

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ

Група АКП-23-2К

**Максим Теодорович**

**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

Теодорович Максим В'ячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.51

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

### АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ОСНОВНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ГАЗОФРАКЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

(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

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

#### Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-2К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

М.В. Теодорович

(ініціали та прізвище)

#### Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С. Борин

(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)



## 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.	Аналіз газофракційної установки як керованого об'єкта	15.05.2025	
2.	Формулювання завдань дослідження	18.05.2025	
3	Розроблення і дослідження системи керування газофракційною установкою на основі класичних регуляторів	25.05.2025	
4.	Розробка fuzzy-системи керування газофракційною установкою.	03.06.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

М.В. Теодорович \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

І.І. Чигур \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 73 сторінок друкованого тексту, 18 рисунків, 14 таблиць, 7 посилань на джерела.

Тема: «Автоматичне керування основними параметрами газофракційної установки».

Об'єкт дослідження: бутанова колона газофракційної установки.

Мета проекту: розробити інтелектуальну систему керування основними параметрами газофракційної установки.

Методи дослідження: методи теорії автоматичного керування, математичного моделювання, fuzzy logic.

Результати бакалаврської роботи: розроблено інтелектуальну систему автоматичного керування бутановою колоною газофракційної установки, що здатна ефективно працювати в умовах інформаційної невизначеності, викликаній промисловими шумами. У роботі детально описано алгоритм формування ПД-закону регулювання та розглянуто основні методи вибору параметрів налаштування традиційних ПД-регуляторів. Проаналізовано принципи функціонування нечітких ПД-регуляторів, включаючи процеси виробки та перетворення нечіткої інформації. Проведено порівняльний аналіз традиційних та нечітких регуляторів, висвітлено їхні переваги та недоліки. Також представлені можливості моделювання нечітких регуляторів за допомогою програмних пакетів Matlab.

Ключові слова: бутанова колона, керування, інтелектуальний, регулятор, система

## **ABSTRACT**

Bachelor's thesis contains: 73 pages of printed text, 18 figures, 14 tables, 7 references to sources.

Topic: "Automatic control of the main parameters of a gas fractionation unit".

Object of research: butane column of a gas fractionation unit.

Project goal: to develop an intelligent control system for the main parameters of a gas fractionation unit.

Research methods: methods of the theory of automatic control, mathematical modeling, fuzzy logic.

Results of the bachelor's thesis: an intelligent system for automatic control of a butane column of a gas fractionation unit has been developed, which is able to work effectively in conditions of information uncertainty caused by industrial noise. The work describes in detail the algorithm for forming the PID regulation law and considers the main methods for selecting the tuning parameters of traditional PID controllers. The principles of operation of fuzzy PID controllers, including the processes of generating and converting fuzzy information, have been analyzed. A comparative analysis of traditional and fuzzy controllers is carried out, their advantages and disadvantages are highlighted. The possibilities of modeling fuzzy controllers using Matlab software packages are also presented.

Keywords: butane column, control, intelligent, controller, system

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	8
<b>1 АНАЛІЗ ГАЗОФРАКЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ЯК КЕРОВАНОГО ОБ'ЄКТА</b> .....	10
1.1 Особливості газофракційної установки як керованого об'єкта .....	10
1.2 Огляд функціональних особливостей газофракційної установки .....	11
1.3 Характеристики готового продукту і сировини .....	14
1.4 Аналіз технологічної схеми газофракційної установки .....	17
1.5 Параметри контролю та регулювання в бутановій колоні .....	21
Висновки до розділу .....	24
<b>2 ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ</b> .....	26
2.1 Методології створення малоінерційних систем керування в умовах невизначеності .....	26
2.2 Застосування методів нечіткої логіки в задачах керування .....	27
2.3 Застосування нейромереж у завданнях керування складними об'єктами ..	29
2.4. Постановка завдань дослідження .....	31
Висновки до розділу . .....	32
<b>3 РОЗРОБЛЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОФРАКЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ НА ОСНОВІ КЛАСИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ</b> .....	33
3.1 Виявлення вхідних і вихідних змінних керованого об'єкта .....	33
3.2 Експериментальне визначення динамічних характеристик .....	36
3.3 Збір та обробка результатів експерименту на керованому об'єкті .....	38

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматичне керування основними параметрами газофракційної установки	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Геодорович М.В					6	74
Перевір.		Чигур І.І.						
Реценз.								
Н. Контр.		Кучмистенко О				АКП-23-2К ІФНТУНГ		
Затверд.		Лагойда А.І.						

3.4 Апроксимація динамічних каналів за допомогою передавальних функцій	44
3.5 Оптимальне налаштування класичних регуляторів .....	45
3.6 Проектування та розрахунок компенсуючого пристрою .....	49
3.7 Дослідження АСК на стійкість .....	51
3.8 Оцінка якості та порівняльний аналіз систем керування .....	53
Висновки до розділу .....	58
<b>4 РОЗРОБКА FUZZY-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОФРАКЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ.....</b>	<b>59</b>
4.1 Технології FUZZY систем керування .....	59
4.2 Нечітке керування газофракційною установкою .....	61
4.3 Моделювання і дослідження fuzzy системи керування .....	65
Висновки до розділу.....	70
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>71</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....</b>	<b>73</b>

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ВСТУП

Метою бакалаврської роботи є розробка інтелектуальної системи керування основними параметрами газофракційної установки

У сучасній промисловості існує значний клас технологічних процесів, які вирізняються високим ступенем невизначеності у взаємозв'язках між керуючими впливами, зовнішніми збуреннями та вихідними параметрами, що визначають поточний стан системи. Ці об'єкти часто не піддаються точному математичному моделюванню, що створює серйозні виклики для розробки ефективних систем автоматизованого керування.

Більшість моделей, що описують такі технологічні процеси, як теплові процеси, подрібнення, сепарація або гомогенізація, мають низький рівень формалізації. Це робить їх непридатними для традиційних методів синтезу систем автоматизації, які зазвичай вимагають чітких детермінованих моделей. Незважаючи на ці методологічні труднощі, широке застосування цих процесів у різних галузях промисловості вимагає їхньої автоматизації, що стимулює постійний пошук та розробку нових підходів до побудови систем керування.

Для об'єктів, подібних до газофракційної установки (ГФУ), яка є центральним предметом цього дослідження, характерні кілька визначальних особливостей. По-перше, проектування та функціонування систем керування для них відбувається в умовах значної невизначеності. По-друге, в таких системах зазвичай присутні два основні типи невизначеності: стохастична невизначеність, що виникає під час вимірювання технологічних параметрів, та нечіткість взаємозв'язків при керуванні. Це означає, що випадкові коливання у вимірах поєднуються з неточностями або суб'єктивністю у визначенні керуючих правил чи цілей.

Крім того, технологічні параметри цих процесів часто не можуть бути виміряні безпосередньо або спостережені через відсутність чіткої математичної моделі, яка б описувала їхню поведінку. Операційне середовище також ускладнюється наявністю великої кількості збурень, які мають

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

випадковий, непередбачуваний характер. Багато з цих технологічних процесів характеризуються розподіленими параметрами, тобто їхні властивості змінюються просторово по всій системі, що суттєво ускладнює їхній контроль та управління. У таких умовах розробник системи автоматизації стикається зі складним завданням вибору найбільш значущих параметрів, які б інтегрально відображали загальний характер процесу.

Для подолання цих викликів застосовуються специфічні стратегії. Наприклад, для об'єктів з розподіленими параметрами стохастичну невизначеність можна звести до детермінованих параметрів, які інтегрально відображають характер протікання процесу. Це передбачає перетворення сирих, потенційно зашумлених і багатовимірних даних на значущі, менш вимірні та придатні для керування змінні. Такий підхід є фундаментальним для забезпечення керованості складних систем. Невизначеність цілі керування може бути усунена на основі інтегральних показників параметрів керування, отриманих за допомогою експериментальних моделей процесу. Процес прийняття рішень в таких умовах ґрунтується на неповній інформації, яка часто може бути описана за допомогою нечітких передумов або логіки.

Хоча методи стохастичного керування застосовуються, коли невизначеності можна описати як стохастичні процеси, вони часто виявляються неефективними для значного класу задач. Це пов'язано з обмеженнями стандартних імовірнісних понять і методів, а також з труднощами у визначенні статистичних характеристик параметрів, відсутністю ергодичності процесів та їхньою нестационарністю. У таких випадках джерело невизначеності може бути частково або повністю детермінованим, а сама складність технологічних систем та рівень невизначеності інформації зростають, що підвищує вимоги до точності рішення. Газофракційна установка, автоматизація якої є основною темою даної роботи, належить саме до таких об'єктів.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

# 1 АНАЛІЗ ГАЗОФРАКЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ЯК КЕРОВАНОГО ОБ'ЄКТА

## 1.1 Особливості газофракційної установки як керованого об'єкта

Газофракційна установка (ГФУ) класифікується як "слабоформалізований об'єкт". Це одразу вказує на те, що традиційні підходи до керування, які повністю базуються на точних математичних моделях, ймовірно, будуть недостатніми для досягнення оптимальної продуктивності. Така ситуація вимагає дослідження та впровадження передових стратегій керування, таких як адаптивне, робастне або інтелектуальне керування (наприклад, нечітка логіка, нейронні мережі), які за своєю суттю розроблені для роботи зі значними невизначеностями та неповною інформацією про процес.

Виявлення двох різних типів невизначеності – стохастичної при вимірюванні технологічних параметрів та нечіткості відносин при керуванні – є глибоким розумінням. Це вказує на те, що єдина парадигма керування може бути недостатньою для всебічного вирішення складності системи. Традиційна теорія керування часто зосереджується на одному типі невизначеності; наприклад, класичне робастне керування працює з обмеженими збуреннями, тоді як фільтри Калмана справляються зі стохастичним шумом, а нечіткі логічні контролери розроблені для систем, де взаємозв'язки виражені лінгвістично або неточно. Коли присутні обидва типи невизначеності, система керування, оптимізована для одного, може працювати субоптимально або навіть вийти з ладу при зіткненні з іншим. Це створює більш складну проблему проектування керування. Отже, для ефективного управління обома типами невизначеності логічно потрібна інтеграція методологій, здатних обробляти кожну з них. Це призводить до висновку, що гібридний підхід до керування, можливо, поєднуючи статистичні методи (для стохастичних елементів) з нечіткою логікою або іншими методами штучного інтелекту (для неточних взаємозв'язків), є необхідним для досягнення ефективного та надійного керування. Цей багатогранний ландшафт невизначеності підносить проблему керування над стандартними промисловими

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

викликами.

Стратегія зведення стохастичної невизначеності в системах з розподіленими параметрами до "детермінованих параметрів, що інтегрально відображають характер протікання процесу", є надзвичайно важливим практичним підходом. Це передбачає значний етап попередньої обробки даних та вивідного моделювання. У контексті розподілених систем, де властивості змінюються просторово (наприклад, профіль температури вздовж колони), безпосереднє вимірювання в кожній точці є непрактичним, а обсяг даних може бути величезним. Стохастичність додає шум до цих вимірювань. Концепція "інтегральних показників" стосується агрегованих або виведених значень (наприклад, середньої температури в секції або розрахованої загальної ефективності), які узагальнюють складний стан розподіленої системи, спрощуючи її представлення. Посилання на "отриманих за допомогою експериментальних моделей" вказує на те, що ці інтегральні показники не виводяться з фундаментальних (теоретичних) моделей, а радше з емпіричних даних, статистичного аналізу або методів машинного навчання. Ці "м'які датчики" або оцінювачі стану є ключовими для надання необхідних вхідних даних системі керування. Таким чином, перетворення зашумлених, багатовимірних, стохастичних даних на більш стабільні, репрезентативні "детерміновані" або "інтегральні" параметри значно спрощує проблему керування. Ця стратегія є практичним інженерним рішенням внутрішніх викликів вимірювання та моделювання в "слабоформалізованих" системах, підкреслюючи залежність від підходів, керованих даними, та вивідного керування.

## 1.2 Огляд функціональних особливостей газофракційної установки

Газофракційна установка (ГФУ) виконує ключову функцію розділення широкої фракції легких вуглеводнів, що охоплює компоненти від C1 до C6 (від метану до гексанів), на окремі, більш чисті фракції. Цей процес є критично важливим для нафтопереробної та хімічної промисловості, дозволяючи

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

отримувати цінні продукти з сировини.

Основним технологічним принципом, що лежить в основі газофракціонування, є ректифікація. Ця методика є одним з найпоширеніших та фундаментальних процесів у хімічній, нафтопереробній та багатьох інших галузях промисловості. Ректифікація – це складний процес розділення багатокомпонентних сумішей, як парових, так і рідких, на практично чисті компоненти або на суміші, збагачені легшими чи важчими складовими. Це розділення досягається шляхом контрольованого контакту нерівноважних потоків пари та рідини.

Характерні особливості процесу ректифікації в контексті ГФУ включають наступне.

Утворення нерівноважних потоків. Ключовою умовою ректифікації є створення нерівноважних потоків пари та рідини, які вступають у контакт. При розділенні парових сумішей нерівноважний потік рідини, відомий як рідинне зрошення (флегма), утворюється шляхом повної або часткової конденсації пари, що утворюється при міжфазному контакті. Натомість, при розділенні рідких сумішей нерівноважний паровий потік (парове зрошення) утворюється внаслідок часткового випаровування рідини після контакту.

Нерівноважні потоки пари та рідини, що контактують у колоні, перебувають у стані насичення. Зазвичай, парова фаза є більш нагрітою, ніж рідина, і містить більшу частку важколетких компонентів порівняно з рідиною. Після контакту відбувається взаємний перерозподіл компонентів між фазами: рідина збагачується леткими компонентами, а пара – важколеткими.

Роль відмінностей у температурах кипіння. Можливість розділення сумішей за допомогою ректифікації зумовлена різними температурами кипіння компонентів суміші. Ця властивість сприяє створенню необхідних нерівноважних потоків пари та рідини, що, в свою чергу, забезпечує прогресивне збагачення парової фази легкими компонентами, а рідинної – важкими.

Масообмін як фізична основа. Фізичною основою розділення в цьому процесі є масообмін між нерівноважними потоками пари (газу) та рідини. У

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

ректифікації цей масообмін є двостороннім, що означає рух компонентів в обох напрямках через міжфазну поверхню. Це відрізняє ректифікацію від таких процесів, як адсорбція або осушення, де масообмін зазвичай є одностороннім.

Сама ГФУ є інтегрованим комплексом, що складається з кількох ректифікаційних колон, різноманітних теплообмінних апаратів, ємностей для зберігання, насосів та спеціалізованих технологічних печей.

Основна функція ГФУ – розділення легких вуглеводнів С1-С6 шляхом ректифікації – є внутрішньо складною через відносно близькі температури кипіння цих компонентів. Це вимагає надзвичайно точного контролю над робочими умовами для досягнення необхідної ефективності розділення та чистоти продукту. Навіть незначні відхилення у критичних параметрах, таких як температура, тиск або витрати флегми, можуть суттєво порушити делікатну рівновагу пари-рідини та кінетику масообміну. Ці порушення можуть призвести до значного впливу на ефективність розділення та чистоту продукту, роблячи процес надзвичайно чутливим та важким для моделювання з точністю, необхідною для звичайних методів керування. Саме ця властивість безпосередньо сприяє класифікації ГФУ як "слабоформалізованого" об'єкта.

Безпосереднє наголошення на "нерівноважних потоках" як фундаментальній основі ректифікації в ГФУ є важливим аспектом. Це означає, що спрощені, теоретичні моделі рівноважних ступенів, які часто використовуються на початкових етапах проектування процесу, ймовірно, недостатні для точного та надійного керування процесом. У промисловій практиці ректифікаційні колони рідко досягають ідеальної рівноваги на кожній фізичній тарілці. Такі фактори, як обмежений час контакту між фазами, недосконале змішування та опори масообміну, означають, що реальні тарілки працюють в нерівноважних умовах. Для ефективного керування ГФУ необхідні динамічні моделі, які точно відображають перехідну поведінку та складну кінетику масообміну, що ще більше ускладнює формалізацію системи та підтверджує її класифікацію як "слабоформалізованої". Це свідчить про більшу залежність від емпіричних даних, адаптивного керування або робастних

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

стратегій керування, які можуть впоратися з розбіжністю між моделлю та реальним об'єктом.

### 1.3 Характеристики готового продукту і сировини

Газофракційна установка (ГФУ) переробляє два основні види сировини: нестабільний бензин та широку фракцію легких вуглеводнів (ШФЛВ). Якість цих вхідних потоків має вирішальне значення для стабільності та ефективності процесу розділення.

Детальні властивості нестабільного бензину представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1- Характеристика нестабільного бензину ТУ 39.1340-89

НАЗВА ПОКАЗНИКІВ	ЗНАЧЕННЯ
Густина при 20°C, г/см <sup>3</sup>	1,735
Фракційний склад:	
- початок кипіння, °C, не нижче	32
- переганяється 10%, °C не вище	52
- переганяється 50%, °C не вище	77
- переганяється 90%, °C не вище	117
- переганяється 96%, °C не вище	152
- кінець кипіння, °C, не вище	187
- об'ємна частка залишку, %, не більше	2,4
- об'ємна частка залишку і втрат, %, не більше	6,1
Вміст фактичних смол, мг/100 мл, не більше	6,1
Тиск насичених парів, кПа, не більше	1202
Масова частка загальної сірки, %, не більше	1,05
Випробування на мідній пластинці	Витримує
Вміст води і механічних домішок	Відсутні
Колір	Прозорі

Детальні властивості широкої фракції легких вуглеводнів (ШФЛВ) (ТУ 38.301523-89) наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Характеристика ШФЛВ (ТУ 38.301523-89)

МАСОВА ЧАСТКА КОМПОНЕНТІВ, %:	ЗНАЧЕННЯ
- сума метану, етану та етилену, не більше	6.1
- сума пропану та пропілену, не менше	27
- сума бутанів та бутиленів, не менше	62
- сума пентанів і вище, не більше	17
Об'ємна частка рідкого залишку при 20°C, не більше	2,7
Тиск насичених парів, надлишковий, кПа, при 45°C, не більше	2,7
Масова частка сірководню та меркаптанової сірки, %, не більше	1,06
в тому числі сірководню, не більше	1,004
Вміст вільної води та луку	відсутність
Інтенсивність запаху, бали, не менше	4
Зовнішній вигляд	безбарвна прозора речовина

Газофракційна установка виробляє кілька типів зріджених вуглеводневих газів, які відповідають різним стандартам та призначенням. До них належать паливні гази для комунально-побутового споживання (марки АТ за ДСТУ 20448-90), зріджені вуглеводневі гази для експорту (марки АТ за ДСТУ 21443-75), а також природні горючі гази для промислового та комунально-побутового призначення (за ДСТУ 5542-87).

Якість готових продуктів, згідно з ТУ 38.101497-79, розрізняється за марками: Вища, А, Б, В. Кожна марка має свої специфічні вимоги до вуглеводневого складу та вмісту домішок.

Специфікації сировини, представлені в таблицях, часто містять діапазони значень (наприклад, суми компонентів для ШФЛВ, діапазони температур кипіння для бензину). Ця мінливість у якості сировини створює значний виклик

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

для системи керування ГФУ. У реальних промислових умовах сировина може надходити з різних джерел або змінюватися з часом від одного й того ж джерела, що призводить до коливань у межах цих заданих діапазонів. Система керування, розроблена для фіксованого складу вхідного потоку, ймовірно, буде працювати неефективно або вийде з ладу, якщо фактичний вхідний потік відхиляється. Отже, система керування ГФУ повинна бути достатньо робастною та адаптивною, щоб справлятися з цими вхідними коливаннями, одночасно стабільно виробляючи готову продукцію, яка відповідає жорстким, заздалегідь визначеним специфікаціям. Ця внутрішня мінливість вхідних даних безпосередньо сприяє "слабоформалізованій" природі процесу, оскільки точна динамічна реакція на зміну складу або властивостей сировини може бути не ідеально змодельована або передбачувана. Це підкреслює ключовий виклик у керуванні процесами, де мінливість вхідних даних додає значної складності.

Здатність ГФУ виробляти кілька різних марок продукції (Вища, А, Б, В), кожна з яких має власні унікальні та суворі якісні специфікації, вимагає складної багатоцільової стратегії керування. Якщо завод повинен виробляти різні марки в різний час або одночасно (якщо є паралельні установки), система керування не може просто прагнути до єдиного, фіксованого набору чистоти продукції. Вона повинна бути здатною динамічно коригувати свої цілі та робочі точки. Досягнення вищої чистоти (наприклад, марки "Вища") зазвичай вимагає більш жорстких робочих умов (наприклад, вищих коефіцієнтів флегми, більшого споживання енергії) і може призвести до меншого виходу бажаного компонента або вищого споживання енергії. І навпаки, менш чиста марка може дозволити збільшити пропускну здатність або зменшити споживання енергії. Система керування повинна керувати цими внутрішніми компромісами. Цей сценарій є класичним застосуванням для передових методів керування, таких як модельне предиктивне керування (МПК), яке може обробляти кілька взаємодіючих цілей та обмежень. МПК може оптимізувати процес на основі економічних критеріїв (наприклад, максимізуючи прибуток за рахунок виробництва найбільш цінної марки), дотримуючись усіх якісних специфікацій та експлуатаційних обмежень.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Це переводить проблему керування від простого підтримання стабільності до оптимізації економічної ефективності, додаючи рівень стратегічної складності до завдання автоматизації.

#### 1.4 Аналіз технологічної схеми газофракційної установки

Газофракційна установка (рис.1.1) використовує нестабілізований бензин та широку фракцію легких вуглеводнів (ШФЛВ) як основні сировинні потоки. Процес розділення цих сумішей є багатоступеневим та складним, що вимагає точного керування на кожному етапі.

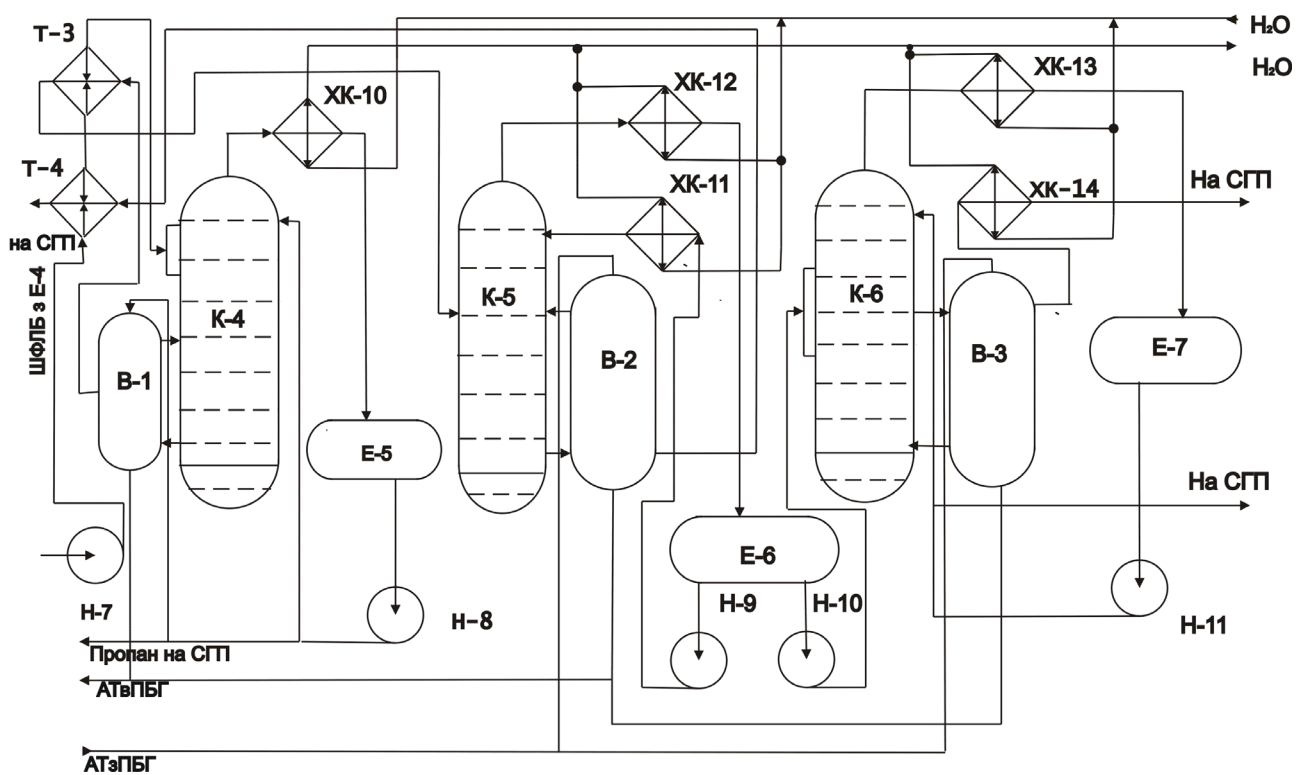


Рисунок 1.1 - Технологічна схема газофракційної установки

Початкова обробка та подача до пропанової колони (К-4): Сировина з ємності Е-4 подається насосом Н-5, проходячи послідовно через теплообмінники Т4 та Т3 для попереднього нагріву. Після цього підготовлений потік спрямовується як живлення до пропанової колони К-4. Колона К-4 оснащена 30 ковпачковими тарілками. Подача сировини може здійснюватися на різні тарілки – 13-ту, 15-ту або 17-ту (рахуючи знизу), вибір якої залежить від поточної

						Арк.
					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури та якості вхідної сировини. Кількість завантаження сировини в колону точно регулюється витратоміром.

Пропанова колона (К-4): У пропановій колоні К-4 відбувається розділення суміші нестабільного бензину та ШФЛВ на дві основні фракції: верхній продукт – пропанова фракція, та нижній продукт – суміш бутанів і вищих вуглеводнів. Тиск у колоні К-4 підтримується в діапазоні 1-1,7 МПа за допомогою автоматизованої системи регулювання тиску.

Пари пропанової фракції, що виходять з верхньої частини колони К-4, проходять через конденсатор-холодильник ХК-10. Температура верху колони К-4 підтримується в межах 30-85°C (303-359 К) шляхом регулювання витрати рідкого зрошення (флегми), що повертається в колону, зазвичай в обсязі 10-35 м<sup>3</sup>/год. Це зрошення подається насосом Н-8 з ємності Є-5 через регулятор витрати. Залишкова частина верхнього продукту відкачується насосом Н-8, контрольованим регулятором рівня, до ємностей складу готової продукції.

Температура нижньої частини пропанової колони К-4 підтримується в діапазоні 80-120°C (353-393 К) за рахунок тепла, що надходить від випарника В-1. Як теплоносій використовується гарячий абсорбент, що подається насосом Н-7 з відповідної лінії (через Т-4), при цьому його витрата точно контролюється регулятором. Пари, що утворюються у випарнику В-1, повертаються до пропанової колони К-4. Рідка фаза, що виходить з випарника В-1, проходить через теплообмінник Т-3 і, регульована контролером рівня, далі подається на завантаження стабілізатора К-5.

Стабілізатор (К-5): Стабілізатор К-5 також оснащений 30 ковпачковими тарілками. Вхідна сировина може подаватися на тарілки 9, 11 або 15. Колона К-5 працює під контрольованим тиском 0,5-0,7 МПа, який підтримується спеціальним регулятором тиску.

У стабілізаторі К-5 відбувається розділення сировини на два окремі продукти: верхній продукт – бутанова фракція, та нижній продукт – стабільний газовий бензин. Пари бутанової фракції з верхньої частини стабілізатора К-5 проходять через конденсатори-холодильники Х-12. Після конденсації цей рідкий

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

потік надходить до ємності Е-6. Температура верхньої частини стабілізатора К-5 підтримується в межах 40-80°C шляхом регулювання витрати зрошення, що повертається до колони. Зрошення подається насосом Н-9 з ємності Е-6, проходячи через регулятор витрати та холодильник Х-11. Залишкова частина бутанової фракції з ємності Е-6 потім подається насосом Н-9, під контролем рівня, на завантаження бутанової колони К-6.

Температура нижньої частини стабілізатора К-5 підтримується в діапазоні 80-120°C за рахунок тепла, що надходить від випарника В-2. Гарячий абсорбент слугує теплоносієм, його витрата точно підтримується регулятором. Пари з випарника В-2 повертаються до стабілізатора К-5. Нижній продукт, стабільний газовий бензин, проходить через теплообмінник Т-4 та регулятор рівня, після чого перекачується до ємностей складу готової продукції (СГП).

Бутанова колона (К-6): Бутанова колона К-6 має більшу кількість тарілок – 80 ковпачкових тарілок. Сировина, яка є сумішшю бутанів, може подаватися на тарілки 30, 32 або 34, залежно від температури та якості вхідного потоку. Ця колона працює під контрольованим тиском 0,3-0,55 МПа, який підтримується регулятором тиску.

У бутановій колоні К-6 відбувається подальше розділення бутанової суміші на дві окремі фракції: верхній продукт – ізобутанова фракція, та нижній продукт – нормальний бутан. Пари ізобутану, що виходять з верхньої частини бутанової колони К-6, проходять через конденсатор-холодильник Х-13. Після конденсації цей рідкий потік надходить до ємності Е-7. Температура верху бутанової колони К-6 підтримується в межах 30-50°C шляхом регулювання витрати зрошення, що повертається в колону. Зрошення подається насосом Н-11 з ємності Е-7 через регулятор витрати. Залишкова частина продукту перекачується, під контролем рівня, до ємностей складу готової продукції.

Складність технологічної схеми ГФУ, що включає каскад послідовно з'єднаних ректифікаційних колон, кожна з яких має свої власні входи, виходи, системи нагріву та охолодження, є значним викликом для автоматизації. Взаємозалежність між колонами, де продукт однієї колони є сировиною для

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

наступної, означає, що будь-яке збурення або неефективність в одній секції може каскадно вплинути на весь процес. Це вимагає інтегрованої та координованої системи керування, яка може оптимізувати роботу всього комплексу, а не лише окремих колон.

Критична роль міжколонної теплової інтеграції, наприклад, використання гарячого абсорбенту як теплоносія у випарниках К-4 та К-5, є важливим аспектом. Хоча така інтеграція значно підвищує енергоефективність установки, вона також створює додаткові взаємозв'язки між колонами, які ускладнюють завдання керування. Зміни в одному теплообміннику або колонці можуть вплинути на умови роботи іншої, що вимагає складніших алгоритмів керування, які можуть враховувати ці взаємодії та запобігати їхньому дестабілізуючому впливу. Це перетворює проблему керування з лінійного послідовного керування на складну мережу взаємозалежних процесів.

Стратегічна важливість гнучких точок подачі сировини (наприклад, на 13, 15, 17 тарілки для К-4) є ще одним важливим елементом. Ця гнучкість дозволяє операторам оптимізувати процес розділення залежно від змін температури та якості вхідної сировини. Однак, для автоматизованої системи керування це означає, що вона повинна бути достатньо інтелектуальною, щоб не тільки виявляти зміни в сировині, але й динамічно визначати оптимальну точку подачі та відповідним чином коригувати її. Це вимагає використання адаптивних або оптимізаційних алгоритмів, які можуть постійно переоцінювати умови та приймати рішення в реальному часі, додаючи ще один рівень складності до системи керування.

Каскадний характер контурів керування, де вихід однієї колони є входом для наступної, створює потенціал для значних взаємодій між ними. Наприклад, якщо проблема з розділенням у пропановій колоні К-4 призводить до зміни складу нижнього продукту, це безпосередньо вплине на ефективність стабілізатора К-5, а потім і на бутанову колону К-6. Це може призвести до "ефекту доміно", де невеликі збурення на початку процесу посилюються по мірі проходження через систему. Ефективна система керування повинна мати

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

можливість передбачати ці взаємодії та компенсувати їх, можливо, за допомогою багатозмінних або предиктивних методів керування, щоб підтримувати стабільність та якість продукції по всій установці.

### **1.5 Параметри контролю та регулювання в бутановій колоні**

Бутанова колона, як і будь-яка ректифікаційна колона, є складним об'єктом керування, що характеризується значним часом запізнення та численними взаємодіючими параметрами. Ефективне керування нею вимагає точного контролю та регулювання кількох ключових змінних. До основних параметрів контролю та регулювання в бутановій колоні належать: температура верху колони, температура низу колони, температура та витрата сировини, тиск у колоні, а також якість верхнього та нижнього продуктів.

Регулювання температури верху бутанової колони К-6 здійснюється шляхом зміни витрати зрошення (флегми). Якщо допустиме відносно велике відхилення цієї температури, то регулювання витрати зрошення є доцільним. Однак, для досягнення кращої якості регулювання при малих допустимих відхиленнях температури, доцільно встановлювати термопару на так званій "контрольній тарілці". Температура на цій тарілці, розташованій приблизно в середині концентраційної частини колони, змінюється значно більше, ніж на верхній тарілці, що робить її більш чутливою до змін у процесі. Це дозволяє раніше виявляти та коригувати відхилення. Згідно з технологічним регламентом, допустимі значення температури верху бутанової колони становлять 30-50°C.

Зниження температури верху колони призводить до неповного випаровування бутанової фракції, що, в свою чергу, зменшує продуктивність за верхнім продуктом. Навпаки, збільшення температури верху колони може призвести до того, що разом з бутановою фракцією будуть випаровуватися і пентанові фракції. Це погіршує якість дистиляту, роблячи його некондиційним та вимагаючи повторної ректифікації.

Використання "контрольної тарілки" для вимірювання температури, а не лише верхньої тарілки, є важливим аспектом для вивідного керування. Це

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

свідчить про те, що пряме вимірювання якості продукту на виході може бути занадто повільним або дорогим. Замість цього, керування здійснюється за допомогою "м'якого датчика" – температури на проміжній тарілці, яка є більш чутливою до змін у профілі концентрації. Це дозволяє системі керування швидше реагувати на зміни та підтримувати стабільність процесу, що є критично важливим для слабоформалізованих систем, де прямі вимірювання можуть бути проблематичними.

Температура низу бутанової колони безпосередньо впливає на якість та вихід важких фракцій, зокрема пентанової фракції. Зниження цієї температури може призвести до неповного випаровування бутану, внаслідок чого бутан потрапляє до інших продуктів, знижуючи їхню чистоту. І навпаки, підвищення температури низу колони може спричинити випаровування важких фракцій, які повинні залишатися в нижньому продукті. Для підтримання температури низу колони в межах, передбачених технологічним регламентом, залишок нагрівається у виносному випарнику. Допустимі значення температури низу бутанової колони становлять 40-60°C.

Температура та витрата сировини, що надходить до колони, повинні бути постійними, оскільки вони суттєво впливають на температурний режим усієї колони. Зниження температури вхідної сировини призводить до неповного випаровування певних фракцій у рідині, що надходить, що вимагає підведення більшої кількості теплоти до низу колони для компенсації. Збільшення витрати сировини в колону може призвести до нечіткого її розділення на компоненти, оскільки при цьому температура в колоні знижується. Витрата сировини регулюється автоматично за допомогою клапана, встановленого на вході в колону. Допустимі значення витрати сировини становлять 5-35 м<sup>3</sup>/год.

Тиск у колоні є критичним параметром. При підвищенні тиску ускладнюється процес випаровування, що призводить до зменшення продуктивності бутанової колони за дистилятом. Навпаки, при зменшенні тиску в колоні відбувається випаровування як бутану, так і пентану, що погіршує якість бутанового дистиляту. Тиск у колоні підтримується автоматично шляхом

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

відкриття клапана у верхній частині колони. Допустимі значення тиску в бутановій колоні становлять 0,3-0,55 МПа.

Якість готового продукту (бутану) є кінцевою метою процесу розділення. Згідно з регламентом, якість бутану повинна становити 94-98% масових. Вміст нормального бутану в дистилаті становить  $D=0,98$ , а вміст всього пентану та більш важких вуглеводнів у бутановій фракції становить  $R=0,99$  (масова частка). Початкова температура охолоджуючої води становить  $t_w=20^{\circ}\text{C}$ , а сировина в колону подається у вигляді киплячої речовини. Продуктивність апарату за сировиною становить  $G_c=30000$  кг/год.

Кількість зрошення є ключовим параметром для регулювання температури верху колони та, відповідно, якості верхнього продукту. Допустимі значення кількості зрошення становлять 5-30 м<sup>3</sup>/год.

Таблиця 1.3 - Параметри контролю і регулювання в бутановій колоні

НАЗВА ПАРАМЕТРУ	ОДИНИЦЯ ВИМІРЮВАННЯ	ДОПУСТИМІ ЗНАЧЕННЯ
Температура верху бутанової колони	°C	30-50
Температура низу бутанової колони	°C	40-60
Тиск в бутановій колоні	МПа	0,3-0,55
Якість готового продукту (бутану)	%, масові	94-98
Витрата сировини	м <sup>3</sup> /год	5-35
Кількість зрошення	м <sup>3</sup> /год	5-30

Бутанова колона є багатозмінним об'єктом керування зі значним часом запізнення. Це означає, що зміна одного параметра (наприклад, витрати зрошення) впливає не тільки на температуру верху, але й на інші параметри, такі як тиск і якість продукту, причому ці зміни проявляються не миттєво. Це вимагає застосування передових методів керування, таких як багатозмінне

керування або керування з передбаченням моделі, які можуть враховувати ці взаємодії та затримки, щоб забезпечити стабільну та ефективну роботу.

Критичний взаємозв'язок між температурою, тиском та витратами в колоні є фундаментальним для розуміння її динаміки. Ці параметри не є незалежними; вони взаємно впливають один на одного через складні термодинамічні та гідродинамічні зв'язки. Наприклад, зміна тиску впливає на температури кипіння, що, в свою чергу, змінює профіль температур у колоні та ефективність розділення. Зміна витрати сировини або зрошення впливає на гідравліку та тепловий баланс. Необхідність підтримувати ці параметри в жорстких діапазонах, як показано в Таблиці 1.4, підкреслює чутливість процесу. Будь-яке відхилення може призвести до значних втрат продукції або зниження її якості, що вимагає високоточних та інтегрованих систем керування.

### **Висновки до розділу**

Представлений аналіз першого розділу роботи охоплює поточний стан задач керування складними інерційними процесами та методи їхнього вирішення. У дослідженні виокремлено значний клас об'єктів, моделі яких характеризуються низьким рівнем формалізації, а їхні поточні параметри не можуть бути безпосередньо спостережені або отримані шляхом прямих вимірювань.

Газофракційна установка (ГФУ) була розглянута як яскравий приклад такого складного інерційного об'єкта. Для неї було надано комплексний аналіз, що включає детальний опис послідовності технологічних операцій, а також аспектів керування. У розділі також представлена вичерпна інформація щодо технологічного регламенту, що охоплює характеристику обладнання, сировини та готового продукту. Завершальним елементом аналізу є розгляд параметрів, що підлягають контролю та впливають на хід процесу.

Загалом, дослідження підкреслює, що газофракційна установка є типовим представником класу слабоформалізованих об'єктів керування, що вимагає застосування передових, адаптивних та робастних підходів до автоматизації.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Внутрішня мінливість сировини, багатоцільові вимоги до якості продукції та складні взаємозв'язки між технологічними параметрами створюють значні виклики для традиційних методів керування. Необхідність керування двома типами невизначеності — стохастичною та нечіткою — а також залежність від інтегральних та вивідних показників для моніторингу стану процесу, підкреслюють важливість розробки гібридних систем керування. Такі системи повинні бути здатними не лише підтримувати стабільність процесу, але й оптимізувати його ефективність та економічні показники в умовах динамічних змін та обмеженої інформації.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

## 2 ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Методології створення малоінерційних систем керування в умовах невизначеності

Сучасні технологічні системи дедалі частіше обладнуються лінгвістичними моделями управління, які формуються на основі аналізу експлуатаційних даних. Ці моделі є основою для розробки нечітких регуляторів, що описують взаємозв'язки між параметрами процесу за допомогою лінгвістичних змінних. Для ефективного функціонування таких систем критично важливою є інформація про поточний стан об'єкта, яка також має бути представлена у вигляді лінгвістичних термів. Враховуючи, що пряме вимірювання часто є ускладненим, застосовуються вимірювальні системи, що спираються на непрямі дані. Для обробки цих даних та отримання значень технологічних параметрів широко використовуються багатосарові нейронні мережі, які функціонують як універсальні апроксиматори, моделюючи складні залежності між вимірюваними та необхідними величинами.

Зазначені підходи до управління складними системами в умовах невизначеності вимагають поєднання різних парадигм штучного інтелекту. Лінгвістичні моделі, що знаходять своє втілення у нечіткій логіці, ефективно працюють з якісними, неточними знаннями, які часто є характерними для людського досвіду. Водночас, нейронні мережі демонструють високу ефективність у розпізнаванні складних закономірностей та апроксимації нелінійних функцій на основі великих обсягів даних, навіть якщо ці дані є неповними або зашумленими. Таким чином, для створення стійких та адаптивних систем управління, що здатні ефективно функціонувати в реальних умовах, де домінують невизначеність та складні взаємозв'язки, необхідним є синергетичний підхід. Це передбачає інтеграцію можливостей нечіткої логіки для обробки якісної інформації та прийняття рішень на основі експертних знань, а також нейронних мереж для обробки кількісних даних, розпізнавання образів та навчання складних залежностей. Таке поєднання дозволяє розробити рішення,

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

що є більш надійними та гнучкими, ніж системи, побудовані на використанні лише одного з цих методів.

## 2.2 Застосування методів нечіткої логіки в задачах керування

Об'єкти управління, що розглядаються в контексті даного дослідження, часто характеризуються як "слабо визначені". Вони мають такі особливості, як унікальність, відсутність чітко визначеної оптимальності та індивідуальність поведінки особи, яка приймає рішення. Примітно, що кваліфікований експерт, володіючи значним досвідом роботи з унікальним об'єктом, здатний ефективно вирішувати управлінські завдання, навіть за умов недостатньо чіткої картини процесів у ньому та його унікальності. Це підкреслює, що в процесі практичної роботи з управління об'єктом, особа, яка приймає рішення, набуває знань, що є ключовим інструментом для вирішення завдань управління слабо визначеними об'єктами.

Ця обставина зумовлює необхідність автоматизації інтелектуальної діяльності людини. Особливістю автоматизації інтелектуальної діяльності оператора, який має досвід управління конкретним об'єктом або класом об'єктів, є розробка моделі не самого об'єкта, а моделі управління ним. Іншими словами, моделюються не статичні характеристики об'єкта, а динамічні дії персоналу під час управління, які хоча й усвідомлюються, проте не можуть бути легко описані формальною математичною мовою. Якщо існує досвідчений оператор, модель управління об'єктом вже існує — вона може бути представлена у вигляді набору інструкцій або міститися в пам'яті оператора. Завдання полягає лише в тому, щоб представити цю модель у формі, зручній для реалізації автоматизованої системи управління.

Таким чином, доцільним є створення системи, яка дозволить формалізувати та застосовувати професійні знання досвідчених операторів та експертів-технологів для вирішення завдань управління обладнанням. Це забезпечить можливість управління об'єктом людьми, які не мають достатнього досвіду роботи з обладнанням цього класу і виконують скоріше функції

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

диспетчера, а не оператора.

При розгляді процесу прийняття рішень людиною, зазвичай виявляється, що її оцінки мають більше якісну, ніж кількісну природу. Створити формальну модель управління складним об'єктом, яка б імітувала дії оператора, неможливо без використання інформації, що не може бути виражена кількісно. Це пов'язано з тим, що основним джерелом інформації для побудови моделі керування є людина-оператор. Зазвичай людині легше надавати таку інформацію в неформалізованій формі, у вигляді якісних понять. Людина мислить і приймає рішення не лише в "кількостях"; вона, насамперед, думає в "якостях", і для неї пошук рішення — це, в першу чергу, пошук задуму рішення, де кількісні оцінки відіграють допоміжну роль.

З цієї точки зору, традиційні математичні методи виявляються малоефективними для аналізу систем, побудованих на принципах людського мислення, оскільки вони не дозволяють виявити, формалізувати та використовувати нечіткість людського мислення та поведінки. Класична математична логіка, орієнтована на точні, чітко визначені поняття, є недостатньою для адекватного опису складних реальних систем, в яких присутня значна частка невизначеності. На відміну від неї, теорія нечітких множин, запропонована Лотфі Заде, дозволяє працювати з нечіткими поняттями, такими як "високий", "швидкий" чи "гарячий", що наближає математичні моделі до інтуїтивного розуміння людини. Цей підхід особливо корисний для моделювання систем, в яких важко провести чітку межу між різними станами або категоріями. Теорія нечітких множин надає більш гнучкий і природний інструмент для опису складних процесів, що робить її незамінною в багатьох областях науки і техніки.

Таким чином, нечітка логіка є критично важливим інструментом для подолання розриву між інтуїтивним, якісним людським досвідом та формальними, автоматизованими системами управління. Це є фундаментальним викликом у сфері штучного інтелекту: як ефективно формалізувати та застосувати приховані знання людини, які часто виражаються неточними,

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

лінгвістичними термінами. Завдяки здатності представляти "нечіткі поняття", нечітка логіка дозволяє системам управління більш точно імітувати процеси прийняття рішень людиною, долаючи обмеження класичних математичних підходів, які вимагають абсолютної точності. Це означає, що основна цінність нечіткої логіки полягає в її здатності перетворювати неформальні, якісні знання операторів-людей у обчислювану форму, тим самим ефективно долаючи когнітивний розрив між людською інтуїцією та машинною операцією.

Крім того, формалізація експертних знань через нечітку логіку має значні наслідки для управління персоналом та масштабованості операцій. Вбудовуючи накопичений досвід досвідчених операторів в автоматизовані системи, це дозволяє менш досвідченому персоналу ефективно керувати складним обладнанням. Це трансформує роль від вузькоспеціалізованого "оператора" до більш наглядової "диспетчерської" функції, зменшуючи залежність від обмеженої кількості висококваліфікованих фахівців. Це, в свою чергу, потенційно знижує бар'єри для навчання та операційні витрати, підвищуючи стійкість операцій та їх масштабованість.

### **2.3 Застосування нейромереж у завданнях керування складними об'єктами**

Складна взаємодія між вимірюваними параметрами об'єкта управління та тими, що безпосередньо впливають на його поведінку, часто ускладнює створення точних математичних моделей. Традиційні методи моделювання можуть виявитися недостатньо гнучкими для опису таких систем. Саме тому багат шарові нейронні мережі, завдяки своїй здатності до навчання та адаптації, пропонують ефективне вирішення цієї проблеми. Нейронні мережі здатні апроксимувати складні нелінійні функції будь-якої складності, що дозволяє їм точно моделювати залежності між різними параметрами об'єкта. Процес навчання мережі полягає у підборі оптимальних значень ваг з'єднань між нейронами таким чином, щоб мінімізувати різницю між бажаним і фактичним виходом мережі. Застосування сигмоїдної функції активації, яка плавно змінює

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

своє значення від 0 до 1, забезпечує нелінійність мережі і дозволяє їй ефективно розв'язувати складні завдання.

Особливо цінною властивістю нейронних мереж є їхня здатність працювати з неповними або шумливими даними. Це дозволяє використовувати їх для ідентифікації систем, про які відомо недостатньо інформації, а також для адаптивного управління в умовах змінних зовнішніх впливів. Крім того, нейронні мережі можуть бути використані для розв'язання задач прогнозування, що є важливим для оптимізації процесів управління. Сучасні дослідження в галузі нейромережевих технологій спрямовані на розробку нових алгоритмів навчання, які дозволяють підвищити швидкість і точність навчання мереж, а також забезпечити їхню стійкість до перенавчання. Важливим напрямком є також розробка методів оцінки якості моделей, що дозволяють вибрати оптимальну архітектуру мережі для конкретної задачі.

Принцип поділу праці між системами розпізнавання образів та експертними системами знаходить своє відображення в людському пізнанні. Людський мозок використовує різні механізми для обробки інформації, які відрізняються за швидкістю та точністю. Швидке розпізнавання образів, наприклад, обличчя або предметів, дозволяє орієнтуватися в навколишньому світі та реагувати на зміни в реальному часі. Однак, для прийняття складних рішень, що вимагають аналізу великої кількості інформації та глибокого розуміння ситуації, залучаються більш повільні, але точні когнітивні процеси. Ця аналогія з когнітивною архітектурою людини є не просто порівнянням, а пропонує концептуальну основу для проектування інтелектуальних систем управління. Вона вказує на те, що ефективні системи штучного інтелекту не повинні покладатися на єдиний монолітний підхід, а натомість інтегрувати різні парадигми ШІ. Наприклад, нейронні мережі можуть виконувати швидкі, керовані даними функції розпізнавання образів, тоді як нечітка логіка або експертні системи можуть займатися більш обміркованим, заснованим на знаннях прийняттям рішень. Такий інтегрований підхід може призвести до створення більш надійних, адаптивних систем, що здатні демонструвати

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

продуктивність, близьку до людської, у складних та невизначених умовах.

#### 2.4. Постановка завдань дослідження

Для об'єктів, що розглядаються, досягнення оптимального управління за всіма критеріями є недосяжним за допомогою традиційних методів автоматизації. Це пов'язано з тим, що точні математичні моделі таких систем створити складно. Тому вирішальну роль в управлінні відіграє людський фактор. Навички та досвід оператора дозволяють йому ефективно керувати процесом в реальному часі, враховуючи всі нюанси та непередбачувані ситуації.

Для ефективного управління слабо структурованими процесами потрібні системи автоматизації, здатні до самонавчання та адаптації. Такі системи повинні бути здатні імітувати інтелектуальні дії людини, такі як розпізнавання образів, прийняття рішень на основі неповних даних та адаптація до змінних умов. Однак, створення таких систем пов'язане з необхідністю вирішення складних наукових задач, таких як формалізація експертних знань та розробка методів оцінки якості процесу.

М'які обчислення, засновані на теорії нечітких множин, надають нові можливості для розробки систем автоматичного управління. На відміну від традиційних методів, які оперують точними числами, м'які обчислення дозволяють використовувати нечіткі поняття та лінгвістичні змінні, що наближені до людської мови. Це особливо важливо для систем, які мають справу зі складними, нечітко визначеними об'єктами та процесами. Застосування нечіткої логіки дозволяє створювати системи, які більш адаптивні до змінних умов і здатні приймати рішення в умовах неповної інформації.

Цей підхід чітко артикулює фундаментальний зсув парадигми в проектуванні систем управління: відхід від класичного ідеалу точного математичного моделювання та детермінованого контролю до підходів, які активно враховують та керують притаманною невизначеністю та неточністю. Визнання того, що "оптимальне управління... є недосяжним за допомогою традиційних методів" для складних систем через труднощі створення "точних

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

математичних моделей", є критичним усвідомленням. Введення "м'яких обчислень" як нової парадигми означає відмову від жорстких, точних обчислень на користь більш гнучких, людиноподібних міркувань, що є суттєвим для реальних, нечітко визначених процесів. Це не просто використання нових інструментів; це фундаментальна зміна у тому, як проблеми управління концептуалізуються та вирішуються. Замість того, щоб намагатися втиснути складну, невизначену реальність у точні моделі, нова парадигма розробляє моделі, які за своєю суттю призначені для обробки нечіткості, неточності та людиноподібних міркувань, що є значним зрушенням у базовій філософії інженерії управління.

### **Висновки до розділу**

Для управління складними технологічними процесами, де вимоги до якості та продуктивності часто суперечать одна одній, нечітка логіка є ефективним інструментом. Вона дозволяє моделювати нечіткі поняття та відносини, які характерні для реальних виробничих процесів. За допомогою нечіткої логіки можна створити систему управління, яка буде здатна автоматично знаходити компроміс між якістю та продуктивністю.

Здатність нечіткої логіки "автоматично знаходити компроміс між якістю та продуктивністю" підкреслює її вирішальну роль у практичній багатоцільовій оптимізації для складних промислових процесів. У реальних сценаріях цілі рідко бувають єдиними або ідеально узгодженими; вони часто конфліктують (наприклад, максимізація випуску проти мінімізації споживання енергії). Нечітка логіка надає механізм для навігації цими суперечливими цілями та досягнення задовільної, а не суворо оптимальної продуктивності, що часто є більш досяжним та стійким у невизначених середовищах. Це виходить за рамки простого оброблення неточностей, активно керуючи компромісами.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

# 3 РОЗРОБЛЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОФРАКЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ НА ОСНОВІ КЛАСИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ

## 3.1 Виявлення вхідних і вихідних змінних керованого об'єкта

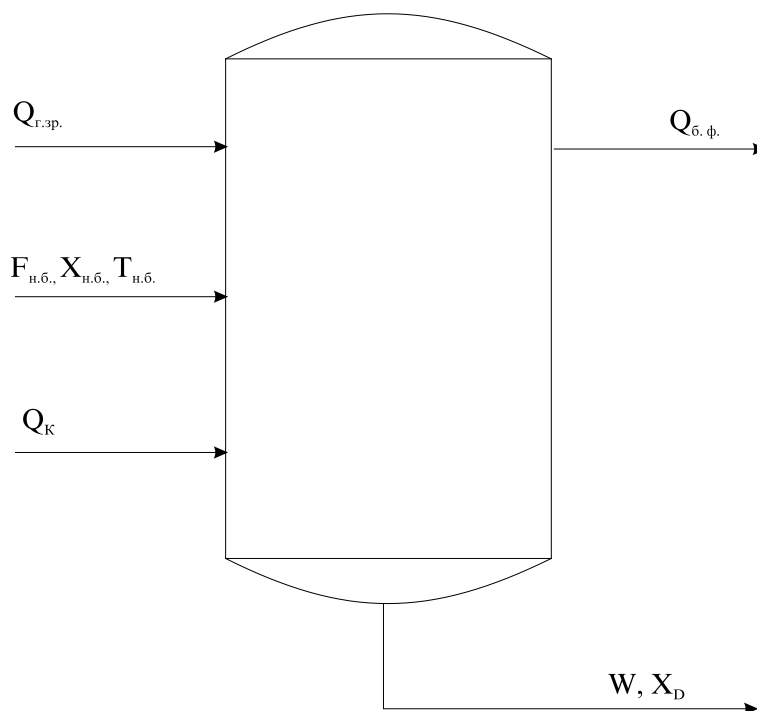
Газофракціонування є ключовим промисловим процесом, що забезпечує точне розділення вуглеводневих сумішей на їхні складові компоненти. Цей складний процес вимагає надзвичайно точних та надійних механізмів керування для досягнення оптимальної якості продукції, операційної ефективності та суворого дотримання стандартів безпеки. Автоматизація, зокрема через застосування класичних систем керування, відіграє фундаментальну роль у забезпеченні та підтримці стабільності та точності критичних параметрів процесу. До таких параметрів належать температура, тиск та витрати газів на різних етапах фракціонування. Основна мета цього звіту — провести глибоке дослідження застосування та ефективності класичних регуляторів у цьому контексті, систематично висвітлюючи їхні можливості у досягненні бажаних показників та визнаючи їхні властиві обмеження при зіткненні зі складною динамікою процесу.

Блок стабілізації, що є основним об'єктом керування в цьому дослідженні, характеризується складною взаємодією вхідних та вихідних параметрів. Головне завдання його автоматичної системи керування полягає в оптимізації теплового режиму всередині блоку, що забезпечує ефективну та стабільну роботу. Вихідні параметри, які слугують ключовими індикаторами техніко-економічних показників процесу, охоплюють кілька критичних вимірювань: обсяг відбору дистиляту, якісні характеристики бутанової фракції, а також точний відсотковий вміст як низькокиплячих компонентів у дистиляті, так і висококиплячих компонентів у кубовому продукті.

Натомість, вхідні параметри – це ті, зміни яких безпосередньо впливають на вищезгадані вихідні параметри. Для блоку стабілізації (як концептуально показано на рисунок 3.1), до них належать витрата, температура та якість

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

сировини, подача тепла у випарник (зазвичай витрата водяної пари) та витрата гострого зрошення.



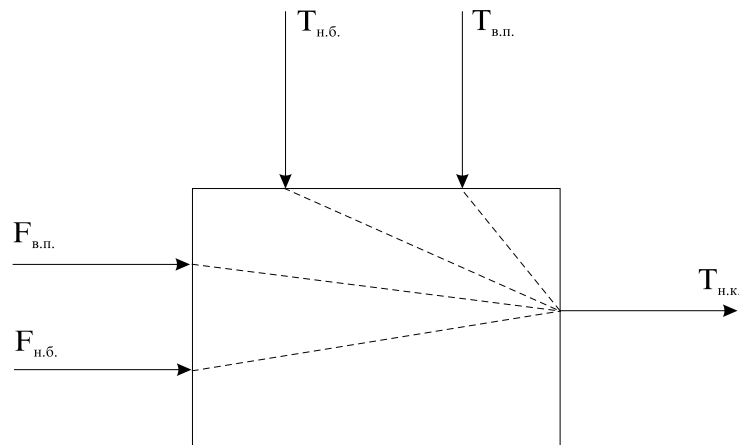
$F_{н.б.}$  – витрата нестабільного бензину;  $X_{н.б.}$  – якість нестабільного бензину;  $T_{н.б.}$  – температура нестабільного бензину;  $W$  – відбір стабільного бензину;  $X_D$  – процентний вміст висококиплячих компонентів в кубовому продукті;  $Q_K$  – витрата пари в випарник;  $Q_{г.зр.}$  – витрата гострого зрошення;  $Q_{б. ф.}$  – відбір бутанової фракції

Рисунок 3.1 - Вхідні і вихідні параметри блоку стабілізації

Особливо критичним прикладом, що підкреслює необхідність точного керування, є температура низу стабілізуючої колони (див. рисунок 3.2). Ця температура безпосередньо визначає якість стабільного бензину, який є кубовим залишком. Відхилення від оптимальної температури низу колони можуть призвести до значних експлуатаційних проблем та погіршення якості продукції. Якщо температура низу колони перевищує встановлену норму, частина цінного бензинового продукту може ненавмисно потрапити до бутанової фракції, що призведе до кількісних втрат бензину. І навпаки, зниження температури низу колони може спричинити неповне випаровування бутанової фракції, тим самим

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

погіршуючи якість бензину. Отже, постійний та точний моніторинг і регулювання температури низу колони є абсолютно необхідними для підтримки специфікацій продукції та операційної ефективності.



$T_{н.к.}$  – температура низу стабілізатора;  $T_{в.п.}$  – температура водяної пари;  $T_{н.б.}$  – температура нестабільного бензину;  $F_{н.б.}$  – витрата нестабільного бензину;  $F_{в.п.}$  – витрата водяної пари

Рисунок 3.2 - Схема динамічних каналів низу стабілізуючої колони

Цей процес, як впливає з переліку численних вхідних (витрата нестабільного бензину, якість нестабільного бензину, температура нестабільного бензину, витрата пари у випарник, витрата гострого зрошення) та вихідних (відбір стабільного бензину, відсотковий вміст висококиплячих компонентів у кубовому продукті, відбір бутанової фракції) змінних, а також критичної ролі температури низу колони для якості бензину, має внутрішньо багатовимірний характер. Взаємозв'язки, такі як залежність якості бутанової фракції від витрати гострого зрошення, та якості стабільного бензину від кількості й температури поданого теплоносія, вказують на значне перехресне зв'язування між параметрами. Це означає, що хоча окремі канали можуть контролюватися, загальна взаємодія цих змінних створює складну проблему багатовимірного керування. Прості одноконтурні системи керування, навіть каскадні, можуть зіткнутися з труднощами в оптимальному управлінні сильними перехресними зв'язками або значними збуреннями, що одночасно впливають на кілька вхідних параметрів. Згадка про "складну взаємозалежність параметрів" та "високу

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

динаміку процесів" вказує на фундаментальне обмеження класичних, значною мірою роз'єднаних стратегій керування у вирішенні властивої багатоканальної природи таких процесів. Це свідчить про те, що для справді оптимального керування можуть знадобитися передові методи, здатні безпосередньо обробляти ці складні взаємодії, а не покладатися на серію незалежних або слабо пов'язаних контурів.

### 3.2 Експериментальне визначення динамічних характеристик

Точне визначення динамічних характеристик є невід'ємною передумовою для ефективного проєктування та впровадження будь-якої системи керування. Серед різних доступних методологій для цієї мети, у цьому дослідженні конкретно застосовується метод аперіодичного впливу, який більш відомий як метод перехідної характеристики або метод стрибка. Ця техніка передбачає навмисне введення раптової, ступінчастої зміни до обраної вхідної змінної процесу. Подальше спостереження та запис вихідної реакції системи з часом дозволяють охарактеризувати її динамічну поведінку.

Наукова обґрунтованість та застосовність методу перехідної характеристики, особливо для подальшого лінійного моделювання, ґрунтуються на кількох ключових припущеннях щодо досліджуваного об'єкта. По-перше, об'єкт дослідження вважається лінійним, що означає, що вхідна змінна повинна коливатися в невеликих межах, щоб підтримувати пропорційну вихідну реакцію. По-друге, динамічні властивості об'єкта передбачаються незмінними в часі протягом експерименту та, в ідеалі, під час нормальної експлуатації. По-третє, вихідна змінна вважається незалежною від просторових координат об'єкта.

Незалежно від обраного методу динамічної характеристики, процес зазвичай охоплює три окремі етапи:

**Підготовка та планування експерименту.** Цей початковий етап є критично важливим для забезпечення якості даних. Він включає ретельний вибір відповідного обладнання. Наприклад, прилад, призначений для реєстрації змін вихідної змінної, повинен мати високий ступінь точності, зокрема клас не менше

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

0.5, у поєднанні з найменшою зоною нечутливості. Крім того, діапазон шкали реєструючого приладу та швидкість руху діаграмного блоку повинні бути відкалібровані таким чином, щоб зміна реєструючої змінної займала значну частину записуючого носія (наприклад, 100-200 мм по ширині для значення змінної та 200-250 мм по довжині для часу). У цьому конкретному експерименті було обрано вторинний прилад типу КСП-2, який відповідав цим суворим вимогам, маючи шкалу від 0 до 200°C, напругу живлення 220 В та клас точності 0.5. Амплітуда вхідного впливу була ретельно обрана в інтервалі 0.35 - 0.4 від мінімально-максимального значення, при цьому 100% переміщення регулюючого органу (РО) було визначено як мінімально-максимальне значення для збурень, що застосовуються через рух РО.

Проведення експерименту. На початку експерименту об'єкт процесу приводиться до стабільного робочого режиму, що характеризується постійною вхідною змінною. Згодом застосовується контрольоване збурення, як правило, шляхом відкриття регулюючого органу (РО) на певний приріст (наприклад, 1-2 одиниці). Отримана зміна вихідної величини потім ретельно реєструється з часом. Одночасно документуються будь-які значні зміни основних збурюючих впливів, що діють на систему. Експеримент вважається завершеним, коли вихідна величина стабілізується і залишається незмінною з певного моменту часу, що вказує на досягнення системою нового сталого стану. Для забезпечення статистичної надійності для кожного досліджуваного каналу керування проводяться три окремі експерименти.

Обробка результатів експерименту. Сирі характеристики, отримані з цих експериментів, потім обробляються у відповідних точках даних за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми. Ця обробка має на меті отримати усереднені характеристики, які зменшують вплив випадкових шумів і забезпечують більш надійне представлення справжньої динамічної поведінки системи. Початкові результати цих розрахунків для різних каналів керування систематично представлені в табличному форматі.

Вибір методу перехідної характеристики відображає прагматичний підхід

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

до ідентифікації системи в реальних промислових умовах. Цей метод широко застосовується в промисловій автоматизації завдяки своїй відносній простоті реалізації порівняно зі складнішими тестами частотної характеристики або передовими алгоритмами ідентифікації системи, які можуть вимагати спеціалізованих збуджуючих сигналів або значних обчислювальних ресурсів. Він дозволяє отримати динамічні моделі з мінімальними перебоями в поточних операціях. Однак точність подальшого проектування регулятора безпосередньо залежить від достовірності цих експериментально отриманих динамічних характеристик, що підкреслює практичний компроміс між легкістю експерименту та точністю моделі.

### **3.3 Збір та обробка результатів експерименту на керованому об'єкті**

Вибір конкретного обладнання має першочергове значення для точного збору даних. Вторинний прилад КСП-2 був обраний завдяки його продемонстрованій точності (клас 0.5) та відповідному діапазону вимірювання (0-200°C), що робить його придатним для вимірювань температури. Амплітуда вхідного збурення, встановлена на рівні 0.35-0.4 від мінімально-максимального значення (або 12% переміщення регулюючого органу (РО), як видно з наданих таблиць), була ретельно обрана для забезпечення того, щоб реакція системи залишалася в межах припустимого лінійного робочого діапазону.

Протокол збору даних передбачав встановлення стаціонарного стану для процесу, застосування контрольованої ступінчастої зміни до регулюючого органу (РО), а потім безперервний запис вихідної реакції до досягнення нового стаціонарного стану. Цей систематичний підхід був відтворений для кожного окремого досліджуваного каналу керування, включаючи:

- Канал, що відображає положення регулюючого органу на температуру низу колони.
- Канал, що пов'язує положення регулюючого органу з витратою теплоносія.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

- Канал, що з'єднує температуру теплоносія з температурою низу колони.

Наступні таблиці 3.1, 3.2 представляють необроблені експериментальні дані, отримані для кожного з цих каналів, що слугують основою для подальшої обробки та моделювання.

Таблиця 3.1 - Експериментальні дані по каналу “положення регулюючого органу – температура низу колони”

Т,С	% ХОДУ РО	Т,С	Т,С	% ХОДУ РО	Т,С
0.02	12.02	100.03	90.01	12.02	109.33
10.02	12.02	100.02	100.01	12.02	109.54
20.02	12.02	100.05	110.01	12.02	109.62
30.02	12.02	102.82	120.01	12.01	109.74
40.02	12.02	105.04	130.01	12.01	109.86
50.02	12.02	106.42	140.01	12.01	109.88
60.02	12.02	107.43	150.01	12.01	109.93
70.02	12.02	108.23	160.01	12.01	109.95
80.02	12.02	109.03	170.01	12.01	109.94

*Примітка. Початкове відкриття регулюючого органу 65%.*

Таблиця 3.2 - Експериментальні дані по каналу “положення регулюючого органу - витрата теплоносія”

T, C	% ХОДУ РО	QT, М3/ГОД
0.01	12.01	550.02
5.01	12.01	555.73
10.01	12.01	558.84
15.01	12.01	560.15
20.01	12.01	560.66
25.01	12.01	560.97
30.01	12.01	561.03
35.01	12.01	561.08

*Примітка. Початкове відкриття регулюючого органу 65%.*

Таблиця 3.3 - Експериментальні дані по каналу “температура теплоносія– температура низу колони”

T, C	ТТ.Н	T, C	T, C	ТТ.Н	T, C	T, C	ТТ.Н	T, C
0.01	200.01	100.01	80.01	200.01	108.21	160.01	200.01	110.01
10.01	200.01	100.01	90.01	200.01	108.81	170.01	200.01	110.01
20.01	200.01	100.01	100.01	200.01	109.31			
30.01	200.01	101.21	110.01	200.01	109.71			
40.01	200.01	102.81	120.01	200.01	109.91			
50.01	200.01	104.31	130.01	200.01	109.99			
60.01	200.01	105.21	140.01	200.01	109.91			
70.01	200.01	107.01	150.01	200.01	110.01			

*Примітка. Початкова температура теплоносія  $t_{т.н}=175C$ .*

Ці таблиці є надзвичайно цінними, оскільки вони безпосередньо представляють вихідні дані експериментів. Вони відображають реакцію системи на ступінчасті зміни вхідних параметрів або збурень, що є первинним

емпіричним доказом динамічної поведінки системи до будь-яких математичних перетворень чи апроксимацій. Їх включення забезпечує прозорість та дозволяє читачам відстежувати походження подальших оброблених даних та отриманих моделей.

Слід зазначити, що якщо ці ідеальні припущення (лінійність, незмінність у часі) значно порушуються під час фактичної роботи установки — наприклад, через великі, несподівані збурення, що виводять систему в нелінійні режими, або через довгострокові зміни характеристик процесу (наприклад, забруднення, деградація каталізатора) — експериментально отримані передавальні функції та налаштовані на їх основі регулятори можуть не працювати оптимально або навіть призвести до нестабільності. Це підкреслює критичний, часто ігнорований зв'язок між контрольованим експериментальним середовищем, теоретичними припущеннями, що лежать в основі моделювання, та кінцевою надійністю та продуктивністю системи керування в динамічному промисловому середовищі. Це неявно вказує на обмеження суто класичного лінійного керування для сильно нелінійних або змінних у часі процесів, натякаючи на необхідність адаптивних або робастних стратегій керування в таких випадках.

Початкові експериментальні дані, отримані та представлені в розмірних одиницях, проходять важливе перетворення в безрозмірні величини. Ця стандартизація є важливою з кількох причин: вона полегшує порівняльний аналіз різних фізичних змінних, спрощує математичні маніпуляції та дозволяє застосовувати узагальнені принципи теорії керування без обмежень конкретними одиницями.

Перетворення виконується для кожного з трьох визначених каналів процесу:

- Для каналу, що відображає "положення регулюючого органу – температуру низу колони", експериментальні дані з таблиці 3.1 перетворюються на безрозмірні значення, які потім зведені та представлені в таблиці 3.4.
- Для каналу, що пов'язує "положення регулюючого органу - витрату теплоносія", експериментальні дані з таблиці 3.2 спочатку використовуються для

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

побудови експериментальної перехідної характеристики. Згодом ці дані перетворюються на безрозмірні величини, а результати зведені в таблиці 3.5.

- Аналогічно, для каналу, що з'єднує "температуру теплоносія – температуру низу колони", експериментальні дані з таблиці 3.3 використовуються для побудови експериментальної перехідної характеристики. Ці дані потім перетворюються на безрозмірні величини, а безрозмірні результати систематично показані в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Експериментальні дані по каналу “положення регулюючого органу - температура низу колони ” в безрозмірних одиницях.

T,С	XВХ	УВИХ	T,С	XВХ	УВИХ
0.01	1.01	0.01	90.01	1.01	0.91
10.01	1.01	0.01	100.01	1.01	0.94
20.01	1.01	0.01	110.01	1.01	0.96
30.01	1.01	0.29	120.01	1.01	0.98
40.01	1.01	0.51	130.01	1.01	0.99
50.01	1.01	0.65	140.01	1.01	0.99
60.01	1.01	0.75	150.01	1.01	1.00
70.01	1.01	0.83	160.01	1.01	1.00
80.01	1.01	0.88	170.01	1.01	1.00

Обчислимо коефіцієнт передачі для даного каналу

$$K_n = \frac{\Delta t}{\Delta \% \text{ ходу } PO} = \frac{10}{12} = 0.8 \left( \frac{^{\circ}C}{\%} \right). \quad (3.1)$$

Таблиця 3.5 - Експериментальні дані по каналу “положення регулюючого органу-витрата теплоносія” в безрозмірних одиницях.

T,С	XBX	YBIX
0.01	1.01	0.01
5.01	1.01	0.528
10.01	1.01	0.809
15.01	1.01	0.929
20.01	1.01	0.977
25.01	1.01	0.997
30.01	1.01	1.00
35.01	1.01	1.009

$$Kn = \frac{\Delta Q_T}{\Delta \% \text{ходу } PO} = \frac{11}{12} = 0.9 \left( \frac{M^3}{\text{кг} \cdot \%} \right). \quad (3.2)$$

Таблиця 3.6 - Експериментальні дані по каналу “температура теплоносія - температура низу колони ” в безрозмірних одиницях.

T,С	Z	YBIX	T,С	Z	YBIX	T,С	Z	YBIX
0.01	1.01	0.01	70.01	1.01	0.71	140.01	1.01	1.01
10.01	1.01	0.01	80.01	1.01	0.83	150.01	1.01	1.01
20.01	1.01	0.01	90.01	1.01	0.89	160.01	1.01	1.01
30.01	1.01	0.13	100.01	1.01	0.94	170.01	1.01	1.01
40.01	1.01	0.29	110.01	1.01	0.98			
50.01	1.01	0.44	120.01	1.01	1.00			
60.01	1.01	0.53	130.01	1.01	1.009			

$$Kn = \frac{\Delta t}{\Delta t_{T.H}} = \frac{10}{25} = 0.4. \quad (3.3)$$

Ці таблиці є надзвичайно цінними, оскільки вони безпосередньо

демонструють результат першого важливого етапу обробки даних: перетворення необроблених експериментальних даних у безрозмірні одиниці. Це дозволяє безпосередньо порівнювати їх з необробленими даними та візуально демонструє процес нормалізації, що є стандартною процедурою в інженерії керування. Ці безрозмірні значення слугують безпосереднім вхідним сигналом для подальшої апроксимації передавальних функцій, що робить ці таблиці життєво важливим проміжним кроком у процесі моделювання системи.

### 3.4 Апроксимація динамічних каналів за допомогою передавальних функцій

Після перетворення даних у безрозмірну форму наступним і не менш критичним кроком є апроксимація динамічних характеристик об'єкта процесу за допомогою математичних моделей, зокрема передавальних функцій. Цей процес передбачає підгонку експериментально отриманих перехідних характеристик до спрощених математичних представлень, що є життєво важливим для абстрагування динамічної поведінки системи у форму, придатну для формального проектування та аналізу систем керування.

Для каналу "положення регулюючого органу – температура низу колони" експериментальна крива, що спостерігається для цього каналу, демонструє чітку експоненціальну форму, характерну для системи першого порядку з часовою затримкою. Отже, для її апроксимації обирається та використовується передавальна функція першого порядку.

$$W(p) = \frac{0.8 \cdot e^{-20p}}{78.493p + 1} \quad (3.4)$$

Важливо, що похибка апроксимації, отримана в результаті цієї підгонки, була визнана задовільною, що вказує на те, що спрощена модель адекватно відображає суттєву динаміку каналу та відповідає встановленим вимогам до проектування керування.

Для допоміжних каналів, а саме "положення регулюючого органу - витрата теплоносія" та "температура теплоносія – температура низу колони", той самий

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

алгоритм розрахунку та стратегія апроксимації (з використанням аперіодичних ланок першого порядку) застосовуються для підгонки експериментальних кривих цих каналів. Отримана передавальна функція для каналу "положення регулюючого органу - витрата теплоносія" представлена рівнянням (3.5).

$$W(p) = \frac{0.9}{6.2 \cdot p + 1}. \quad (3.5)$$

Передавальна функція для каналу "температура теплоносія – температура низу колони" наведена в рівнянні (3.6).

$$W(p) = \frac{0.4 \cdot e^{-22 \cdot p}}{87 \cdot p + 1}. \quad (3.6)$$

Вибір апроксимації складних динамічних процесів за допомогою простих моделей першого порядку є поширеною та прагматичною інженерною практикою. Хоча реальні промислові процеси за своєю природою складніші, часто демонструючи динаміку вищого порядку, значні затримки та різні нелінійності, вибір найпростішої математичної моделі, яка адекватно відображає суттєву динамічну поведінку системи для цілей проектування керування, є стратегічним. Більш високий порядок або складніша нелінійна модель, хоча й може запропонувати вищу точність у порівнянні з реальним процесом, неминуче призведе до значно складнішого проектування, налаштування та аналізу регулятора. Згадка про "задовільну похибку апроксимації" вказує на те, що це спрощення вважається прийнятним для досягнення цілей керування. Це підкреслює фундаментальний компроміс в інженерії керування між досягненням високої точності/складності моделі та забезпеченням практичності, надійності та простоти впровадження отриманого регулятора.

### 3.5 Оптимальне налаштування класичних регуляторів

Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регуляторів є критично важливим для негайного запуску установки без проведення численних випробувань, що дозволяє значно заощадити матеріальні витрати та часові ресурси.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.5.1 Розрахунок параметрів для одноконтурної автоматичної системи керування

Для досягнення високоточного регулювання критичних параметрів процесу, таких як температура низу колони, стратегічно використовується пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор. Вибір ПІ-регулятора обґрунтований його властивою здатністю усувати статичну похибку в процесі регулювання, тим самим гарантуючи, що керована змінна в кінцевому підсумку сходиться до бажаного заданого значення і підтримує його без будь-якого постійного відхилення.

Загальна передавальна функція для ПІ-регулятора неперервної дії математично виражається як:

$$W_p(p) = \frac{C_1 \cdot p + C_0}{p}. \quad (3.7)$$

Використовуючи стандартну обчислювальну програму, призначену для налаштування регуляторів, були систематично визначені оптимальні параметри для цього конкретного застосування. Ці оптимальні значення виявилися:  $C_0 = 0.113152$  та  $C_1 = 4.184657$ . Отже, конкретна передавальна функція для ПІ-регулятора, реалізованого в цій одноконтурній конфігурації, точно визначається як:

$$W_p(p) = \frac{4.18 \cdot p + 0.11}{p}. \quad (3.8)$$

Спрощена структурна схема цієї одноконтурної АСК зображена на рисунку 3.3.

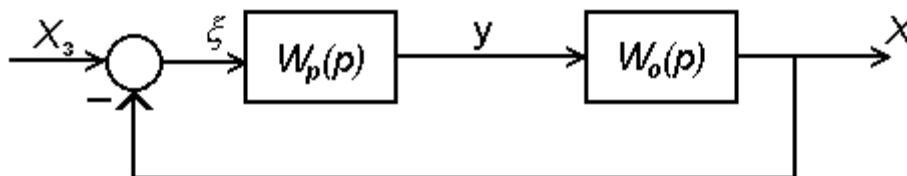


Рисунок 3.3 - Спрощена структурна схема одноконтурної АСК

### 3.5.2 Розрахунок параметрів для каскадної автоматичної системи керування

Каскадні системи керування є особливо вигідними та стратегічно застосовуються для автоматизації процесів, що характеризуються значною інерційністю в їхньому основному каналі регулювання. Це особливо актуально, коли менш інерційну проміжну змінну можна ідентифікувати та ефективно контролювати для зменшення впливу збурень до того, як вони поширяться на основний вихід процесу.

Каскадна система керування за своєю суттю складається з двох окремих, але взаємопов'язаних регуляторів: головного (або зовнішнього) регулятора, основною функцією якого є стабілізація загального виходу об'єкта, та допоміжного (або внутрішнього) регулятора, який призначений для регулювання ідентифікованої проміжної координати, позначеної як  $y_1$ . Важливо, що вихідний сигнал, генерований головним регулятором, слугує динамічним заданим значенням для допоміжного регулятора, створюючи вкладену структуру керування.

Вибір законів керування для кожного регулятора визначається їхніми специфічними ролями. Для забезпечення підтримки основної вихідної координати на заданому рівні без статичної похибки закон регулювання головного регулятора обов'язково повинен включати інтегральну складову. Навпаки, основною вимогою до допоміжного регулятора є швидка реакція. Тому він, як правило, може використовувати простіший закон регулювання, такий як пропорційний (П) регулятор, який часто є достатнім завдяки своїй простоті та властивій швидкій дії.

Порівняльний аналіз одноконтурних та каскадних АСК однозначно демонструє, що вища швидкість внутрішнього контуру в каскадній АСК значно покращує якість перехідного процесу. Це покращення особливо помітне при ефективній компенсації збурень, що надходять у систему через канал регулювання, оскільки внутрішній контур може швидко реагувати на їх придушення. Це підкреслює, що вибір архітектури керування (одноконтурна

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

проти каскадної) не є довільним, а є прямою відповіддю на конкретні динамічні характеристики та експлуатаційні виклики процесу. Каскадне керування є потужною класичною технікою, яка пропонує значне покращення придушення збурень та динамічних показників для процесів з певними інерційними властивостями, часто усуваючи необхідність у складніших, обчислювально інтенсивних передових стратегіях керування. Це являє собою оптимізоване застосування класичних методів для досягнення вищої якості керування для певного класу процесів.

Розрахунок параметрів каскадних АСК передбачає визначення оптимальних налаштувань як головного, так і допоміжного регуляторів, враховуючи динамічні характеристики об'єктів процесу як в основному, так і в допоміжному каналах керування. Оскільки налаштування цих двох регуляторів взаємозалежні, для їх розрахунку використовується ітераційний метод. На кожному кроці ітерації концептуально розраховується зведена одноконтурна АСК, де один з регуляторів умовно розглядається як частина еквівалентного об'єкта.

Еквівалентний об'єкт для головного регулятора представлений як послідовне з'єднання замкнутого допоміжного контуру та основного каналу регулювання. Еквівалентний об'єкт для допоміжного регулятора концептуалізується як паралельне з'єднання допоміжного каналу та основної розімкнутої системи. Враховуючи, що часові затримки, пов'язані з двома передавальними функціями об'єкта, не співрозмірні, процес розрахунку починається з головного регулятора. У першому наближенні зовнішній (головний) регулятор вважається відключеним (тобто  $W_{pv}(p)=0$ ), і використовується еквівалентна передавальна функція

$$W_p^B(p)=0, W_e(p)=W_0(p)/W_1(p) \quad (3.9)$$

Це дозволяє спочатку визначити налаштування головного регулятора, ніби він був частиною одноконтурної АСК для основного каналу регулювання. На другому кроці налаштування допоміжного регулятора розраховуються на основі передавальної функції еквівалентного об'єкта, враховуючи вплив зовнішнього

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

регулятора. Ці ітераційні розрахунки тривають до тих пір, поки налаштування допоміжного регулятора, визначені в двох послідовних ітераціях, не співпадуть із заданою точністю.

Після проведення чотирьох ітерацій за допомогою комп'ютерної програми розрахунку, остаточні передавальні функції для зовнішнього (головного) та внутрішнього (допоміжного) регуляторів були визначені як:

$$W_p^3(p) = 3.19 + 0.08/p, \quad (3.10)$$

$$W_p^B(p) = 4.95. \quad (3.11)$$

### 3.6 Проектування та розрахунок компенсуючого пристрою

Об'єкт процесу демонструє чутливість до збурень, особливо тих, що поширюються через канал "температура теплоносія - температура низу колони". Для ефективної протидії цим збуренням та покращення продуктивності системи необхідне проектування компенсуючого пристрою.

Для аналізу реакції системи на такі збурення та для інформування про проектування компенсатора, спочатку виводиться еквівалентна передавальна функція системи для цього конкретного каналу збурення. Ця функція задається як:

$$W_{\text{б.к.}}^e(p) = \frac{W_z(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_o(p)}. \quad (3.12)$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$W_{\text{б.к.}}^e(p) = \frac{-8634 \cdot p^4 - 188.5 \cdot p^3 + 77.49 \cdot p^2 + p}{941880 \cdot p^5 + 153157 \cdot p^4 + 11870 \cdot p^3 + 712.5 \cdot p^2 + 17.2 \cdot p + 0.1}$$

Після підстановки числових значень у цю еквівалентну передавальну функцію було зроблено висновок, що система демонструє помітно малий коефіцієнт згасання, приблизно 0.19. Такий низький коефіцієнт згасання вказує на погано згасаючу або потенційно коливальну реакцію на збурення, що вимагає вдосконалення системи керування. Тому для покращення можливостей придушення збурень необхідно ввести додатковий контур керування, що включає компенсуючий пристрій, в одноконтурну систему керування.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Використовуючи принцип інваріантності, передавальна функція ідеального компенсатора теоретично може бути визначена як:

$$W_K^{i_d}(p) = -\frac{W_z(p)}{W_o(p)}, \quad (3.13)$$

$$W_K^{i_d}(p) = -\frac{0.4 \cdot (78.49 \cdot p + 1) \cdot e^{-2 \cdot p}}{0.8 \cdot (87 \cdot p + 1)}$$

Аналіз цієї ідеальної передавальної функції показав, що вона не містить членів з "мінус" чистою затримкою, а ступінь її полінома чисельника не більший за ступінь полінома знаменника. Ці характеристики підтверджують, що ідеальний компенсатор є фізично реалізованим.

Однак пряма фізична реалізація такого ідеального компенсатора часто може бути досить складною та непрактичною в промислових умовах. Отже, вважається більш доцільним та практичним обрати реальний компенсатор з простішою, легше реалізованою структурою. Таким чином, передавальна функція обраного реального компенсатора пропонується:

$$W_K^p = \frac{0.5}{2.7 \cdot p + 1}. \quad (3.14)$$

На рисунок 3.4 проілюстрована спрощена структурна схема каскадної АСК, яка неявно формує основу для інтеграції таких компенсуючих пристроїв.

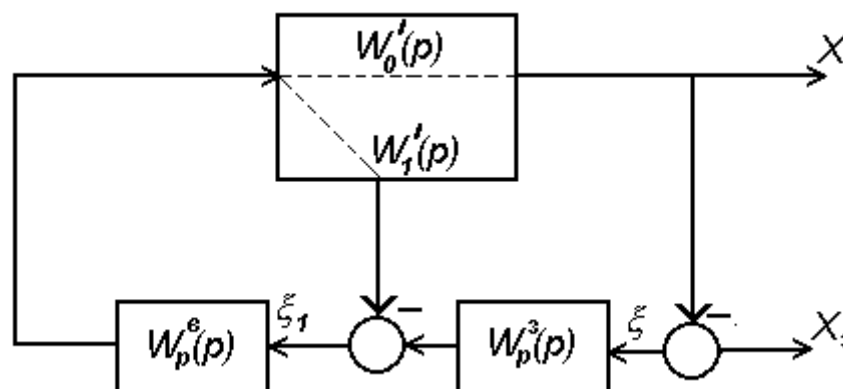


Рисунок 3.4 - Спрощена структурна схема каскадної АСК

Цей сценарій ідеально ілюструє класичну та поширену дилему в

інженерному проектуванні: компроміс між досягненням теоретичної оптимальності та забезпеченням практичної реалізованості. Хоча математичні виведення можуть дати "ідеальне" рішення, реальні обмеження, такі як вартість, складність обладнання, легкість обслуговування та надійність до варіацій параметрів, часто диктують простішу, "реалізовану" апроксимацію. Рішення обрати простіший компенсатор першого порядку означає, що деяка ступінь теоретичної оптимальності продуктивності свідомо жертвується заради переваг простоти впровадження, зниження витрат та потенційно більшої надійності в реальному промисловому середовищі. Це підкреслює, що проектування систем керування - це не просто математична справа, а комплексна інженерна дисципліна, яка балансує теоретичну строгість з практичними обмеженнями.

### 3.7 Дослідження АСК на стійкість

Стійкість системи є першочерговою та беззаперечною властивістю для будь-якої автоматичної системи керування. Вона принципово визначається як властива здатність системи повертатися до свого початкового стану рівноваги після виведення з нього збуренням, як тільки дія цього збурення припиняється. Навпаки, нестабільна система може демонструвати неконтрольовані коливання, необмежені реакції або некеровану поведінку, що створює серйозні експлуатаційні ризики та загрози безпеці в промисловому середовищі.

У цьому проекті стійкість розроблених автоматичних систем керування (АСК) ретельно оцінюється за допомогою критерію Найквіста. Критерій Найквіста є потужним і широко визнаним графічним методом в теорії керування, який дозволяє визначити стійкість замкнутої системи керування зі зворотним зв'язком шляхом аналізу частотної характеристики її передавальної функції розімкнутого контуру. Цей критерій надає інформацію про кількість обходів критичної точки  $(-1, 0)$  у комплексній площині, що безпосередньо пов'язано зі стійкістю замкнутої системи. Для ефективного застосування критерію Найквіста спочатку необхідно вивести еквівалентну передавальну функцію розімкнутого контуру для кожної конкретної досліджуваної конфігурації системи керування.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Аналіз стійкості проводився як для одноконтурних, так і для каскадних конфігурацій АСК, що включало виведення та оцінку їхніх відповідних передавальних функцій розімкнутого контуру.

Для дослідження на стійкість одноконтурної АСР складемо еквівалентну передавальну функцію розімкнутого контура. Для цього перемножимо передавальні функції регулятора і об'єкта. Отримаємо:

$$W_{\text{екв}}^{\text{роз}}(p) = W_p(p) * W_o(p). \quad (3.15)$$

Для дослідження на стійкість каскадної АСР за критерієм Найквіста скористаємось еквівалентною передавальною функцією розімкнутого контура каскадної системи:

$$W_{\text{кас.екв}}^{\text{роз}}(p) = \frac{W_B(p) * W_3(p) * W_p(p)}{1 + W_B(p) * W_1(p)}. \quad (3.16)$$

Фактичний аналіз стійкості як для одноконтурних, так і для каскадних систем був виконаний шляхом введення їхніх отриманих передавальних функцій розімкнутого контуру в спеціалізовану обчислювальну програму, таку як середовище MCAD. Результати, отримані в результаті цих ретельних комп'ютерних симуляцій, однозначно підтверджують, що як одноконтурні, так і каскадні автоматичні системи керування є стійкими. Це означає, що вони здатні повертатися до стаціонарного стану після збурень, не демонструючи стійких або зростаючих коливань.

Хоча стійкість підтверджена, важливо визнати, що сама по собі стійкість не гарантує оптимальної або навіть задовільної продуктивності. Стійка система все ще може бути дуже повільною, демонструвати надмірне перерегулювання або бути сильно коливальною до встановлення. Підтвердження стійкості лише гарантує, що система не вийде з-під контролю або не буде неконтрольовано коливатися. Це розмежування готує ґрунт для подальшої оцінки якості, яка заглиблюється в те, наскільки добре ці стабільні системи фактично працюють з точки зору характеристик динамічної реакції. Це підкреслює фундаментальне поняття в теорії керування: стійкість є бінарною умовою (стабільна/нестабільна), яка є передумовою для будь-якої функціональної системи керування, тоді як

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

продуктивність є безперервним спектром того, наскільки ефективно система досягає своїх цілей керування.

### 3.8 Оцінка якості та порівняльний аналіз систем керування

Загальна якість та ефективність автоматичної системи керування (АСК) кількісно визначаються комплексним набором показників якості. Ці показники безпосередньо виводяться з перехідних характеристик системи, які графічно відображають динамічну реакцію системи на ступінчастий вхід з часом. Для отримання цих критичних перехідних характеристик використовуються обчислювальні інструменти, зокрема стандартна програми. Це передбачає введення передавальних функцій замкнутих систем у комп'ютер для симуляції. Еквівалентна передавальна функція для замкнутої одноконтурної системи, розробленої для підтримки температури низу колони, виводиться як:

$$W_e(p) = \frac{W_0(p) \cdot W_p(p)}{W_0(p) \cdot W_p(p) + 1} \quad (3.17)$$

Розкладемо чисте запізнення в ряд Пада:

$$e^{-p \cdot \tau} \approx \frac{1 - 0.5p\tau}{1 + 0.5p\tau} \quad (3.18)$$

отримаємо:

$$\begin{aligned} W_e(p) &= \frac{\frac{0.8 \cdot e^{-20p}}{(78.49p + 1)} \cdot \frac{4.18p + 0.11}{p}}{\frac{0.8 \cdot e^{-20p}}{(78.49p + 1)} \cdot \frac{4.18p + 0.11}{p} + 1} = \\ &= \frac{-33.6p^2 + 2.56p + 0.08}{784.9p^3 + 54.89p^2 + 3.56p + 0.08} \end{aligned}$$

Знаходимо також еквівалентні передавальні функції каскадної системи регулювання. При відключеному основному регулятору:

$$W_e^1(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_p^B(p) \cdot W_o(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_p^B(p)} \quad (3.19)$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$W_e(p) = \frac{4.95 \cdot \frac{0.8 \cdot e^{-20p}}{78.49p+1} \cdot \frac{0.9}{6.2p+1}}{1 + 4.95 \cdot \frac{0.9}{6.2p+1}} = \frac{3.564 \cdot e^{-20p}}{486.64p^2 + 434.4p + 5.455},$$

для всієї каскадної системи:

$$W_e^{очн}(p) = \frac{W_p^3(p) \cdot W_p^B(p) \cdot W_1(p) \cdot W_o(p)}{1 + W_p^B(p) \cdot W_1(p) + W_p^B(p) \cdot W_p^3(p) \cdot W_1(p) \cdot W_o(p)}, \quad (3.20)$$

$$W_e^{очн}(p) = \frac{-113.7p^2 + 8.52p + 0.285}{4866.4p^4 + 4830.6p^3 + 375.3p^2 + 13.98p + 0.285}$$

Отримаємо еквівалентну передавальну функцію для комбінованої системи:

$$W_e^{комб.}(p) = \frac{-32204.5p^5 - 17784.7p^4 + 1581.7p^3 + 107.27p^2 + 1.64p}{3864534p^6 + 1648517p^5 + 104778.9p^4 + 6756p^3 + 793.1p^2 + 17.67p + 0.1}$$

Визначимо показники якості для досліджуваних систем.

Перерегулювання. Цей показник кількісно визначає максимальне перехідне відхилення керованої змінної за межі її кінцевого усталеного значення.

Він розраховується за формулою (3.20):

$$\sigma = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{y(\infty)} \cdot 100 \quad (3.20)$$

де  $A_1$  - перше максимальне відхилення керованої величини від її усталеного значення;

$y(\infty)$  - усталене значення керованої змінної.

Розрахуємо перерегулювання для одноконтурної АСР:

$$\sigma_1 = 27.6 \%$$

Для каскадної АСР:

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

$$\sigma_2 = 22.2 \%$$

Обидва перерегулювання знаходяться в допустимих межах.

Ступінь затухання коливань. Цей показник відображає, наскільки швидко затухають коливання в реакції системи. Він розраховується за формулою:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} \quad (3.21)$$

де  $A_1$  - перше відхилення змінної від її усталеного значення;

$A_3$  - третє відхилення змінної від її усталеного значення.

Обчислимо степінь затухання для одноконтурної АСР:

$$\psi_1 = 0.91$$

Для каскадної АСР:

$$\psi_2 = 0.98$$

Для комбінованої АСР:

$$\psi_3 = 0.75.$$

Всі показники знаходяться в допустимих межах. Далі розглянемо такий показник якості системи, як час перехідного процесу  $t_{пр}$ . Це один з вибраних показників якості регулювання. Його також отримують з перехідної характеристики.

Час перехідного процесу. Це ключовий показник швидкості реакції системи, що представляє час, необхідний для того, щоб вихід системи встановився в межах заданого відсотка (зазвичай 2% або 5%) від його кінцевого усталеного значення після ступінчастого входу. Він також отримується безпосередньо з перехідної характеристики.

Час перехідного процесу в одноконтурній АСР підтримання температури низу колони:

$$t_{пр1} = 147 \text{ с.}$$

Час перехідного процесу в каскадній АСР:

$$t_{пр2} = 125 \text{ с.}$$

В комбінованій АСР:

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_{п2}=172.6 \text{ с.}$$

Всі показники знаходяться в допустимих межах.

З приведених обчислень видно, що хоч всі три АСР задовільняють вимогам якості регулювання, каскадна АСР має кращі показники якості.

Був проведений комплексний порівняльний аналіз розрахованих показників якості для одноконтурних, каскадних та комбінованих автоматичних систем керування. Результати представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 - Порівняльний аналіз показників якості автоматичних систем керування

ПОКАЗНИК ЯКОСТІ	ОДНОКОНТУРНА АСК	КАСКАДНА АСК	КОМБІНОВАНА АСК
Перерегулювання (%)	27.61	22.21	-
Степінь затуханя коливань	0.92	0.99	0.76
Час перехідного процесу (с)	147.01	125.01	172.61
Запас по амплітуді	0.41	0.61	-
Запас по фазі (градуси)	30.01	600.01	-

На основі комплексного набору кількісних розрахунків та порівнянь однозначно зроблено висновок, що хоча всі три конфігурації автоматичних систем керування (одноконтурна, каскадна та комбінована) успішно задовольняють фундаментальним вимогам до якості регулювання, каскадна АСК послідовно демонструє вищі показники якості за кількома метриками, зокрема менше перерегулювання та швидший час перехідного процесу, що робить її кращою стратегією керування для цього застосування.

Ці емпіричні дані підтверджують переваги каскадного керування для

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

інерційних процесів. Чисельні результати чітко показують, що каскадна АСК перевершує одноконтурну АСК за ключовими показниками: менше перерегулювання (22.2% проти 27.6%), вищий ступінь затухання (0.98 проти 0.91) та значно швидший час перехідного процесу (125 с проти 147 с). Це кількісне підтвердження виходить за рамки теоретичних переваг каскадного керування, надаючи емпіричний доказ його переваг у цьому конкретному контексті газофракціонування. Вища продуктивність каскадної системи безпосередньо перетворюється на відчутні експлуатаційні переваги: зменшення відходів продукції (менше перерегулювання означає менше відхилення від заданого значення), покращена стабільність (вище затухання) та збільшена пропускна здатність/ефективність (швидший час встановлення після збурень). Це підтверджує інженерне рішення застосувати складнішу структуру керування для вирішення конкретних технологічних проблем, демонструючи, що додаткові зусилля з проектування та налаштування дають вимірні та значні експлуатаційні переваги.

Цікавим є спостереження щодо комбінованої АСК. Хоча вона впроваджується як система, що включає компенсуючий пристрій для обробки збурень, її показники продуктивності (ступінь затухання 0.75 та час перехідного процесу 172.6 секунди) помітно менш сприятливі, ніж у каскадної системи (0.98 затухання, 125 с час перехідного процесу), і навіть гірші, ніж у одноконтурної системи за часом перехідного процесу (147 с). Можна було б інтуїтивно очікувати, що система з компенсатором працюватиме краще або принаймні порівнянно з простішою одноконтурною системою, особливо при придушенні збурень. Її гірша загальна продуктивність свідчить про те, що просте додавання прямого компенсатора до одноконтурної системи не автоматично призводить до найкращої динамічної реакції, особливо в порівнянні з добре розробленою каскадною структурою. Субоптимальна продуктивність комбінованої системи може означати кілька факторів: обрана структура компенсатора може не ідеально відповідати динаміці збурень, її налаштування може бути не повністю оптимізовано в поєднанні з основним регулятором, або каскадна структура за

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

своєю суттю забезпечує більш надійний та ефективний механізм для обробки конкретних типів збурень та інерцій, присутніх у цьому процесі. Це підкреслює, що цілісна інтеграція системи та ретельне налаштування є критично важливими, і що більш складна архітектура (як каскадна) може запропонувати вищі переваги продуктивності порівняно з простішою архітектурою, доповненою компенсатором, особливо для певних характеристик процесу.

### **Висновки до розділу**

Дослідження АСК підтвердило значну ефективність класичних регуляторів, зокрема пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, у контексті автоматизації технологічного процесу газофракціонування. Аналіз продемонстрував, що ці класичні стратегії керування є високоефективними для забезпечення як стабільності, так і точності, необхідних для регулювання критичних параметрів процесу, включаючи, але не обмежуючись, температуру, тиск та витрати газів на різних етапах фракціонування.

Незважаючи на продемонстровану ефективність, поглиблений аналіз також виявив значне обмеження: покладатися виключно на класичні регулятори не завжди може бути достатнім для оптимального керування процесами газофракціонування, особливо при зіткненні з умовами, що характеризуються високою складністю взаємозалежності параметрів та властивою високою динамікою процесів. Це виявлене обмеження рішуче свідчить про те, що для досягнення справді оптимальної продуктивності в таких складних та динамічних сценаріях доцільно досліджувати та впроваджувати стратегії, що передбачають інтеграцію класичних регуляторів з більш передовими методами автоматизації.

Рекомендації для майбутніх досліджень та впровадження включають вивчення та включення таких методів, як нечіткі системи керування або адаптивні методи регулювання. Ці передові підходи пропонують потенціал для підвищення продуктивності, забезпечуючи вищі можливості в обробці нелінійностей процесу та інформаційних невизначеностей.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

## 4 РОЗРОБКА FUZZY-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОФРАКЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ

### 4.1 Технології FUZZY систем керування

Складна природа багатьох технологічних процесів, зокрема в промисловості, значно ускладнює їхнє точне математичне моделювання. Ці процеси часто характеризуються нелінійністю, змінними в часі параметрами, немодельованими збуреннями та нюансами, що залежать від оператора-людини, які важко кількісно оцінити. Традиційні методи автоматичного керування, такі як класичні ПІД-регулятори, зазвичай вимагають наявності точних математичних моделей керованої системи для ефективного проектування та налаштування. Ця залежність від точних моделей часто обмежує застосовність та ефективність звичайних стратегій керування в реальних промислових умовах, де такі моделі або недоступні, або їх практичне отримання є надзвичайно складним.

Внутрішня складність та невизначеність реальних промислових процесів, таких як газофракційні установки, створюють принципове обмеження для керування, заснованого на моделях. Це не просто питання складності; це стосується неможливості охопити всі нюанси за допомогою точних рівнянь. Чисто математична модель, за визначенням, спрощує реальність. Коли спрощення є надмірним, модель стає неадекватною для розробки керування. Це вказує на зміну парадигми в інженерії керування: від суто кількісних, керованих моделями підходів до якісних, керованих знаннями, особливо для систем, де людський досвід має першочергове значення.

Нечітка логіка, що базується на теорії нечітких множин, пропонує надійну основу для роботи з неточною, розпливчастою та неповною інформацією, яка є характерною для людського мислення та багатьох реальних процесів. На відміну від класичної булевої логіки (істина/хиба), нечітка логіка дозволяє використовувати ступені істинності, що дозволяє представляти лінгвістичні змінні та поняття (наприклад, "висока температура", "мала похибка"). Ця здатність робить нечітку логіку особливо придатною для формалізації якісних

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

знань та евристичних правил, які оператори-люди використовують для керування складними системами.

Здатність нечіткої логіки працювати з неточністю безпосередньо вирішує обмеження традиційних методів. Це прямий причинно-наслідковий зв'язок: традиційні методи зазнають невдачі через вимоги до точності; нечітка логіка досягає успіху, приймаючи неточність. Це свідчить про те, що нечітка логіка є не просто альтернативою, а рішенням, адаптованим до природи проблеми. Основна сила нечіткої логіки полягає в її епістемологічній відповідності проблемній області: вона моделює світ так, як його сприймають експерти-люди (неточний), а не примушує його до точної, але часто неточної математичної конструкції.

Нечіткі регулятори (рисунок 4.1) функціонують на основі нечіткої логіки, формалізуючи евристичні знання та правила прийняття рішень, що використовуються експертами-людьми.

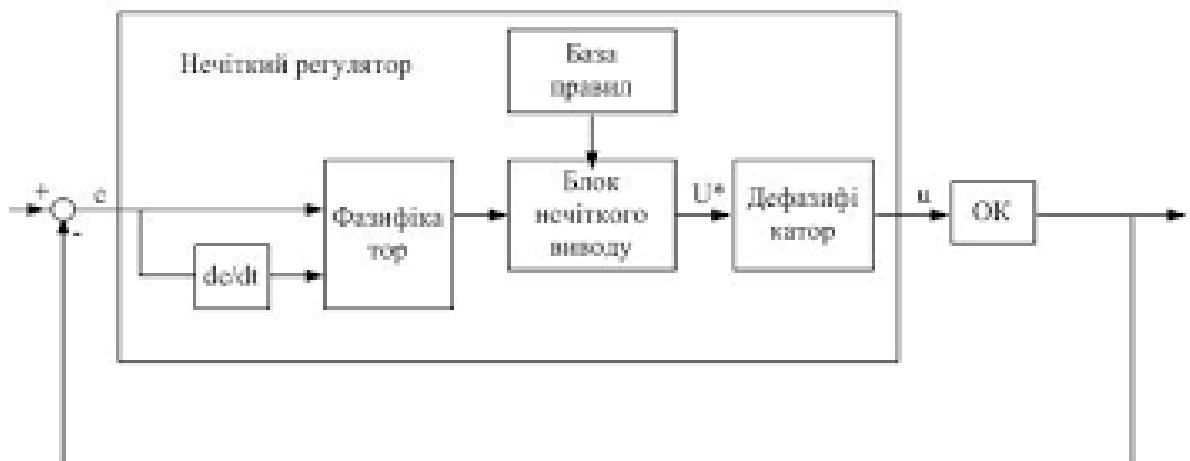


Рисунок 4.1 – Структура нечіткого регулятора

Робота нечіткого регулятора зазвичай включає три основні етапи:

- **Фазифікація:** Цей етап перетворює точні, чіткі вхідні значення (наприклад, показники датчиків) у нечіткі множини, присвоюючи ступені належності різним лінгвістичним термам (наприклад, температура 25°C може бути "середньою" зі ступенем належності 0.8 та "високою" зі ступенем 0.2).
- **Інференція (Оцінка правил):** На цьому етапі нечіткі вхідні дані оцінюються за набором заздалегідь визначених нечітких правил, зазвичай у форматі "ЯКЩО-ТО". Обчислюється ступінь істинності передумови кожного

правила, і це значення істинності потім застосовується до наслідку правила для визначення нечіткого виходу.

- Дефазифікація: Заключний етап перетворює нечіткий вихід (нечітку множину) назад у точну, чітку дію керування, яка може бути застосована до керованого процесу (наприклад, нечіткий вихід "трохи збільшити потужність" перетворюється на конкретне значення напруги).

Три етапи фазифікації, інференції та дефазифікації представляють собою систематичний процес перетворення якісних людських знань у кількісні дії керування. Цей структурований підхід є вирішальним для ефективного подолання розриву між людиною та машиною та для програмування інтуїтивних стратегій керування. Ця послідовність відображає те, як експерт-людина може подумки обробляти інформацію та приймати рішення, але в автоматизований, повторюваний спосіб. Цей структурований процес перетворення дозволяє нечітким регуляторам "імітувати" людський інтелект, роблячи їх "інтелектуальними" системами керування.

#### 4.2 Нечітке керування газофракційною установкою

Змоделюємо схему одноконтурної системи автоматичного регулювання з аналоговим ПІД-регулятором зі зворотнім зв'язком (рисунок 4.2). Зауважимо, що всі дослідження проводяться при одиничній ступінчатій дії.

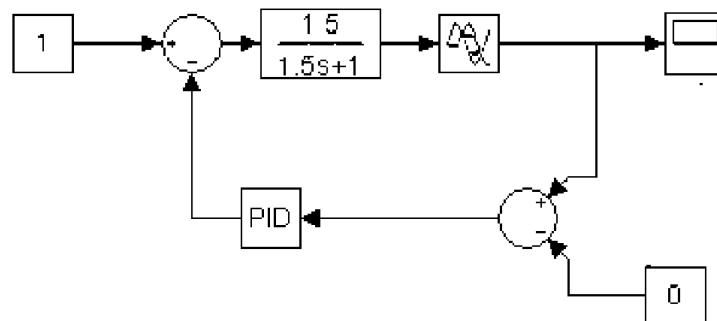


Рисунок 4.2 - Модель одноконтурної системи автоматичного регулювання

З рисунка бачимо, що об'єкт управління є послідовним з'єднанням типових ланок: аперіодичної ланки першого порядку і ланки чистого запізнення. Таким чином, передавальна функція об'єкту управління має вигляд:

$$W_o(S) = \frac{1.5}{1.5 \cdot S + 1} \cdot e^{-s}$$

Передавальна функція ПІД-регулятора має вигляд:

$$y(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int \varepsilon(t) + T_d \cdot \dot{\varepsilon}(t)$$

Значення параметрів налаштування ПІ-регулятора для даного об'єкту наступні:  $P=0.388$ ,  $I=1/T_i=0.323$ . Значення параметрів настройки ПІД-регулятора для даного об'єкту наступні:  $P=1.093$ ,  $I=1/T_i = 0.86$ ,  $D=T_d=0.209$ . Блок PID-controller є підсистемою, тобто він утворений за допомогою більш простих блоків системи. Внутрішня структура даного блоку представлена на рисунку 4.3.

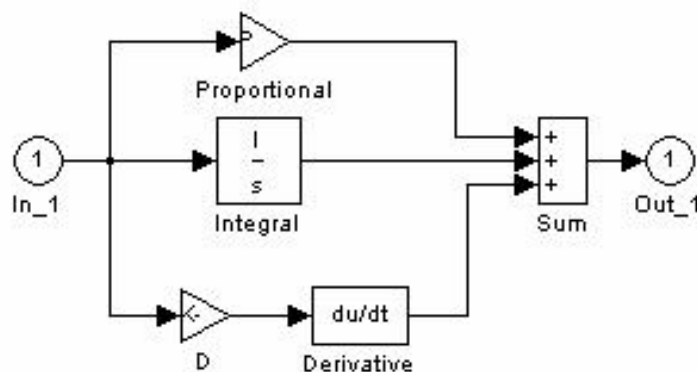


Рисунок 4.3 - Внутрішня структура блоку PID-controller

Бібліотека системи Simulink містить блок fuzzy-регулятора. Сформуємо модель одноконтурної системи автоматичного регулювання з використанням даного блоку, причому реалізуємо ПІ-закон регулювання. Для формування вхідних сигналів по аналогії з блоком аналогового регулятора використовуємо блок Integral (рисунку 4.4).

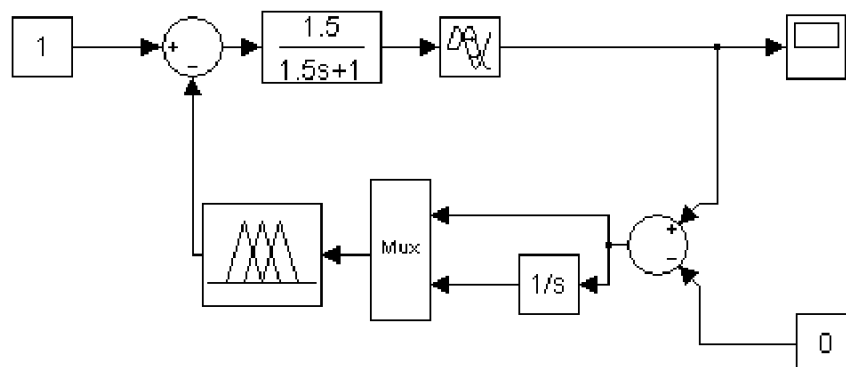


Рисунок 4.4 - Модель одноконтурної системи автоматичного регулювання з ПІ-fuzzy-регулятором

Нечітка система керування реалізується за допомогою "Fuzzy Logic Toolbox" у MATLAB, з акцентом на системі виводу типу Мамдані, відомій своєю інтерпретованістю. Система налаштована з двома вхідними змінними:  $x_1$ , що представляє відхилення (пропорційна складова), та  $x_2$ , що представляє приріст відхилення (інтегральна складова). Вихідна змінна  $y$  відповідає приросту керуючої дії. Для лінгвістичного опису для кожної вхідної змінної обрано сім трикутних термів (NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB – Негативний Великий, Негативний Середній, Негативний Малий, Нульовий, Позитивний Малий, Позитивний Середній, Позитивний Великий). Для вихідної змінної бажано вибирати непересічні терми, щоб підвищити чіткість регулювання. Це підвищить чіткість регулювання. Рекомендовані симетричні діапазони для вхідних змінних ( $x_1$  та  $x_2$ ) є критично важливими для ефективною фазифікації. Для вихідної змінної  $y$  рекомендується діапазон  $[0, C]$ , де верхня межа  $C$  варіюється від 1.1 до 2 для одиничної ступінчатої дії, що дозволяє вихідному сигналу регулятора компенсувати збурення. Оптимальне значення  $C=2$  пропонується для досягнення оптимального співвідношення між величиною динамічної похибки, часом регулювання та кількістю коливань.

Тепер необхідно сформулювати базу правил fuzzy-регулятора. В основу встановлений спосіб, запропонований в літературі. Лінійний безперервний ПІ-регулятор з передавальною функцією

$$y(t) = k_D \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \varepsilon(t)$$

можна замінити близьким по стратегії і логіці управління fuzzy-регулятором, якщо як його вихідна змінна розглядати приріст управляючої дії  $\Delta y$ . Тоді закон регулювання можна представити в наступній диференціальній формі:

$$\frac{dy(t)}{dt} = k_D \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{1}{T_I} \cdot \varepsilon(t),$$

або в різнищевій формі:

$$\Delta y(k) = y(k) - y(k-1) = k_D \cdot \Delta \varepsilon(k) + \frac{\Delta t}{T_I} \cdot \varepsilon(k)$$

Таким чином, для вхідних змінних  $\varepsilon(k)$  і  $\Delta \varepsilon(k)$  і вихідний  $\Delta y(k)$  може бути інтегрований fuzzy-регулятор, що реалізовує нелінійний закон

$$\Delta y(k) = F[\Delta \varepsilon(k), \varepsilon(k)]$$

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і еквівалентний в певному значенні ПІ-регулятора.

Для нашого випадку  $x_1$  відповідає сигналу розузгодження  $\varepsilon(k)$ ,  $x_2$  відповідає приросту сигналу розузгодження  $\Delta\varepsilon(k)$ , а біля відповідає  $\Delta y(k)$ . Лінгвістичні правила для такого ПІ- fuzzy-регулятора приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Лінгвістичні правила для ПІ fuzzy-регулятора

	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Вибір типу Мамдані, трикутних функцій належності та непересічних вихідних термів відображає філософію проектування, що надає пріоритет інтерпретованості та людському розумінню. Це не є довільним; це безпосередньо підтримує основний принцип нечіткої логіки – формалізацію людської інтуїції, що робить поведінку регулятора прозорою та легшою для вдосконалення експертами. Системи Мамдані відомі своєю інтерпретованістю, оскільки їхній вихід також є нечіткою множиною, що робить наслідки правил інтуїтивно зрозумілими. Трикутні функції належності є простими та обчислювально ефективними, тоді як непересічні вихідні терми спрощують дефазифікацію та забезпечують чітку, однозначну дію керування для кожного правила. Ці вибори відповідають меті перетворення людського досвіду в зрозумілий алгоритм. Вибір дизайну підкреслює підхід "білої скриньки" до нечіткого керування, де внутрішня логіка системи є прозорою та безпосередньо пов'язаною з лінгвістичними описами людини, що є життєво важливим для промислових застосувань, що вимагають людського нагляду та налаштування.

### 4.3 Моделювання і дослідження fuzzy системи керування

Нечіткі системи керування реалізуються та моделюються за допомогою Fuzzy Logic Toolbox у MATLAB та Simulink. Редактор правил використовується для введення та керування лінгвістичними правилами, розробленими на етапі проектування. Переглядач поверхні надає графічне представлення поверхні керування, пропонуючи уявлення про нелінійне відображення входу-виходу нечіткої системи. Інтеграція з моделями Simulink включає вказівку імені файлу .fis (наприклад, fuzzy1.fis, fuzzy2.fis) у параметрах блоку Fuzzy Logic Controller. Критичним кроком для правильного функціонування є завантаження файлу .fis у робочий простір MATLAB при відкритті моделі, зазвичай за допомогою функції попереднього завантаження моделі (`fuzzy1=readfis('fuzzy1')`). Параметри моделювання, такі як встановлення опції "Boolean logic signals" на off, коригуються для забезпечення сумісності зі змінними з плаваючою комою, що використовуються в нечіткій логіці.

Детальні кроки використання Fuzzy Logic Toolbox у MATLAB та Simulink розкривають практичний робочий процес проектування та тестування нечітких систем. Згадка про переглядач поверхні та необхідність оновлення робочого простору після змін у файлі .fis опосередковано вказує на ітеративний процес проектування та налаштування, де візуальний огляд та швидке прототипування є вирішальними для оптимізації продуктивності регулятора. Можливість візуалізувати поверхню керування дозволяє дизайнерам інтуїтивно зрозуміти нелінійне відображення та виявити потенційні проблеми. Необхідність перезавантаження файлів .fis після змін свідчить про те, що налаштування нечітких систем часто є ітеративним процесом спроб і помилок, де параметри (функції належності, правила) коригуються на основі спостережуваної продуктивності. Це менш аналітичний і більш емпіричний підхід, ніж традиційне проектування керування. Методологія підкреслює, що проектування нечіткого керування часто є емпіричним та ітеративним процесом, що значною мірою спирається на середовища моделювання для швидкого прототипування та оцінки продуктивності, а не на чисто аналітичне виведення. Це підкреслює

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

практичний, практичний характер впровадження таких систем.

Результати моделювання порівнюють перехідні процеси газофракційної установки, керованої аналоговим ПІ-регулятором, з нечітким ПІ-регулятором. Графіки (рисунок 4.5) ілюструють, що хоча нечіткий регулятор може демонструвати дещо довший час регулювання та більшу кількість коливань, він досягає значного зменшення динамічної похибки. Це вказує на те, що нечітке ПІ-керування може призвести до покращення точності в стаціонарному режимі, хоча з потенційними компромісами в характеристиках перехідного процесу.

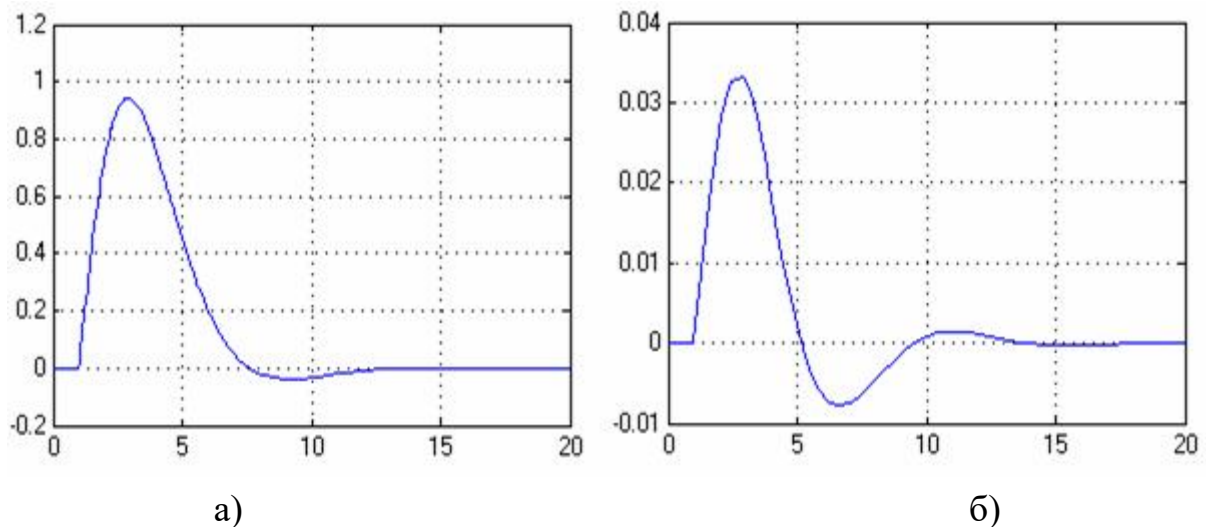


Рисунок 4.5 - Графіки перехідних процесів для моделі з аналоговим регулятором (а) і моделі з fuzzy-регулятором (б)

Спостережуваний компроміс між динамічною похибкою та перехідним процесом (час регулювання, коливання) є критичним моментом. Це свідчить про те, що нечітке керування, хоча й чудово справляється з невизначеністю та зменшує похибку в стаціонарному режимі, не завжди може бути кращим за всіма показниками продуктивності. Це означає, що вибір регулятора передбачає нюансоване рішення, засноване на конкретних вимогах та пріоритетах застосування. У деяких промислових процесах точність у стаціонарному режимі (низька динамічна похибка) є першочерговою, навіть якщо це означає дещо повільніший або більш коливальний перехідний процес. В інших випадках швидка реакція та мінімальне перевищення є критично важливими. Сила нечіткого регулятора у зменшенні похибки в стаціонарному режимі робить його

придатним для застосувань, де цінується точність у рівновазі. Це підкреслює, що "оптимальне" керування залежить від контексту. Нечітке керування пропонує інший набір характеристик продуктивності, що робить його потужною альтернативою, коли зменшення динамічної похибки є основною метою, навіть якщо це відбувається за рахунок деякої перехідної продуктивності.

Для реалізації ПІД-нечіткого регулятора до вхідних сигналів додається диференціальна складова ( $x_3$ ) за допомогою блоку диференціювання Derivative у Simulink (рисунок 4.6).

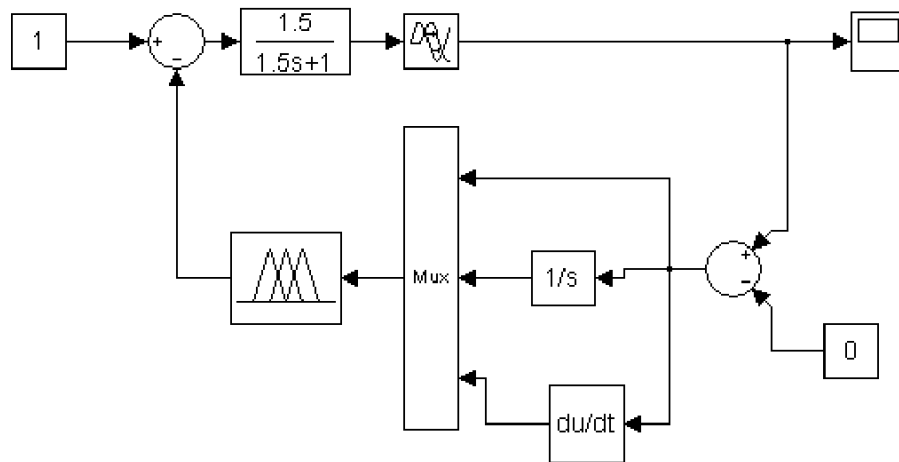


Рисунок 4.6 - Модель одноконтурної системи автоматичного регулювання з ПІД-fuzzy-регулятором

Існуючий файл fuzzy1.fis розширюється шляхом додавання  $x_3$  як вхідної змінної та визначення трьох трикутних термів (N, ZE, P) для її лінгвістичного опису. Для вихідної змінної додаються два терми (N, P). До бази правил вводяться нові правила, такі як ЯКЩО ( $x_3=N$ ) ТО ( $y=N$ ), що відображає, що негативна швидкість зміни похибки повинна призводити до негативної зміни керуючої дії (рисунок 4.7).

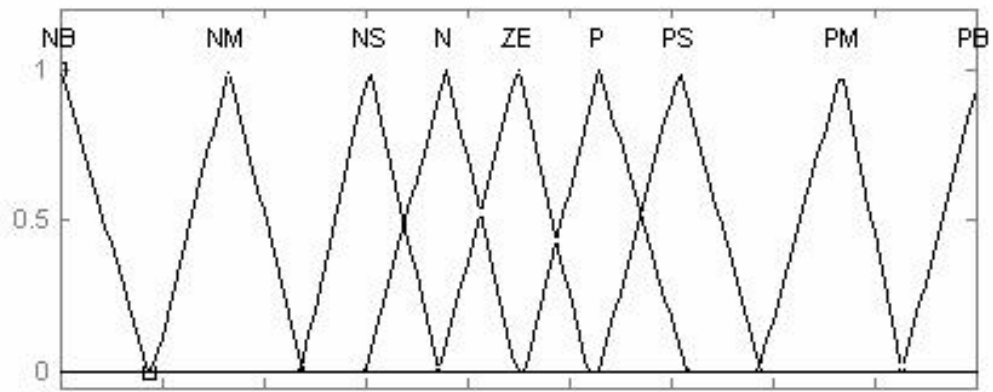


Рисунок 4.7 - Терми вихідної змінної ПІД-подібного fuzzy-регулятора

Діапазони змінних коригуються для  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  та  $u$ . Точне налаштування діапазону складової  $x_3$  (диференціальної) є критично важливим і часто виконується емпірично (наприклад,  $[-0.16;0.16]$  для даного об'єкта). Подібно до нечіткого ПІ-регулятора, нечіткий ПІД-регулятор також демонструє значне зменшення динамічної похибки порівняно з його аналоговим аналогом, але зі збільшенням часу регулювання та коливань (Рисунок4.9).

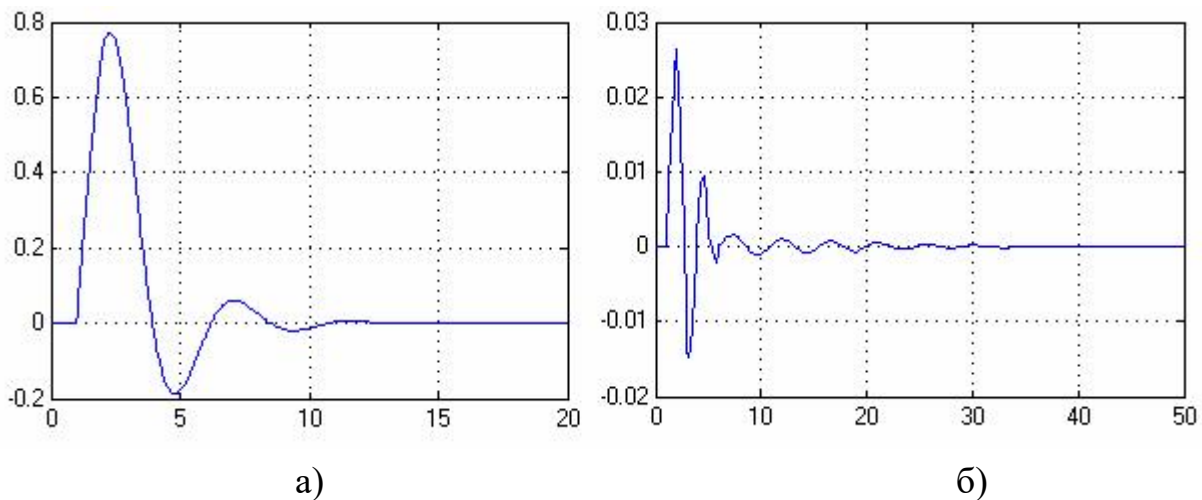


Рисунок 4.8 - Графіки перехідних процесів для моделі з аналоговим регулятором (а) і моделі з ПІД - fuzzy-регулятором (б)

Пряме порівняння перехідних процесів нечітких ПІ та нечітких ПІД-регуляторів (рисунок4.9) виявляє нюансований результат.



## Висновки до розділу

Дослідження успішно продемонструвало розробку нечіткої системи керування для газофракційної установки, вирішуючи проблеми, спричинені складним та неточним характером її процесів. Теорія нечітких множин виявилася інструментальною у роботі з якісними даними та невизначеностями, забезпечуючи ефективне керування там, де точні математичні моделі є неможливими. Розроблена нечітка система керування, завдяки своїй структурі, заснованій на правилах, продемонструвала адаптивність до змінних робочих умов, що є критично важливою особливістю для динамічних промислових середовищ.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання даного дослідження була обґрунтована значущість створення системи автоматичного контролю за ключовими показниками газофракційної установки. Така система є фундаментальною для оптимізації її продуктивності та гарантування стабільного перебігу технологічних операцій. Впровадження автоматизованого управління спрямоване на нівелювання людського чинника, зменшення ймовірності помилкових рішень та формування оптимальних умов для роботи установки на всіх стадіях.

Ключовими завданнями, що знайшли своє вирішення в межах цієї роботи, були ідентифікація параметрів, які підлягають автоматичному моніторингу, та обрання відповідних методик і технологічних рішень для їх вимірювання й регулювання. Створення системи автоматизованого управління забезпечує збір та аналіз інформації від численних сенсорів та приладів, розташованих на газофракційній установці, що дозволяє на основі отриманих даних ефективно коригувати її функціонування.

Важливим компонентом роботи став вибір математичного апарату та методологій для прогнозування динаміки установки за різних умов експлуатації. Зокрема, застосування теорії нечіткої логіки та нейромережових технологій дає змогу адекватно моделювати складні взаємозв'язки між показниками установки та передбачати її поведінку в умовах інформаційної невизначеності. Теорія нечітких множин ефективна при роботі з якісною інформацією, характерною для управлінських завдань, де не завжди можливе точне кількісне визначення всіх параметрів. Нейронні мережі, зі свого боку, надають інструментарій для апроксимації нелінійних залежностей і співвідношень між параметрами, що сприяє більш прецизійному управлінню процесами.

Розроблена система має суттєве значення для поліпшення ефективності використання газофракційних установок, адже вона уможливорює оперативне виявлення та виправлення відхилень від заданих оптимальних режимів. Її імплементація сприяє скороченню експлуатаційних витрат, підвищенню

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

надійності роботи обладнання та забезпеченню вищої точності дотримання технологічних регламентів. Разом з тим, для успішної реалізації поставлених завдань необхідно брати до уваги обмеження, пов'язані з адаптацією системи до конкретних умов експлуатації та забезпеченням її сумісності з іншими компонентами загальної автоматизованої системи управління підприємством.

У перспективі, подальший розвиток запропонованої системи може включати інтеграцію більш досконалих алгоритмів машинного навчання для підвищення точності прогнозів та здатності адаптуватися до змінних умов функціонування установки. Також розглядається можливість поєднання з іншими сучасними технологіями для реалізації ще більш ефективного управління процесами в режимі реального часу.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Топільницький П. І. Первинна переробка природних і нафтових газів та газоконденсатів: Навч. посіб. / П. І. Топільницький; Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Л. : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2005. — 259 с.

2. Склабінський В. І., Ляпощенко О. О., Артюхов А. Є. Технологічні основи нафто- та газопереробки: Навчальний посібник / В. І. Склабінський, О. О. Ляпощенко, А. Є. Артюхов. — Суми: Сумський державний університет, 2011. — 187 с.

3. Склабінський В. І., Ляпощенко О. О. Технологічні лінії та комплекси нафто- і газопереробних виробництв: Навчальний посібник. – Суми : СумДУ, 2023 (або попередні видання).

4. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Донбас, 2004—2013.

5. Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). Fuzzy Control. Addison Wesley Longman, Menlo Park, CA.

6. Wang, L. X. (1997). A Course in Fuzzy Systems and Control. Prentice Hall PTR.

7. Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Prentice Hall.

					БР.АКП-04.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73