

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКПз-14.00.00.000 ПЗ

Група АКПзд-23-2К

Андрій Михаць

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

Михаць Андрій Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.51

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСОМ ПЕРЕРОБКИ НАФТИ

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПзд-23-2К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

А.О. Михаць

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

М.І. Когутяк

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

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 перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

« » 2025 року

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

Михаць Андрій Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації процесом переробки нафти

керівник роботи Чигур Ігор Іванович, доцент, к.т.н.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 53/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали практик, технологічна схема, методичні матеріали, каталоги, стандарти, технічна література

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

Вступ. 1. Фундаментальні засади та технологічний опис процесу переробки нафти. 2. Вибір об'єкта керування та аналіз технологій керування. 3. Математичне моделювання керованого об'єкту. 4. Розроблення системи автоматичного керування об'єктом.

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

1. Лист 1 – Технологічна схема установки каталітичного риформінгу - БР.АКПз-14.00.00.000 01. Лист 2 – Функціональна схема автоматизації трубчатої печі - БР.АКПз-14.00.00.000 02. Лист 3 – Спрощена схема трубчатої печі - БР.АКПз-14.00.00.000 03. Лист 4 – Динамічні характеристики основних каналів керування - БР.АКПз-14.00.00.000 04. Лист 5 – Структура МРС-регулятора - БР.АКПз-14.00.00.000 05. Лист 6 – Лінгвістичний опис процесу керування -БР.АКПз-14.00.00.000 06. Лист 7 – Реалізація fuzzy-керування в Matlab -БР.АКПз-14.00.00.000 07. Лист 8 – Перехідні характеристики -БР.АКПз-14.00.00.000 08.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Фундаментальні засади та технологічний опис процесу переробки нафти	15.05.2025	
2.	Вибір об'єкта керування та аналіз технологій керування	18.05.2025	
3.	Математичне моделювання керованого об'єкту	22.05.2025	
4.	Розроблення системи автоматичного керування об'єктом	08.06.2025	

Студент _____
(підпис)

А.О. Михаць _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

І.І. Чигур _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 68 сторінок друкованого тексту, 33 рисунки, 2 таблиці, 7 посилань на джерела.

Тема: «Розроблення системи автоматизації процесом переробки нафти».

Об'єкт дослідження: процес переробки нафти на нафтопереробному підприємстві.

Мета проекту: Метою роботи є розробка та створення ефективної системи автоматичного керування процесом каталітичного риформінгу.

Методи дослідження включають синергію теоретичних та експериментальних підходів, що забезпечує всебічне вивчення процесу каталітичного риформінгу та розробку надійної системи автоматичного керування.

Результати бакалаврської роботи: розроблено та імплементовано систему автоматичного керування процесом каталітичного риформінгу. Ця система забезпечує значне підвищення ефективності технологічного процесу за рахунок оптимізації виходу цільових продуктів та зниження експлуатаційних витрат. Крім того, реалізація системи сприяє покращенню екологічної безпеки нафтопереробного виробництва шляхом більш точного контролю та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Ключові слова: нафта, керування, риформінг, піч, регулятор.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 68 pages of printed text, 33 figures, 2 tables, 7 references to sources.

Topic: "Development of an automation system for the oil refining process".

Object of research: the oil refining process at an oil refinery.

Project objective: The aim of the work is to develop and create an effective automatic control system for the catalytic reforming process.

Research methods include a synergy of theoretical and experimental approaches, which ensures a comprehensive study of the catalytic reforming process and the development of a reliable automatic control system.

Results of the bachelor's thesis: an automatic control system for the catalytic reforming process has been developed and implemented. This system provides a significant increase in the efficiency of the technological process by optimizing the yield of target products and reducing operating costs. In addition, the implementation of the system contributes to improving the environmental safety of oil refining production through more accurate control and minimizing the negative impact on the environment.

Keywords: oil, control, reforming, furnace, regulator.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ЗАСАДИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ОПИС ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ НАФТИ	12
1.1 Призначення процесу та характеристика вхідного і вихідного продуктів	12
1.2 Фізико-хімічні основи процесу каталітичного риформінгу	13
1.3 Вплив технологічних параметрів на процес каталітичного риформінгу	16
1.4 Опис установки каталітичного риформінгу.....	18
Висновки до розділу	22
2 ВИБІР ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ	23
2.1 Вибір керованого об'єкта	26
2.2 Принцип функціонування трубчатої печі	21
Висновки до розділу	31
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРОВАНОВОГО ОБ'ЄКТУ	32
3.1 Постановка завдання на моделювання	32
3.2 Моделювання статичного режиму трубчатої печі	34
Висновки до розділу	45
4 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ	47
4.1 Стратегії керування MPC та нечіткої логіки для трубчатої печі	47
4.2 Розробка системи керування об'єктом на базі Fuzzy Logic	53

					БР.АКПз-14.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Михаць А.О.			Розроблення системи автоматизації процесом переробки нафти	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Чигур І.І.					6	69
Реценз.						АКПзд-23-2К ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Лагойда Л.І.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

Висновки до розділу	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	68

					БР.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Метою бакалаврської роботи є створення високоефективної системи автоматичного керування процесом каталітичного риформінгу, яка б забезпечувала комплексну оптимізацію ключових технологічних параметрів, підвищення стабільності функціонування обладнання, зниження питомих енергетичних витрат та покращення якісних характеристик кінцевої продукції відповідно до актуальних екологічних і технологічних стандартів.

Нафтопереробна промисловість, будучи фундаментальною складовою глобального енергетичного сектору, відіграє незамінну роль у забезпеченні паливно-енергетичними ресурсами ключових сфер економіки, включаючи транспорт, промисловість та комунальне господарство. У структурі нафтопереробних процесів особливе місце займає каталітичний риформінг. Цей технологічний процес спрямований не лише на суттєве підвищення октанового числа автомобільних бензинів, що є критично важливим для сучасних двигунів внутрішнього згоряння, але й на виробництво високоцінної сировини для нафтохімічної промисловості, зокрема ароматичних вуглеводнів. Таким чином, ефективність та стабільність процесу каталітичного риформінгу безпосередньо впливають на якість кінцевої продукції та економічні показники нафтопереробних підприємств.

Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується низкою глобальних викликів, які ставлять перед нафтопереробною галуззю нові, складні завдання. Постійне зростання світового попиту на енергетичні ресурси, з одного боку, та посилення вимог до екологічних стандартів палива – з іншого, створюють значний тиск на виробників. Необхідність зменшення енергозатрат у виробничих процесах, зумовлена як економічними міркуваннями, так і прагненням до сталого розвитку, додатково актуалізує питання оптимізації технологій. У цьому контексті, автоматизація процесу каталітичного риформінгу перетворюється з бажаної опції на нагальну виробничу необхідність. Саме впровадження ефективних автоматичних систем керування (АСК) відкриває шлях до

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

підвищення загальної продуктивності установок, істотного зниження питомих витрат енергоресурсів, забезпечення стабільно високої якості продукції та, що не менш важливо, зменшення негативного впливу виробництва на довкілля. У складних умовах високої конкуренції, характерних для сучасного ринку нафтопродуктів, саме рівень автоматизації технологічних процесів дедалі частіше стає визначальним фактором економічної ефективності та конкурентоспроможності підприємств, дозволяючи їм відповідати світовим стандартам якості та екологічної безпеки.

Застосування передових технологій управління, зокрема адаптивних та предиктивних систем, є ключовим напрямком модернізації процесів риформінгу. Такі системи здатні не лише підтримувати оптимальні режими роботи обладнання в реальному часі, але й прогнозувати можливі відхилення та запобігати їм, що сприяє скороченню незапланованих простоїв та значному зниженню ризиків виникнення аварійних ситуацій. Це, в свою чергу, підвищує загальну надійність та безпеку експлуатації нафтопереробних комплексів.

Обґрунтування вибору теми дослідження, пов'язаної з розробкою системи автоматичного керування процесом риформінгу, впливає з самої природи цього процесу. Каталітичний риформінг є багатограним, складним з точки зору фізико-хімічних перетворень та одночасно критично важливим технологічним процесом, який значною мірою визначає якість кінцевої продукції та економічну ефективність нафтопереробного підприємства в цілому. Необхідність підвищення якості палива, що відповідає дедалі жорсткішим сучасним екологічним стандартам, висуває підвищені вимоги до точності управління параметрами технологічного процесу. Автоматизація дозволяє забезпечити оптимальне використання енергоресурсів, мінімізувати втрати цінних компонентів, підвищити продуктивність установок та екологічну безпечність виробництва. У світлі постійного зростання конкуренції на ринку нафтопродуктів та неперервного підвищення вимог до їх якості, автоматичні системи керування стають невід'ємною складовою стратегії модернізації підприємств, сприяючи їхній успішній адаптації до сучасних технологічних та ринкових викликів. Крім того,

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

автоматизація процесу риформінгу дозволяє суттєво знизити ризики виникнення аварійних ситуацій, що є надзвичайно важливим аспектом з точки зору забезпечення безперервної та безпечної роботи підприємств.

Існує глибокий, хоча й не завжди очевидний, зв'язок між посиленням екологічних вимог та зростаючою складністю систем автоматизації. Жорсткіші екологічні стандарти, що стосуються, наприклад, вмісту сірки, бензолу, ароматичних вуглеводнів у паливах, або обсягів викидів шкідливих речовин в атмосферу, вимагають від виробників не просто стабільної роботи технологічних установок, а високоточного, філігранного керування процесом. Це необхідно для мінімізації утворення небажаних побічних продуктів та оптимізації складу цільових продуктів. Така прецизійність керування, у свою чергу, стимулює розробку та впровадження все більш складних, адаптивних та предиктивних систем керування. Традиційні підходи, засновані, наприклад, на ПД-регуляторах, можуть виявитися недостатньо ефективними для вирішення таких багатопараметричних завдань оптимізації з жорсткими, часто взаємопов'язаними обмеженнями. Таким чином, прагнення до вищої екологічної безпеки та відповідності суворим нормам прямо веде до необхідності застосування більш досконалих методів керування, здатних адекватно реагувати на нелінійності, взаємодії між параметрами та динамічні зміни в процесі.

Для досягнення цієї всеохоплюючої мети було сформульовано низку конкретних завдань. По-перше, передбачався глибокий аналіз існуючих методів автоматизації процесів риформінгу з метою виявлення їхніх переваг, недоліків та областей потенційного вдосконалення. По-друге, ключовим завданням стала розробка адекватної математичної моделі процесу, яка б враховувала вплив основних технологічних параметрів на його ефективність та якість продуктів. По-третє, необхідно було обґрунтувати вибір оптимального технічного та програмного забезпечення для практичної реалізації розроблюваної системи автоматичного керування. Четвертим важливим завданням було створення алгоритмів для оптимізації керування процесом, спрямованих на досягнення максимальної ефективності. Нарешті, передбачалося проведення комп'ютерного

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

моделювання та тестування запропонованої системи в умовах, максимально наближених до реальних виробничих, а також формування конкретних рекомендацій щодо її практичного впровадження на нафтопереробних підприємствах. Очікується, що результати цього дослідження сприятимуть підвищенню загальної ефективності роботи нафтопереробних підприємств, зміцненню їхньої конкурентоспроможності на ринку та забезпеченню відповідності сучасним вимогам сталого розвитку.

Об'єктом даного дослідження виступає безпосередньо процес каталітичного риформінгу, що реалізується на нафтопереробному підприємстві. Цей процес охоплює сукупність складних технологічних операцій, кінцевою метою яких є отримання високоякісного автомобільного бензину з підвищеним октановим числом, а також цінних індивідуальних ароматичних вуглеводнів та інших компонентів, що використовуються як сировина для нафтохімічної промисловості. Предметом дослідження, в свою чергу, є методи та засоби автоматичного керування технологічними параметрами процесу риформінгу. Це включає розробку та аналіз математичних моделей процесу, оптимізацію режимів його роботи, а також створення та реалізацію алгоритмів керування, спрямованих на забезпечення максимальної ефективності, стабільності протікання процесу та його екологічної безпеки.

Методологія дослідження базується на комплексному застосуванні як теоретичних, так і експериментальних підходів, що забезпечує всебічне та глибоке вивчення процесу каталітичного риформінгу та розробку ефективної системи автоматичного керування. Теоретичні методи включають детальний аналіз актуальної наукової літератури, технічної документації на обладнання та існуючих промислових методів автоматизації. Це дозволяє визначити ключові параметри процесу, що підлягають контролю та регулюванню, та зрозуміти їхній вплив на перебіг реакцій.

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1 ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ЗАСАДИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ОПИС ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ НАФТИ

1.1 Призначення процесу та характеристика вхідного і вихідного продуктів

Каталітичний риформінг є одним із ключових процесів вторинної переробки нафти, основне призначення якого полягає у перетворенні низькооктанових вуглеводнів, що містяться у прямогонних бензинових фракціях, на високооктановий рідкий продукт, відомий як риформат. Цей риформат є базовим компонентом для виробництва товарних автомобільних бензинів, що відповідають сучасним експлуатаційним вимогам. Окрім цього, процес каталітичного риформінгу дозволяє отримувати цінні індивідуальні ароматичні вуглеводні, такі як бензол, толуол та ксилоли (так звана БТК-фракція), які є важливою сировиною для подальшого використання у нафтохімічній галузі для синтезу полімерів, розчинників, поверхнево-активних речовин та багатьох інших продуктів. Ще одним суттєвим продуктом процесу є водневмісний газ (ВСГ), який, завдяки своїй відносно низькій вартості, знаходить широке застосування в інших гідрогенізаційних процесах нафтопереробки, таких як гідроочищення, гідрокрекінг тощо.

Сировиною для процесу каталітичного риформінгу слугують бензинові фракції, отримані переважно при первинній перегонці нафти. Фракційний склад сировини визначається цільовим призначенням процесу. Якщо основною метою є отримання індивідуальних ароматичних вуглеводнів, то для риформінгу використовуються вузькі бензинові фракції, збагачені відповідними попередниками. Наприклад, для виробництва бензолу використовують фракцію, що містить вуглеводні С6 (з температурою кипіння приблизно 60-81 °С), для толуолу – фракцію вуглеводнів С7 (82-111 °С), а для ксилолів – фракцію вуглеводнів С8 (115-145 °С). У випадку, коли головною метою є виробництво високооктанового компонента автомобільного бензину, на риформінг направляють ширші бензинові фракції, що містять вуглеводні переважно С7-С9 (з

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

інтервалом кипіння 82-180 °С). Процес риформінгу зазвичай проводять у системі, що складається з каскаду трьох або більше послідовно з'єднаних адіабатичних реакторів. Типовими умовами проведення процесу є температура в діапазоні 480-530 °С, тиск від 1 до 3,5 МПа та об'ємна швидкість подачі сировини від 1 до 3 год⁻¹. Реакції відбуваються в середовищі циркулюючого водневмісного газу на спеціальних біфункціональних каталізаторах, які зазвичай містять платину та інші промотуючі метали, нанесені на кислотний носій.

1.2 Фізико-хімічні основи процесу каталітичного риформінгу

Фізико-хімічні основи процесу каталітичного риформінгу охоплюють комплекс складних хімічних перетворень вуглеводнів сировини. Основними цільовими реакціями є дегідрування шестичленних нафтових вуглеводнів до ароматичних, ізомеризація нафтових вуглеводнів (наприклад, дегідроізомеризація п'ятичленних нафтенів у ароматичні вуглеводні через стадію утворення шестичленних нафтенів), дегідроциклізація парафінових вуглеводнів до ароматичних, та ізомеризація парафінових вуглеводнів з утворенням їх більш розгалужених ізомерів, що мають вищі октанові числа. Поряд з цими бажаними реакціями, в умовах процесу протікають і небажані побічні реакції. До них належить, насамперед, гідрокрекінг парафінових та нафтових вуглеводнів, що призводить до утворення низькомолекулярних газоподібних вуглеводнів та зниження виходу рідкого риформату. Іншою вкрай небажаною реакцією є коксоутворення – складний процес поліконденсації та ущільнення вуглеводнів з утворенням твердих вуглецевих відкладень (коксу) на поверхні та в порах каталізатора, що спричиняє його поступову дезактивацію.

Всі ці різноманітні реакції каталізуються біфункціональними каталізаторами. Такі каталізатори поєднують у своїй структурі два типи активних центрів: металічні та кислотні. Металічні центри, зазвичай представлені високодисперсною платиною або іншими благородними металами (реній, іридій), відповідають за гідруючу-дегідруючу функцію, тобто каталізують реакції відщеплення або приєднання водню. Кислотні центри, які забезпечуються

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

властивостями носія (наприклад, хлорований оксид алюмінію), каталізують реакції, що супроводжуються перебудовою вуглецевого скелету молекул, такі як ізомеризація, дегідроциклізація та крекінг.

Детальніше розглянемо ключові реакції. Дегідрування нафтових вуглеводнів (рисунок 1.1), наприклад, перетворення циклогексану та його гомологів в ароматичні вуглеводні (бензол, толуол, ксилоли) та водень, є однією з найважливіших та найшвидших реакцій у процесі риформінгу. В умовах процесу ця реакція протікає досить легко, і перетворення нафтенів відбувається практично до рівноважного стану. Реакція є ендотермічною (протікає з поглинанням тепла) та супроводжується збільшенням об'єму газової фази. Через утворення великої кількості високооктанових аренів та цінного водню, нафтени є найбільш бажаним компонентом у сировині риформінгу.

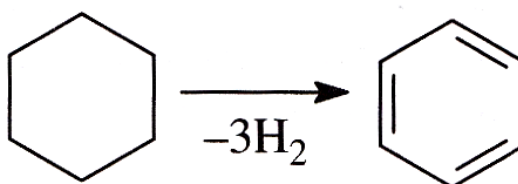


Рисунок 1.1 – Реакція дегідрування нафтових вуглеводнів

Ізомеризація парафінових та нафтових вуглеводнів також відіграє важливу роль. Реакції ізомеризації парафінових вуглеводнів призводять до утворення їх розгалужених ізомерів. Оскільки розгалужені парафіни мають значно вищі октанові числа, ніж їхні лінійні аналоги, ця реакція сприяє підвищенню загального октанового числа риформату. Реакції ізомеризації протікають при робочих температурах процесу і характеризуються невисоким тепловим ефектом, близьким до нуля. Ізомеризація нафтових вуглеводнів, зокрема перетворення п'ятичленних циклоалканів (циклопентанів) на шестичленні (циклогексани), є важливою проміжною стадією, оскільки шестичленні нафтени значно легше дегідруються до ароматичних вуглеводнів.

Дегідроциклізація парафінових вуглеводнів (рисунок 1.2), особливо n-парафінів С6-С9, до відповідних ароматичних вуглеводнів є найскладнішою з

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

цільових реакцій риформінгу. Ця реакція вимагає високої температури та відносно низького тиску і протікає на обох типах центрів біфункціонального каталізатора – металевих та кислотних. Вона також супроводжується виділенням водню та значним зростанням октанового числа.

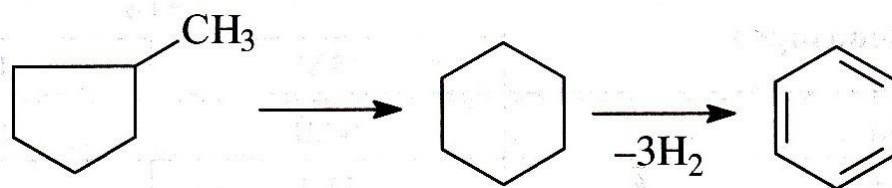


Рисунок 1.2 – Реакція дегідроциклізації парафінових вуглеводнів

Гідрокрекінг, як вже зазначалося, є побічною реакцією (рисунок 1.3). В умовах каталітичного риформінгу він протікає переважно на кислотних центрах каталізатора, призводячи до розщеплення вуглеводневих ланцюгів з утворенням легших парафінових вуглеводнів, часто ізобудови. Хоча продукти гідрокрекінгу можуть мати непогані октанові характеристики, ця реакція є небажаною, оскільки вона супроводжується значним споживанням цінного водню та зниженням виходу рідкого риформату, особливо цільових ароматичних вуглеводнів.

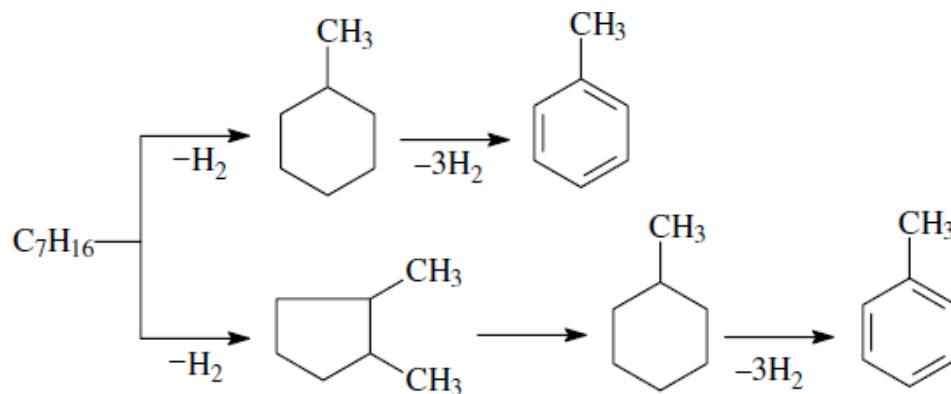


Рисунок 1.3 – Реакція гідрокрекінгу

Коксоутворення є ще однією вкрай небажаною реакцією, що інтенсифікується при високих температурах. Накопичення коксу на поверхні та в порах каталізатора блокує його активні центри, що призводить до поступової втрати активності та селективності каталізатора, скорочуючи тривалість його робочого циклу між регенераціями.

1.3 Вплив технологічних параметрів на процес каталітичного риформінгу

Ефективність процесу каталітичного риформінгу та якість отримуваних продуктів значною мірою залежать від низки технологічних параметрів, серед яких ключовими є температура, тиск, кратність циркуляції водневмісного газу, вуглеводневий склад сировини, об'ємна швидкість подачі сировини та активність каталізатора, зокрема вміст хлору на ньому. Температурний режим є одним із найважливіших параметрів. Оскільки основні цільові реакції риформінгу (дегідрування, дегідроциклізація) є ендотермічними, процес проводять у каскаді з кількох (зазвичай трьох або чотирьох) адіабатичних реакторів з проміжним підігрівом реакційної суміші в спеціальних печах. Підвищення температури, як правило, сприяє збільшенню швидкостей усіх реакцій, включаючи цільові, що веде до зростання октанового числа риформату та виходу ароматичних вуглеводнів. Однак, надмірне підвищення температури також інтенсифікує небажані реакції гідрокрекінгу та, особливо, швидкість накопичення коксу на каталізаторі, що знижує його активність та тривалість робочого циклу.

Тиск також суттєво впливає на вихід і якість риформату, тому цей параметр потребує ретельного регулювання. Зниження загального тиску в системі термодинамічно сприяє реакціям, що йдуть зі збільшенням об'єму, таким як дегідрування та дегідроциклізація, що позитивно впливає на вихід ароматичних вуглеводнів та водню. Однак, при зниженні тиску також зростає швидкість коксоутворення. З іншого боку, підвищення тиску пригнічує цільові реакції, знижує вихід рідких продуктів процесу та вміст у них аренів, але водночас зменшує швидкість дезактивації каталізатора коксом та збільшує споживання водню в реакціях гідрокрекінгу.

Кратність циркуляції водневмісного газу (ВСГ) визначається як відношення об'єму циркулюючого ВСГ (приведеного до нормальних умов) до об'єму сировини, що проходить через реактор за одиницю часу. Висока концентрація водню в реакційній зоні сприяє пригніченню реакцій утворення коксу та гідрогенолізу, що позитивно впливає на стабільність роботи каталізатора та

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

продовжує його міжрегенераційний цикл. Однак, надто висока кратність циркуляції ВСГ збільшує енерговитрати на його компримування та нагрівання. Вибір оптимального значення цього параметра здійснюється з урахуванням стабільності каталізатора, якості сировини та продуктів, жорсткості процесу (температури, тиску) та заданої тривалості міжрегенераційного циклу.

Об'ємна швидкість подачі сировини є величиною, оберненою до часу контакту сировини з каталізатором. Зменшення об'ємної швидкості (збільшення часу контакту) призводить до глибшого перетворення сировини, підвищення октанового числа та вмісту аренів у риформаті, але також може посилити коксоутворення. Збільшення об'ємної швидкості, навпаки, знижує глибину перетворень. Оптимальне значення об'ємної швидкості подачі сировини встановлюють з урахуванням якості сировини, умов проведення процесу та стабільності каталізатора.

Вміст хлору на каталізаторі також є важливим фактором. Хлор, що вводитьься у вигляді хлорорганічних сполук, виконує роль кислотного промотора каталізатора, підтримуючи необхідну кислотність його поверхні. Достатній вміст хлору на каталізаторі та низька вологість у реакційній системі (об'ємний вміст води в циркулюючому ВСГ зазвичай підтримується на рівні $(10-30) \cdot 10^{-6}$) забезпечують стабільну активність каталізатора в реакціях ізомеризації та дегідроциклізації. Вміст хлору підтримується шляхом періодичного або безперервного введення в сировину невеликих кількостей хлорорганічних сполук, наприклад, чотирехлористого вуглецю (CCl_4) або дихлоретану ($C_2H_4Cl_2$).

Існує складний баланс між бажаними та небажаними реакціями в процесі риформінгу, який є надзвичайно чутливим до змін технологічних параметрів. Наприклад, підвищення температури, хоча й сприяє цільовим реакціям дегідрування та дегідроциклізації, що призводять до збільшення октанового числа та виходу ароматичних вуглеводнів, одночасно інтенсифікує небажані реакції гідрокрекінгу (що веде до втрати цільових рідких продуктів та збільшення споживання водню) та коксоутворення (що спричиняє дезактивацію каталізатора). Це створює складне, багатовимірне оптимізаційне завдання для системи

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

керування. Зниження тиску, наприклад, позитивно впливає на вихід аренів, оскільки сприяє реакціям, що йдуть зі збільшенням числа моль, але водночас може посилити швидкість утворення коксу. Висока кратність циркуляції водневмісного газу ефективно пригнічує коксоутворення, продовжуючи термін служби каталізатора, але це досягається ціною значних енергетичних витрат на компримування та циркуляцію великих об'ємів газу. Таким чином, оптимізація процесу риформінгу – це не просто максимізація одного окремого показника, а пошук складного компромісу між кількома, часто конфліктуючими, цілями: максимальне октанове число риформату, максимальний вихід ароматичних вуглеводнів, мінімальна швидкість коксоутворення, максимальний міжрегенераційний пробіг каталізатора та мінімальні загальні енерговитрати. Ця багатофакторність та взаємопов'язаність параметрів підкреслює гостру необхідність у розробці та впровадженні інтелектуальних систем автоматичного керування, здатних враховувати всі ці аспекти одночасно та підтримувати процес в оптимальному стані.

1.4 Опис установки каталітичного риформінгу

Технологічне оформлення процесу каталітичного риформінгу на сучасних нафтопереробних заводах передбачає наявність кількох основних блоків. Установки всіх типів, як правило, включають блок попереднього гідроочищення сировини, власне реакторний блок, блок сепарації парогазової суміші та блок стабілізації (фракціонування) отриманого риформату.

Більшість установок каталітичного риформінгу, що експлуатуються, зокрема в Україні, реалізовані за схемою зі стаціонарним (нерухомим) шаром каталізатора. Типова така установка включає три або чотири послідовно з'єднані реактори. Каталізатор завантажується в ці реактори, часто в нерівних співвідношеннях (наприклад, 1:2:4 або подібних), з метою забезпечення більш рівномірного розподілу теплового навантаження та ступеня перетворення сировини по реакторах. Регенерація каталізатора на таких установках

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

для запобігання отруєнню та дезактивації платинового каталізатора риформінгу. Вміст сірки у гідроочищеній сировині не повинен перевищувати 1 мг/кг. Після гідроочищення сировина (потік VI) змішується з циркулюючим водневмісним газом (ВСГ, потік II), компримованим до робочого тиску процесу (0,5-4,5 МПа), нагрівається в системі теплообмінників та трубчастих печах (П-1) і подається в перший реактор риформінгу (Р-2). У першому реакторі, де температура є найнижчою серед реакторів каскаду, переважно протікають реакції дегідрування нафтових вуглеводнів до ароматичних, які є сильно ендотермічними і призводять до значного зниження температури реакційної суміші. Тому на виході з кожного реактора (крім останнього) суміш продуктів направляється на проміжний підігрів у відповідні секції багатокамерної печі (П-2, П-3) перед подачею в наступний реактор (Р-3, Р-4). Це дозволяє підтримувати необхідний температурний профіль по каскаду реакторів та забезпечити високу швидкість цільових реакцій. Після виходу з останнього реактора (Р-4) гаряча парогазова суміш продуктів (потік VII) охолоджується в теплообмінниках (Т) та холодильниках (Х) і надходить у сепаратор високого тиску (Е-3). У сепараторі відбувається розділення суміші на багатий воднем газ (ВСГ) та рідкий нестабільний каталізат (риформат). Частина ВСГ (потік IX) після очищення від кислих газів в адсорбері (А) та осушки повертається на рециркуляцію в процес (змішуючись зі свіжою сировиною), а надлишкова кількість товарного ВСГ (потік XIV) виводиться з установки для використання в інших процесах або як паливний газ. Рідка фаза (потік VIII) з низу сепаратора Е-3 направляється на колону ректифікації (РК-2), яку часто називають стабілізаційною колоною. В цій колоні з нестабільного каталізату (потік X) відганяються розчинені вуглеводневі гази (метан, етан, пропан, бутан, потік XI), які можуть містити невелику кількість водню. Цей вуглеводневий газ спрямовується на подальшу переробку, наприклад, на газофракціонуючу установку для вилучення цінних компонентів – зрідженого газу (пропан-бутанової фракції, потік XII). Залишковий газ після такої обробки може використовуватися як паливо на самому нафтопереробному заводі. Кубовим залишком колони стабілізації є стабільний високооктановий бензин – риформат

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

(потік XIII), який є цільовим продуктом процесу і направляється на компаундування товарних бензинів.

Одним із найсучасніших та перспективних типів установок каталітичного риформінгу є установки з рухомим (псевдозрідженим або повільно рухомим) шаром каталізатора. Головною перевагою таких установок є можливість безперервної регенерації каталізатора в окремому спеціальному апараті – регенераторі. Це дозволяє підтримувати високу та стабільну активність каталізатора протягом тривалого часу, працювати при більш жорстких умовах процесу (нижчий тиск, вища температура), що сприяє підвищенню виходу та якості цільових продуктів, та значно скоротити або повністю усунути простої установки на регенерацію. Такі установки стають особливо економічно вигідними у випадках, коли робочий тиск у реакторах знижується з одночасним прагненням до підвищення глибини перетворення сировини. Технологічне оформлення установок з рухомим шаром каталізатора відрізняється від схеми зі стаціонарним шаром. Зазвичай три реактори розташовуються вертикально один над одним (так звана "стопка" реакторів) і з'єднані між собою системою перетічних труб малого діаметра. Каталізатор, що має форму дрібних кульок (наприклад, діаметром близько 1,6 мм), повільно перетікає з верхнього реактора в нижній під дією сили тяжіння. З нижнього (третього) реактора відпрацьований (закоксований) каталізатор через систему шлюзових затворів з кульовими клапанами надходить до живильника пневмотранспортної системи і потоком інертного газу (зазвичай азотом) подається у верхню частину регенератора, де відбувається випалювання коксу та відновлення активності каталізатора. Регенований каталізатор потім повертається у верхній реактор риформінгу, замикаючи цикл. Використання таких установок у світовій нафтопереробці постійно зростає.

Вибір між технологією зі стаціонарним та рухомим шаром каталізатора визначається не тільки суто економічними факторами (капітальні та експлуатаційні витрати), але й загальною стратегією підприємства щодо роботи з каталізаторами, вимогами до гнучкості технологічного процесу та цільовими продуктами. Установки з рухомим шаром каталізатора, хоча й можуть бути

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

конструктивно складнішими та вимагати більших початкових інвестицій, надають значні переваги.

Висновки до розділу

Безперервна регенерація дозволяє підтримувати середню активність каталітичної системи на стабільно високому рівні, що, в свою чергу, дає можливість експлуатувати установку в більш жорстких умовах – при нижчому тиску та вищій температурі. Такі умови є сприятливими для досягнення глибшого перетворення сировини, максимізації виходу високооктанових компонентів та особливо цінних ароматичних вуглеводнів. Це стає особливо актуальним при переробці важчих бензинових фракцій або коли підприємство орієнтоване на максимальне виробництво сировини для нафтохімії. Таким чином, якщо пріоритетами є максимальна гнучкість процесу, здатність працювати в інтенсивних режимах та досягати високих показників конверсії сировини, перевага часто надається технологіям з рухомим шаром каталізатора, незважаючи на потенційно вищі капітальні затрати.

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

2 ВИБІР ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ

2.1 Вибір керованого об'єкта

У процесі вибору керованого об'єкта для розробки та вдосконалення систем автоматичного керування в рамках технологічного комплексу каталітичного риформінгу, особлива увага приділяється тим елементам установки, які мають вирішальний вплив на перебіг основного технологічного процесу та для яких критично важливим є підтримання стабільних та оптимальних умов роботи. Ефективне керування промисловими об'єктами вимагає врахування не лише їхніх статичних технічних характеристик, але й складних динамічних властивостей, зокрема здатності швидко та адекватно реагувати на керуючі впливи та зовнішні збурення, а також забезпечувати стабільність функціонування в межах чітко заданих технологічних параметрів. Аналіз процесу риформінгу, зокрема його теплових потреб та температурних режимів, дозволив виявити ключові установки, що суттєво впливають на загальну ефективність та якість кінцевих продуктів. Однією з таких найважливіших установок, що визначає енергетичний баланс та температурні умови для протікання каталітичних реакцій, є трубчаста піч, призначена для нагрівання сировини та проміжних потоків до заданих температур.

Трубчасті печі є невід'ємними та критично важливими елементами в багатьох високотемпературних промислових процесах, зокрема в нафтопереробці та нафтохімії. Їхня основна функція полягає в забезпеченні ефективного та контрольованого підведення тепла до технологічних потоків для проведення ендотермічних реакцій або для досягнення необхідних температурних рівнів. Завдяки можливості точного регулювання температури в різних зонах печі (наприклад, в радіантній та конвекційній секціях) та по довжині змієвиків, можна створити та підтримувати оптимальні умови для таких складних процесів, як каталітичний риформінг, термічний та каталітичний крекінг, піроліз та інші. Це має принципове значення, оскільки стабільний та точно контрольований

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурний режим є необхідною передумовою для досягнення високої селективності цільових реакцій, максимальної ефективності використання сировини та енергії, а також для отримання кінцевого продукту із заданими якісними характеристиками.

Крім того, трубчасті печі характеризуються наявністю низки важливих параметрів, які можуть бути безперервно виміряні за допомогою відповідних датчиків та ефективно контролюються сучасними автоматичними системами. До таких параметрів належать температура нагрівається продукту на виході з печі, температура димових газів, тиск у змійовиках та в топковому просторі, а також витрати палива та повітря, що подається на горіння. Можливість моніторингу та регулювання цих параметрів в режимі реального часу дозволяє оптимізувати процеси горіння та теплопередачі, забезпечуючи максимальну тепловіддачу при мінімальних витратах палива. Однак, трубчасті печі є складними об'єктами керування з точки зору їхніх динамічних характеристик. Зокрема, вони відзначаються значною тепловою інерційністю, що означає повільну реакцію температури продукту на зміну керуючих впливів, наприклад, на зміну подачі палива. Ця висока інерційність ускладнює завдання точного та швидкого регулювання температури, особливо при наявності зовнішніх збурень (наприклад, коливань витрати або температури сировини на вході в піч). Саме тому застосування сучасних автоматизованих систем керування, здатних враховувати цю інерційність та інші динамічні особливості, допомагає забезпечити стабільну роботу печі, мінімізувати небажані коливання температури та підтримувати її в межах вузького заданого діапазону. Завдяки таким системам вдається також суттєво знижувати питомі енергетичні витрати, що є важливим фактором підвищення економічної ефективності виробництва та зменшення його негативного впливу на навколишнє середовище. Належний контроль температури та інших критичних параметрів печі також безпосередньо сприяє підвищенню рівня промислової безпеки, зменшуючи ризик перегріву труб, їх прогару та виникнення аварійних ситуацій. Більше того, сучасні автоматизовані системи дозволяють інтегрувати роботу трубчастої печі з іншими технологічними

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

установками та системами керування підприємства, забезпечуючи узгоджену та оптимізовану роботу всього виробничого комплексу.

Висока інерційність трубчастої печі, як зазначалося, є одним із ключових викликів для традиційних систем автоматичного керування, таких як, наприклад, широко розповсюджені пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори. Інерційність проявляється в тому, що зміни в керуючому впливі (наприклад, збільшення або зменшення подачі палива в пальники) призводять до відповідної зміни вихідного параметра (температури нагріваемого продукту) зі значною часовою затримкою та поступово. Це суттєво ускладнює завдання швидкої та точної стабілізації температури на заданому рівні, особливо при виникненні збурень. ПІД-регулятори, які формують керуючий вплив на основі поточної помилки регулювання (різниці між заданим та фактичним значенням температури), її інтегралу та похідної, при роботі з високоінерційними об'єктами можуть генерувати надмірні керуючі сигнали, намагаючись швидко компенсувати відхилення. Внаслідок цього, система може "не встигати" відреагувати на вже внесені коригування, що призводить до перерегулювання – коли температура спочатку значно перевищує задане значення, а потім опускається нижче нього, викликаючи затухаючі або навіть незатухаючі коливання навколо заданої точки. Такі коливання є небажаними, оскільки вони негативно впливають на стабільність наступних технологічних процесів та якість продукції, а також можуть призводити до підвищеного зносу обладнання. Саме ця особливість високоінерційних об'єктів, як трубчаста піч, робить застосування більш досконалих методів керування, зокрема предиктивних (прогнозуючих) контролерів, таких як MPC (Model Predictive Control), особливо доцільним. Предиктивні контролери використовують математичну модель об'єкта для прогнозування його майбутньої поведінки на певному часовому горизонті. Маючи такий прогноз, MPC може розрахувати оптимальну послідовність майбутніх керуючих дій, яка мінімізує відхилення від заданого значення протягом усього горизонту прогнозування, явно враховуючи інерційність та час запізнення системи. Таким чином, MPC здатний "заглядати вперед" і завчасно компенсувати

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

повільну реакцію системи, забезпечуючи більш плавне, точне та робастне керування температурою в трубчастій печі.

2.2 Принцип функціонування трубчастої печі

Функціональна схема автоматизації типової трубчастої печі (рисунок 2.1) включає декілька взаємопов'язаних контурів регулювання та контролю, спрямованих на забезпечення її ефективної, безпечної та економічної роботи.

Важливим елементом системи автоматизації є контроль за співвідношенням витрат атмосферного повітря та газового палива, що подаються в пальники. Це співвідношення є критичним для забезпечення повного та ефективного згоряння палива, максимізації тепловіддачі та мінімізації утворення шкідливих викидів (наприклад, оксиду вуглецю при нестачі повітря або надлишкових оксидів азоту при його надлишку та високих температурах). Для реалізації цього контролю в трубопроводах подачі повітря та палива встановлюються відповідні витратоміри (позначені як 1А для повітря та 2А для палива). Сигнали від цих витратомірів надходять на спеціальні блоки формування сигналів (1Б та 2Б), які можуть виконувати функції нормування, фільтрації або перетворення сигналів. Оброблені сигнали далі передаються на цифровий регулятор співвідношення безперервної дії (1В), який зазвичай розташований на центральному пульті управління оператора. Цей регулятор порівнює фактичне співвідношення витрат із заданим значенням та, у разі відхилення, формує керуючий сигнал, що надходить на виконавчий механізм (1Г).

Виконавчий механізм, в свою чергу, впливає на регулюючий орган (наприклад, шибер або клапан) на лінії подачі атмосферного повітря, змінюючи його витрату таким чином, щоб підтримувати оптимальне співвідношення з витратою палива. Така система забезпечує точний та динамічний контроль за процесом горіння, сприяючи його стабільності та ефективності.

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

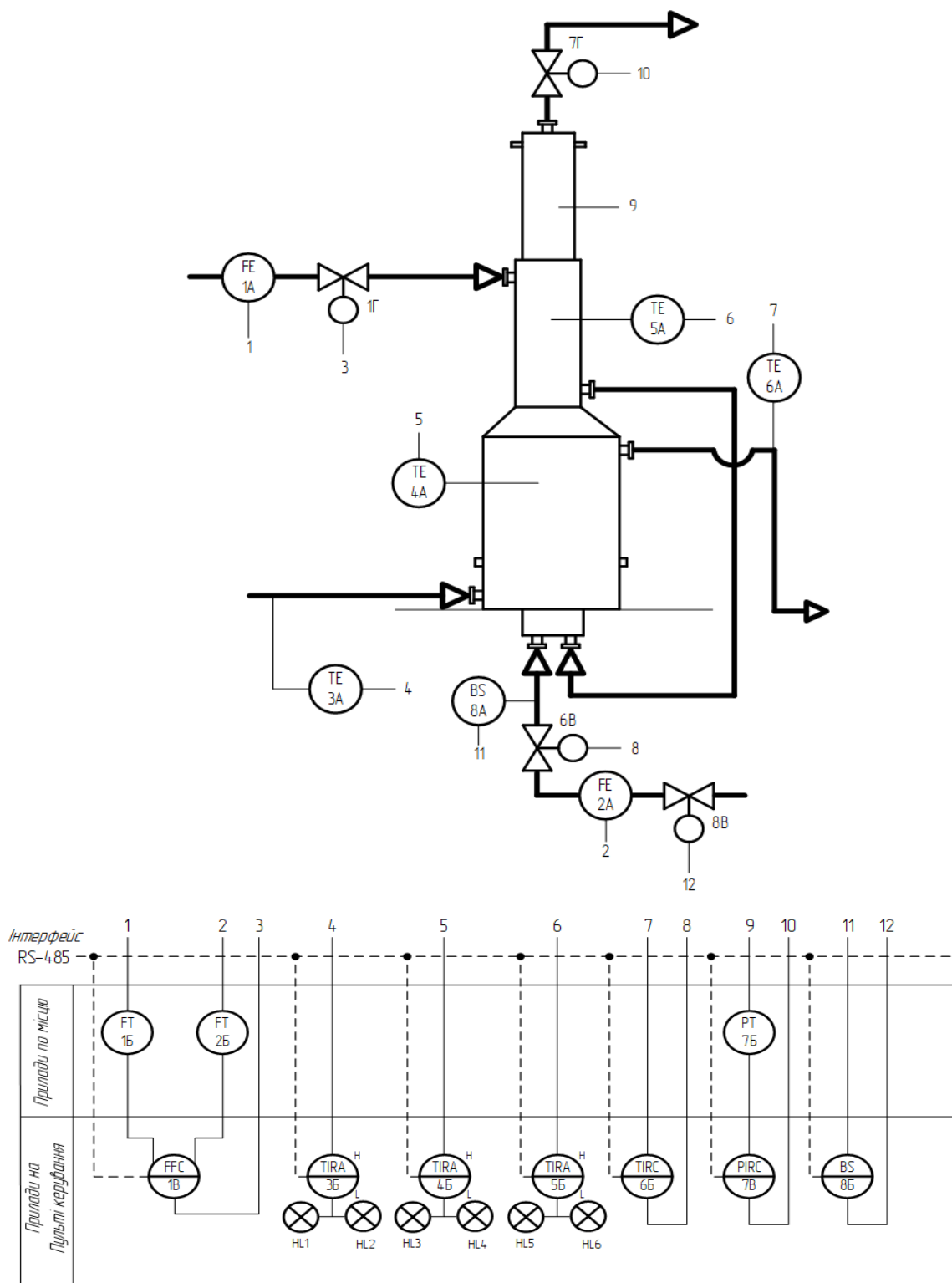


Рисунок 2.1 – Функціональна схема автоматизації трубчатої печі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ

Арк.

27

Іншим, не менш важливим, завданням системи автоматизації є контроль та регулювання температури вихідної речовини, що нагрівається в печі, наприклад, перегрітої водяної пари або сировини риформінгу. Для цього в системі передбачено встановлення термоелектричного перетворювача (термопари, позначеної як 6А) на виході продукту з печі. Цей датчик безперервно вимірює температуру продукту. Сигнал від термопари передається на інший цифровий регулятор температури безперервної дії (6Б). Цей регулятор порівнює виміряну температуру із заданим технологічним значенням i , у випадку розбіжності, генерує керуючу команду, яка надходить на виконавчий механізм (6В). Виконавчий механізм (6В) безпосередньо керує подачею газового палива в пальники печі (наприклад, змінюючи положення регулюючого клапана на лінії палива). Таким чином, якщо температура продукту нижча за задану, подача палива збільшується, і навпаки. Це дозволяє підтримувати необхідну температуру вихідної речовини з високою точністю, що є критичним для подальших технологічних процесів.

Сучасна трубчаста піч зазвичай складається з кількох конструктивних зон або відділів (наприклад, радіантна секція, конвекційна секція), в яких відбуваються процеси теплопередачі від продуктів згоряння палива до нагріваемого середовища, що рухається по трубчастих змійовиках. Для детального контролю температурного режиму в цих відділах використовуються додаткові термоелектричні перетворювачі (позначені як 3А, 4А та 5А). Ці датчики можуть вимірювати температуру пари (або іншого продукту) на вході в піч, в проміжних точках змійовика всередині печі, а також температуру стінок труб або димових газів у різних зонах. Сигнали від цих датчиків передаються на автоматичні реєструвальні прилади (3Б, 4Б, 5Б), які можуть бути оснащені цифровими дисплеями для візуалізації поточних значень температури оператором. Крім простої реєстрації, ці прилади часто оснащені системою сигналізації. Наприклад, можуть використовуватися світлодіодні індикатори: червоні лампочки (HL1, HL3, HL5), що спалахують при перевищенні допустимих (аварійних) значень температури, та жовті лампочки (HL2, HL4, HL6), що

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вказують на наближення температури до критичних (попереджувальних) значень. Така система візуального контролю та сигналізації дозволяє оператору своєчасно виявляти потенційні проблеми та вживати необхідних заходів для запобігання аварійним ситуаціям та забезпечення безпеки процесу.

Для забезпечення безпеки експлуатації печі надзвичайно важливим є безперервний контроль за наявністю полум'я в пальниках. Згасання полум'я при продовженні подачі палива може призвести до накопичення вибухонебезпечної газової суміші в топці. Цей контроль здійснюється за допомогою автоматичного приладу контролю полум'я (8Б), який може бути заснований на різних принципах (наприклад, фотоелемент, іонізаційний датчик, УФ-датчик), що фіксує наявність або відсутність полум'я. У разі згасання полум'я, сигнал від цього приладу негайно передається на виконавчий механізм (8В), який автоматично припиняє подачу газового палива до відповідного пальника або до всіх пальників печі. Це є критично важливим елементом системи протиаварійного захисту, що запобігає вибухам та пожежам на виробництві.

Ще одним важливим аспектом безпечної та ефективної роботи трубчастої печі є контроль за розрідженням (негативним тиском) в топковому просторі. Підтримання невеликого розрідження в топці необхідне для забезпечення стабільної тяги, ефективного видалення продуктів згоряння та запобігання викиду гарячих димових газів або полум'я назовні через оглядові вікна чи інші нещільності. Для контролю розрідження в системі встановлюється тензоперетворювач різниці тиску (датчик тяги, 7А), який вимірює різницю між тиском у топці та атмосферним тиском. Сигнал з цього датчика надходить на блок для формування сигналу (7Б) і далі передається на цифровий регулятор безперервної дії (7В). Цей регулятор порівнює фактичне розрідження із заданим значенням і формує керуючий сигнал, який передається на виконавчий механізм (7Г). Виконавчий механізм (7Г) регулює положення шибера або прямого апарату димососа, тим самим змінюючи кількість димових газів, що видаляються з печі, та забезпечуючи оптимальний рівень розрідження. Це дозволяє

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

підтримувати стабільну роботу печі, оптимізувати процес горіння та забезпечити безпеку експлуатації установки.

Таким чином, комплексна система автоматичного керування трубчастою піччю, що включає різноманітні датчики (температури, витрати, тиску, полум'я), регулятори (співвідношення, температури, розрідження) та виконавчі механізми, забезпечує не тільки стабільну та безпечну роботу самої печі, але й оптимізує процеси горіння палива, контролює ключові технологічні параметри та відповідає високим вимогам промислової безпеки. Ця багатоконтурна система автоматизації демонструє взаємозв'язок різних підсистем керування. Ефективність роботи одного контуру, наприклад, контуру регулювання температури нагріваемого продукту, безпосередньо залежить від належного функціонування інших контурів, таких як система підтримки оптимального співвідношення паливо/повітря, що забезпечує стабільне та ефективне горіння. Якщо, наприклад, співвідношення паливо/повітря неоптимальне, то навіть при коректній роботі регулятора температури (який правильно змінює подачу палива) бажана температура продукту може не досягатися, або процес горіння буде неекономічним (неповне згорання) чи екологічно шкідливим. Аналогічно, розрідження в топці, контрольоване окремим контуром, впливає на тягу та ефективність видалення продуктів згорання, що опосередковано впливає на умови горіння та теплопередачу. Система безпеки контролю полум'я, хоча й є критично важливою, при своєму спрацьовуванні (наприклад, припиненні подачі палива) безпосередньо вплине на всі інші параметри процесу. Отже, ці контури керування не є повністю незалежними; зміна параметрів в одному контурі може викликати збурення або вимагати коригувальних дій в інших. Це вказує на те, що для досягнення найкращої загальної продуктивності та ефективності роботи трубчастої печі може знадобитися не просто набір ізольованих регуляторів, а інтегрований підхід до керування, можливо, із застосуванням багатозв'язних (МІМО) систем керування, де контролер враховує взаємний вплив між різними керованими змінними та керуючими впливами. Це створює передумови для

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

розгляду більш досконалих стратегій керування, таких як MPC, які природно підходять для багатозв'язних об'єктів.

Висновки до розділу

Аналіз процесу ректифікації дав змогу оцінити, як різні технологічні параметри впливають на якість кінцевого продукту. На підставі цього аналізу, в якості центрального об'єкта управління була ідентифікована трубчаста піч. Рішення про вибір того чи іншого елемента для керування безпосередньо залежить від його впливу на загальну продуктивність, рівень безпеки та економічну вигоду виробництва. У випадку з трубчастими печами або іншими критично важливими компонентами виробничої лінії, необхідно ретельно вивчити їхню здатність до точного регулювання ключових показників, таких як температурний режим, робочий тиск, об'єм витрат палива та інші життєво важливі параметри.

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРОВАНОГО ОБ'ЄКТУ

3.1 Постановка завдання на моделювання

Дослідження складних теплофізичних процесів, що відбуваються під час спалювання газу та нагрівання технологічних потоків у трубчастій печі, є фундаментальним та надзвичайно важливим етапом на шляху до ефективного налаштування режимів її роботи та подальшої оптимізації з точки зору енергоефективності та продуктивності. Для досягнення цієї мети необхідно розробити адекватну математичну модель, яка б з достатньою точністю описувала динаміку цих процесів. У контексті даного дослідження, як зазначено у вихідному документі, розглядається процес нагріву топкового газу до температури близько 710 °С (що відповідає приблизно 980 К), з подальшим його змішуванням з парами етилбензолу (цей аспект, ймовірно, стосується конкретного технологічного процесу, для якого використовується піч, наприклад, дегідрування етилбензолу, а не безпосередньо риформінгу, але принципи моделювання печі залишаються схожими). Першочергово, топковий газ (паливо) подається до системи трубопроводів, де він може змішуватися з первинним повітрям для горіння, після чого ця суміш направляється до пальників печі для попереднього підігріву перед безпосередньою подачею в зону горіння. Трубчасті печі, завдяки своїй конструкції, що забезпечує ефективний процес теплообміну та можливість досягнення високих температур, є основним типом нагрівального обладнання, що використовується на багатьох промислових підприємствах у нафтопереробній та хімічній галузях.

На рисунку 3.1 представлена розрахункова схема досліджуваної трубчастої печі, яка, для цілей моделювання, спрощено розглядається як система, що складається з двох основних умовних ємностей (або зон). Перша ємність (позначена як I) представляє зону, де відбувається основний процес нагріву цільового продукту, наприклад, перегрів водяної пари. Друга ємність (позначена як II) моделює зону, де відбувається нагрівання повітря, що подається на пальники, за рахунок тепла відхідних димових газів (тобто, конвекційна секція

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Частина цього потоку гарячих газів потім подається до ємності (II) (конвекційна секція) для подальшого підігріву повітря, яке потім використовується для горіння в пальниках. Це дозволяє утилізувати частину тепла відхідних газів та підвищити загальний ККД печі. Вихідний потік топкових газів після проходження ємності (II) має вже значно нижчу температуру, близько 330 °С (приблизно 600 К), і далі рухається по технологічному ланцюгу, наприклад, до випарника етилбензолу або в димову трубу.

Основною метою керування цим процесом нагріву є отримання та підтримання заданої температури перегрітої пари (або іншого цільового продукту), позначеної як $\Theta_{п.п.}$. Тому саме ця температура виступатиме в якості основної керованої (регульованої) величини. В якості основного керуючого сигналу (впливу), за допомогою якого здійснюється регулювання температури, буде використовуватися витрата газового палива ($G_{г}$), яка безпосередньо визначає інтенсивність процесу горіння та кількість тепла, що виділяється в топці, а отже, і температуру в процесі нагріву. Можливим значущим збуренням у цій системі може бути зміна витрати пари на вході в піч ($G_{п}$), оскільки це безпосередньо впливає на теплове навантаження на піч, процеси теплообміну та, як наслідок, на кінцеву температуру пари. Математичне моделювання, як зазначено, буде зосереджено на ємності (I), в рамках якого будуть складатися та аналізуватися рівняння теплових балансів. Передбачається розробка моделі типу МІМО (Multiple Input-Multiple Output, система з декількома входами та декількома виходами), що дозволить більш точно та комплексно описувати поведінку об'єкта та в подальшому розробляти ефективні алгоритми регулювання параметрів процесу.

3.2 Моделювання статичного режиму трубчастої печі

Моделювання статичного режиму роботи трубчастої печі та подальша ідентифікація об'єкта керування з використанням інструментів нейронних мереж є важливими та послідовними етапами в процесі розробки та оптимізації систем управління складними технологічними об'єктами. Статичне моделювання

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

дозволяє описати поведінку об'єкта в умовах, коли всі його параметри досягли усталених значень і не змінюються з часом, тобто при постійній температурі, тиску, витратах матеріальних потоків тощо. У даному конкретному випадку, аналіз статичного режиму є важливим для отримання базової, фундаментальної характеристики об'єкта керування. Ця характеристика дозволяє визначити, як саме змінюється основна керована величина (наприклад, температура перегрітої пари) в залежності від зміни основного керуючого параметра (наприклад, витрати палива) за умови, що всі інші параметри залишаються незмінними. Така статична залежність є основою для розуміння чутливості процесу до керуючих впливів та для попереднього налаштування регуляторів.

Для опису статичного режиму складаються рівняння матеріального та теплового балансів для кожної з умовних акумулюючих ємностей трубчастої печі, відповідно до прийнятої технологічної схеми нагрівання (зображеної на рисунку 3.1).

Зіставимо теплові баланси відповідно для акумулюючих ємностей трубчастої печі відносно схеми технологічного процесу нагрівання, де $i_{п.}$, $i_{п.п.}$ – ентальпія пари на вході та виході:

$$i_{п.} = r + c_{п.} \cdot \theta_{п.},$$

$$i_{п.п.} = r + c_{п.п.} \cdot \theta_{п.п.}$$

Тепловий баланс для акумулюючої ємності в якій перегрівається водяна пара:

$$G_{п.} \cdot i_{п.} - G_{п.п.} \cdot i_{п.п.} + k_1 \cdot S_1 \cdot \left(\frac{(\theta_{т.г.1} + \theta_{т.г.2})}{2} - \frac{(\theta_{п.п.} + \theta_{п.})}{2} \right) = 0.$$

(3.1)

Тепловий баланс для акумулюючої ємності утворених в результаті згорання палива топкових газів в зоні I:

$$(G_{г.} + G_{п.н.}) \cdot c_{т.г.} \cdot \theta_{т.г.1} - (G_{г.} + G_{п.н.}) \cdot c_{т.г.} \cdot \theta_{т.г.2} - k_1 \cdot S_1 \cdot \left(\frac{(\theta_{т.г.1} + \theta_{т.г.2})}{2} - \frac{(\theta_{п.п.} + \theta_{п.})}{2} \right) = 0$$

(3.2)

Тепловий баланс для ємності в якій підігрівається атмосферне повітря (зона II):

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$G_{п.х.} \cdot c_{пов.} \cdot \theta_{1.п.} - G_{п.н.} \cdot c_{пов.} \cdot \theta_{2.п.} + k_2 \cdot S_2 \cdot \left(\theta_{т.г.2} - \frac{(\theta_{1.п.} + \theta_{2.п.})}{2} \right) = 0. \quad (3.3)$$

Тепловий баланс для акумулюючої ємності охолоджених топкових газів (зона II):

$$G_{т.г.} \cdot c_{т.г.} \cdot \theta_{т.г.2} - k_2 \cdot S_2 \cdot \left(\theta_{т.г.2} - \frac{(\theta_{1.п.} + \theta_{2.п.})}{2} \right) - \theta_{т.г.3} \cdot G_{т.г.} \cdot c_{т.г.} = 0. \quad (3.4)$$

Рівняння статичної характеристики по цільовому каналу керування «витрата газу → температура перегрітої водяної пари». При розрахунку статичного режиму приміняємо припущення про те що об'єм сумішей які протікають в печі незмінний і збурення процесу відсутні.

$$\theta_{п.п.} = G_{п.} \cdot r + G_{п.} \cdot c_{п.} \cdot \theta_{п.} - G_{п.п.} \cdot r + (G_{г.} + G_{п.н.}) \cdot c_{т.г.} \cdot \theta_{т.г.1} - (G_{г.} + G_{п.н.}) \cdot \frac{c_{т.г.} \cdot \theta_{т.г.2}}{G_{п.п.} \cdot c_{п.п.}} \quad (3.5)$$

Рівняння статички у чисельному вигляді:

$$\theta_{п.п.}(G_{г.}) = 71,8266 \cdot G_{г.} + 857,863269.$$

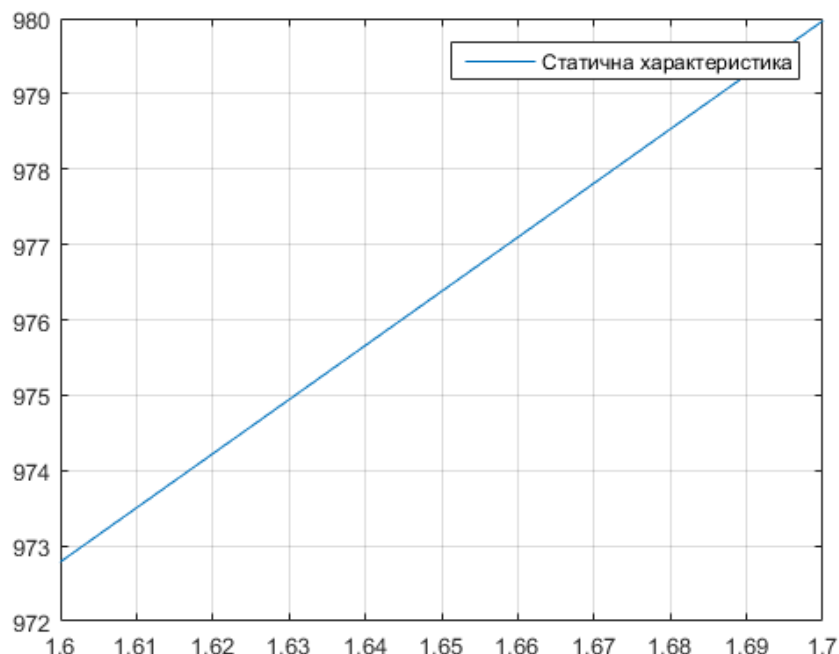


Рисунок 3.2 - Статична характеристика процесу за каналом керування

Графічне представлення цієї статичної характеристики (рисунок 3.2) показує, що в робочому діапазоні зміни витрати газу залежність температури

						ДП.АКПЗ-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			36

перегрітої пари від витрати газу є практично лінійною. Хоча статична залежність між витратою газу та кінцевою температурою може бути апроксимована лінійною функцією в певному діапазоні, сам фізичний процес горіння, теплопередачі (особливо радіаційної, що залежить від четвертого ступеня температури) та руху рідин і газів є суттєво нелінійним, особливо в динамічних перехідних режимах або при значних змінах теплового навантаження. Використання нейронної мережі для подальшої ідентифікації об'єкта, навіть якщо вона навчається на даних, отриманих з лінійної статичної характеристики, все ж є кроком до потенційного врахування цих глибинних нелінійностей, які можуть бути не очевидні з простого аналізу статичної кривої. Нейронні мережі, завдяки своїй структурі з нелінійними функціями активації, є універсальними апроксиматорами і здатні моделювати складні нелінійні залежності, що робить їх застосування виправданим навіть у таких випадках.

Ідентифікація об'єкта керування за допомогою нейронної мережі надає можливість створити більш точну та гнучку математичну модель, здатну адекватно описувати складні, часто нелінійні, взаємозв'язки, які виникають у реальних технологічних процесах. Нейронні мережі, на відміну від класичних аналітичних моделей, не вимагають глибоких апріорних знань про точну структуру фізико-хімічних процесів, а навчаються виявляти ці залежності безпосередньо з експериментальних або розрахункових даних. Вони здатні враховувати широкий спектр вхідних параметрів та їхні взаємні впливи, що не завжди можливо описати за допомогою традиційних математичних методів. Для проведення ідентифікації об'єкта за допомогою нейронної мережі необхідно зібрати репрезентативний набір вхідних та відповідних їм вихідних даних. Ці дані потім використовуються для навчання нейронної мережі, в процесі якого відбувається налаштування її внутрішніх параметрів (вагових коефіцієнтів) таким чином, щоб мінімізувати розбіжність між прогнозованими мережею виходами та реальними значеннями. Результатом є навчена нейромережева модель, яка може використовуватися для прогнозування поведінки об'єкта та для розробки систем оптимального керування.

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

В якості базової функції для генерації навчальних даних була обрана статична характеристика, отримана раніше аналітично: $\theta_{п.п.}(Gг)=71,8266 \cdot Gг + 857,863269$. Тут керованою величиною є температура перегрітої пари ($\theta_{п.п.}$), а керуючим впливом – витрата газового палива ($Gг$). Для перенесення цієї залежності в середовище MATLAB спочатку встановлюється діапазон можливих значень керуючого впливу (витрати газу). Потім, на основі цих значень, розраховуються відповідні значення керованої величини (температури пари). Щоб наблизити ці теоретичні дані до реальних умов, в яких завжди присутні випадкові флуктуації та похибки вимірювань, до розрахованих значень температури додається штучний шум (похибка). Отримана таким чином "зашумлена" статична характеристика (представлена графічно на рисунку 3.3) використовується як набір даних для навчання нейронної мережі.

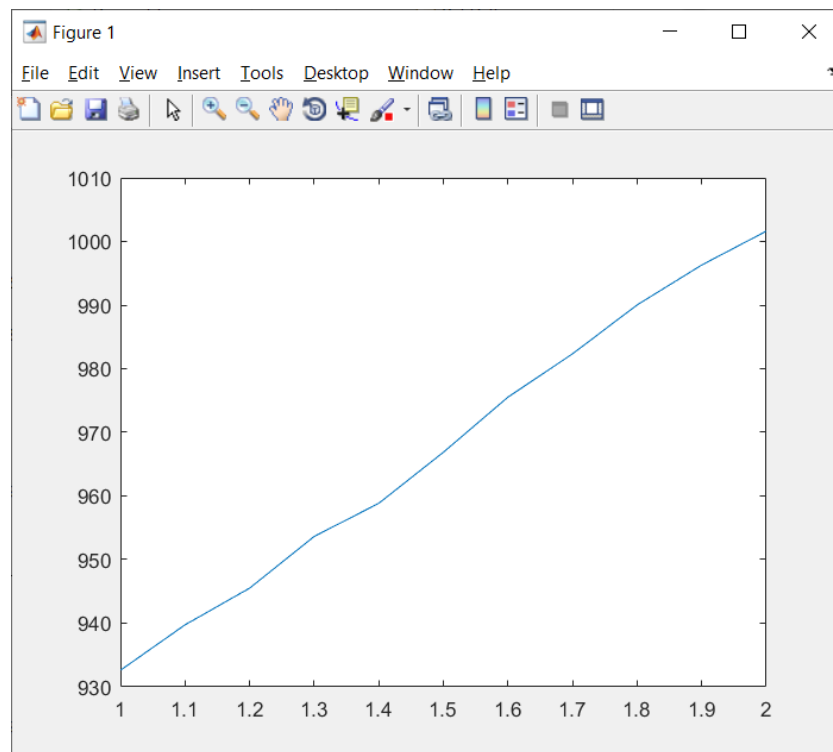


Рисунок 3.3 - Статична характеристика процесу нагрівання з шумами

Рішення використовувати статичну характеристику, отриману з рівнянь теплових балансів, як основу для навчання нейронної мережі, а потім штучно додавати до неї шум, є досить прагматичним підходом, особливо в умовах, коли отримання великого обсягу реальних експериментальних даних з промислового

об'єкта може бути ускладненим або дорогим. Однак, важливо усвідомлювати, що такий підхід також накладає певні обмеження. Якість та адекватність отриманої нейромережевої моделі будуть сильно залежати від точності початкової фізичної моделі (тобто, наскільки добре рівняння теплових балансів описують реальний процес) та від того, наскільки адекватно обрана модель шуму відображає реальні збурення та похибки вимірювань. Якщо початкова фізична модель має суттєві неточності або не враховує якісь важливі фізичні ефекти, ці неточності неминуче будуть "успадковані" нейронною мережею, навіть якщо вона ідеально апроксимує навчальні дані. Аналогічно, якщо структура або статистичні характеристики реального шуму відрізняються від модельованого, нейромережева модель може неадекватно реагувати на реальні збурення в процесі експлуатації. Це може обмежувати здатність навченої моделі до узагальнення, тобто її спроможність точно прогнозувати поведінку об'єкта в режимах роботи, що суттєво відрізняються від тих, які були представлені в навчальній вибірці, або в умовах динамічних змін. Тому, хоча нейронна мережа може демонструвати високу точність на навчальних даних, її продуктивність на реальному промисловому об'єкті, особливо в динамічних режимах або при значних змінах умов експлуатації, може виявитися гіршою, якщо фундаментальна модель або модель шуму були неповними чи неадекватними. Це підкреслює надзвичайну важливість ретельної валідації розробленої моделі на якомога ширшому діапазоні реальних експлуатаційних даних, якщо така можливість існує.

Процес створення та навчання нейронної мережі здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного додатку nntool в середовищі MATLAB. Спочатку підготовлені дані (пари значень "витрата газу – температура пари") завантажуються в цей інструмент (вікно завантаження даних показано на рисунку 3.4). Потім створюється сама нейронна мережа; її структура, що включає кількість шарів, кількість нейронів у кожному шарі та типи функцій активації, може бути налаштована користувачем (загальний вигляд вікна створеної нейронної мережі представлений на рисунку 3.5, а вікно перегляду її детальної структури – на рисунку 3.6).

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

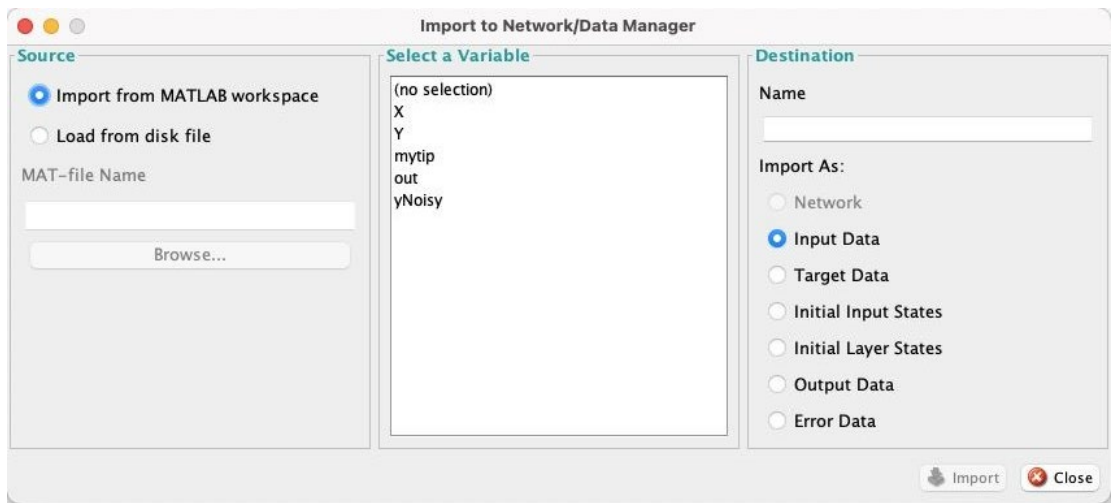


Рисунок 3.4 - Вікно завантаження даних в *nntool*

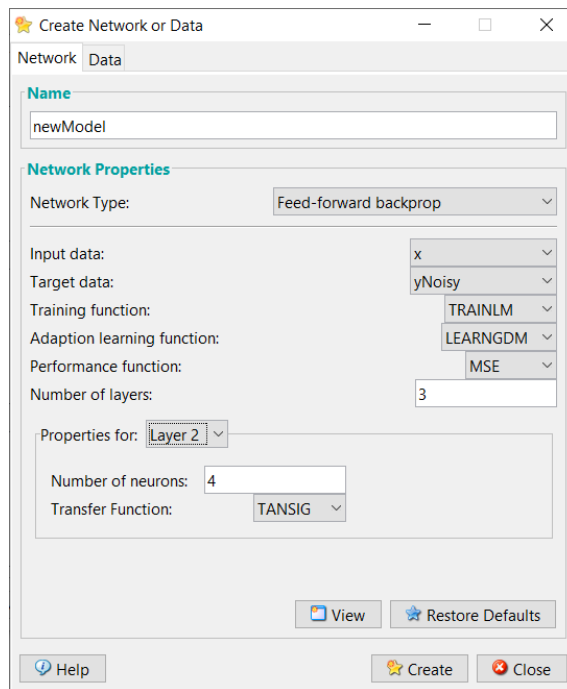


Рисунок 3.5 - Вікно створеної нейронної мережі

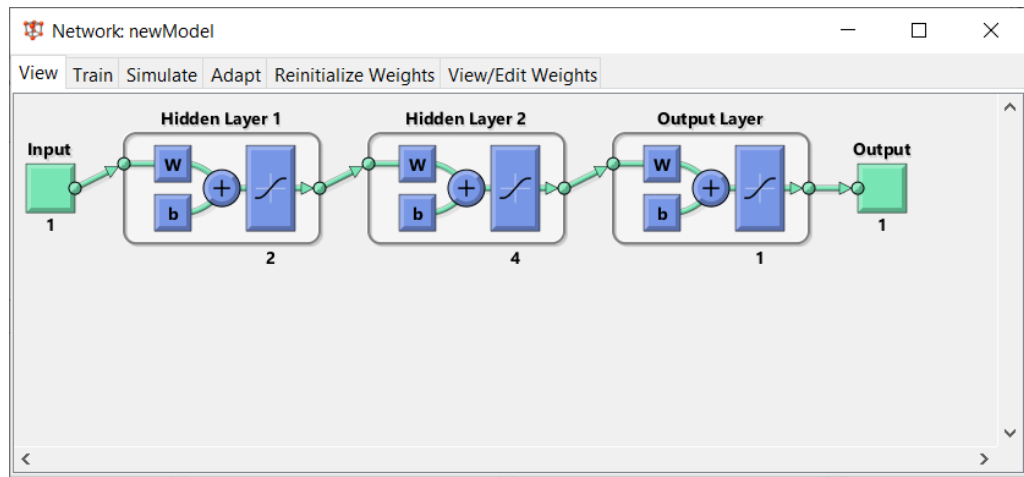


Рисунок 3.6 - Вікно перегляду нейронної мережі

Відкривши вкладку навчання ми можемо обрати вхідні та вихідні дані, а також додаткові параметри і розпочати навчання нейронної мережі.

Навчання нейронної мережі є критично важливим етапом, який полягає в ітеративному налаштуванні вагових коефіцієнтів зв'язків між нейронами таким чином, щоб мінімізувати функцію похибки (наприклад, середньоквадратичну помилку) між вихідними сигналами мережі та цільовими значеннями з навчальної вибірки. У вкладці навчання (рисунок 3.7) обираються вхідні та вихідні дані, а також можуть бути налаштовані різні параметри алгоритму навчання (наприклад, швидкість навчання, критерії зупинки).

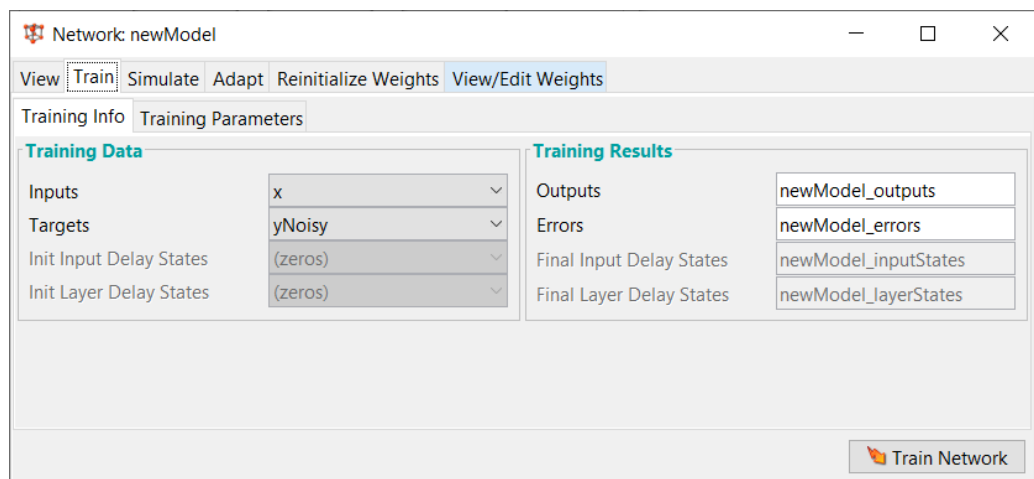


Рисунок 3.7 - Вкладка навчання нейронної мережі

Зазвичай використовується алгоритм зворотного поширення помилки. Після запуску процесу навчання (вікно навчання показано на рисунку 3.8), можна спостерігати за його перебігом та аналізувати якість навчання за допомогою різних графіків.

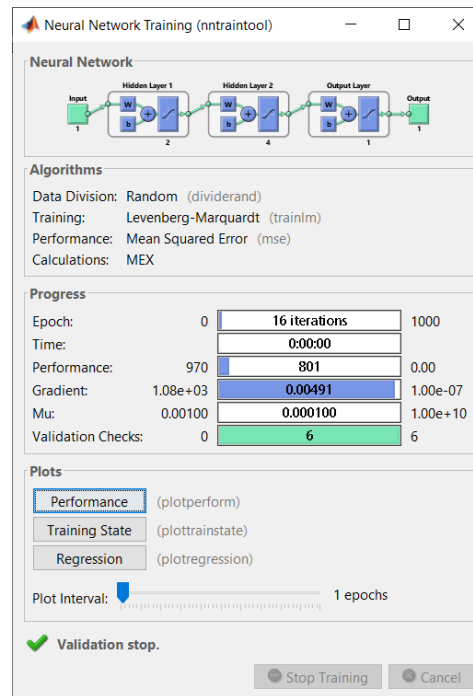


Рисунок 3.8 - Вікно навчання нейронної мережі

Наприклад, графік середньоквадратичного відхилення на кожній епосі навчання (рисунок 3.9) показує, як зменшується помилка в процесі навчання. Графіки, що відповідають якості оптимізації коефіцієнтів (рисунок 3.10), та графік регресії між прогнозованими та цільовими значеннями на різних вибірках (тренувальній, валідаційній, тестовій) (рисунок 3.11) дозволяють оцінити, наскільки добре мережа навчилася узагальнювати дані та чи не відбулося перенавчання.

Після завершення навчання нейронної мережі її можна використовувати для симуляції, тобто для прогнозування вихідних значень на основі нових вхідних даних. Подаючи на вхід навченій мережі ті ж самі значення витрати газу, що використовувалися для навчання (або нові значення з того ж діапазону), отримують набір значень температури пари, спрогнозованих нейронною моделлю.

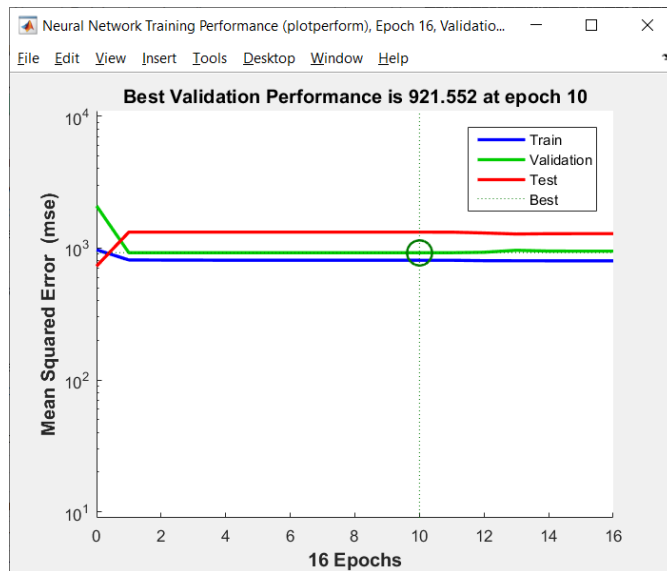


Рисунок 3.9 - Графік середньоквадратичного відхилення на кожній епосі навчання

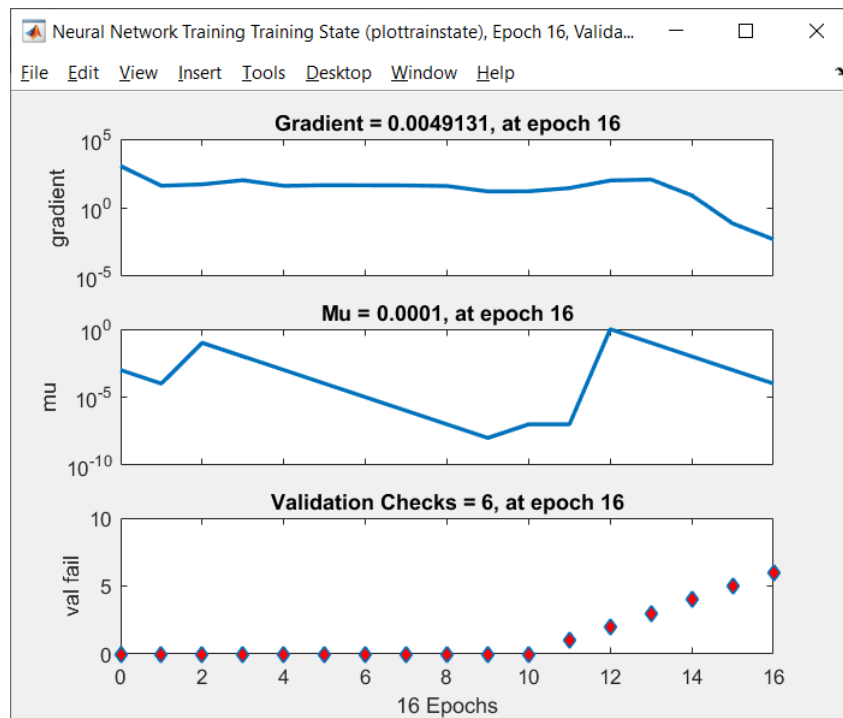


Рисунок 3.10 - Графіки, що відповідають якості оптимізації коефіцієнтів

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

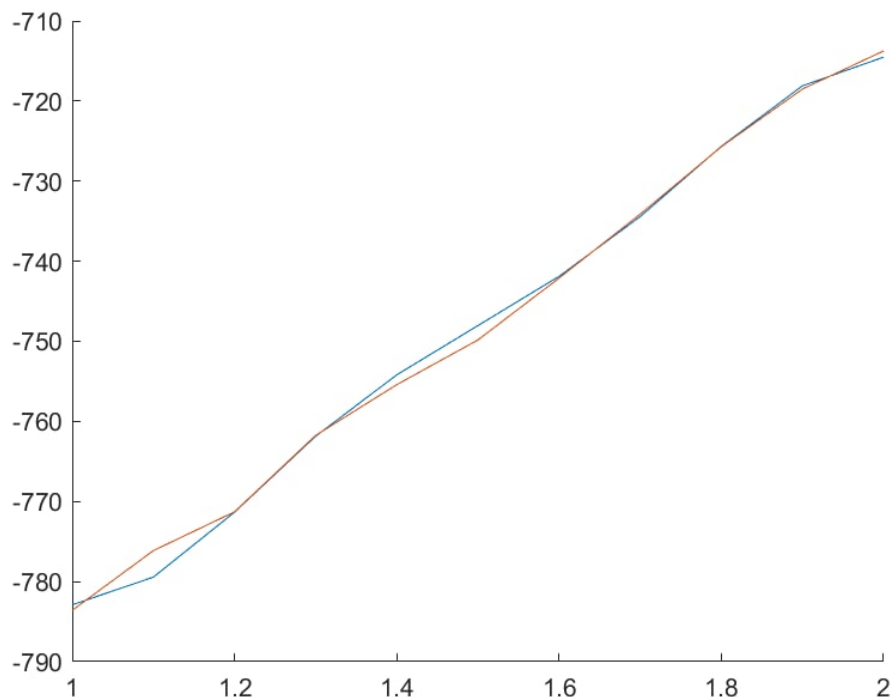


Рисунок 3.12 - Порівняльний графік експериментальних даних і апроксимованих нейронною мережею

В результаті проведеного математичного моделювання та аналізу процесу роботи трубчастої печі вдалося ідентифікувати основні фактори та залежності, які визначають ефективність її функціонування, зокрема, взаємозв'язок між температурою перегрітої пари та витратою газового палива. Поставлені задачі з моделювання статичного режиму та ідентифікації об'єкта з використанням нейронної мережі були успішно розв'язані. Застосування нейронної мережі для ідентифікації динаміки процесу дозволило отримати математичну модель з прийнятною для практичних застосувань точністю. Розроблені таким чином математичні моделі можуть бути ефективно використані як основа для синтезу систем автоматичного керування та для оптимізації режимів роботи печі на практиці.

Висновки до розділу

Порівняння отриманих за допомогою моделі результатів з експериментальними (або квазіекспериментальними) даними та проведений аналіз продемонстрували хорошу узгодженість між прогнозованими та реальними

значеннями. Тим не менш, для досягнення ще вищої точності, особливо в контексті складних наукових обчислень або при роботі з процесами, що характеризуються значною нелінійністю та нестационарністю, можливе подальше покращення розробленої моделі. Це може бути досягнуто шляхом більш детального коригування структури нейронної мережі, використання більш досконалих алгоритмів навчання, а також залучення більшого обсягу репрезентативних експериментальних даних для її навчання та валідації. Застосування сучасних методів, таких як нейронні мережі, у задачах моделювання та оптимізації складних технологічних процесів відкриває значні можливості для підвищення точності прогнозів та створення більш ефективних, адаптивних та робастних систем управління, що є надзвичайно важливим як для промислових застосувань, так і для фундаментальних наукових досліджень.

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

4 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

4.1 Стратегії керування MPC та нечіткої логіки для трубчастої печі

Прогностичне керування за моделлю, відоме як Model Predictive Control (MPC), є одним з найсучасніших, найпотужніших та найефективніших методів розширеного управління технологічними процесами. Цей підхід дозволяє здійснювати оптимальне керування в умовах наявності різноманітних обмежень на керовані змінні, керуючі впливи та їхні швидкості зміни, що робить його надзвичайно популярним та затребуваним у багатьох галузях промисловості. Зокрема, MPC широко застосовується в нафтопереробній та хімічній промисловості для управління складними багатостадійними процесами, а також знаходить застосування в таких сферах, як системи балансування енергетичних мереж, робототехніка та багато інших. Основною концептуальною перевагою MPC є його здатність розраховувати оптимальні керуючі впливи не лише для поточного моменту часу, але й для певного майбутнього часового інтервалу, так званого горизонту прогнозування, при цьому явно враховуючи динаміку процесу, описану математичною моделлю, та накладені обмеження. Це досягається шляхом багаторазового розв'язання задачі оптимізації на кожному кроці дискретизації часу: на основі поточного стану системи та моделі розраховується оптимальна послідовність майбутніх керуючих впливів, але в систему подається лише перший елемент цієї послідовності; на наступному кроці процедура повторюється з урахуванням нового виміряного стану системи. Такий підхід "ковзного горизонту" є суттєвою відмінністю MPC від, наприклад, класичного лінійно-квадратичного регулятора (LQR), який розраховує статичний закон керування і не має такої гнучкості та здатності адаптуватися до змін у процесі або моделі.

Однією з найважливіших особливостей та переваг MPC є його здатність прогнозувати майбутню поведінку керованого об'єкта та на основі цього прогнозу здійснювати відповідні випереджувальні коригувальні дії. Це робить MPC значно

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

ефективнішим у порівнянні з традиційними ПДД-регуляторами, які реагують лише на вже виниклу помилку регулювання і не мають вбудованих можливостей прогнозування. Завдяки предиктивній природі, МРС може краще справлятися з процесами, що мають значні транспортні запізнення, немінімально-фазові характеристики або складну нелінійну динаміку. МРС, як правило, реалізується в цифровому вигляді з використанням обчислювальної техніки, хоча останнім часом з'являються дослідження, спрямовані на розробку спеціалізованих аналогових або гібридних схем для реалізації МРС, здатних забезпечити значно швидший час відгуку, що може бути критичним для дуже швидких процесів.

Для цілей налаштування МРС-регулятора в рамках даної роботи, як зазначено у вихідному документі, було вирішено використати спрощену математичну модель об'єкта керування (трубчастої печі). Принциповим спрощенням є припущення про відсутність значущих зворотних зв'язків між різними входами та виходами системи, тобто розглядається декомпозиція багатозв'язної системи на кілька незалежних або слабо зв'язаних каналів керування. Таке рішення обумовлене тим, що в оригінальній, більш повній моделі трубчастої печі, наявність суттєвих перехресних зв'язків між каналами та виражених нелінійних залежностей значно ускладнює процедуру аналітичного синтезу та практичного налаштування параметрів МРС-регулятора, особливо якщо використовуються лінійні варіанти МРС. Основною метою налаштування МРС-регулятора в даному випадку є пошук таких оптимальних значень його параметрів (горизонти прогнозування та керування, вагові коефіцієнти у функції вартості), які б забезпечували високу якість процесу нагрівання в апараті, тобто швидке досягнення заданої температури, мінімальне перерегулювання, ефективне придушення збурень та дотримання всіх технологічних обмежень.

Спрощення моделі для МРС-регулятора шляхом припущення про "відсутність зворотних зв'язків між входами та виходами системи" є певним компромісом між складністю розробки та налаштування регулятора та потенційною точністю і робастністю системи керування. Хоча такий підхід дійсно може значно спростити дизайн МРС, особливо якщо використовуються

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стандартні лінійні алгоритми, ігнорування існуючих перехресних взаємозв'язків, які, ймовірно, присутні в реальному багатозв'язному об'єкті (МІМО), яким є трубчаста піч, може призвести до субоптимальної роботи або, в гіршому випадку, навіть до втрати стійкості системи керування, якщо ці взаємозв'язки є сильними та неврахованими. Трубчаста піч, як об'єкт з кількома вхідними змінними (наприклад, витрата палива, витрата повітря, витрата нагріваємої сировини) та кількома вихідними змінними (наприклад, температура продукту на виході, температура димових газів, концентрація O₂ у відхідних газах), за своєю природою є системою з внутрішніми перехресними зв'язками. Наприклад, зміна витрати палива вплине не тільки на температуру нагріваємого продукту, але й на температуру топкових газів та склад продуктів згоряння. Зміна витрати сировини, що нагрівається, вплине на її кінцеву температуру, а також може опосередковано вплинути на температуру топкових газів через зміну загального теплового навантаження на піч. Ігнорування цих зв'язків у моделі, що використовується для синтезу МРС, означає, що контролер може не враховувати повний вплив своїх керуючих дій на всі керовані змінні одночасно, або неадекватно реагувати на збурення, що впливають на кілька каналів. Це може призвести до того, що МРС, намагаючись керувати однією змінною, ненавмисно викличе небажані зміни в іншій змінній, або його реакція на збурення буде менш ефективною та повільнішою, ніж могла б бути при використанні повної МІМО-моделі. Тому, хоча такий підхід зі спрощеною моделлю може бути виправданим на початковому етапі дослідження або для об'єктів зі слабкими перехресними зв'язками, важливо усвідомлювати його потенційні обмеження та необхідність ретельної валідації отриманого регулятора на більш повній моделі або на реальному об'єкті. У разі незадовільних результатів може виникнути потреба у розробці та використанні більш складних МІМО МРС контролерів, які явно враховують взаємозв'язки в системі.

Оскільки математична модель трубчастої печі, розроблена в попередньому розділі, представляє собою об'єкт типу МІМО (з двома основними вхідними параметрами – витрата палива та витрата пари, та двома вихідними – температура

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перегрітої пари та температура топкових газів), оптимальним вибором для розробки системи керування є саме застосування MPC-регулятора, який за своєю природою дуже ефективно працює з такими багатозв'язними системами. Додатковими перевагами MPC, що роблять його привабливим для даного завдання, є його здатність явно враховувати обмеження на вхідні та вихідні змінні (наприклад, максимальна/мінімальна подача палива, допустимий діапазон температур) та можливість вибору та налаштування критерію оптимізації (функції вартості) за допомогою вбудованих у програмне забезпечення методів, що надає додаткову гнучкість у процесі проектування та налаштування системи керування. Структура системи керування з MPC-регулятором, реалізована в середовищі моделювання Simulink, а також деталі її налаштування, представлені на рисунку 4.1.

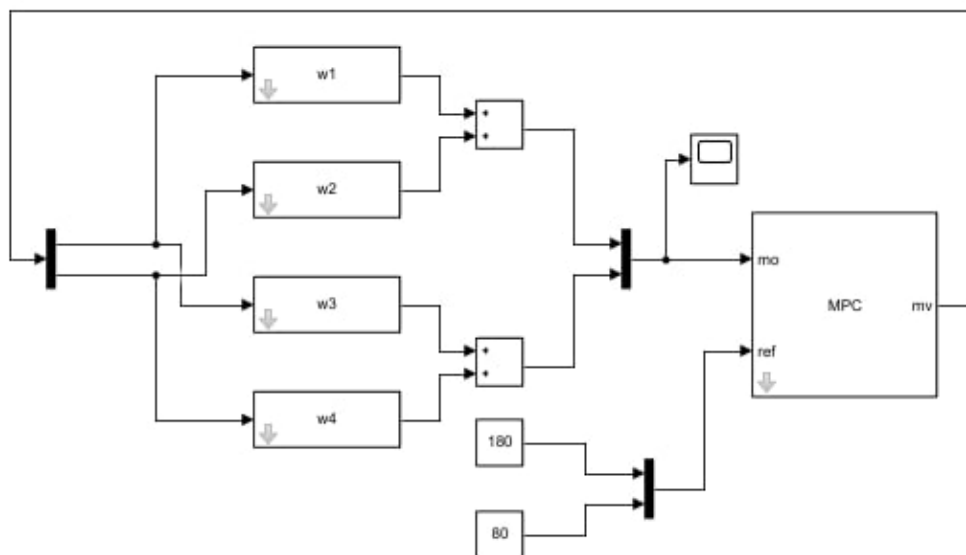


Рисунок 4.1 - Модель системи з MPC регулятором

Вхідними параметрами для MPC-блоку в цій структурі є математична модель об'єкта (трубчастої печі), розроблена в розділі 3, та бажані (задані) значення вихідних параметрів (наприклад, задана температура перегрітої пари), яких необхідно досягти та підтримувати в процесі керування. Вікно налаштувань MPC-регулятора (рисунок 4.2) дозволяє задавати параметри моделі, горизонти, обмеження та вагові коефіцієнти.

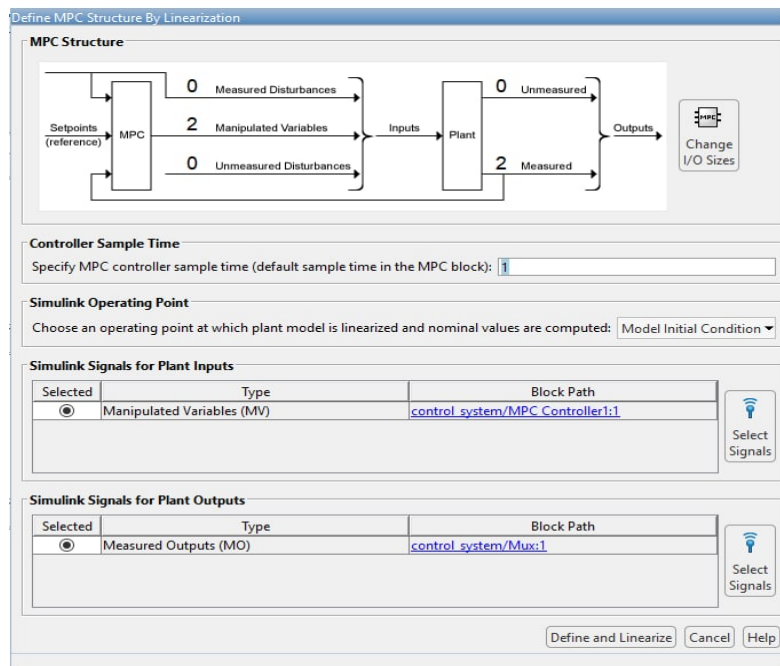


Рисунок 4.2 - Вікно налаштувань

Приклади вихідних сигналів MPC-регулятора (керуючих впливів) та реакції керованого об'єкта в дискретному та неперервному вигляді показані на рисунках 4.3, 4.4 та 4.5, демонструючи динаміку роботи системи керування.

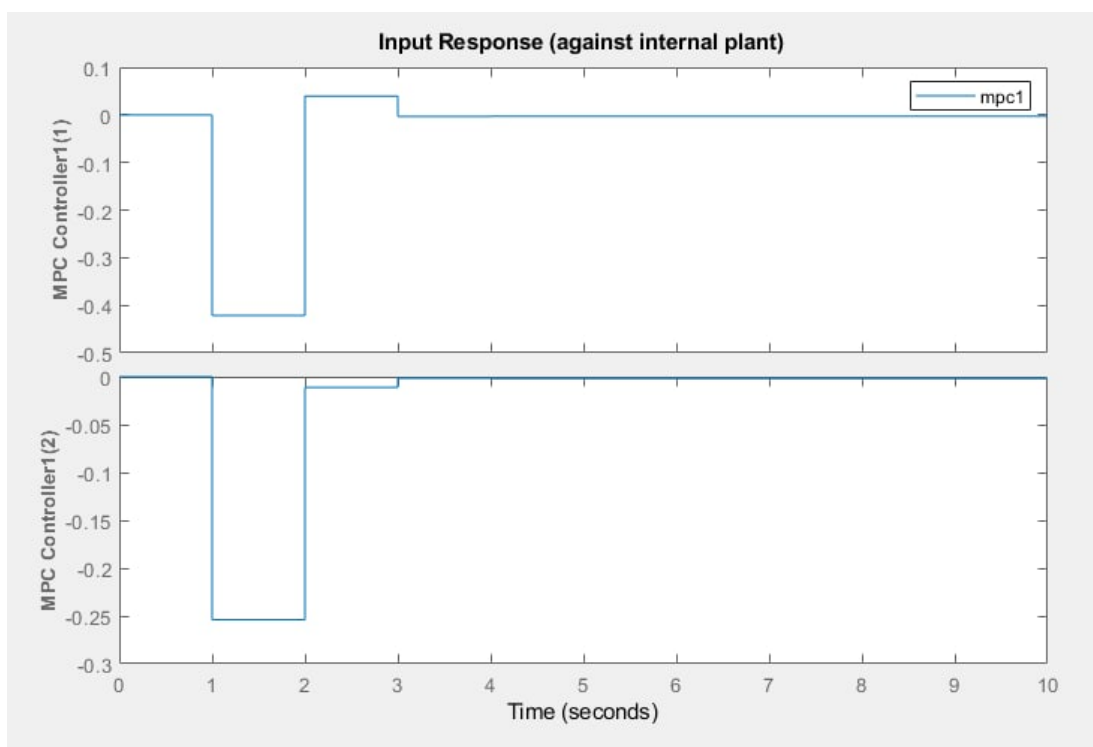


Рисунок 4.3 - Вихід MPC-регулятора в дискретному вигляді

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

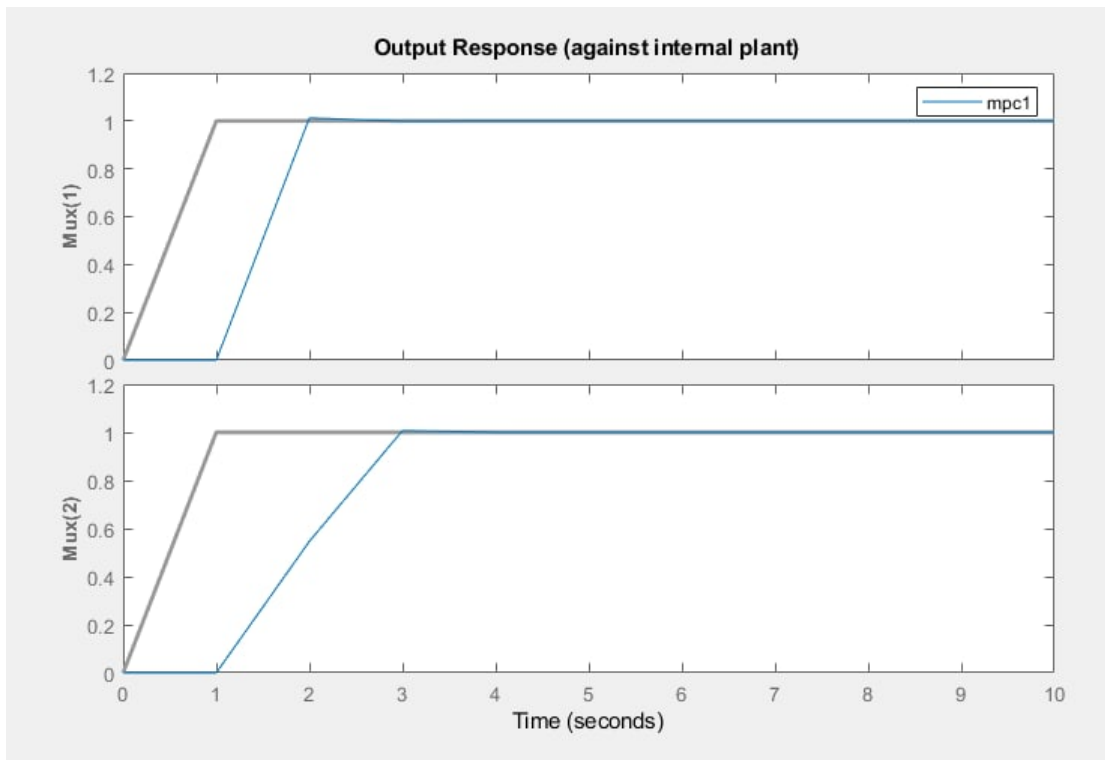


Рисунок 4.4 - Вихід МРС-регулятора

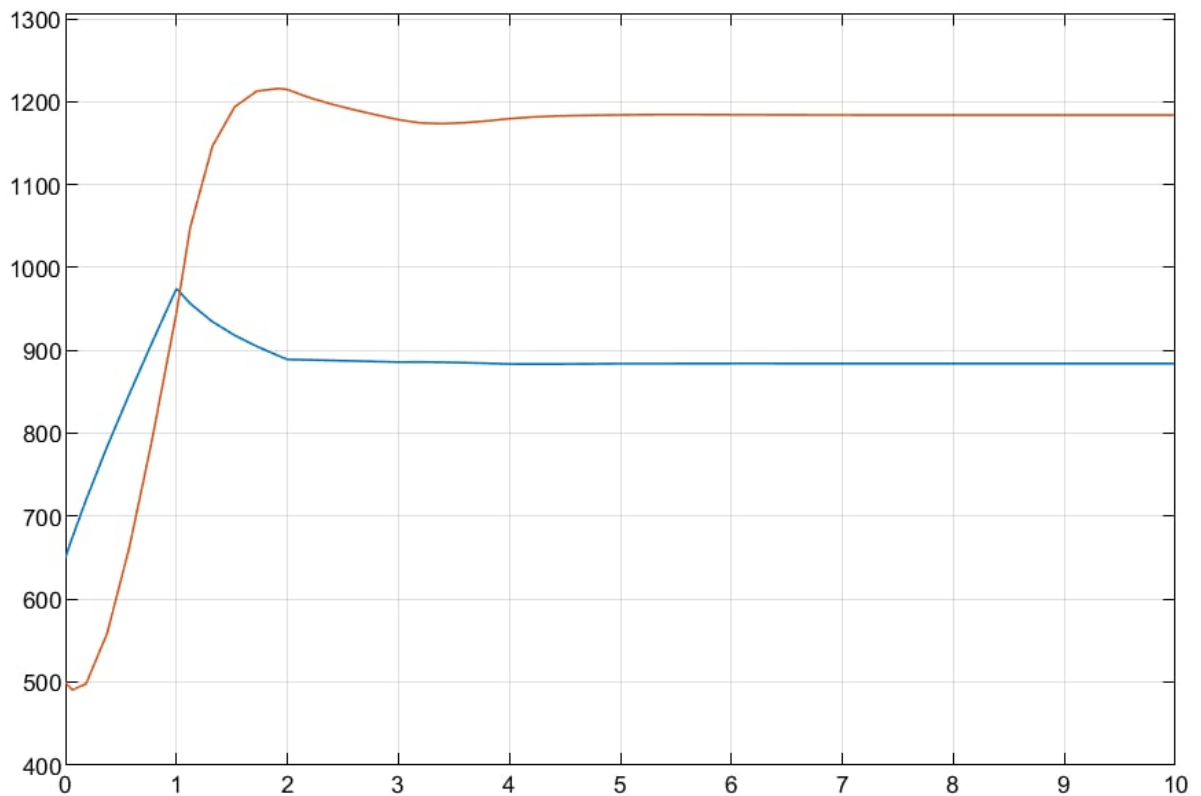


Рисунок 4.5 - Вихід МРС-регулятора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

4.2 Розробка системи керування об'єктом на базі Fuzzy Logic

Альтернативним підходом до створення інтелектуальної системи керування трубчастою піччю є розробка системи на основі нечіткої логіки (Fuzzy Logic Control, FLC). Цей підхід особливо ефективний для об'єктів, точну математичну модель яких складно отримати, або для систем, що характеризуються значною невизначеністю, нелінійністю та наявністю якісної, лінгвістичної інформації про їхню поведінку (наприклад, експертних знань операторів). З метою розробки такої нечіткої системи керування для трубчастої печі, в якості основи використовується математична модель, отримана в розділі 3, або якісне розуміння процесів, що в ній відбуваються. Першим кроком у проектуванні FLC є визначення вхідних та вихідних змінних системи. Для побудови бази знань нечіткої системи були визначені керуючі змінні (наприклад, витрата газового палива та витрата пари, якщо вона також є керованою) та керовані (регульовані) величини (наприклад, температура перегрітої пари та температура топкових газів).

Наступним важливим кроком є фазифікація цих змінних. Фазифікація – це процес перетворення чітких (кількісних) значень фізичних змінних у лінгвістичні змінні, які описуються набором лінгвістичних термів (наприклад, для температури: "критично мала", "мала", "нормальна", "велика", "критично велика"). Кожному лінгвістичному терму ставиться у відповідність функція належності, яка визначає ступінь, з яким конкретне чітке значення змінної належить до даного нечіткого терму.

критично мала
мала
<Температура перегрітої пари; нормальна ; $550 < S \leq 1100$
велика
критично велика

Основні функції належності:

$$\mu_{S_критично_мала} = \begin{cases} 1, s < 600 \\ \frac{660-s}{60}, 600 \leq s \leq 660 \\ 0, s > 660 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\mu_{S_Мала} = \left\{ \begin{array}{l} 0, s < 600 \text{ або } s > 800 \\ \frac{s-600}{100}, 600 \leq s < 700 \\ \frac{800-s}{100}, 700 \leq s \leq 800 \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

$$\mu_{S_Нормальна} = \left\{ \begin{array}{l} 0, s < 725 \text{ або } s > 975 \\ \frac{s-725}{125}, 725 \leq s < 850 \\ \frac{975-s}{125}, 850 \leq s \leq 975 \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

$$\mu_{S_Велика} = \left\{ \begin{array}{l} 0, s < 850 \text{ або } s > 1100 \\ \frac{s-850}{125}, 850 \leq s < 975 \\ \frac{1100-s}{125}, 975 \leq s \leq 1100 \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

$$\mu_{S_Критично_велика} = \left\{ \begin{array}{l} 1, s > 1100 \\ \frac{s-1000}{100}, 1000 \leq s \leq 1100 \\ 0, s < 1000 \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

Те ж саме зробимо і для керування (витрата газового палива):

критично низька

мала

⟨Витрата газового палива; нормальна ; $0 < U \leq 2.5$ ⟩

велика

критично низька

Опишемо функції належності для входу (витрата газового палива):

$$\mu_{U_Критично_низька} = \left\{ \begin{array}{l} 1, u < 0.5 \\ \frac{1-s}{0.5}, 0.5 \leq u \leq 1 \\ 0, s > 1 \end{array} \right\} \quad (4.6)$$

$$\mu_{U_Низька} = \left\{ \begin{array}{l} 0, u < 0.5 \text{ або } u > 1.7 \\ \frac{s-0.5}{0.6}, 0.5 \leq u < 1.1 \\ \frac{1.7-s}{0.6}, 1.1 \leq u \leq 1.7 \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

$$\mu_{U_Нормальна} = \left\{ \begin{array}{l} 0, u < 1.4 \text{ або } u > 2 \\ \frac{s-1.4}{0.3}, 1.4 \leq u < 1.7 \\ \frac{2-s}{0.3}, 1.7 \leq u \leq 2 \end{array} \right\} \quad (4.8)$$

$$\mu_{U_Висока} = \left\{ \begin{array}{l} 0, u < 1.7 \text{ або } u > 2.5 \\ \frac{s-1.7}{0.4}, 1.7 \leq u < 2.1 \\ \frac{2.5-s}{0.4}, 2.1 \leq u \leq 2.5 \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

$$\mu_{S_{\text{Критично_висока}}} = \begin{cases} 1, s > 2.1 \\ \frac{s-2.1}{0.4}, 2.1 \leq u \leq 2.5 \\ 0, s < 2.1 \end{cases} \quad (4.10)$$

На основі визначених лінгвістичних змінних та їхніх терм-множин формується ядро нечіткої системи керування – база знань. База знань складається з набору нечітких правил типу "ЯКЩО (умова) ТО (висновок)", які описують логіку прийняття рішень системою. Наприклад, правило може мати вигляд: "ЯКЩО Температура_пари Е Мала ТА Температура_газів Е Нормальна ТО Витрата_палива СЛІД Збільшити_значно". Ці правила можуть бути сформульовані на основі експертних знань технологів, аналізу експериментальних даних або на основі якісної моделі процесу. На рисунку 4.6 показано приклад сформованих нечітких правил керування. Для практичної реалізації цих правил та всієї нечіткої системи використовуються спеціалізовані інструменти, такі як Fuzzy Logic Toolbox, що вбудований у програмне середовище MATLAB.

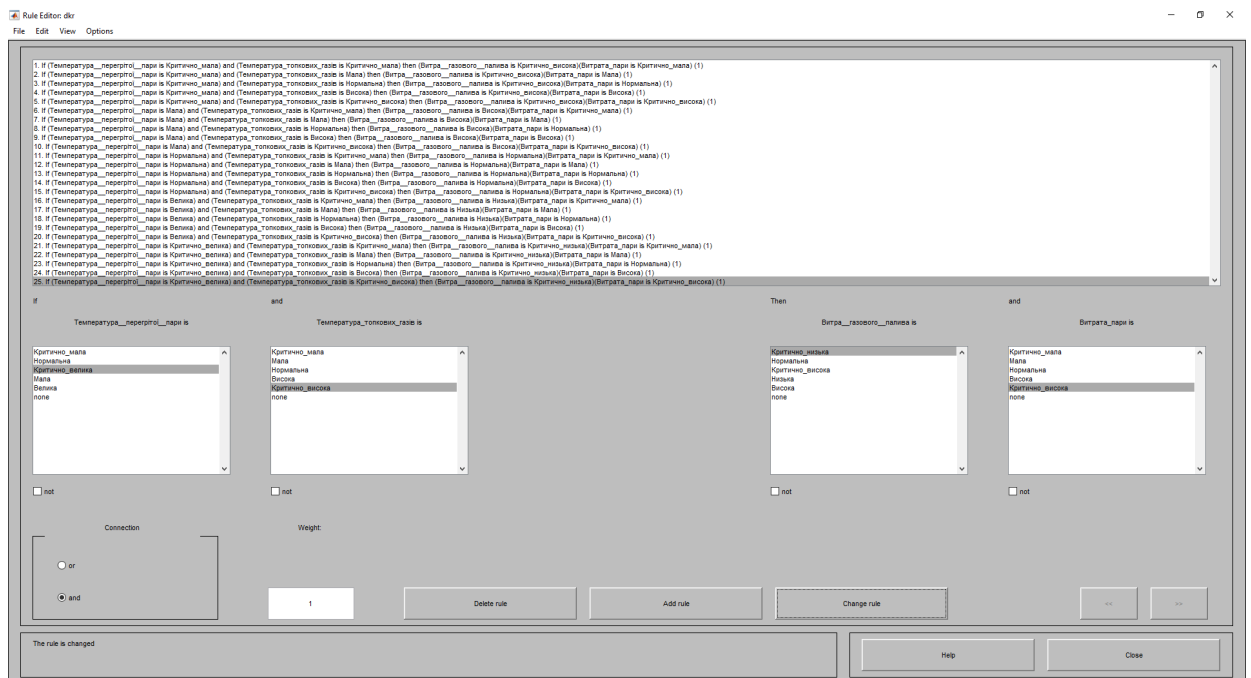


Рисунок 4.6 - Сформовані нечіткі правила керування

Структура розроблюваної нечіткої системи керування, як показано на рисунку 4.7, може мати, наприклад, два входи (поточні значення температури перегрітої пари та температури топкових газів) та два виходи (зміни у витраті газового палива та витраті пари). Після створення структури системи, до неї додаються визначені раніше функції належності для всіх лінгвістичних змінних за допомогою відповідних вікон налаштувань у MATLAB (рисунок 4.8 для "Температури перегрітої пари", рисунок 4.9 для "Витрати газового палива", рисунок 4.10 для "Температури топкових газів", рисунок 4.11 для "Витрати пари").

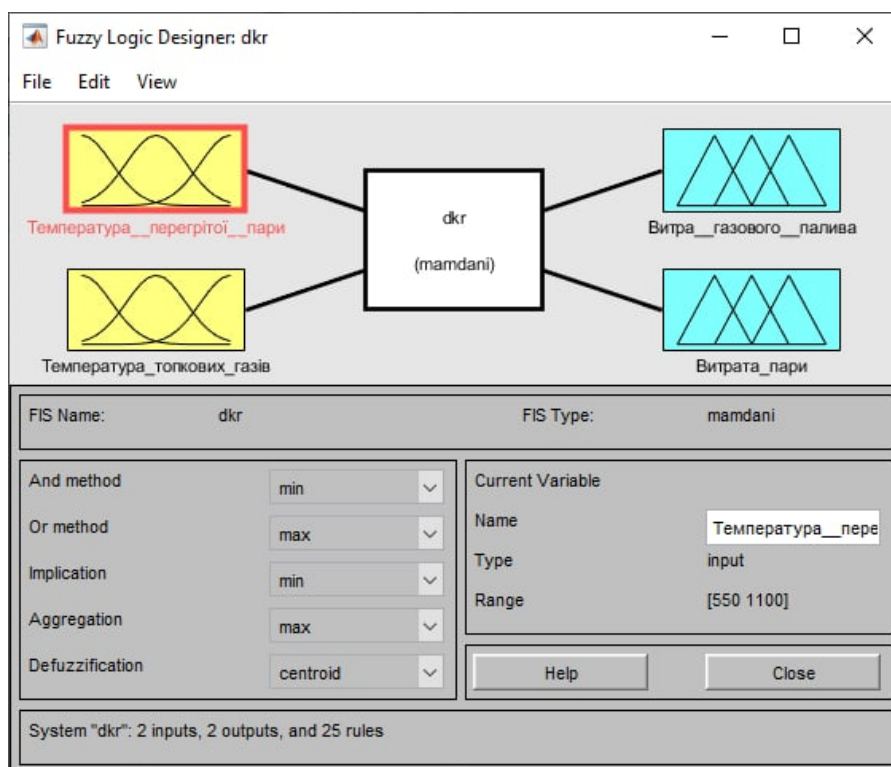


Рисунок 4.7 - Структура системи керування

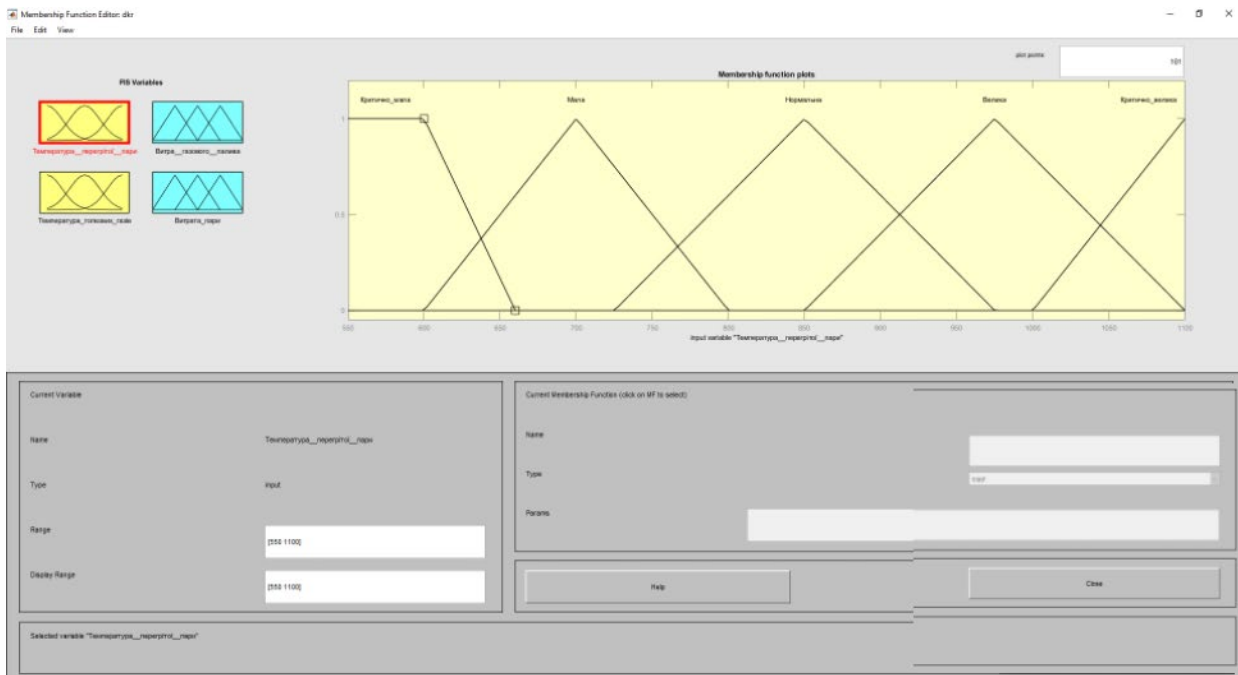


Рисунок 4.8 - Лінгвістична змінна «Температура перегрітої пари»

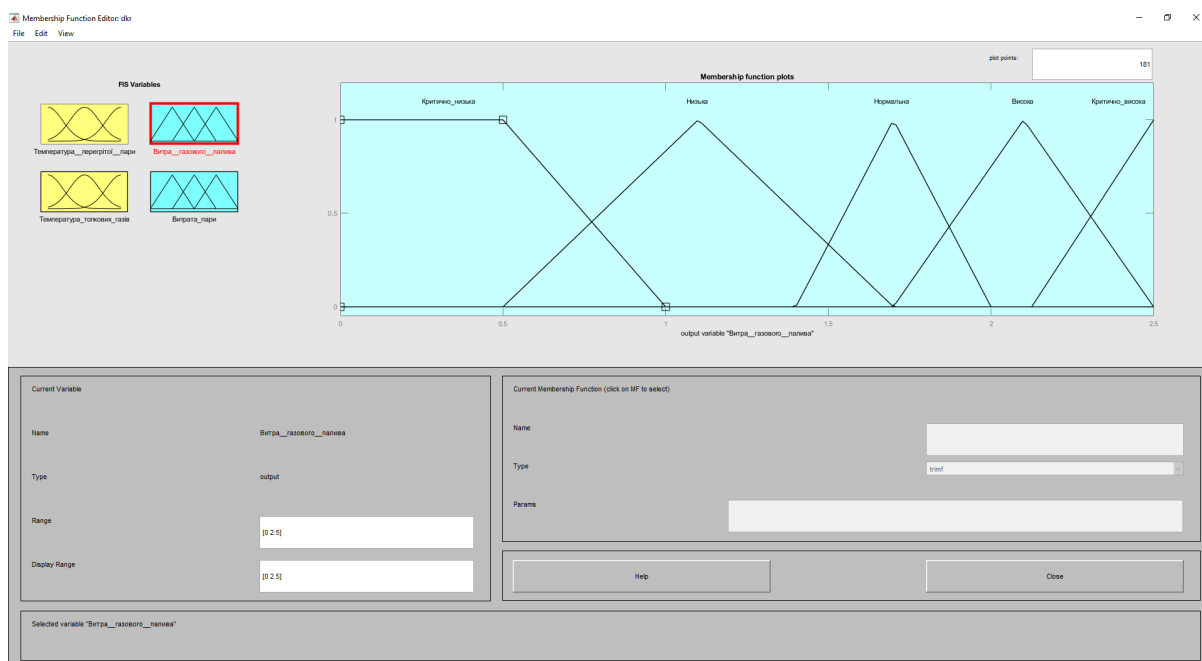


Рисунок 4.9 - Лінгвістична змінна «Витрата газового палива»

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

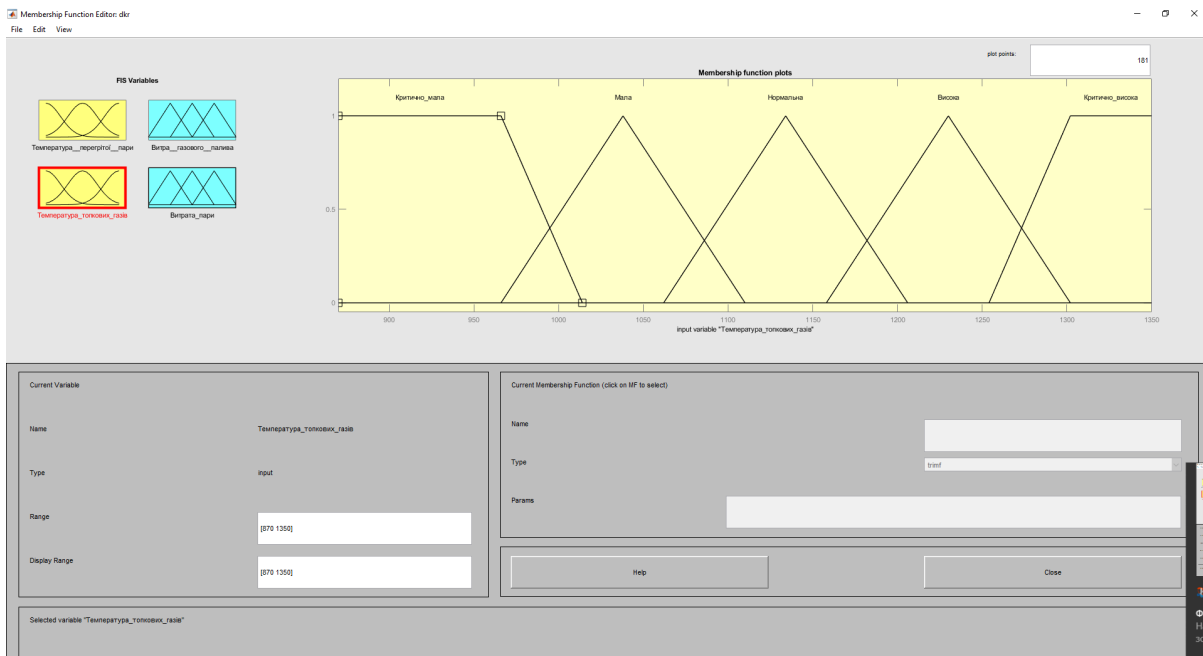


Рисунок 4.10 - Лінгвістична змінна «Температура топкових газів»

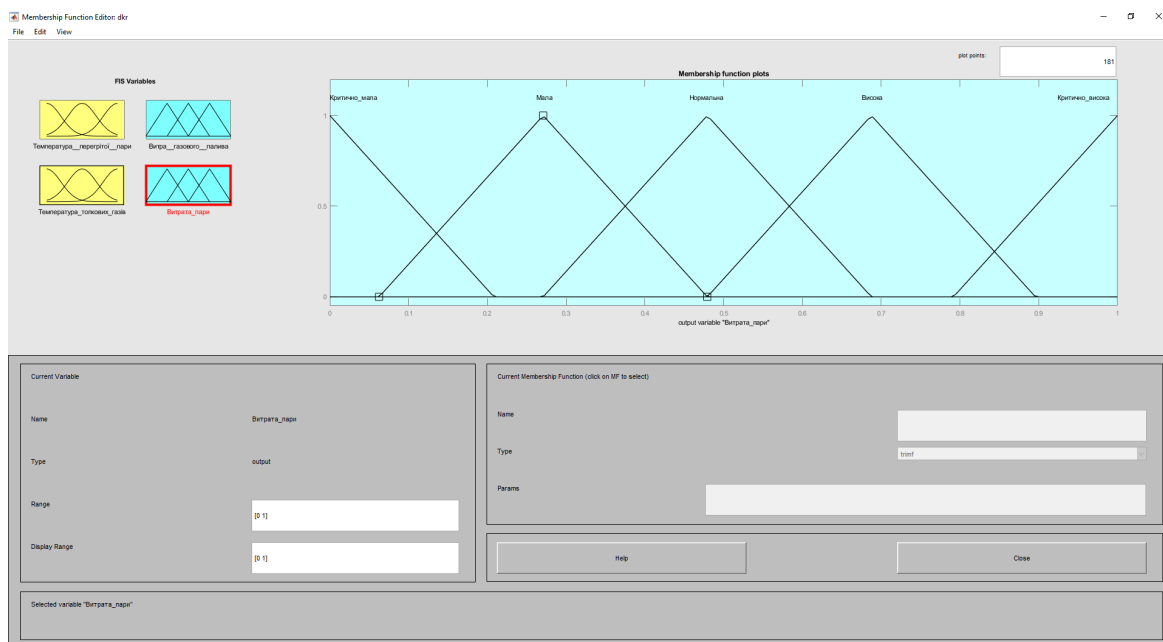


Рисунок 4.11 - Лінгвістична змінна «Витрата пари»

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Після здійснення всіх описаних налаштувань, нечітка система керування стає готовою до використання та тестування. Роботу системи та коректність спрацювання нечітких правил можна візуально перевірити, наприклад, переглянувши графіки поверхні нечіткого висновку (рисунок 4.12 для залежності вихідної витрати газового палива від вхідних температур, та рисунок 4.13 для залежності вихідної витрати пари). Ці поверхні показують, як змінюється вихідний керуючий сигнал при різних комбінаціях вхідних значень. Також можна перевірити спрацювання конкретних правил при заданих вхідних значеннях (приклад на рисунку 4.14 для температури пари 890 та температури топкових газів 1100).

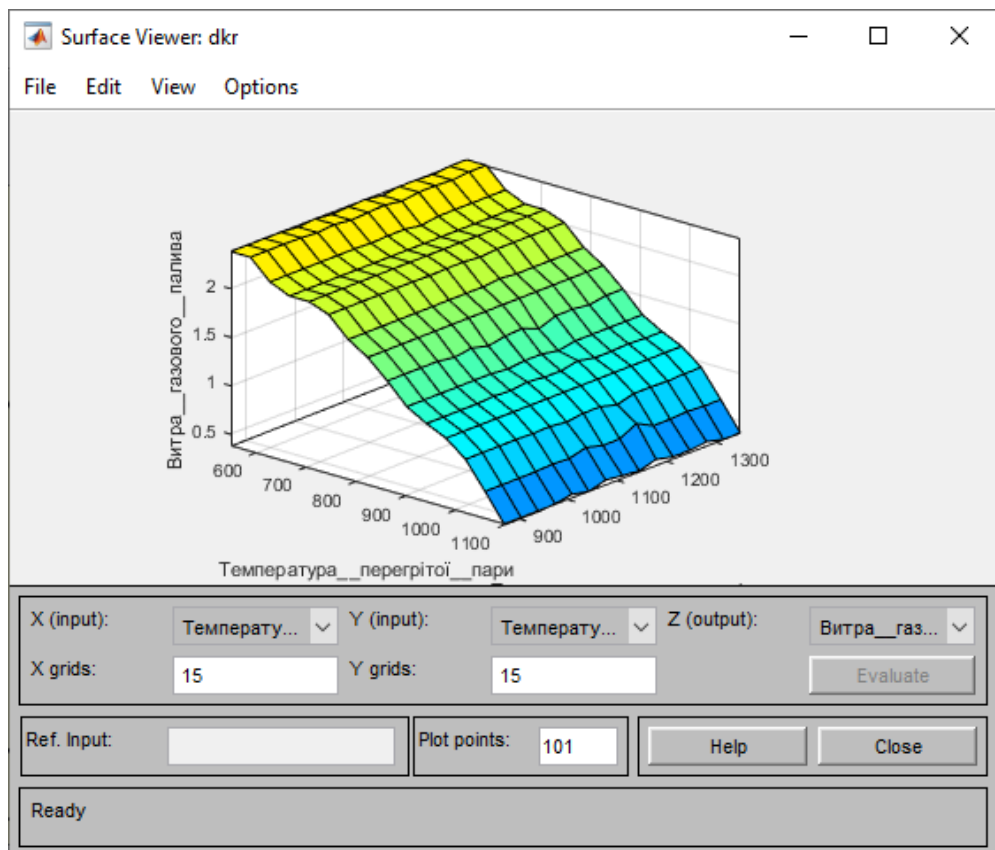


Рисунок 4.12 - Графік поверхні нечіткого висновку для витрати газового палива

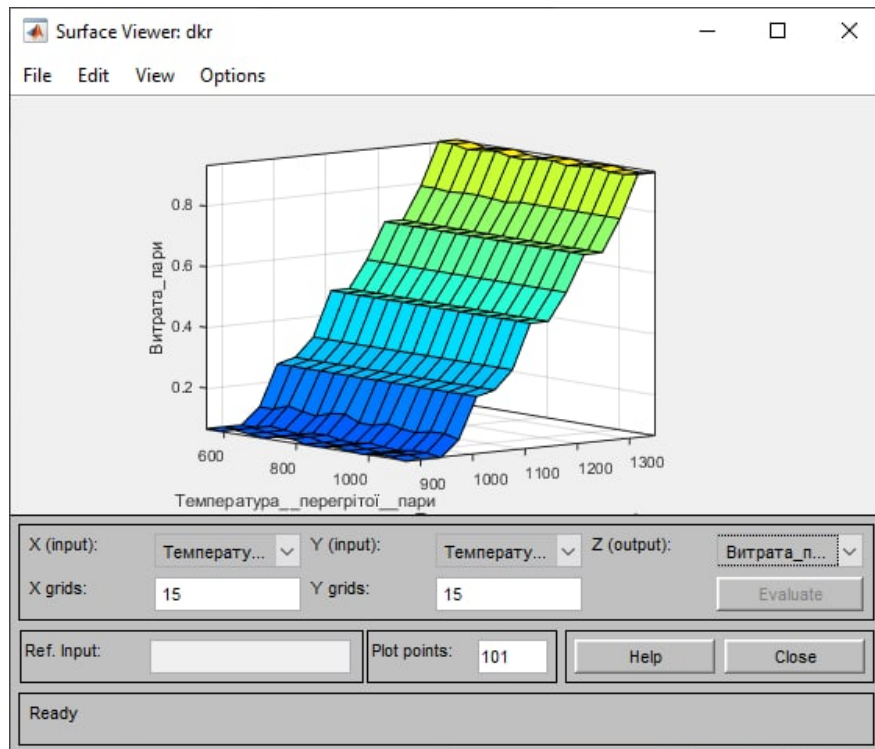


Рисунок 4.13 - Графік поверхні нечіткого висновку для витрати пари

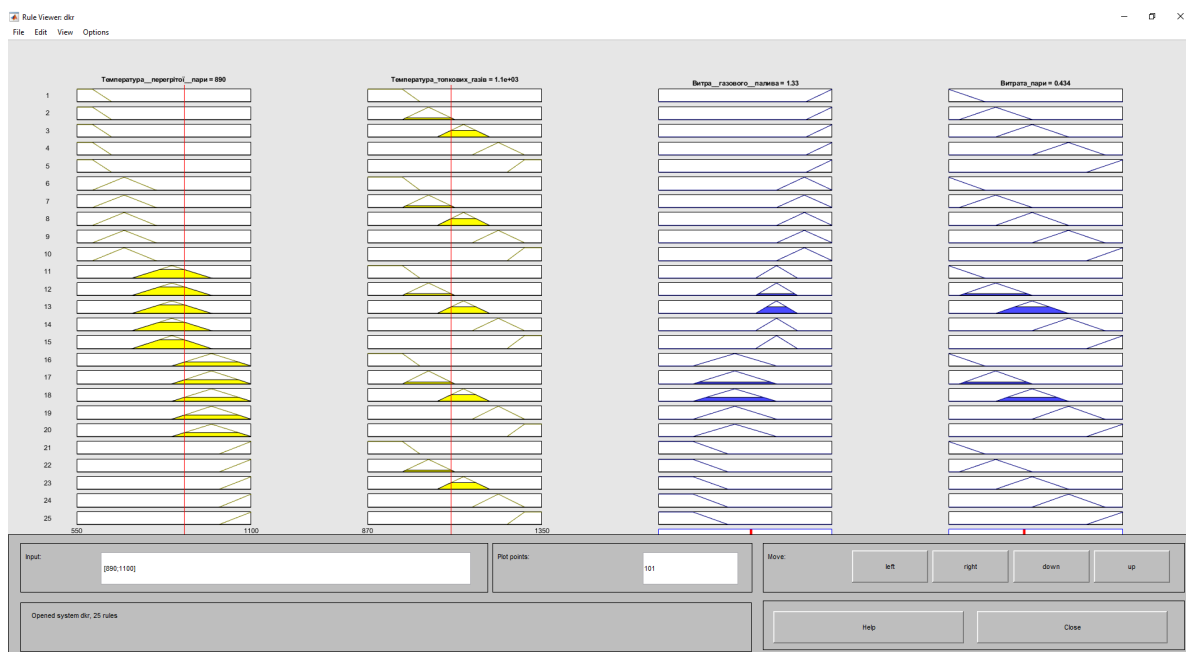


Рисунок 4.14 - Перегляд роботи правил при значенні температури пари 890 та температура топкових газів 1100

Для комплексної перевірки ефективності розробленої нечіткої системи керування та аналізу її динамічних характеристик, створюється замкнена система автоматичного регулювання в середовищі Simulink. Ця система, як правило, складається з блоку нечіткого контролера (який реалізує розроблені нечіткі правила та логіку висновку), блоку, що моделює динаміку реального об'єкта керування, та засобів візуалізації результатів симуляції, наприклад, осцилографа. Структура такої моделі замкненої системи представлена у вихідному документі на рисунку 4.15.

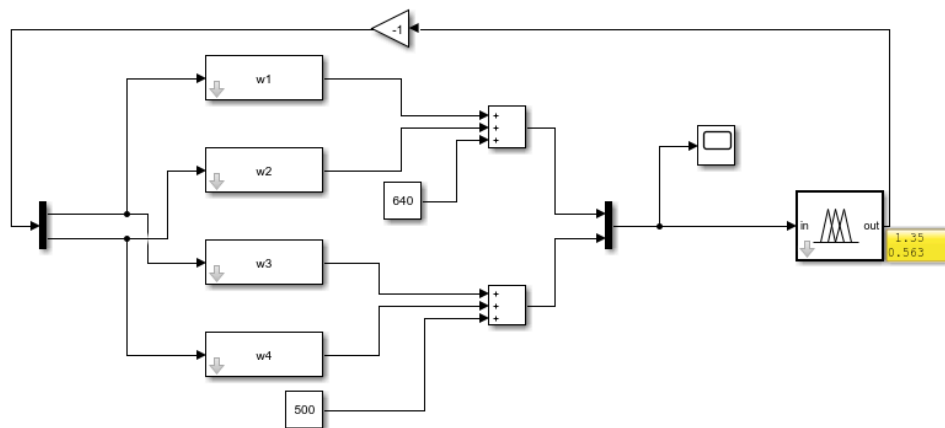


Рисунок 4.15 - Схема керування в середовищі *Simulink*

Після запуску симуляції цієї моделі в Simulink, можна проаналізувати динамічну поведінку замкненого контуру регулювання з нечітким контролером, спостерігаючи за перехідними процесами на осцилографі (приклад перехідної характеристики системи, що відображає реакцію системи на зовнішнє збурення або зміну заданого значення, показаний на рисунку 4.16).

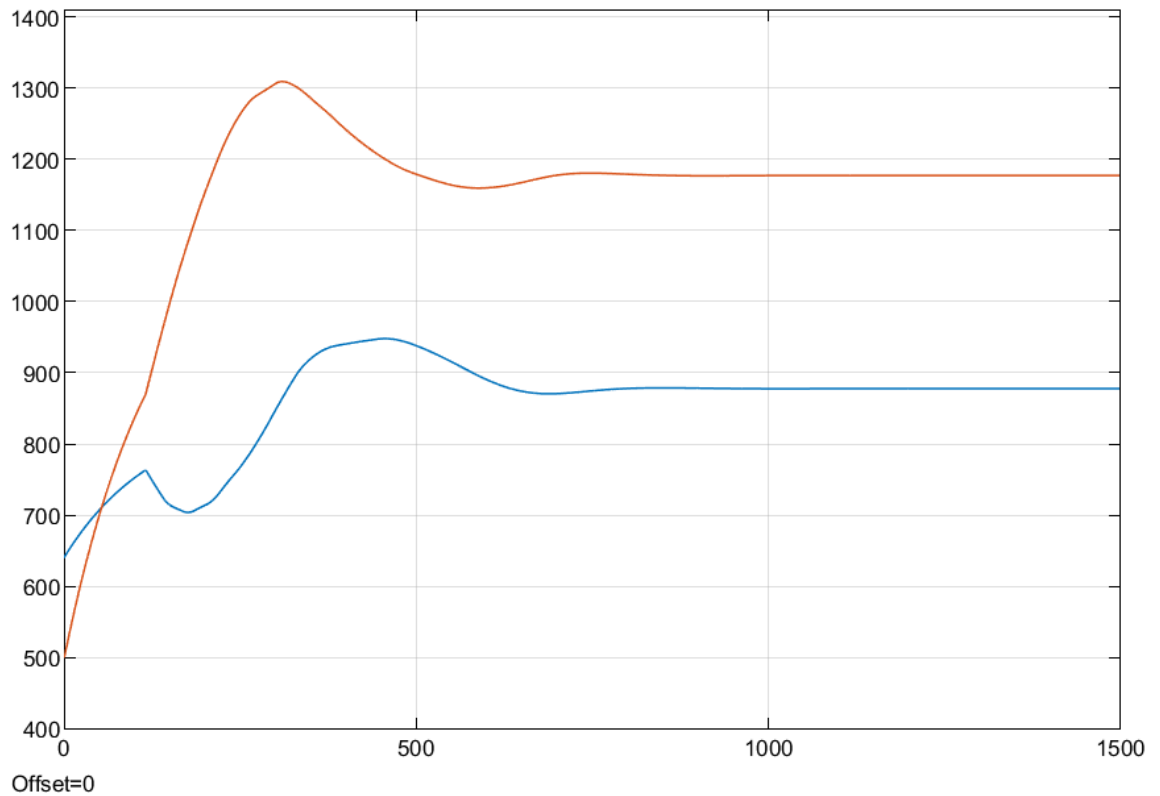


Рисунок 4.16 - Перехідна характеристика замкнутого контуру регулювання

Вибір між MPC та нечітким керуванням для такого складного об'єкта, як трубчаста піч, не завжди є однозначним або взаємовиключним; кожен з цих підходів має свої унікальні сильні сторони, які можуть бути доцільними для різних аспектів керування або за різних умов.

Висновки до розділу

MPC є надзвичайно потужним інструментом для реалізації оптимального керування, особливо коли необхідно враховувати численні обмеження на змінні процесу та коли доступна відносно точна математична модель об'єкта. Його здатність до прогнозування та багатокрокової оптимізації робить його ефективним для систем з великими запізненнями та складною динамікою. З іншого боку, нечітке керування демонструє більшу гнучкість та робастність при роботі з системами, для яких важко отримати точну аналітичну модель, або коли в системі присутня значна лінгвістична невизначеність, або коли є можливість формалізувати цінні експертні знання операторів у вигляді нечітких правил.

Потенційно, найбільш ефективним рішенням могла б стати гібридна система керування, яка б поєднувала переваги обох підходів. Наприклад, нечітка логіка могла б використовуватися для адаптації параметрів МРС-регулятора в залежності від поточного стану процесу або для обробки нештатних ситуацій та прийняття рішень на вищому рівні ієрархії керування, тоді як МРС відповідав би за основну траєкторну оптимізацію в штатному режимі роботи.

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведеного комплексного дослідження було успішно вирішено основні завдання, спрямовані на розробку та обґрунтування вдосконаленої системи автоматичного керування процесом каталітичного риформінгу, призначеної для експлуатації в умовах сучасного нафтопереробного підприємства. В ході роботи було детально проаналізовано технологію процесу, визначено ключові технологічні параметри, що мають вирішальний вплив на його ефективність та якість отримуваних продуктів. На основі цього аналізу було створено математичну модель об'єкта керування – трубчастої печі, яка є невід'ємною частиною установки риформінгу. Було розроблено та досліджено алгоритми автоматичного керування, зокрема на базі модельно-прогнозуючого керування (MPC) та нечіткої логіки, які забезпечують можливість оптимізації параметрів процесу, спрямованої на зменшення питомих енергетичних витрат, покращення стабільності роботи технологічного обладнання та підвищення якості кінцевої продукції, такої як високооктановий бензин та ароматичні вуглеводні.

Результати проведеного дослідження, що включали етапи теоретичного аналізу, математичного моделювання та комп'ютерної симуляції, переконливо демонструють, що впровадження запропонованої вдосконаленої системи автоматичного керування дозволяє досягти значних позитивних ефектів. По-перше, очікується суттєве підвищення продуктивності процесу риформінгу за рахунок підтримки оптимальних режимів роботи та мінімізації відхилень від них. По-друге, автоматизація дозволяє мінімізувати вплив людського фактора на перебіг технологічного процесу, що знижує ймовірність помилок операторів та підвищує загальну надійність і стабільність виробництва. По-третє, що є надзвичайно важливим у сучасних умовах, розроблені підходи до керування сприяють забезпеченню відповідності виробництва дедалі жорсткішим сучасним екологічним вимогам, зокрема, шляхом оптимізації процесів горіння та мінімізації утворення побічних продуктів. Окрім цього, очікується зниження енергетичних

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

витрат, покращення стабільності роботи обладнання та підвищення якості кінцевої продукції.

Важливим практичним досягненням даного дослідження є успішна інтеграція сучасних методів предиктивного керування та принципів автоматичної адаптації системи до неминучих змін у виробничих умовах. Така інтеграція суттєво підвищує гнучкість та стійкість (робастність) розробленої системи керування, дозволяючи їй ефективно функціонувати навіть при зміні якості сировини, характеристик каталізатора або інших зовнішніх збуреннях. Здатність системи "передбачати" розвиток процесу та адаптуватися до нових умов є ключовою перевагою в динамічному середовищі сучасного нафтопереробного виробництва.

Розроблені в ході дослідження методи та підходи до автоматизації процесу каталітичного риформінгу мають значний потенціал для практичного застосування. Вони можуть бути використані як основа для модернізації існуючих технологічних процесів на нафтопереробних підприємствах, сприяючи підвищенню їхньої конкурентоспроможності на ринку нафтопродуктів та покращенню показників екологічної безпеки. Впровадження таких систем дозволить не лише оптимізувати поточні операції, але й створити платформу для подальшого вдосконалення технологій та переходу до більш інтелектуальних та автономних виробництв.

Отримані в ході даного дослідження результати створюють міцну наукову та методологічну основу для подальших, ще глибших досліджень у сфері автоматизації складних, багатопараметричних виробничих процесів у нафтопереробній та хімічній промисловості. Успішне впровадження розроблених систем автоматичного керування в реальні промислові умови вимагатиме не тільки технічної досконалості самих алгоритмів керування, але й комплексного вирішення низки важливих організаційних та інфраструктурних питань. До них належать, зокрема, розробка програм та проведення навчання експлуатаційного персоналу для роботи з новими системами, забезпечення безшовної інтеграції розроблених рішень з існуючою на підприємстві інфраструктурою

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП), а також приділення особливої уваги забезпеченню високої надійності та точності роботи первинних вимірювальних приладів (датчиків) та виконавчих механізмів. Саме від якості та достовірності вхідних даних, що надходять від датчиків, залежить точність математичних моделей та ефективність керуючих впливів, що генеруються системою.

Довгострокова ефективність та надійність розроблених систем керування, особливо тих, що базуються на використанні математичних моделей (як, наприклад, МРС), значною мірою залежатиме від наявності та ефективності механізмів адаптації цих моделей до неминучих змін у характеристиках технологічного процесу, що відбуваються з часом. До таких змін можна віднести поступову дезактивацію каталізатора риформінгу внаслідок коксоутворення або отруєння каталітичними отрутами, варіації у фракційному та хімічному складі сировини, що надходить на переробку, а також поступове забруднення поверхонь теплообмінного обладнання, що призводить до зниження ефективності теплопередачі. Хоча в загальних висновках вихідного документа згадується важливість "автоматичної адаптації до змін у виробничих умовах", конкретні механізми такої адаптації для розроблених систем керування трубчастою піччю не були деталізовані, що, безперечно, є важливим та перспективним напрямком для подальших наукових досліджень та інженерних розробок. Це може включати розробку алгоритмів періодичної або безперервної переідентифікації параметрів моделі об'єкта в режимі онлайн, використання адаптивних методів керування, що автоматично коригують параметри регулятора на основі аналізу розбіжності між прогнозованими та реальними значеннями керованих змінних, або застосування методів машинного навчання для виявлення прихованих закономірностей та прогнозування змін у поведінці процесу.

Серед перспективних напрямків подальших досліджень можна виділити розробку та дослідження гібридних систем керування, що поєднують переваги різних підходів (наприклад, МРС та нечіткої логіки або нейромережевих технологій). Важливим є також вдосконалення математичних моделей процесу

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

риформінгу з урахуванням кінетики дезактивації каталізатора, що дозволить оптимізувати не тільки поточні режими, але й тривалість міжрегенераційних циклів. Актуальною задачею залишається розробка систем оптимізації роботи установки риформінгу в реальному часі з урахуванням не тільки технологічних, але й економічних показників (наприклад, вартості сировини, енергії, каталізатора та цін на цільові продукти). Нарешті, перспективним є інтеграція розроблених систем локального керування процесом риформінгу з системами управління виробничими процесами вищого рівня ієрархії (MES – Manufacturing Execution Systems) для забезпечення комплексної оптимізації роботи всього нафтопереробного підприємства.

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Кривошеєв, О. М. Автоматизація технологічних процесів та виробництв нафтогазової галузі: навчальний посібник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. – 320 с.

2. Пасічник, Р. Л., Поліщук, В. Й., & Савченко, О. М. Системи автоматизованого управління технологічними процесами нафтопереробки: монографія. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 280 с.

3. Воскобойніков, В. А., Загірняк, М. В. Моделювання та оптимізація складних систем управління в нафтопереробці. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 210 с.

4. Коваленко, В. М., Бондаренко, О. В., Петренко, Д. С. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології на підприємствах хімічної промисловості: підручник. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 450 с.

5. Ткаченко, В. В., & Ляшенко, В. І. Принципи побудови та функціонування систем автоматичного управління нафтопереробними установками. – Суми: СумДУ, 2020. – 190 с.

6. Григорович, О. В., & Шевченко, А. І. Цифрові технології в автоматизації нафтогазових комплексів. – Полтава: ПолтНТУ, 2021. – 230 с.

7. Іваницький, А. В. Сучасні інформаційні технології в управлінні нафтопереробними виробництвами. – Одеса: ОНПУ, 2016. – 250 с.

					ДП.АКПз-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		