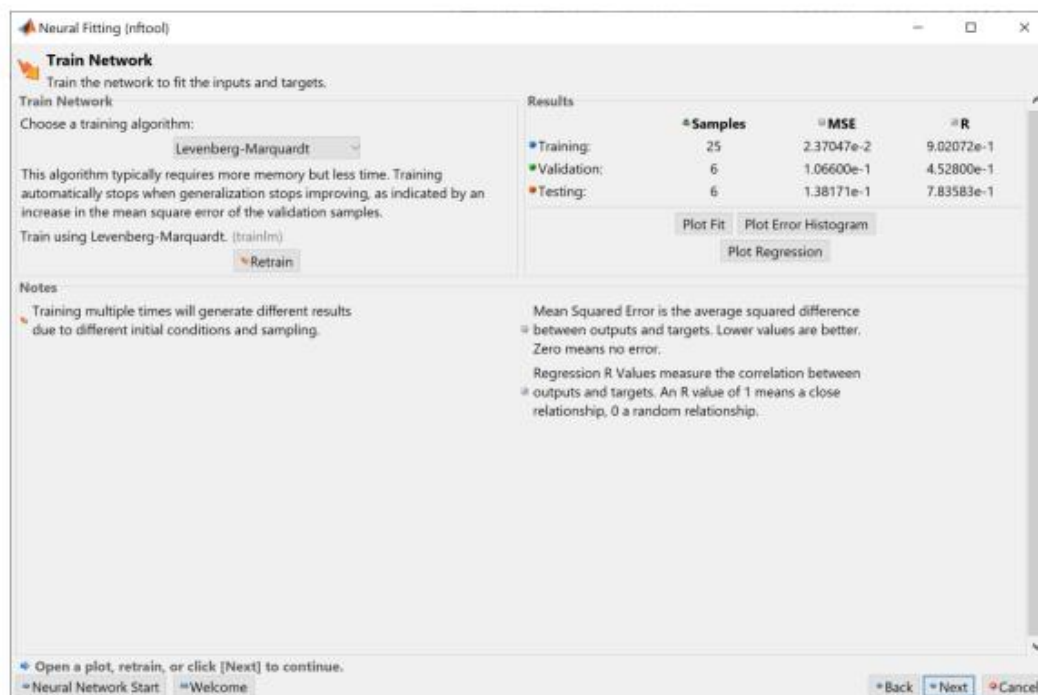


Рис. 4.24 – Налаштування для навчання нейронної мережі (вибір алгоритму)

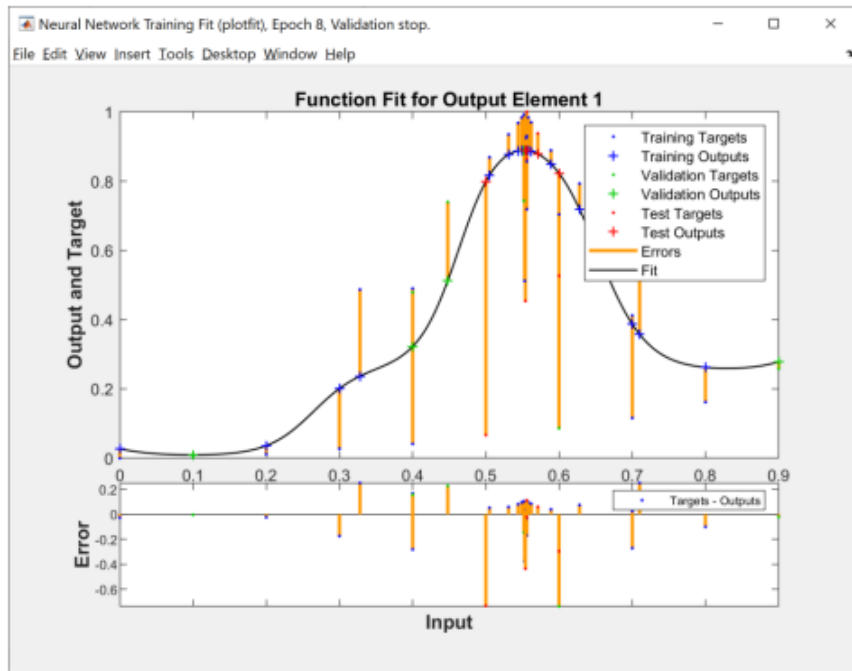


Рис. 4.26 – Графік функції, що відповідає вихідному елементу

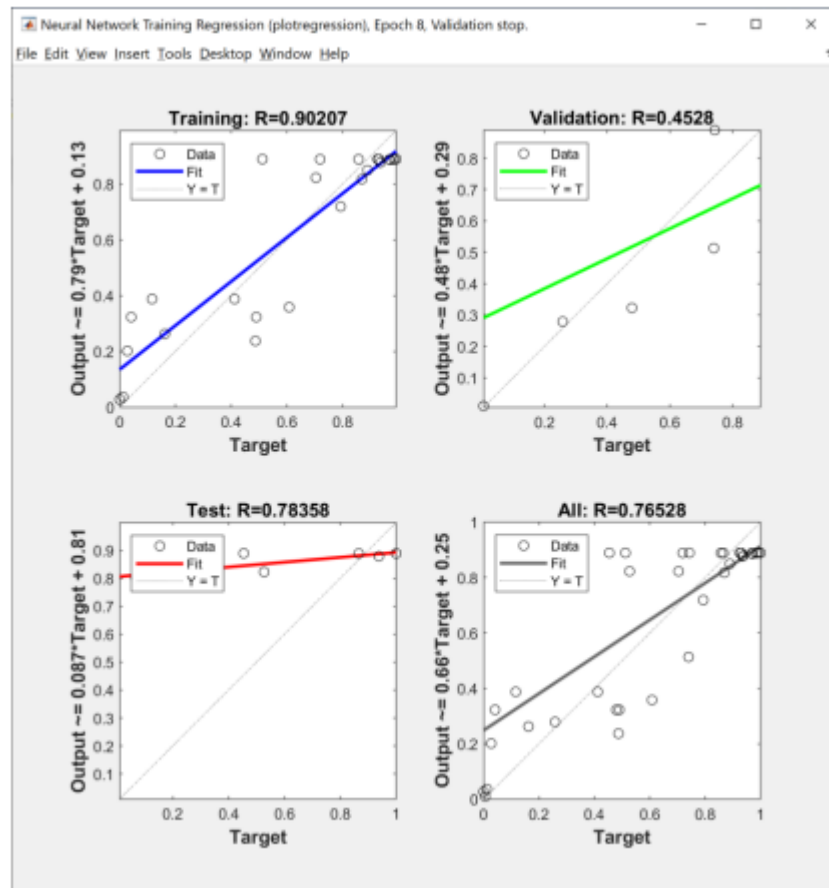


Рис. 4.27 – Графіки тренувальної регресії

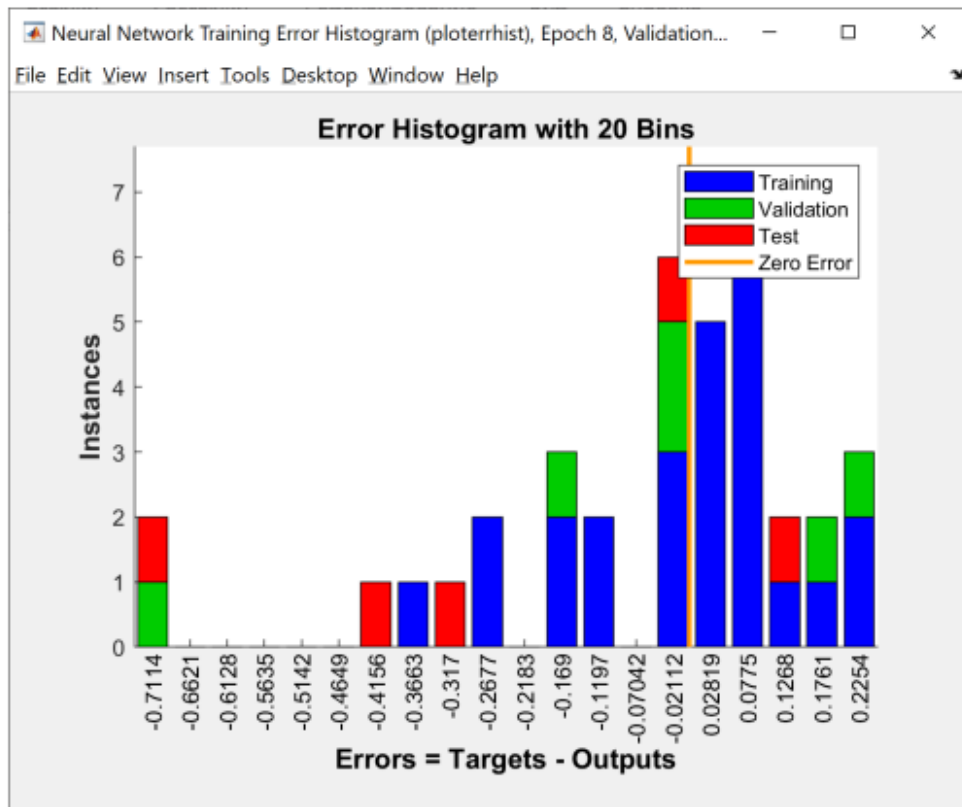


Рис. 4.28 – Діаграма похибок

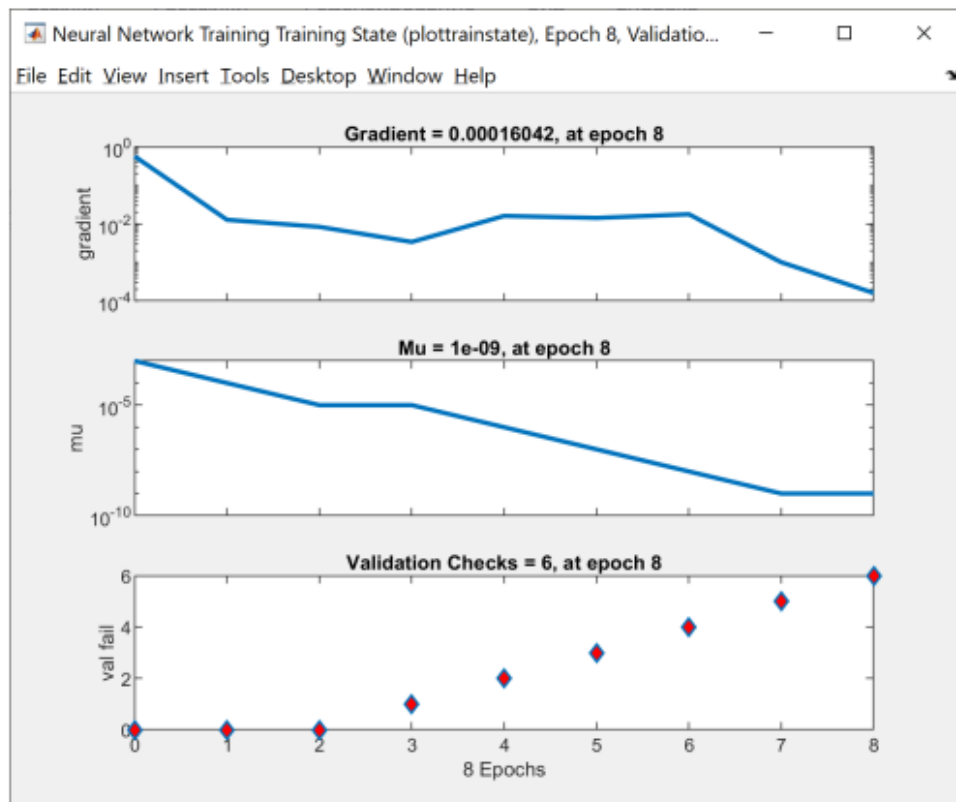


Рис. 4.29 – Графіки стану навчання

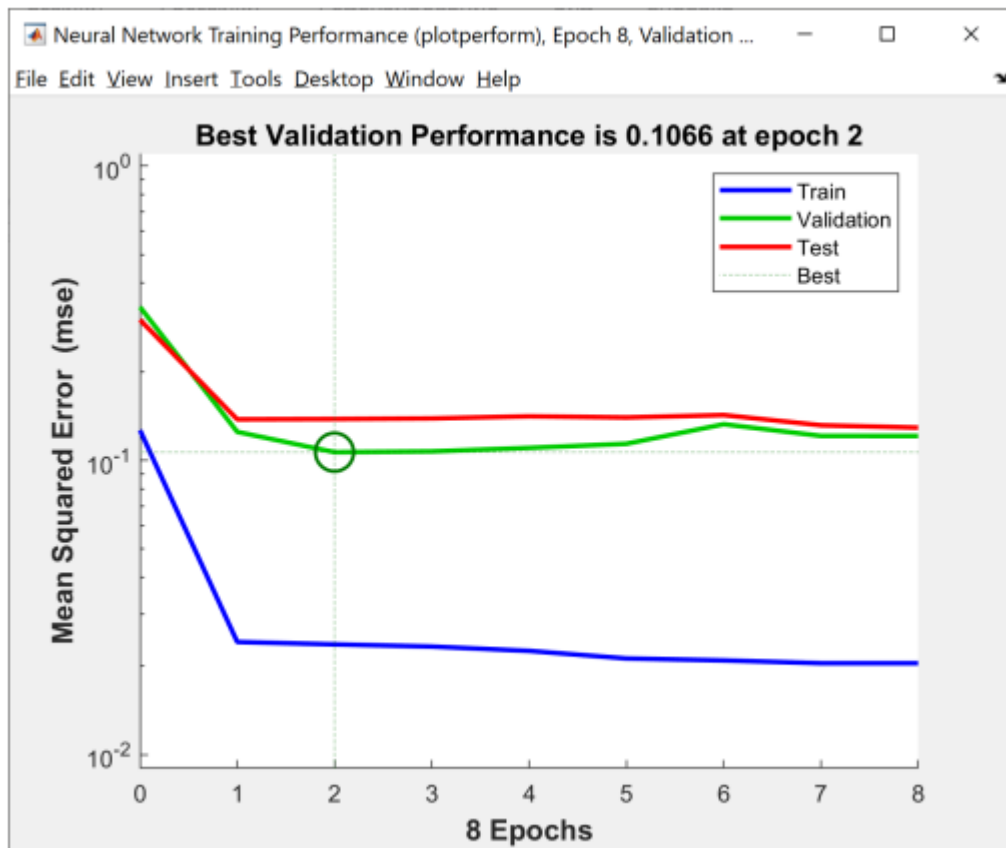


Рис. 4.30 – Найкраща продуктивність під час перевірки

Після завершення навчання нейронної мережі необхідно вивести результати. Це можна реалізувати кількома способами; у даній роботі було обрано виведення результатів за допомогою моделі в Simulink, як показано на рисунках 4.31 та 4.32.

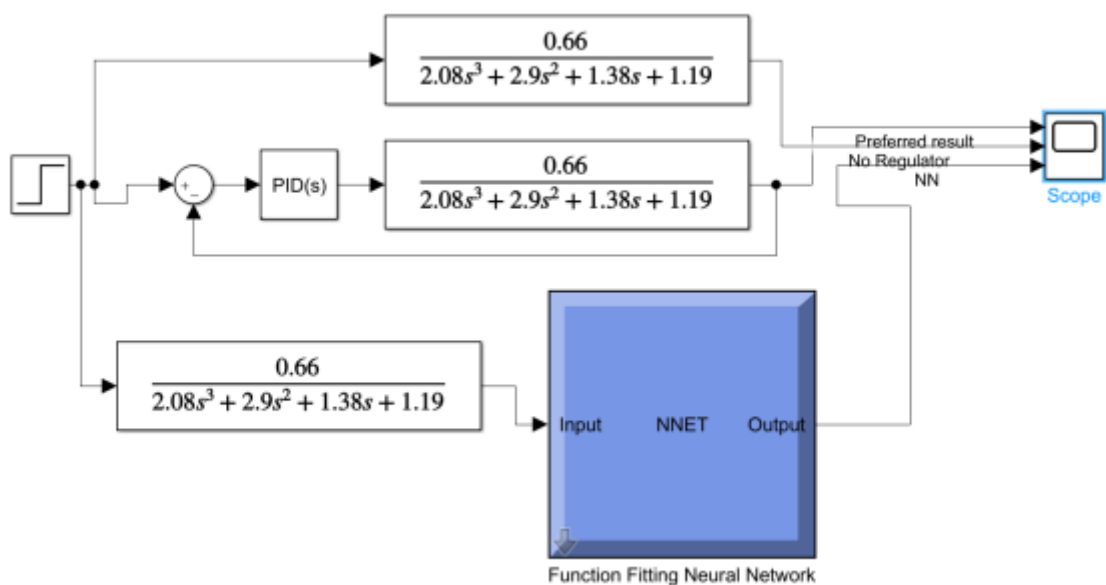


Рис. 4.31 – Модель Simulink

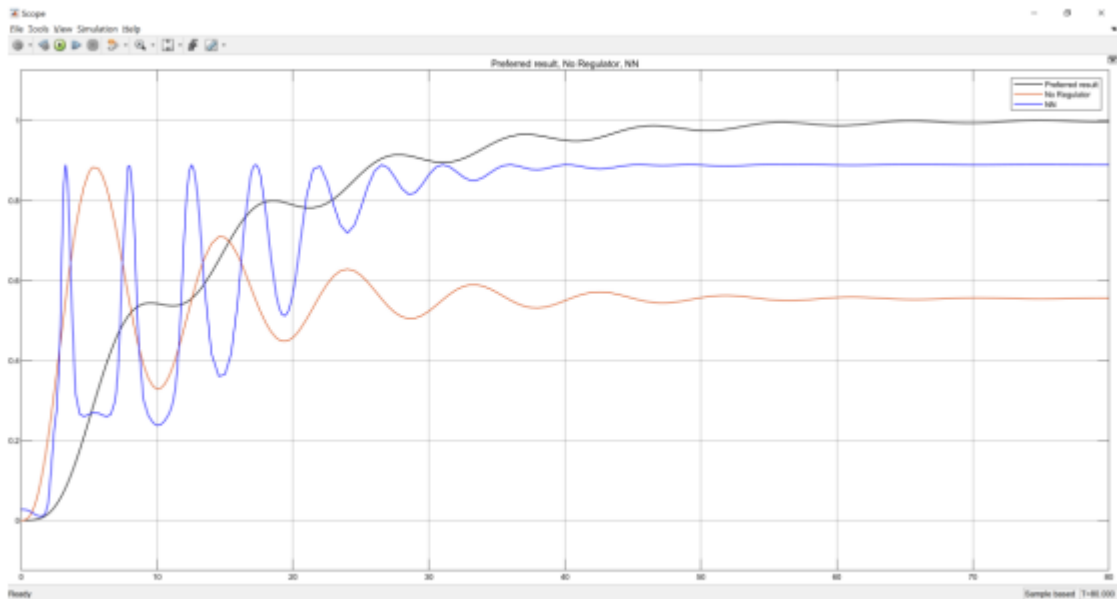


Рис. 4.32 – Результати моделювання

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було здійснено синтез сучасних систем автоматичного регулювання трубчастої печі з використанням класичних, оптимальних та інтелектуальних підходів. Проведені дослідження підтвердили, що вдосконалення алгоритмів керування є ключовим чинником підвищення ефективності, точності й надійності роботи трубчастих печей у промислових умовах.

У процесі синтезу було проаналізовано можливість застосування лінійних регуляторів, таких як ПІ та ПІД, які продемонстрували здатність забезпечувати стабільність системи та зменшувати статичну похибку, одночасно підтримуючи прийнятну швидкодію. Порівняння різних варіантів регуляторів показало, що збільшення кількості регулювальних параметрів дозволяє точніше компенсувати динамічні зміни процесу нагріву, особливо в умовах нелінійної поведінки об'єкта.

Подальший синтез оптимальної системи керування на основі алгоритму АКОР (LQR) продемонстрував суттєві переваги використання методів оптимізації, зокрема в частині мінімізації енергетичних витрат і забезпечення плавності та стійкості перехідних процесів. Оптимальний регулятор дозволяє формувати

керуючий вплив з урахуванням компромісу між швидкістю, точністю та економічністю системи, що є особливо актуальним для теплотехнічних об'єктів.

Важливим етапом розділу став синтез системи обробки рівня на основі нейронної мережі. Використання інтелектуальних методів керування продемонструвало потенціал адаптації системи до зміни режимів роботи, збурень та нелінійностей, властивих трубчастим печам. Нейронна мережа показала здатність навчатися на основі даних та покращувати якість регулювання без необхідності ручного переналаштування параметрів, що відкриває перспективи для глибшої автоматизації та цифровізації процесів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської дисертації було наочно продемонстровано процес автоматизації печей, а саме — ефективність впровадження систем автоматичного керування. Показано необхідність і актуальність автоматизації трубчастих печей, спрямованої на підвищення їхньої відтворюваності, якості роботи та пропускної здатності.

У першому розділі було описано технологічний процес системи, принцип її роботи та конструкцію вакуумної печі.

У другому розділі проведено моделювання системи: визначено всі елементи, записано їхні диференційні рівняння та передавальні функції. Також була розроблена функціональна схема системи автоматичного регулювання трубчастих печей, сформовано загальну передавальну функцію (замкнену та розімкнену), а також виконано вибір регулювальних пристроїв і побудовано технологічну схему.

У третьому розділі проведено аналіз системи з визначенням її стійкості різними методами — методом Ляпунова, а також за критеріями Гурвіца, Михайлова і Найквіста. Крім того, було знайдено граничний коефіцієнт підсилення за критерієм Гурвіца. Визначено прямі оцінки якості, на основі яких було прийнято рішення про впровадження регулятора.

У четвертому розділі здійснено синтез системи. Спочатку застосовувався PI-регулятор, згодом — PID-регулятор. Однак отримані результати виявилися незадовільними, тому проведено коригування числових коефіцієнтів PID-регулятора. Експериментальним шляхом підібрано оптимальні параметри та побудовано порівняльні графіки перехідних характеристик системи з регулятором і без нього.

Подальший синтез системи включав застосування алгоритму оптимального регулювання АКOP (LQR-algorithm). Наступним етапом став синтез системи трубчастої печі на основі нейронної мережі з метою подальшої оптимізації процесу керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткаченко В.О. Підвищення ефективності систем автоматичного керування трубчатими печами / В.О. Ткаченко, Л.І. Фешанич // Актуальні проблеми сучасної науки та освіти: матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції м. Львів, 7-8 листопада 2025 року. – Львів : Львівський науковий форум, 2025. – 255 с.
2. Конспект лекцій з дисципліни «Металургійні печі» для студентів підготовки напрямку 6.050401 Металургія /Укл.: Крячко Г.Ю. – Кам'янське; ДДТУ, 2016р., 36 с.
3. Автоматизація виробничих процесів: Підручник. / І.В Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. — К. Видавництво Ліра-К, 2015 — 300 с.
4. Лукінюк М.В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом "Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології". – К.: НТУУ "КПІ", 2008. – 236 с.
5. Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості. - К.: Аграрна освіта, 2001. - 224 с.
6. Автоматизовані системи управління технологічними процесами: довідник / за заг. ред. Б. Б. Тимофеева ; уклад. Н. Г. Скрипаненко. Київ : Техника, 2003. 351 с. 23. Ананьєв В. П. Синтез і налагодження квазіоптимальних систем підпорядкованого регулювання в металургії: навч. посіб. Київ : Просвіта, 2007. 344 с.
7. Кустов К. І., Шершевер М. А. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації: методичні вказівки до курсового проекту для студентів спеціальності 151 75 «Автоматизація так комп'ютерно-інтегровані технології» : уклад. А. М. Ніколаєнко. Запоріжжя: ЗДІА, 2016. 34 с.
8. Барішенко О. М. Розробка і дослідження методів і пристроїв теплової обробки сталі в термічних печах з метою енергозбереження : автореф. дис... канд.

техн. наук : 05.14.06 / О. М. Барішенко; Дніпродзержин. держ. техн. ун-т. – Дніпродзержинськ, 2008. – 19 с.

9. Мочалін В. Н., Кочнев Н. В. Моделювання та дослідження систем автоматичного управління з використанням ПЕОМ: навч. посіб. Київ : КПІ, 2005. 178 с.. Автоматичне регулювання і регулятори. Київ, Металургія, 2007. 180 с.

10. Стенцель Й.І., Поркуян О.В. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв. Підручник. - Луганськ.: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту, 2010. - 302 с.

11. Грицай В. І., Стасюк І. Д., Гуменецький В. В. – Автоматична оптимізація роботи нагрівальних трубчастих печей великої потужності. – 2001. – 8 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ЛЬВІВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ФОРУМ

МАТЕРІАЛИ

XVI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ



**АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ
НАУКИ ТА ОСВІТИ**

7-8 листопада 2025 року

ЛЬВІВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ФОРУМ

**МАТЕРІАЛИ
XVI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ**

**АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ
НАУКИ ТА ОСВІТИ**

7-8 листопада 2025 року

**Львів
2025**

УДК 005
ББК 94.3(0)

Актуальні проблеми сучасної науки та освіти: матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції м. Львів, 7-8 листопада 2025 року. – Львів : Львівський науковий форум, 2025. – 255 с.

У даному збірнику представлені тези доповідей учасників XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми сучасної науки та освіти», організованої Львівським науковим форумом. Висвітлюються актуальні проблеми сучасної науки та освіти на сучасному етапі становлення, розглядаються сучасні наукові дискусії різних наукових напрямів.

Збірник призначений для студентів, здобувачів наукових ступенів, науковців та практиків.

Всі матеріали представлені в авторській редакції. Автори несуть безпосередню відповідальність за повноту, їх цілісність та дотримання норм академічної доброчесності.

Львівський науковий форум, 2025

<i>Кузнєцов О.М.</i> ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У БІОМЕХАНІЦІ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ	125
<i>Тимошук Г.В., Ільчук Е.А.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ХВИЛЬ ТЕПЛА НА ТЕРИТОРІЇ МІСТА РІВНЕ У КОНТЕКСТІ СУЧАСНИХ ЗМІН КЛІМАТИЧНИХ УМОВ	128
<i>Ткаченко В.О., Фешанич Л.І.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРУБЧАСТИМИ ПЕЧАМИ	132
<i>Франков О.С.</i> ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНОСТЬ У ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ	135
ФІЗИЧНЕ ВИХОВАННЯ І СПОРТ	138
<i>Кравченко О.Ю., Репко О.О.</i> ЗАСОБИ РОЗВИТКУ ПЕРЦЕПТИВНО-КОГНІТИВНИХ ЗДІБНОСТЕЙ В ФУТБОЛІ	138
ФІЛОЛОГІЧНІ НАУКИ	141
<i>Lukyanenko K.</i> INTERDISCIPLINARITY IN CLIL-ORIENTED ENGLISH LANGUAGE TEACHING: A CASE STUDY ON THE EFFECTIVENESS OF CLIL IN IMPROVING VOCABULARY AND COMMUNICATION SKILLS AMONG SECONDARY SCHOOL LEARNERS.....	141
<i>Volkova M.</i> DIFFICULTIES IN ASSESSING AND CERTIFYING THE LEVEL OF PROFICIENCY IN AVIATION ENGLISH	145
<i>Буров Д.О., Декусар Г.Г.</i> THE ROLE OF INTERPOL IN COMBATING ECONOMIC CRIMES.....	148
<i>Житар І.</i> РОБОТА З ТЕРМІНОЛОГІЄЮ КІБЕРБЕЗПЕКИ НА ЗАНЯТТЯХ З УКРАЇНСЬКОЇ МОВИ ПРОФЕСІЙНОГО СПРЯМУВАННЯ.....	150
<i>Коц А.А.</i> TACTICS OF POLICE OFFICERS AT THE SCENE OF A CRIME.....	153
<i>Куцєпалова К.</i> ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ВЕРБАЛЬНОЇ ТА НЕВЕРБАЛЬНОЇ КОМУНІКАЦІЇ У ДІЛОВОМУ СПІЛКУВАННІ	156
ФІЛОСОФСЬКІ НАУКИ.....	158
<i>Дука І.О.</i> РОЛЬ КРИТИЧНОГО МИСЛЕННЯ У ФОРМУВАННІ СВІТОГЛЯДУ СТУДЕНТА.....	158
<i>Крисюк Ю.П.</i> БОГДАН КІСТЯКІВСЬКИЙ ПРО ДЕРЖАВУ, ПРАВО ТА ПРАВОВИЙ МЕНТАЛІТЕТ.....	162
ЮРИДИЧНІ НАУКИ.....	165
<i>Bandurin V.V.</i> TERRORISM: CAUSES OF TERRORIST ACTS	165

Ткаченко Володимир Олександрович
магістр другого року навчання
Фешанич Лідія Ігорівна
доцент кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій,
Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРУБЧАСТИМИ ПЕЧАМИ

На сучасному етапі технічного розвитку проблема удосконалення трубчастих печей набуває особливої значущості, що зумовлено потребою підвищення їх енергоефективності, надійності та екологічної безпечності експлуатації. Науково-дослідні роботи та інженерні розробки у цій сфері спрямовані на оптимізацію енергоспоживання, зменшення шкідливих викидів і продовження ресурсу роботи обладнання. Використання інтелектуальних систем керування відкриває нові можливості для підвищення стабільності та продуктивності технологічних процесів.

Основним завданням системи регулювання трубчастих печей є підтримання сталої температури продукту, що виходить із печі [1]. На роботу системи впливають різноманітні збурення, серед яких — зміна витрати та температури вихідного продукту, коливання теплотворної здатності палива, варіації кількості та температури поданого повітря, тепловтрати в навколишнє середовище тощо.

Компенсація зазначених збурень здійснюється автоматичною системою регулювання, що керує подачею палива для забезпечення заданого температурного режиму продукту. Проте через теплову інерційність стінок печі та значну тривалість перехідних процесів використання лише одноконтурної системи автоматичного регулювання може призводити до істотних динамічних похибок і повільного реагування системи.

Для підвищення точності регулювання температури доцільно застосовувати каскадну систему автоматичного керування, яка включає два регулятори:

- коригувальний регулятор, що підтримує температуру продукту на виході з печі;
- стабілізуючий регулятор, який контролює температуру газів над перевальною стінкою та впливає на подачу палива.

Стабілізуючий контур дозволяє компенсувати збурення, які виникають у процесі згоряння палива, ще до того, як вони вплинуть на температуру продукту.

Для забезпечення оптимального співвідношення палива та повітря в печах із примусовою подачею первинного повітря застосовується регулятор співвідношення паливо-газ-повітря,

що підтримує задане значення коефіцієнта надлишку повітря, визначального для стабільності горіння [2]. Функціональна схема трубчатої печі показана на рисунку 1.

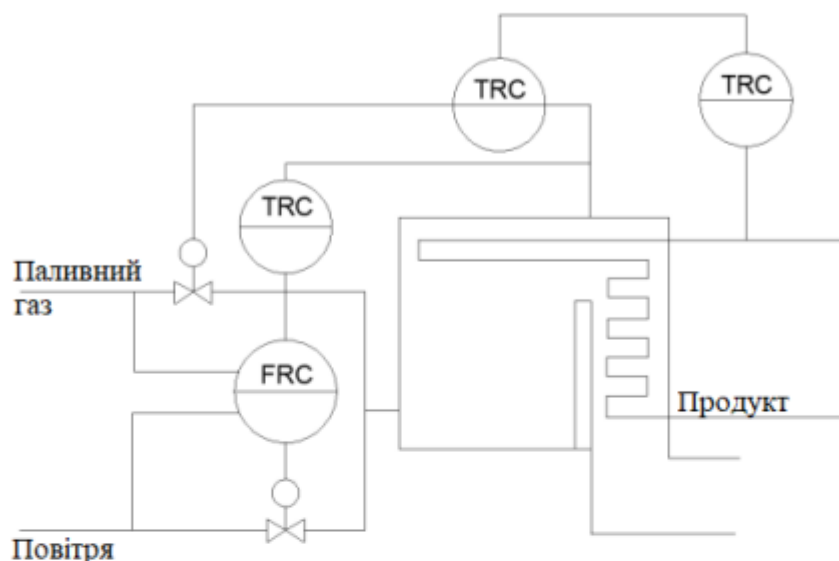


Рисунок 1 – Функціональна схема трубчатої печі

У випадку зміни теплоти згоряння палива регулятор витрати отримує коригувальний сигнал від стабілізатора вмісту кисню у димових газах, що забезпечує повне згоряння палива й підвищує ефективність керування. Коливання тиску паливного газу розглядаються як суттєве збурення, тому система автоматичного керування додатково оснащується регулятором тиску, який узгоджується з регулятором температури в камері згоряння. Це дозволяє компенсувати зміни тиску й забезпечити стабільність подачі палива.

Зважаючи на високу чутливість температурного режиму печі до співвідношення паливо-повітря, у системах керування трубчастими печами часто застосовують схеми надрегулювання. Такі системи реагують на підвищення температури вихлопних газів над перевальною стінкою, коригуючи роботу регулятора співвідношення паливний газ-повітря шляхом зміни подачі первинного повітря.

Контроль співвідношення палива та повітря має здійснюватися з урахуванням вимог безпеки, щоб запобігти утворенню вибухонебезпечних сумішей через нестачу повітря в топці. З цією метою подача палива обмежується таким чином, щоб вона не перевищувала максимально допустимого значення, що відповідає поточній витраті повітря. Якщо швидкість повітряного потоку зменшується нижче допустимого рівня, подача палива повинна автоматично зменшуватися для запобігання аварійним ситуаціям.

Удосконалення систем керування трубчастими печами є одним із ключових напрямів підвищення ефективності промислових теплотехнічних установок. Аналіз показав, що застосування традиційних одноконтурних систем регулювання не забезпечує належної

якості підтримання температурного режиму через наявність значних теплових інерційних властивостей печі та вплив зовнішніх збурень.

Запровадження каскадних систем автоматичного керування дозволяє суттєво підвищити точність і швидкодію регулювання, оскільки стабілізувальний контур оперативно компенсує відхилення параметрів горіння до того, як вони впливають на кінцеву температуру продукту. Додаткове використання регуляторів співвідношення паливо–повітря–газ і контролю тиску палива забезпечує стабільність процесу згоряння, підвищує енергоефективність та безпечність експлуатації печей.

Таким чином, впровадження інтелектуальних і каскадних систем автоматичного регулювання температури є доцільним напрямом модернізації трубчастих печей, що сприяє підвищенню продуктивності, надійності та екологічної стійкості теплотехнічних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Будник А.Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: Навчальний посібник. –Суми: Вид-во СумДУ, 2008. - 212 с
2. Горбійчук, М. І., Лазорів, А. М., Когутяк, М. І. Синтез ефективних систем керування температурним режимом муфельної печі. *Методи та прилади контролю якості*, 2024, 2(53), с. 81–93. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-81-93](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-81-93).