

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМ-52.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-2

Василь Пшик

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

Пшик Василь Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53:004.89

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення інтелектуальної системи керування процесом очищення газу

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-2

(шифр групи)

В.А. Пшик

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доц., к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання)

О.В. Кучмистенко

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 20.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу очистки газу в дистиляційній колоні, як об'єкту автоматизації	11.11.25–25.11.25	
2	Моделювання обчислювального апарату та оптимізація регуляторів дистиляційної колони на основі біоінспірованих алгоритмів	18.11.25–31.11.25	
3	Синтез та моделювання інтелектуального керування процесом очистки газу в дистиляційній колоні	22.11.24–5.12.25	
4	Розроблення операторського інтерфейсу системи управління дистиляційною колонною з використанням ПЗ HONEYWELL	27.11.25–5.12.25	

Студент _____
(підпис)

В.А. Пшик _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

О.В. Кучмистенко _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

На магістерську роботу студента Пшика В.А. на тему: «Розроблення інтелектуальної системи керування процесом очищення газу».

Магістерська робота на здобуття кваліфікації магістра з автоматизації за спеціальністю 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, – Івано- Франківськ, 2025 р.

У магістерській роботі проведено дослідження процесу очищення газу в дистиляційній колоні та розроблено інтелектуальну систему керування на основі математичного моделювання, методів оптимізації та сучасних засобів автоматизації. У роботі створено фізико-математичні моделі сталого та динамічного режимів роботи колони, що охоплюють тепломасообмінні процеси, рівноважні залежності та вплив конструктивних параметрів на ефективність розділення. Розроблено динамічну модель з ПД-регуляторами, налаштованими за критерієм ІТАЕ, а також реалізовано МІМО-управління з використанням методів decoupling. Проведено оптимізацію параметрів ПІ-регуляторів за допомогою біоінспірованих алгоритмів АСО, CS, DA та GWO, що дозволило підвищити стійкість системи, зменшити вплив поперечних зв'язків та забезпечити швидкодію контурів керування.

Пояснювальна записка до магістерської роботи має обсяг 79 сторінок, містить 18 рисунків, 4 таблиці та 13 літературних джерел.

Дана магістерська робота може бути корисною для студентів і фахівців у галузі автоматизації хімічних і технологічних процесів, а також знайти практичне застосування у проєктуванні сучасних систем управління дистиляційними об'єктами на промислових підприємствах.

Ключові слова: ДИСТИЛЯЦІЙНА КОЛОНА, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, БІОІНСПІРОВАНІ АЛГОРИТМИ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ.

ANNOTATION

For the master's thesis of student Pshyk V.A. entitled: "Development of an Intelligent Control System for the Gas Purification Process." Master's thesis submitted for the qualification of Master of Automation under specialty 174 – Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2025.

The thesis investigates the gas purification process in a distillation column and develops an intelligent control system based on mathematical modeling, optimization methods, and modern automation tools. The work presents physicochemical and mathematical models describing both steady-state and dynamic operating modes of the column, including heat and mass transfer processes, equilibrium dependencies, and the influence of structural parameters on separation efficiency. A dynamic model with PID controllers tuned according to the ITAE criterion is developed, along with a MIMO control framework implemented using decoupling techniques. Optimization of PI controller parameters is performed using bio-inspired algorithms such as ACO, CS, DA, and GWO, which enhances system stability, reduces cross-coupling effects, and improves response performance of control loops.

The explanatory note of the master's thesis consists of 79 pages and includes 18 figures, 4 tables, and 13 references.

This master's thesis may be useful for students and specialists in the field of automation of chemical and technological processes, and may also find practical application in the design of modern control systems for distillation units at industrial facilities.

Keywords: DISTILLATION COLUMN, INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS, MATHEMATICAL MODELING, BIO-INSPIRED ALGORITHMS, PROCESS AUTOMATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИСТКИ ГАЗУ В ДИСТИЛЯЦІЙНІЙ КОЛОНІ, ЯК ОБ’ЄКТУ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	11
1.1 Технологія обробки природного газу в дистиляційних колонах у нафтовій та газовій промисловості.....	11
1.2 Фізико-хімічна природа процесу очищення газу в умовах дистиляційної колони.....	19
1.3 Розроблення цифрового двійника дистиляційної колони в програмному середовищі Honeywell UniSim Design.....	21
1.4 Модель дистиляційної колони в динамічному режимі	32
Висновки до розділу 1	34
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО АПАРАТУ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРІВ ДИСТИЛЯЦІЙНОЇ КОЛОНИ НА ОСНОВІ БІОІНСПІРОВАНІХ АЛГОРИТМІВ	36
2.1 Розвиток штучного інтелекту в сфері автоматизації технологічних процесів	36
2.2 Алгоритм оптимізації Ant Colony Optimization, ACO.....	40
2.3 Алгоритм Cuckoo search, CS	43
2.4 Алгоритм Dragonfly Algorithm, DA.....	44
2.5 Алгоритм Enhanced grey wolf optimizer, EGWO	46
2.6 Розробка системи керування для МІМО-об’єкта дистиляційної колони.....	48
Висновки до розділу 2	52

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОЧИСТКИ ГАЗУ В ДИСТИЛЯЦІЙНІЙ КОЛОНІ	54
3.1. Розробка моделі системи управління дистиляційною колонією в Simulink.	54
3.2. Визначення параметрів алгоритмів.....	55
Висновки до розділу 3	65
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ОПЕРАТОРСЬКОГО ІНТЕРФЕЙСУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДИСТИЛЯЦІЙНОЮ КОЛОННОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЗ HONEYWELL	67
4.1. Створення мнемосхеми для системи автоматичного керування	67
4.2. Поєднання математичної моделі дистиляційної колони з системою керування Honeywell Experion PKS.....	69
4.3. Розроблення мнемосхеми в програмному забезпеченні Honeywell	72
Висновки до розділу 4	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

DA (Dragonfly algorithm) – алгоритм стрекози

CS (Cuckoo search) – алгоритм пошуку зозулі

EGWO (Enhanced grey wolf optimizer) – покращений алгоритм оптимізації
сірих вовків

ACO (Ant colony algorithm) – алгоритм мурашиної колонії

ITAE (Integral time absolute error) – інтегральна часова абсолютна помилка

AI (Industrial artificial intelligence) – промисловий штучний інтелект

Exregion PKS – розподілена система управління Exregion PKS (торгова назва
ПЛК-системи від Honeywell)

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні технологічні процеси в хімічній та нафтогазовій промисловості все частіше характеризуються високою складністю, багатовимірністю та взаємозалежністю параметрів, що робить ефективне керування ними надзвичайно важливим для забезпечення стабільності та продуктивності виробництва. Дистиляційні колони очищення газу є прикладом складного технологічного об'єкта, де одночасно відбуваються теплообмінні та масообмінні процеси, а динаміка системи значною мірою визначається зміною складу газової суміші, швидкістю потоків і конструктивними характеристиками колонного апарата. Управління такими об'єктами потребує інтегрованого підходу, який поєднує фізичне моделювання, математичні розрахунки та сучасні алгоритми автоматизації, включно з адаптивними та біоінспірованими методами оптимізації параметрів ПІ-регуляторів. Впровадження інтелектуальних систем керування дозволяє підвищити точність контролю технологічних параметрів, забезпечити стійкість процесу та ефективно реагувати на змінні виробничі умови.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми, присвяченої моделюванню та автоматизації дистиляційних колон очищення газу, обумовлений її значенням для забезпечення ефективності сучасних технологічних процесів, оптимізації енергоспоживання та підвищення якості кінцевого продукту. Дослідження процесу керування багатовимірними об'єктами дозволяє визначити оптимальні параметри регулювання, оцінити вплив поперечних зв'язків на стабільність системи та створити методи підвищення точності регулювання.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка та вдосконалення фізичних і математичних моделей дистиляційної колони, а також створення інтелектуальної системи автоматичного управління, здатної забезпечувати стабільність технологічного процесу та оптимальне регулювання параметрів у реальному часі. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання: аналіз фізико-хімічних та технологічних особливостей процесу, розробка моделей сталого та динамічного стану, оцінка ефективності налаштування ПІ-регуляторів

за допомогою біоінспірованих алгоритмів, моделювання динаміки системи та перевірка функціонування інтелектуальної мнемосхеми в умовах інтеграції з сучасними системами керування.

Об'єкт дослідження охоплює дистиляційну колону очищення газу як технологічний об'єкт із багатовимірною динамікою, а *предметом дослідження* є фізичні, математичні та програмні моделі процесу, а також системи автоматичного управління, що забезпечують стабілізацію та оптимізацію його параметрів у реальному часі.

Методи дослідження включають експериментальні підходи для визначення основних технологічних характеристик, математичне моделювання та симуляційне моделювання процесів з використанням сучасного програмного забезпечення, а також алгоритми адаптивної оптимізації параметрів регуляторів для забезпечення стабільності та високої точності керування.

Новизна отриманих результатів полягає у комплексній інтеграції фізичних та математичних моделей дистиляційної колони з сучасними системами автоматизації та застосуванні біоінспірованих методів оптимізації для підвищення стабільності й адаптивності технологічного процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Здійснене дослідження узгоджується з пріоритетними науковими напрямами у сфері автоматизації технологічних процесів, цифровізації виробництва та впровадження інтелектуальних систем керування. Робота інтегрована у загальний перелік наукових тем кафедри, що стосуються розвитку методів математичного моделювання, оптимізації та проєктування автоматизованих систем для об'єктів хімічної та нафтогазової промисловості.

Практичне значення отриманих результатів полягає у підвищенні ефективності управління технологічними процесами на промислових установках, оптимізації параметрів контролерів, зменшенні енергетичних витрат та підвищенні стабільності та якості кінцевого продукту.

Структура та обсяг магістерської роботи. Пояснювальна записка має обсяг 79 сторінок, містить 18 рисунків, 4 таблиці та 13 літературних джерел.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИСТКИ ГАЗУ В ДИСТИЛЯЦІЙНІЙ КОЛОНІ, ЯК ОБ'ЄКТУ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У промислових умовах дистиляційна колона посідає провідне місце серед технологічних апаратів, що забезпечують очищення природного газу від широкого спектра домішок та формування кінцевого продукту із заданими експлуатаційними характеристиками. У цьому розділі розглядається структура процесу газоочистки, аналізується функціонування основних агрегатів, що забезпечують масообмін і теплопередачу в апаратурі такого типу, а також уточнюються конструктивні особливості та варіативність конфігурацій дистиляційних колон, які застосовуються у нафтогазовій галузі.

1.1. Технологія обробки природного газу в дистиляційних колонах у нафтовій та газовій промисловості

У сучасному нафтопереробному комплексі природний газ виконує роль енергетичного ресурсу та функціонує як універсальна сировинна база для виробництва широкого спектра нафтохімічних продуктів. Після видобутку газ надходить на технологічні установки у сирому вигляді, характеризується значною варіабельністю компонентного складу та містить суміш вуглеводневих і неуглеводневих домішок, серед яких вода, легкі й важчі вуглеводні від пропану до гептану, циклопентан, метан, вуглекислий газ, сірководень, азот та багато інших складників. Такий склад визначає необхідність проведення глибокої підготовки газової суміші, яка охоплює видалення небажаних компонентів, поділ на індивідуальні або групові фракції та створення умов, за яких газ може бути використаний як товарний продукт або як напівпродукт для подальшого перероблення.

Технологія обробки передбачає формування стабільного складу товарного газу, заснованого на вимогах чинних стандартів, а також забезпечення безпечності

та довговічності трубопровідної інфраструктури. Наприклад, під час виділення ізобутанової фракції застосовуються вимоги стандарту СТ РК 2957-2017, які забезпечують однорідність продукту та регламентують концентрацію компонентів таким чином, щоб масова частка ізобутану становила не менше 98%, кількість пропану не перевищувала 1,3%, нормального бутану – 0,7%, а присутність важких вуглеводнів була повністю відсутня. Одночасно встановлюються жорсткі обмеження на вміст сірководню та загальної сірки, що не повинні перевищувати 0,005%, оскільки навіть незначні концентрації цих речовин можуть спричиняти корозію обладнання та створювати небезпеку для технологічної інфраструктури. Якість товарного газу визначається не лише його хімічним складом, а й енергетичними властивостями, що безпосередньо впливають на ефективність горіння та стабільність технологічних процесів.

У промисловій практиці дистиляційна колона розглядається як складний масообмінний агрегат, у якому створюється багаторазове та інтенсивне контактування парової й рідинної фаз. Така організація процесу забезпечує можливість глибокого розділення газорідинних сумішей та вилучення цільових компонентів відповідно до їхньої леткості. Дистиляційні колони стали невід'ємною частиною технологічних схем нафтогазової, хімічної та навіть харчової промисловості завдяки здатності забезпечувати високий ступінь селективності та стабільність кінцевої продукції.

На рисунку 1.1 подано узагальнену схему будови типового дистиляційного апарата. Його основу становить вертикальний корпус, у внутрішньому об'ємі якого розміщуються контактні пристрої у вигляді тарілок або насадок, що створюють умови для багаторазового масообмінного контакту. Нижня частина апарата пов'язана з ребойлером, який забезпечує подачу теплової енергії та приводить до утворення парової фази, котра піднімається вгору. У верхній частині колони розташовується конденсатор, що перетворює частину парів на рідину, яка далі накопичується в резервуарі рефлюксу та повертається у верхню частину колони для стабілізації масообмінного процесу. Така циркуляційна організація теплових та масообмінних потоків формує замкнену систему, здатну підтримувати стало

визначений режим розділення газорідної суміші та забезпечувати стабільність продуктивності дистиляційної установки.

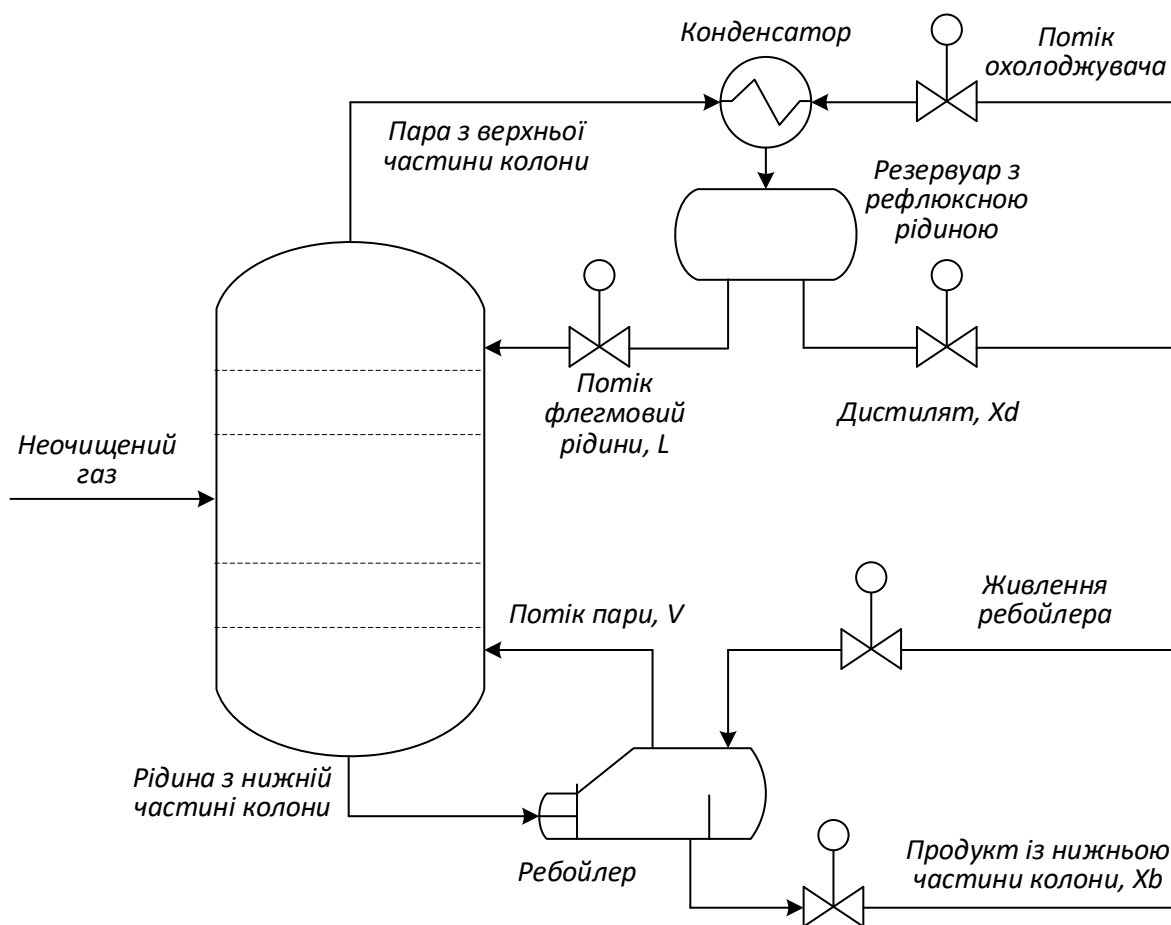


Рис. 1.1. Узагальнена схема будови типового дистиляційного апарата

Вхідний матеріальний потік, що надходить у дистиляційну колону, містить основні компоненти природного газу, на прикладі сирого газу такими компонентами можуть бути бутан чи пентан, а також широкий спектр сторонніх домішок, концентрації яких прагнуть зменшити або повністю усунути у процесі вилучення цільового продукту [1]. Природа компонентів визначає особливості їх поведінки в умовах тепломасообмінних процесів: більш легкі складники переходять у парову фазу та накопичуються у верхній частині апарата, тоді як важчі утворюють рідинний потік, що концентрується у нижній секції. Таке фазове розділення лежить в основі принципу дистиляції, що забезпечує контрольоване отримання дистиляту та кубового залишку з властивостями, заданими технологічним регламентом.

Різноманіття конструкцій дистиляційних колон зумовлене складністю організації внутрішнього масообмінного простору, а класифікація апаратів ґрунтується на типі елементів, через які рухаються рідинні та газові потоки [2]. У промисловій практиці активно застосовуються тарілчасті колони, де масообмін реалізується за допомогою контактних пристроїв різної конструкції [3]. Тарілки можуть мати форму ковпачків, клапанів, сит із каліброваними отворами, хвилястих або решітчастих поверхонь, а також спеціальних трубчастих елементів. Вибір конфігурації контактної пристрою безпосередньо впливає на гідродинамічний режим, інтенсивність барботування та ефективність розділення фаз.

Тарілки виконують функцію забезпечення барботажного контакту між парою та рідиною, що формує динамічний масообмінний шар, у якому відбувається рівноважний розподіл летких компонентів. Кількість розміщених у колоні тарілок визначає число стадій процесу, а отже, впливає на ступінь селективності розділення. Пара, що піднімається з нижніх секцій, переходить зі стадії i на рівень $i+1$, тоді як рідина під дією гравітаційних сил повертається на попередній рівень $i-1$, що створює зустрічнопотоківу структуру руху фаз, зображену на рисунку 1.2. Подібна конфігурація забезпечує багаторазове повторення локальних рівноважних станів, що робить процес розділення більш глибоким і контрольованим.

Переміщення парової фракції зумовлене наявністю перепаду тиску між нижньою та верхньою частинами системи. Цей перепад є функцією низки параметрів, включаючи густину та швидкість руху пари, конструктивні особливості контактних пристроїв, а також геометрію та кількість отворів у поверхні тарілок [3]. Гідродинамічні характеристики колонного простору суттєво впливають на стабільність процесу барботування, а отже, і на загальну ефективність дистиляційного обладнання.

За принципом функціонування тарілки суттєво різняться. У конструкціях із наявністю спеціальних каналів для переливу рідина переходить з верхньої стадії на нижчу через сформовану систему перепускних пристроїв, які забезпечують контрольований рух потоку та запобігають його частковому змішуванню з парою на сусідніх рівнях. Існують також конструкції, у яких рідинна та парова фази

переміщуються через одні й ті самі отвори в основі агрегата. У таких системах відсутні окремі переливні канали, а взаємодія фаз відбувається безпосередньо в отворах, що формує інший гідродинамічний режим і потребує особливо точного вибору параметрів експлуатації, оскільки умови контактування визначають стабільність барботажного шару та інтенсивність масообмінних процесів (рис.1.2).

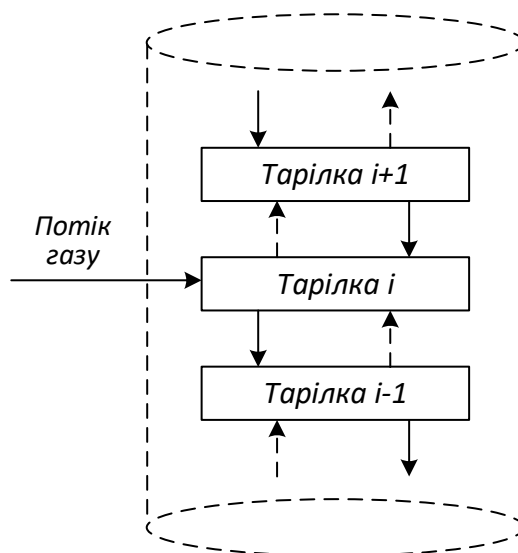


Рис. 1.2. Організація внутрішнього масообмінного простору

Насадкова дистиляційна колона являє собою апарат, внутрішній простір якого заповнений спеціальними елементами, що виконують функцію інтенсифікації тепломасообмінних процесів [2]. У корпусі апарата розташовується опорна конструкція, на яку сипким способом завантажують насадки різної геометричної форми. Найпоширенішими конфігураціями є кільця, пружиноподібні елементи та сідлоподібні фігури, оптимізовані таким чином, щоб забезпечувати максимальну площу міжфазного контакту при мінімальному гідродинамічному опорі. На поверхні насадок формуються плівки рідини, через які проходить паровий потік, створюючи умови для інтенсивного масообміну та досягнення термодинамічної рівноваги на кожному елементі заповнення. Відсутність дискретних стадій, характерних для тарільчастих колон, зумовлює безперервний характер процесу, а тому ефективність насадочного апарата визначається не кількістю тарілок, а висотою еквівалентної теоретичної стадії, що слугує мірою його масообмінної спроможності.

У системі дистиляційної колони одним із найважливіших функціональних елементів є конденсатор, який у термодинамічному сенсі виконує роль теплообмінного апарата, що забезпечує перетворення пари на рідину за умов практично сталого тиску [4]. Конденсація відбувається шляхом тепловідведення до зовнішнього охолоджувального середовища, яким зазвичай виступає вода, розчинені гліколеві суміші або інший хладоагент, здатний підтримувати стабільний градієнт температур. Охолоджені пари, досягаючи точки насичення, переходять у рідку фазу, утворюючи рефлюкс, що акумулюється у спеціальному резервуарі. Рефлюксний потік поділяється на дві частини: одна повертається у верхню секцію колони для орошення, формуючи стабільну структуру тепломасообміну між газовою та рідинною фазами, тоді як інша відводиться з апарата як дистилят, який є основним продуктом процесу.

У промислових схемах дистиляції застосовують два типи конденсаційних апаратів, кожен з яких визначає характер взаємодії між фазами та впливає на селективність розділення. Конденсатор повного конденсації забезпечує перехід у рідку фазу всього парового потоку, що відходить від верхньої частини колони, утворюючи єдину рідинну фракцію. Подібний режим використовується тоді, коли необхідно забезпечити суворий контроль складу дистиляту й досягти рівномірного розподілу рециркуляційного потоку.

Принцип роботи часткового конденсатора побудований на формуванні стану рівноваги між парою та рідиною, у якому лише частина парового потоку перетворюється на рідину, тоді як інша частина зберігає газоподібну форму. Такий режим дозволяє більш тонко керувати концентраційними характеристиками вихідного продукту, оскільки невідконденсована парова фракція має інший склад, ніж рідина, і може бути виведена з апарата як окремий газовий продукт. У резервуарі з рефлюксною рідиною може формуватися додатковий потік вихідного пару, що є наслідком дії теплового балансу системи та залежить від потужності теплообміну, температури хладоагента й умов зворотного зв'язку з колоною.

Рисунок 1.3 демонструє дві конструктивні конфігурації конденсаторів, що застосовуються у складі дистиляційної колони. На першій зображено варіант

повного конденсатора, який забезпечує повний перехід парової фази у рідку форму, тоді як друга конфігурація відображає частковий конденсатор, робота якого ґрунтується на створенні стану рівноваги між газовою та рідинною фазами, унаслідок чого лише частина парового потоку переходить у конденсат.

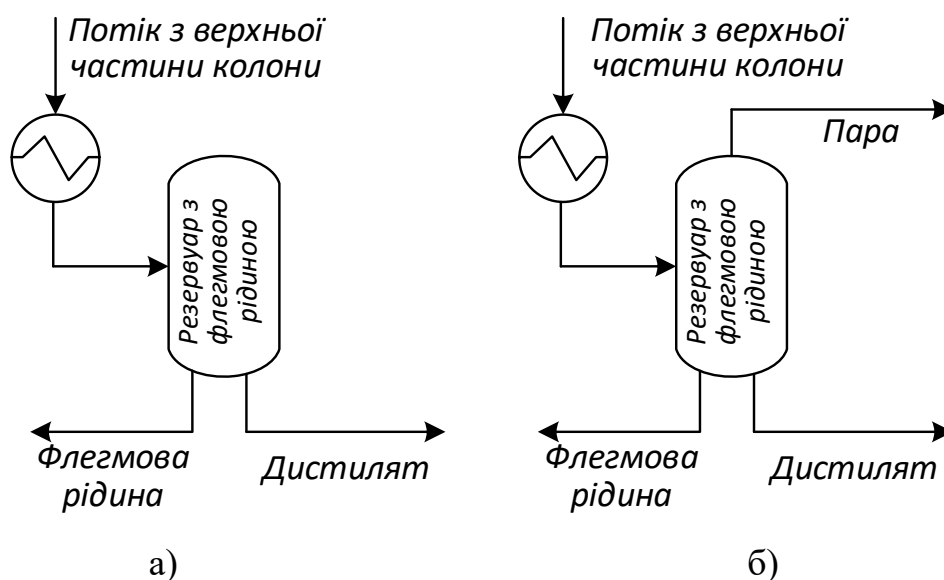


Рис. 1.3. Конструктивні конфігурації конденсаторів, що застосовуються у ДК

У конструкції дистиляційних колон важливою складовою теплової інфраструктури є ребойлер, який виконує фундаментальну функцію підтримання стабільного теплового балансу у нижній секції апарата [5]. У науковому визначенні ребойлер являє собою теплообмінний апарат, що під'єднується до нижньої частини колони та забезпечує безперервну генерацію парової фази за рахунок рециркуляції рідкого потоку, який надходить знизу. У ході процесу дистиляції рідина з нижньої частини колони надходить до ребойлера, де під дією теплової енергії переходить у парову фазу, повертаючись назад у колонний простір та створюючи стабільний потік висхідних парів, необхідних для підтримання масообмінної рівноваги.

На рисунку 1.4 наведено схему ребойлера котельного типу, який є одним із найбільш поширених рішень у промислових умовах. Конструктивний принцип роботи таких ребойлерів полягає у тому, що рідина подається у нижню секцію котла, де вона нагрівається до температури кипіння за допомогою зовнішнього теплоносія. Утворений пар піднімається у верхню частину ребойлера та надходить

назад у дистиляційну колону, створюючи необхідний для процесу тепломасообміну паровий фронт. У такий спосіб ребойлер забезпечує постійну підтримку енергетичного режиму установки, впливаючи на інтенсивність випаровування, профіль температури та концентраційний розподіл компонентів уздовж колонного простору.

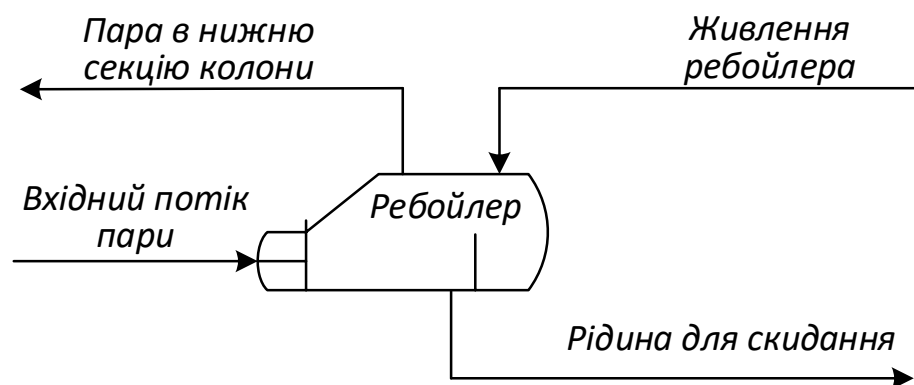


Рис. 1.4. Схема ребойлера котельного типу

Функціонування ребойлера тісно пов'язане з динамікою гідродинамічних і тепломасообмінних процесів, які формують внутрішню структуру дистиляційної колони. Встановлення певного теплового навантаження на ребойлер визначає швидкість утворення парів, що впливає на гідравлічний опір і забезпечує характерну для цього типу процесів взаємодію між рідинною та газовою фазами. За допомогою ребойлера досягається необхідний режим кипіння рідкої фази, що є важливим фактором керованості процесу та його технологічної стабільності. Саме тому вибір конструктивного виконання ребойлера, параметрів теплоносія та режимів рециркуляції визначає ефективність дистиляційної установки та її здатність забезпечувати необхідну селективність розділення складних багатокомпонентних сумішей.

Орошення дистиляційної колони визначається як кількість рідкої фази, що повертається до її верхньої частини після проходження через конденсатор. Рідина, яка спрямовується назад у колонний апарат, характеризується як флегмова або рефлюксна, що підкреслює її роль у створенні внутрішнього циркуляційного контуру та підтриманні рівноважних умов між паровою і рідкою фазами.

Керування інтенсивністю цього потоку є центральним аспектом експлуатації дистиляційної колони, оскільки саме через нього встановлюється величина флегмового числа, тобто співвідношення між кількістю рідини, що повертається у верхню частину колони, та обсягом кінцевого продукту, який відбирається з установки. Це співвідношення відіграє критичну роль у забезпеченні селективності процесу, визначаючи якість розділення та енергетичну ефективність апарата. Підвищені значення флегмового числа призводять до інтенсифікації масообміну, збільшуючи чистоту продукту, але водночас зумовлюють більші енергетичні витрати, тоді як знижені – скорочують теплове навантаження, погіршуючи якість розділення. Саме тому оптимізація цього параметра ґрунтується на компромісі між енергоспоживанням і технологічними вимогами до чистоти дистиляту.

Термодинамічним параметром, який має фундаментальне значення для оцінки поведінки газових потоків у верхній частині дистиляційної колони, є температура точки роси. Під точкою роси розуміють температуру, за якої за умови сталого тиску відбувається конденсація охолоджуваного газу або пари. Цей параметр відображає здатність газової суміші до фазового переходу, демонструючи межу, за якою газова фаза вже не може утримувати певну кількість компонентів у пароподібному стані. Температура точки роси використовується як чутливий індикатор якості газу, оскільки зміна її значень сигналізує про присутність важких компонентів або домішок, які впливають на роботу технологічного обладнання та на характеристики кінцевого продукту. У промислових умовах контроль цього параметра є необхідною складовою забезпечення безпеки, стабільності технологічного режиму та відповідності продукції нормативним вимогам.

1.2. Фізико-хімічна природа процесу очищення газу в умовах дистиляційної колони

Процес очищення газових сумішей у дистиляційній колоні формується як результат складної взаємодії теплових, масообмінних і гідродинамічних явищ, що розвиваються у вертикально стратифікованому апараті з постійною циркуляцією

парової та рідинної фаз. Первинною передумовою реалізації процесу розділення є відмінність у леткості компонентів газової суміші, яка задає термодинамічний градієнт, що забезпечує розподіл речовини уздовж висоти колони. Система функціонує в умовах постійного парорідинного контакту, де кожна локальна ділянка характеризується власним рівнем температури, тиску та складу, що формує сукупність рівноважних станів, які взаємодіють між собою у динамічному режимі.

У нижній частині апарата підтримується зона підвищеної температури, де рециркульована рідка фаза інтенсивно випаровується під дією теплового потоку від ребойлера. Така термічна дія створює умови для збагачення парової фази легкими компонентами, тоді як важчі фракції залишаються у рідинному шарі та рухаються вниз у напрямку до котлової частини колони. Механізм випаровування є результатом поступового подолання молекулярними частинками сил міжфазної взаємодії, що супроводжується збільшенням ентальпії та зміною фазового стану, тоді як конденсація у верхній частині апарата відбувається внаслідок охолодження парової суміші до температури, за якої досягається її рівновага з відповідною рідинною фазою.

Зміна складу суміші на різних висотних рівнях визначається термодинамічними характеристиками компонентів: їх парціальними тисками, леткістю, активністю та здатністю до формування рівноважних станів. Парорідинна рівновага задається залежностями, які описують сумісну поведінку компонентів у системі, зокрема законами Рауля, Дальтона та рівняннями стану, що враховують міжмолекулярні взаємодії. Кожний компонент демонструє власну траєкторію фазового переходу, і ця різниця в поведінці визначає можливість досягнення необхідного рівня очищення продукту на виході технологічної установки.

Режим тепломасообміну у колоні формується як результат зустрічного руху фаз. Пара піднімається догори завдяки перепаду тиску між секціями апарата, тоді як рідка фаза спускається вниз під дією сили тяжіння, створюючи умови для повторного контакту з піднімаючимся паром. Цей процес супроводжується постійним оновленням міжфазної поверхні, що забезпечує інтенсивність

масообміну. Ефективність такого контакту залежить від конструктивних особливостей апарата, геометрії контактних елементів, швидкості переміщення потоків, ступеня турбулентності та здатності рідинної плівки рівномірно розподілятися по тарілках чи насадках. Зміна будь-якого з цих параметрів спричиняє перехід системи в інший рівноважний стан, що відображається у концентраційному профілі уздовж висоти колони.

Суттєвим фактором, що впливає на процес розділення, є взаємодія гідродинамічних і теплових режимів, які визначають стійкість та рівномірність фазового контакту. Коливання температури, тиску або флегмового числа можуть порушувати баланс між фазами, спричиняючи зміщення рівноважних умов. У таких випадках система переходить у режим, де поточний склад фаз уже не відповідає термодинамічним передумовам для якісного розділення суміші. Ця властивість виявляє нелінійну природу об'єкта та його чутливість до збурень, яка потребує ретельного аналізу при формуванні контурів автоматичного регулювання.

Розуміння фізико-хімічної сутності процесу очищення газу у дистиляційній колоні створює теоретичну основу для подальшого моделювання поведінки системи, оскільки дозволяє визначити взаємозв'язок між тепловими, масообмінними й гідродинамічними параметрами. Саме ця взаємодія формує структуру технологічного процесу, задає характер його динаміки та визначає вимоги до способів керування, які забезпечують стабільність режиму, сталість вихідного складу продукту та ефективність роботи апарата у промислових умовах.

1.3. Розроблення цифрового двійника дистиляційної колони в програмному середовищі Honeywell UniSim Design

Створення цифрового двійника дистиляційної колони у сучасному програмному забезпеченні формує науково обґрунтований підхід до дослідження, аналізу та оптимізації складних технологічних процесів, характерних для газової, нафтохімічної та енергетичної галузей. Програмне середовище Honeywell UniSim

Design, яке використовується для реалізації такого цифрового представлення об'єкта, забезпечує можливість відтворення реальних режимів роботи промислових установок з високою точністю, що дозволяє досліджувати поведінку технологічного процесу без втручання у реальну установку та без ризику виникнення аварійних ситуацій.

Дане середовище функціонує як комплексний інструмент для побудови, аналізу та оптимізації технологічних схем, у яких визначальними є процеси тепломасообміну, фазові переходи, нерівноважні режими та взаємодія багатокомпонентних сумішей. Honeywell UniSim Design надає можливість створювати математичні описи об'єктів, що враховують транспортні явища, властивості реальних речовин, кінетичні закономірності та умови протікання фізичних і хімічних процесів. Це забезпечує високий рівень наближення моделі до фактичного промислового процесу та дозволяє досліджувати об'єкт у широкому діапазоні робочих умов.

Цифровий двійник дистиляційної колони формується шляхом поетапного моделювання її поведінки у стаціонарному та динамічному режимах. На першому етапі створюється стаціонарна модель, що відображає структуру технологічної колони, її балансні співвідношення та рівноважний склад фаз. Така модель є основою для визначення параметрів технологічного режиму, аналізу впливу вихідних умов та уточнення термодинамічних характеристик сумішей, що надходять до апарата і виходять з нього. На основі цих даних формується реконструйована схема об'єкта, що відтворює реальні технологічні зв'язки та структуру масо- і теплопереносу.

Другий етап полягає у переході від стаціонарної моделі до динамічного представлення процесу, що дозволяє відтворити поведінку об'єкта під дією зовнішніх збурень, зміни витрат сировини, коливань температури або тиску, а також під дією керуючих впливів. Динамічний цифровий двійник забезпечує можливість вивчення трансформації внутрішніх параметрів колони у часі, встановлює закономірності формування перехідних процесів і дозволяє виконувати дослідження роботи системи автоматичного керування. У такій моделі з високою

деталізацією відображаються реальні фізичні явища, що формують поведінку колонного апарата, включаючи тепломасообмінні процеси на тарілках або насадках, динаміку зміни складу фаз, зміну температурних профілів та взаємодію між потоками рідини й пари.

У програмному середовищі UniSim Design реалізовано спеціалізовану технологію EO (Equation-Oriented), що забезпечує обчислення складних систем рівнянь у десятки разів швидше порівняно з традиційними методами. Це дозволяє проводити високоточні дослідження в режимі, максимально наближеному до реального часу, і відкриває можливість для розроблення інтелектуальних систем керування, що базуються на прогнозуванні стану об'єкта.

Значною перевагою UniSim Design є наявність широкої бібліотеки моделей теплообмінних апаратів, конденсаторів, ребойлерів, колонних елементів і блоків розрахунків, які створюються з урахуванням сучасних наукових уявлень про властивості речовин та процесів. Кожне оновлення програмного комплексу доповнюється новими кінетичними моделями, вдосконаленими алгоритмами розрахунку та інструментами аналізу, що підвищує точність відтворення технологічного процесу і забезпечує актуальність цифрового двійника для сучасних промислових умов.

Склад вхідного матеріального потоку дистиляційної колони включає компоненти, представлені в таблиці 1.1. Вихідний газ, що надходить на обробку, містить як легкі, так і важкі вуглеводні, а також домішки, концентрації яких необхідно знизити до допустимих значень або повністю видалити з кінцевого продукту. Основною технологічною задачею процесу є отримання суміші нормального бутану та ізобутану із концентрацією близько 98%, а також ефективно очищення газу від важких вуглеводнів, що включають компоненти з п'яти і більше атомів вуглецю (C5+).

Досягнення поставленої мети забезпечується за рахунок поетапного розділення газової суміші у дистиляційній колоні, де легкі компоненти піднімаються у верхню частину апарату і збираються у вигляді дистиляту, тоді як більш важкі фракції концентруються у нижній частині колонного апарата. Вибір

технологічних параметрів, таких як температура, тиск, флегмове число та розподіл потоків, визначає якість кінцевого продукту та ефективність видалення небажаних домішок.

Таблиця 1.1

Склад газу та концентрація компонентів у вхідному потоці

№	Найменування компонента	Хімічна формула	CAS номер	Відсоток у молях, %
1.	Ізобутан	C_4H_{10}	75-28-5	26,65
2.	Ізопентан	C_5H_{12}	78-78-4	20,95
3.	Нормальний бутан	C_4H_{10}	106-97-8	19,00
4.	Нормальний пентан	C_5H_{12}	109-66-0	10,05
5.	Додекан	$C_{12}H_{26}$	112-40-3	2,02
6.	Ундекан	$C_{11}H_{24}$	1120-21-4	1,94
7.	Бензен	C_6H_6	71-43-2	1,61
8.	Гексан	C_6H_{14}	110-54-3	7,26
9.	Гептан	C_7H_{16}	142-82-5	3,23
10.	Метилциклопентан	C_6H_{12}	96-37-7	–
11.	Циклопентан	C_5H_{10}	287-92-3	1,61
12.	Октан	C_8H_{18}	111-65-9	1,21
13.	Пропан	C_3H_8	74-98-6	0,00
14.	Нонан	C_9H_{20}	111-84-2	0,00
15.	Толуол	C_7H_8	108-88-3	0,00
16.	О-ксилол	C_8H_{10}	95-47-6	0,00
17.	Етилбензол	C_8H_{10}	100-41-4	0,00
18.	1,2,4-Триметилбензен	C_9H_{12}	95-63-6	0,00

Таблиця 1.1 відображає склад газу та концентрацію окремих компонентів, що є вихідними даними для математичного моделювання та розрахунку режимів роботи дистиляційної колони, а також слугує основою для розробки цифрового

двійника, який дозволяє прогнозувати поведінку системи та оптимізувати процес розділення.

Вхідний потік сировини для дистиляційної колони характеризується певними фізико-технічними параметрами, представленими на рисунку 1.5(a). Температура газової суміші на вході становить 118 °С, тиск дорівнює 1471 кПа, а масовий потік складає $15,47619 \times 10^3$ кг/год. Концентрації окремих компонентів у молях на одиницю речовини встановлюються відповідно до даних, наведених у таблиці 1.1, та ілюструються на рисунку 1.5(б).

Table 1.1: Feed Flow Parameters (from Figure 1.5a)

Parameter	Value
Stream Name	Feed Flow
Vapour / Phase Fraction	0.1060
Temperature [C]	118.0
Pressure [kPa]	1471
Molar Flow [kgmole/h]	203.9
Mass Flow [kg/h]	1.410e+004
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	22.76
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-1.455e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	119.8
Heat Flow [kJ/h]	-2.968e+007
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	22.56
Fluid Package	Basis-1
Phase Option	Multiphase

Table 1.2: Component Concentrations (from Figure 1.5b)

Component	VolFraction
n-Butane	0.194772
i-Butane	0.273193
i-Pentane	0.214762
n-Pentane	0.103024
n-Hexane	0.074423
n-Heptane	0.033111
n-Octane	0.012404
n-C11	0.019887
n-C12	0.020707
Cyclopentane	0.016504
Mycyclopentan	0.020707
Benzene	0.016504

Рис. 1.5. Налаштування параметрів вхідного потоку: а) умови вхідного потоку в середовищі Unisim Design; б) концентрації компонентів

Наступним етапом моделювання є конфігурація дистиляційної колони за допомогою інструменту Input Expert програмного забезпечення Unisim Design. Основне вікно конфігуратора, представлене на рисунку 1.6, відображає важливі параметри та потоки, що визначають роботу колонного апарата. Зокрема, в ньому задаються матеріальні потоки: Feed Flow – вхідний потік у дистиляційну колонну, Distillate Flow – потік дистиляту, Bottoms Flow – потік із нижньої частини колонного апарата, а також енергетичні потоки, що включають Condenser Q – енергію конденсатора, та Reboiler Q – енергію ребойлера.

Налаштування цих параметрів дозволяє моделювати фізико-хімічні процеси розділення в колоні в умовах сталого стану (Steady-State) та здійснювати подальше

динамічне моделювання. Встановлення значень матеріальних і енергетичних потоків є основою для визначення ефективності розділення компонентів, оптимізації рефлюксу та оцінки впливу змін вхідних умов на продуктивність та якість кінцевого продукту. Зокрема, правильне задання вхідного потоку Feed Flow визначає масовий баланс колонного апарата, тоді як енергетичні потоки конденсатора і ребойлера контролюють температурний режим і забезпечують необхідний тепломасообмін між паровою та рідинною фазами, що є критичним для точного розділення легких і важких компонентів суміші.

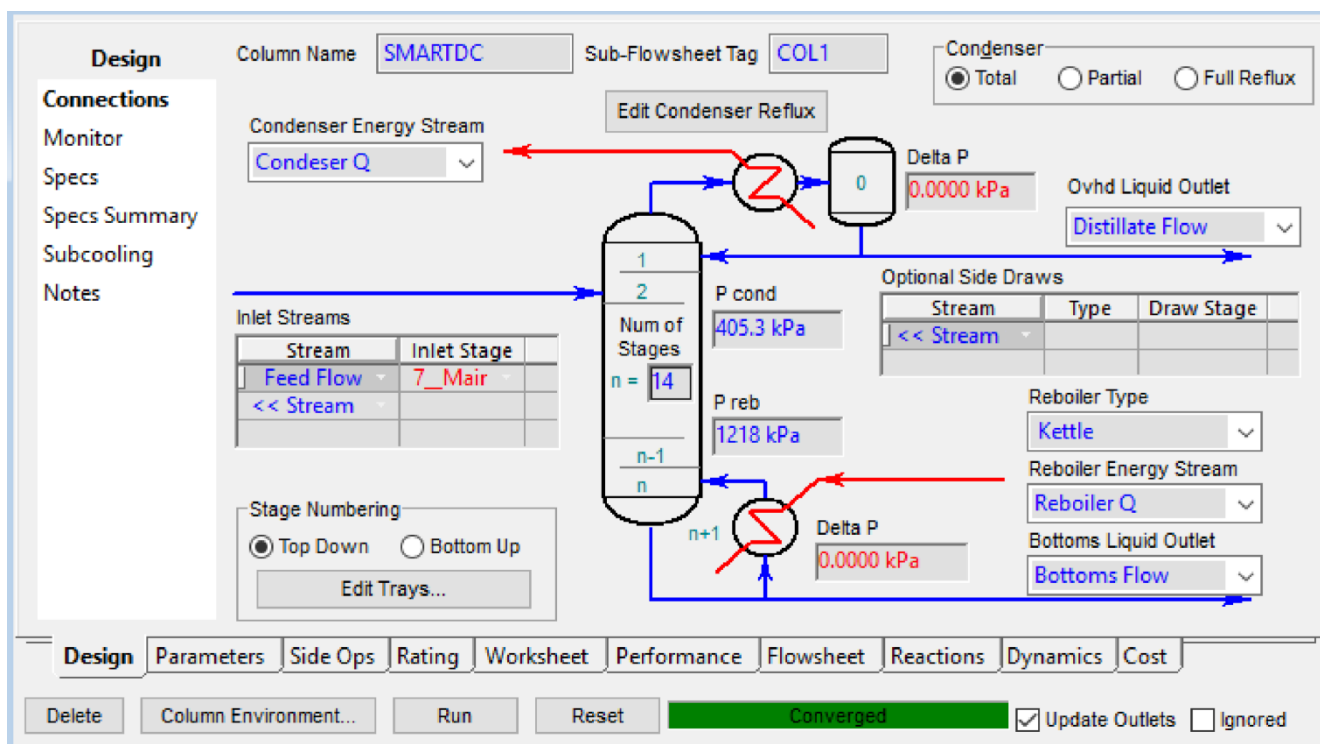


Рис. 1.6. Основне вікно конфігурації колонни в Unisim Design

Аналіз фізико-хімічних параметрів вхідного потоку дозволяє визначити початкові умови для розрахунку тепломасообміну та фазових перетворень у колоні. Зокрема, температура та тиск визначають початкову щільність і об'ємний розподіл газової суміші, що впливає на ефективність подальшого розділення компонентів. Масовий потік визначає обсяг речовини, який необхідно обробити, і використовується при розрахунку гідравлічних характеристик апарата. Концентраційний склад, встановлений відповідно до таблиці, слугує вихідними даними для математичного моделювання процесу дистиляції, що дозволяє

прогнозувати розподіл компонентів між дистиллятом та залишком, а також оцінити ефективність очищення газу від важких фракцій.

Відповідно до специфікації дистиляційної колони, для забезпечення ефективного процесу розділення необхідно обрати 14 тарілок. Вхідний матеріальний потік Feed Flow подається на сьому стадію колонного апарата, що забезпечує оптимальне розподілення компонентів між верхньою та нижньою частинами колони.

Для точного розрахунку колонного апарата у програмному забезпеченні задаються додаткові специфікації, які визначають бажані параметри продуктів розділення. До таких специфікацій відносяться чистота дистилляту, де частка компонентів ізобутану та бутану у потоці Distillate повинна складати 0,98, та чистота продуктів з нижньої частини колони, де частка цих компонентів у потоці Bottoms дорівнює 0,02. Активними параметрами для керування розрахунком обрано швидкість потоку дистилляту (8,78 м³/год) та чистоту дистилляту. Інші специфікації, такі як Reflux Ratio, Reflux Rate, Btms Prod Rate, Bottoms Purity, використовуються виключно для оцінки помилки обчислень у режимі «Estimate».

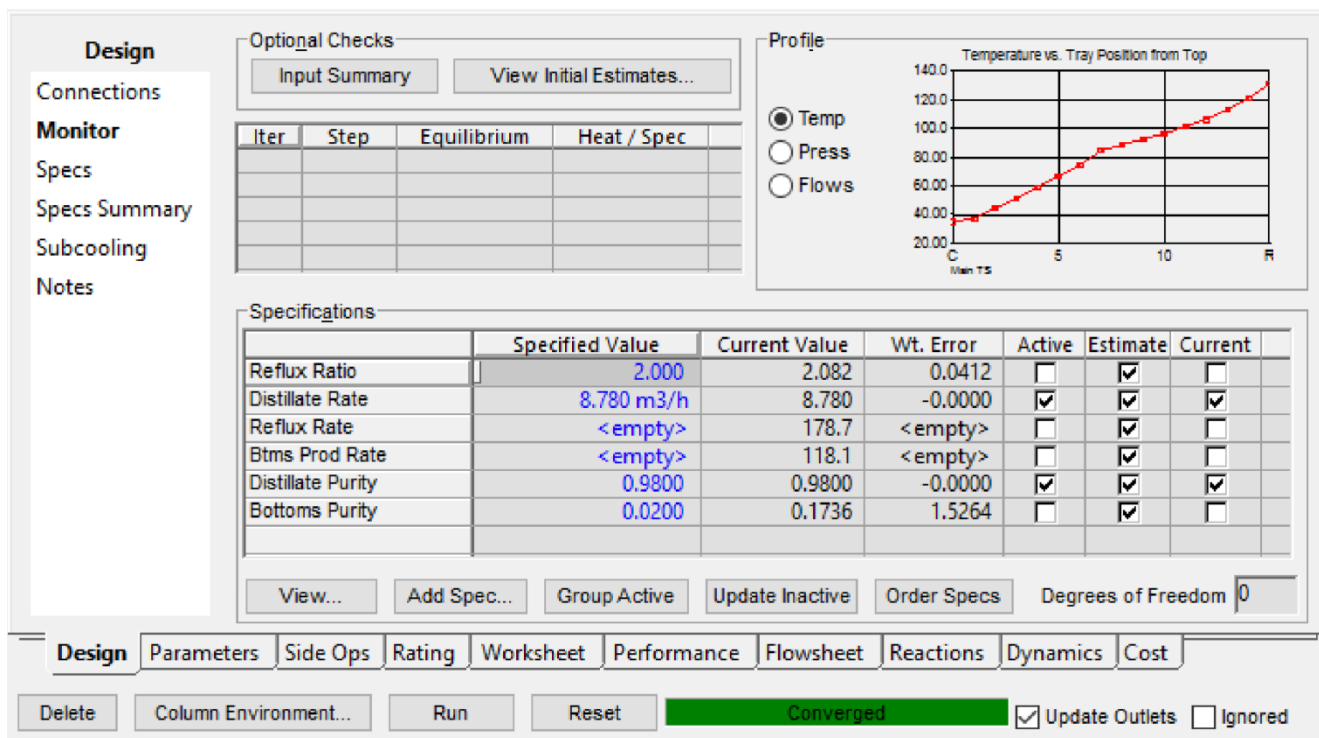


Рис. 1.7. Таблиця специфікацій дистиляційної колони

При заданій конфігурації колонного апарата ступінь свободи системи дорівнює нулю, що дозволяє здійснити розрахунок колони без додаткових обмежень. Розв'язувач Unisim Design налаштований на максимальну кількість ітерацій, рівну 500, при допустимій похибці обчислень $1,0 \times 10^{-5}$. Така конфігурація забезпечує стабільність розрахунку та точність визначення робочих параметрів колони, включаючи розподіл компонентів між дистилятом і залишком, температурний режим та ефективність тепломасообміну.

На рисунку 1.7 представлені результати моделювання дистиляційної колони в умовах сталого стану. При встановленій швидкості потоку дистиляту $8,7774 \text{ м}^3/\text{год}$ на виході з колони формується матеріальний потік, що містить суміш бутанів із концентрацією 97,74%. Отримані результати демонструють відповідність розрахунків поставленій технологічній задачі та підтверджують правильність налаштувань колонного апарата.

Для підвищення точності та чистоти дистиляту можна здійснити додаткове регулювання параметра «швидкість потоку дистиляту», зменшивши його значення. Це дозволяє підвищити концентрацію легких компонентів у верхній частині колони, що, у свою чергу, сприяє більш ефективному розділенню суміші та зменшенню частки важких домішок у дистиляті.

На рисунку 1.8 наведена таблиця концентрацій окремих компонентів та швидкостей матеріальних потоків після розрахунку колони, що відображає розподіл речовини між дистилятом і залишком. Такий аналіз дозволяє оцінити ефективність роботи дистиляційної колони та забезпечує основу для подальшої оптимізації технологічного процесу, включаючи налаштування рефлюксного потоку, енергетичних потоків конденсатора та ребойлера, а також коригування режимів роботи тарілок для досягнення бажаних характеристик продукту.

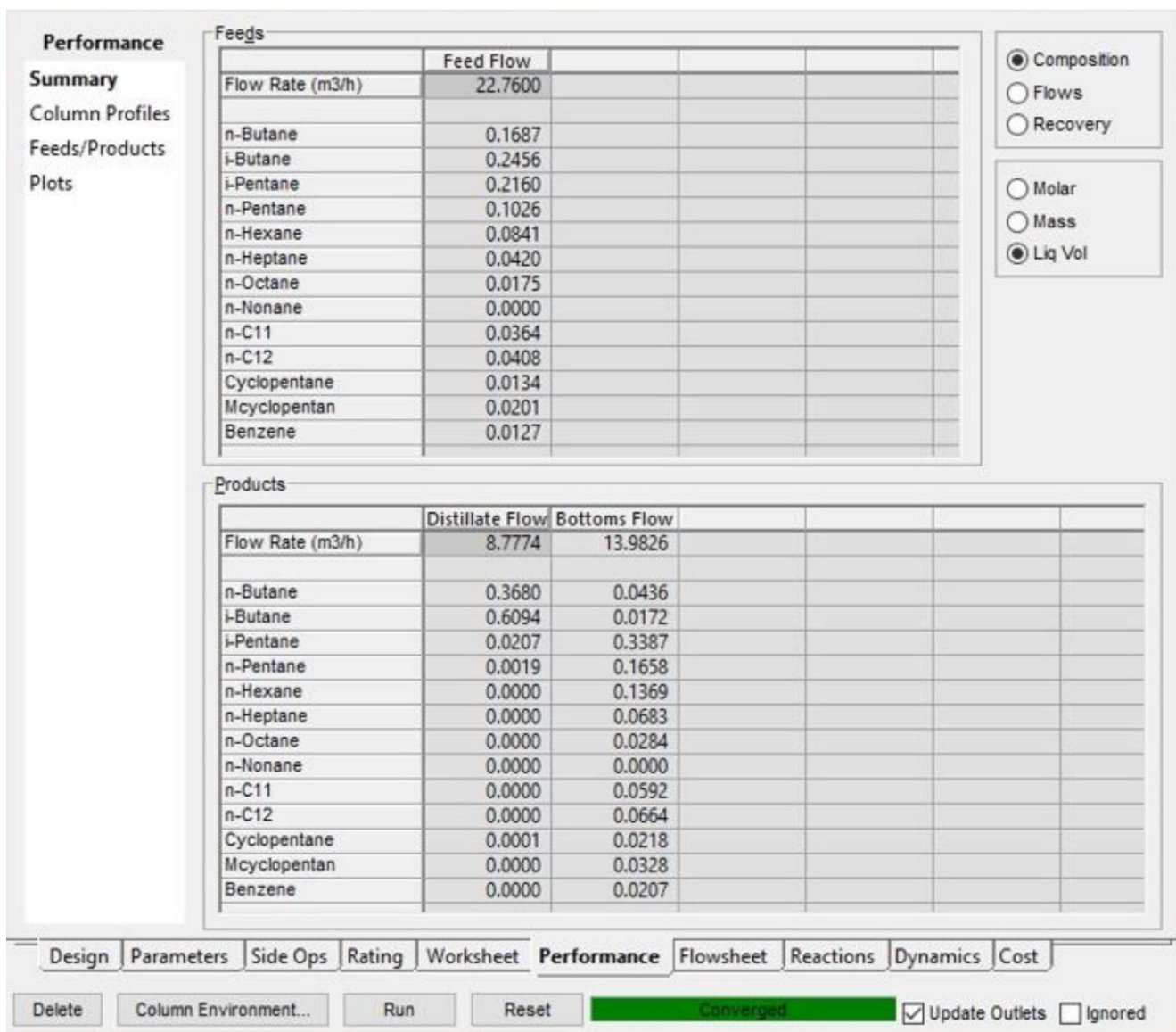


Рис. 1.8. Результати розрахунків колони в сталому стані

На рисунку 1.9 представлено розподіл концентрацій окремих вуглеводнів залежно від стадії процесу, яка відповідає номеру тарілки, починаючи від верхньої частини колонного апарата – конденсатора, і закінчуючи нижньою частиною – ребойлером. Аналіз цього розподілу дозволяє оцінити ефективність розділення компонентів газової суміші у кожній стадії колони.

Дані, отримані у результаті моделювання, показують поступове зменшення концентрації важких фракцій при русі від ребойлера до верхньої частини колони та зростання частки легких компонентів у напрямку конденсатора. Такий профіль концентрацій дозволяє визначити критичні точки для контролю чистоти дистилату та залишку, а також для коригування параметрів рефлюксу і енергетичних потоків

колонного апарата.

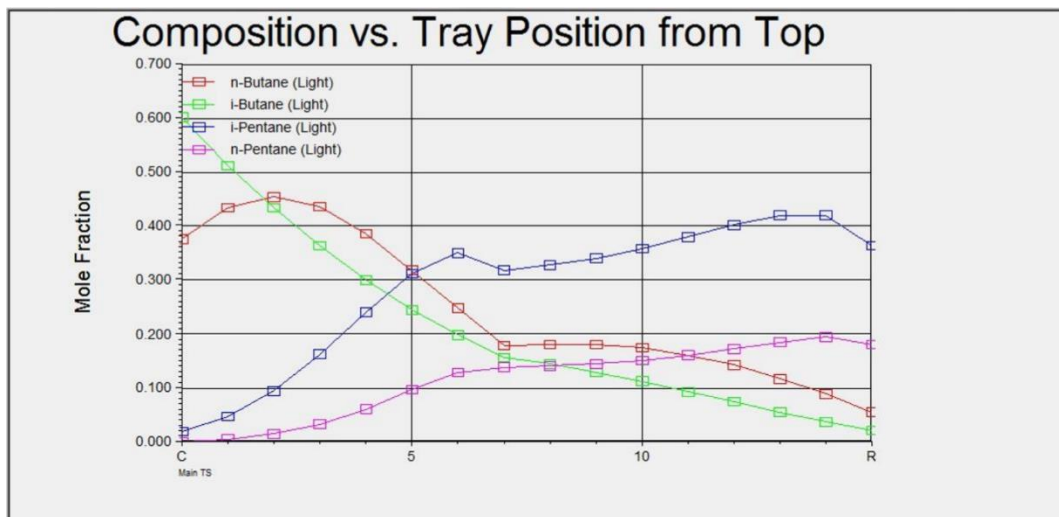


Рис. 1.9. Профіль концентрацій компонентів залежно від стадії дистиляційної колони

Наступним етапом моделювання є розрахунок параметрів тарілок колонного апарата за допомогою утиліти Tray Sizing. Для даної колони обрано клапанний тип тарілок, що забезпечує високу ефективність масообміну між паровою та рідинною фазами, при цьому зберігаючи відносно просту конструкцію, що полегшує експлуатацію та обслуговування.

Результати розрахунків, представлені на рисунку 1.10, демонструють оптимальні значення основних параметрів тарілок, визначених утилітою Tray Sizing у відповідності з технологічними вимогами процесу. Значення, відібрані автоматично для досягнення максимальної ефективності розділення, позначені синім кольором, тоді як інші параметри, розраховані за допомогою розв'язувача Unisim Design, виділені чорним кольором.

Такий підхід дозволяє оцінити ефективність роботи кожної стадії колонного апарата, визначити оптимальну геометрію та конфігурацію тарілок, а також забезпечити точне керування розподілом компонентів у колоні. Розрахунок параметрів тарілок є важливим елементом створення цифрового двійника, оскільки він забезпечує достовірне відтворення масообмінних процесів у моделі, що, у свою чергу, дозволяє прогнозувати поведінку дистиляційної колони при зміні технологічних умов та оптимізувати режим її роботи для досягнення заданих

характеристик продукту.

Performance

Results

Trayed
Table
Plot

Section Results
 Trayed
 Packed
 Export Pressures
 View Warnings...

Tray Results

Section	Section_1		
Internals	Valve		
Section Diameter [m]	1.067		
Max Flooding [%]	68.90		
X-Sectional Area [m ²]	0.8938		
Section Height [m]	8.534		
Section DeltaP [kPa]	6.624		
Number of Flow Paths	1		
Flow Length [mm]	596.9		
Flow Width [mm]	1008		
Max DC Backup [%]	33.18		
Max Weir Load [m ³ /h-m]	49.94		
Max DP/Tray [kPa]	0.603		
Tray Spacing [mm]	609.6		
Total Weir Length [mm]	884.2		
Weir Height [mm]	50.80		
Active Area [m ²]	0.6018		
DC Clearance [mm]	38.10		
DC Area [m ²]	0.1460		
Side Weir Length [m]	0.8842		
Hole Area [m ²]	9.207e-002		
Estimated # of Holes/Valve	78		
Chimney/Sump Res Time			
Relief Area [m ²]	0.0000		
Relief - S [mm]			
Relief - A [mm]			
Relief - B [mm]			

Design Performance Dynamics

Delete OK Ignored

Рис. 1.10. Результат розрахунку конфігурацій клапанних тарілок дистиляційної колони

В результаті проведених розрахунків отримана конфігурація тарілок дистиляційної колони, яка забезпечує ефективний масообмін між рідинною та паровою фазами та відповідає технологічним вимогам процесу. Основні параметри тарілок включають загальну довжину перегородки тарілки, яка становить 644,6 мм, висоту перегородки – 50,8 мм, а відстань між сусідніми тарілками дорівнює

609,6 мм. Діаметр секції колонного апарата становить 1,067 м.

Дані параметри визначають геометричну конфігурацію колонного апарата та впливають на інтенсивність барботажу, турбулентність рідини, контактну поверхню для масообміну та перепад тиску на кожній стадії. Правильне встановлення цих характеристик дозволяє забезпечити рівномірний розподіл парового та рідинного потоків, оптимізувати тепломасообмін та досягти заданої чистоти продуктів на верхній і нижній частинах колони.

Отримані результати є важливим етапом створення цифрового двійника дистиляційної колони, оскільки точне відтворення геометрії та параметрів тарілок забезпечує достовірну симуляцію роботи колони, дозволяє прогнозувати поведінку процесу при зміні технологічних умов і оптимізувати режими управління для досягнення максимальної ефективності розділення компонентів суміші.

1.4. Модель дистиляційної колони в динамічному режимі

Відповідно до досліджень, представлених у роботі [6], для структури керування типу LV необхідно регулювати потік рефлюксу L та потік пари V, які виступають критично важливими параметрами процесу, що безпосередньо впливають на ефективність очищення газової суміші та розподіл компонентів між верхньою і нижньою частинами колонного апарата.

Для реалізації динамічного моделювання технологічної установки була розроблена динамічна модель системи, що включає чотири контролери, які підтримують номінальні режими роботи: LIC-100, LIC-101, PIC-100 та TIC-100. Додатково інтегровані два контролери FIC-Reflux Flow, L та FIC-Boilup Flow, V, параметри яких розраховані із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту для адаптивного регулювання процесу.

Параметри ПІ-регуляторів, визначені раніше за допомогою алгоритму DA із використанням критерію якості ІТАЕ-М, були застосовані для налаштування ПІД-блоків керування колони в середовищі Unisim Design. Такий підхід дозволяє досягти точного підтримання встановлених технологічних режимів навіть при

зміні вхідних потоків або зовнішніх впливів, забезпечуючи стабільність температурного та матеріального профілів у колоні, оптимальне співвідношення компонентів у дистилаті та залишку, а також підвищення ефективності розділення компонентів газової суміші.

Розроблена динамічна модель дистиляційної колони, представлена на рисунку 1.11, включає в себе діаграму потоку процесу (Process Flow Diagram, PFD), графічне відображення швидкості потоку дистилату, чистоти продукту та концентрацій бутанів, а також панелі управління контролерами. Така структура моделі дозволяє одночасно контролювати кількісні та якісні параметри процесу, оцінювати ефективність роботи системи регулювання та проводити тестування режимів роботи установки у реальному часі.

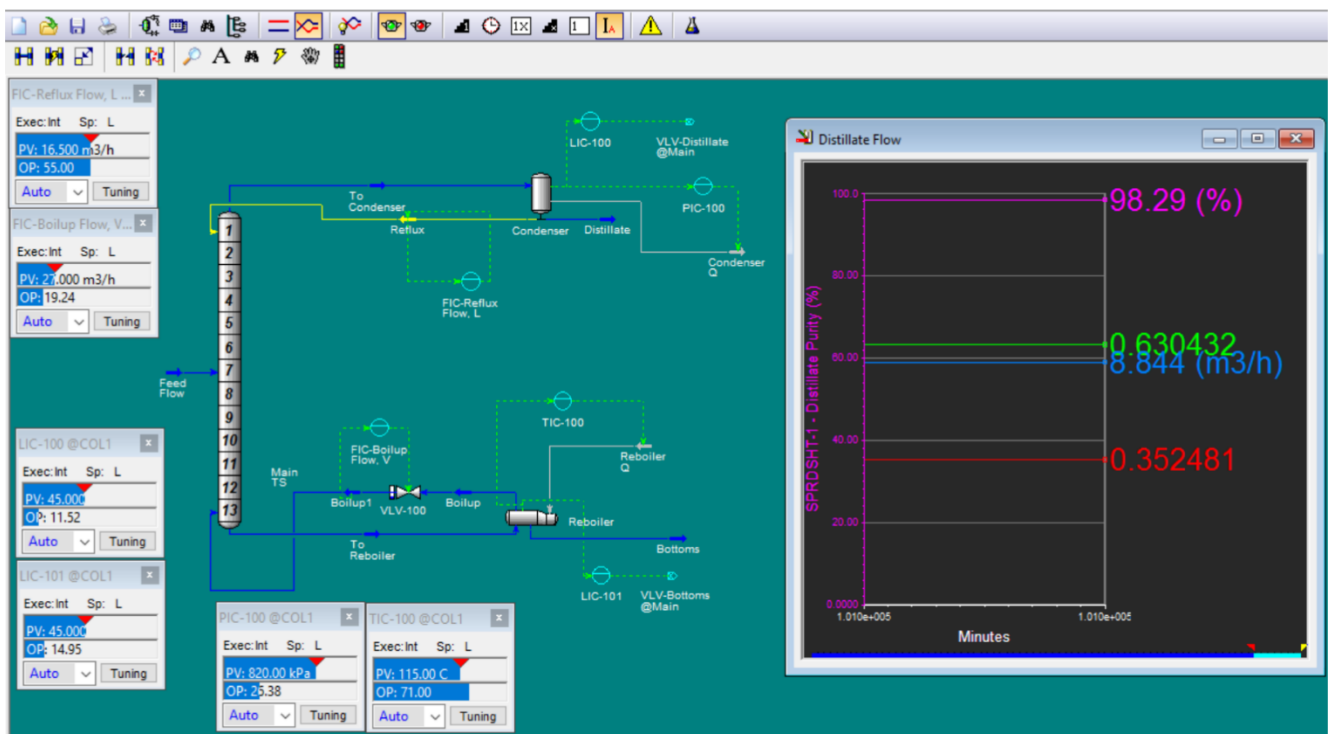


Рис. 1.11. Динамічна модель дистиляційної колони

На графіку, представленою на рисунку 1.11, показано, що при швидкості потоку дистилату 8,844 м³/год чистота продукту досягає 98,29 %, що відповідає технологічним вимогам та встановленим критеріям якості дистилату. Це свідчить про високу ефективність роботи колони та правильність налаштування параметрів регулювання.

Динамічна модель у середовищі Unisim Design надає можливість проводити комплексне тестування колонного апарата, включно з перевіркою роботи систем управління, контролю та сигналізації, а також моделювання нестандартних або аварійних ситуацій. Аналіз результатів моделювання в динамічному режимі показав, що система знаходиться в стабільному стані, а завдання керування технологічним процесом виконано у відповідності до заданих критеріїв.

Аналіз результатів моделювання показав, що при швидкості потоку дистиляту $8,844 \text{ м}^3/\text{год}$ чистота продукту становить $98,29\%$, що повністю відповідає технологічним вимогам. Профіль концентрацій компонентів залежно від стадії процесу демонструє зменшення важких фракцій у напрямку до конденсатора та збільшення частки легких компонентів у верхній частині колони, що свідчить про ефективність масообміну на кожній тарілці.

Динамічна модель дозволяє проводити тестування стабільності та стійкості системи управління, перевіряти роботу контролерів, а також прогнозувати вплив змін технологічних умов на кінцеву якість продукту. Вона є невід'ємною частиною створення цифрового двійника дистиляційної колони, забезпечуючи достовірне відтворення фізико-хімічних процесів, оптимізацію режимів роботи та підвищення продуктивності і якості кінцевого продукту.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі магістерської роботи було проведено комплексне дослідження технологічного процесу очищення газу в дистиляційній колоні як об'єкта автоматизації та створено цифрову модель установки для подальшого аналізу і оптимізації. Було розглянуто фізико-хімічну сутність процесу, описано особливості тепломасообміну між фазами, визначено рівноважні параметри системи та фактори, що впливають на зміну складу газової суміші.

На основі аналізу вхідного потоку та специфікацій колонного апарата було налаштовано конфігурацію тарілок, визначено оптимальні параметри їх геометрії, включно з висотою та відстанню між тарілками, діаметром секцій і довжиною

перегородок. Розрахунки в сталому стані показали досягнення заданої чистоти дистиляту на рівні 97,7–98 %, що підтверджує ефективність обраної конструкції та налаштувань системи.

Створено динамічну модель дистиляційної колони, яка включає контролери рефлюксу та пари, ПД-регулятори з параметрами, розрахованими за критерієм ІТАЕ-М, а також панелі управління і графічне відображення концентрацій компонентів. Модель дозволяє відтворювати реальні процеси у часі, оцінювати стабільність та стійкість установки, тестувати режими роботи контролерів і перевіряти системи сигналізації. Результати динамічного моделювання показали, що при швидкості потоку дистиляту 8,844 м³/год досягається чистота продукту 98,29 %, що відповідає встановленим технологічним критеріям.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО АПАРАТУ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРІВ ДИСТИЛЯЦІЙНОЇ КОЛОНИ НА ОСНОВІ БІОІНСПРОВАНИХ АЛГОРИТМІВ

2.1. Розвиток штучного інтелекту в сфері автоматизації технологічних процесів

Світові тенденції розвитку високоефективних розподілених систем управління спрямовані на інтеграцію сучасних досягнень штучного інтелекту у промислові системи управління складними виробничими процесами. Це напрями отримали загальне позначення «Industrial Artificial Intelligence» (IAI), що відображає прагнення до інтелектуалізації промислового управління. Основна мета таких систем полягає у застосуванні інтелектуальних алгоритмів управління для забезпечення заданих показників продуктивності, економічної ефективності та стабільності функціонування промислових об'єктів.

На сьогоднішній день виділяються перспективні напрями, серед яких розвиток технологій «розумного виробництва» (Smart Manufacturing, SM), використання алгоритмів аналізу великих обсягів даних у промисловості (Industrial Big Data Analysis, IBDA), створення цифрових двійників підприємств (Digital Twin, DT), впровадження технологій промислового Інтернету речей (Industrial Internet of Things, IIoT) та використання хмарних обчислень (Cloud Computing, CC). Інтелектуальні системи поступово проникають у всі сфери промислового виробництва, включаючи автоматизацію процесів у нафтовій та газовій промисловості, хімічній, аерокосмічній, металургійній галузях та інших. У контексті нафтовидобувного сектору, де навіть короткочасні простої виробництва можуть призводити до багатомільйонних втрат, впровадження штучного інтелекту набуває особливої економічної значущості.

Відповідно до концепції промислової революції «Індустрія 4.0» відбувається масштабне оцифрування технологічних процесів, автоматизація та роботизація

систем управління за допомогою штучного інтелекту, де роль людини зводиться до функції контролю та нагляду за автономним виробництвом. Smart-система, побудована згідно з концепцією «Індустрія 4.0», виконує інтегровані функції інтелектуального моніторингу підприємства, планування, управління та логістики виробничих процесів. Вона забезпечує автоматизоване збирання даних з сенсорів, обробку та аналіз отриманої інформації, формування робочих розкладів та підготовку аналітичних звітів. Так, дослідження, присвячене впровадженню Smart-систем у процес розробки нафтових родовищ, демонструє можливість забезпечення високоефективного та екологічного видобутку шляхом цифровізації та інтелектуалізації систем управління. Інтеграція таких систем дозволяє створювати високотехнологічне, безпечне, надійне та економічно ефективно виробництво як для безперервних, так і для дискретних технологічних процесів.

Одним із важливих аспектів розумного виробництва є створення віртуального двійника підприємства, здатного виконувати функції аналітики виробничих даних, прогнозування та корекції управляючих впливів на технологічні процеси залежно від поточного стану системи. Такий підхід підвищує продуктивність та ефективність виробництва за рахунок адаптивного реагування на зміни умов функціонування. У наукових джерелах цифрове виробництво подається як кіберфізична система (Cyber-Physical System, CPS), яка структурно включає п'ять рівнів. Перший рівень відповідає за збирання даних з об'єктів технологічного процесу за допомогою програмованих логічних контролерів та контрольовано-вимірювальних приладів. На другому рівні здійснюється обробка даних і виділення значущої інформації. Третій рівень спрямований на передавання оброблених даних у програмне забезпечення розподілених систем і SCADA для виявлення небажаних відхилень параметрів процесу та передаварійних ситуацій, що дозволяє приймати своєчасні керуючі рішення для запобігання аваріям. Четвертий рівень реалізує взаємодію людини з машиною через Human Machine Interface (HMI), спрощуючи роботу інженера з обладнанням. П'ятий рівень забезпечує самоконфігурацію системи у відповідь на зміни зовнішнього середовища.

Методи штучного інтелекту відзначаються високою точністю у вирішенні складних оптимізаційних завдань, швидкодією та здатністю до обробки великих обсягів інформації. Інтелектуальні системи дозволяють формувати цілі управління, приймати рішення, забезпечувати послідовність дій для досягнення заданого результату, здійснювати прогнозування параметрів процесу та порівнювати їх із фактичними даними, створювати контур зворотного зв'язку та виконувати функції корекції управління. У практиці інтелектуального управління активно застосовуються біоінспіровані підходи, що базуються на вивченні природних процесів, наприклад, руху колонії мурах до джерела харчування або реакції імунної системи організму на чужорідні агенти. Такі процеси характеризуються надійністю, стабільністю та здатністю до адаптації у змінних умовах навколишнього середовища.

Для розв'язання складних оптимізаційних задач у промисловості широко застосовуються метаевристичні алгоритми, засновані на принципах біоінспірованого штучного інтелекту, зокрема алгоритми роїння, еволюційні, мультиагентні та екологічні моделі. Активний розвиток наукових публікацій у цій галузі свідчить про перспективність та актуальність досліджень у сфері інтеграції інтелектуальних систем у промислове виробництво. На рисунку 2.1 представлено класифікацію метаевристичних підходів штучного інтелекту та найбільш розповсюджені біоінспіровані алгоритми, що демонструє різноманітність методологічних інструментів для оптимізації та інтелектуалізації управлінських процесів у промислових об'єктах.

Класифікація метаевристичних підходів штучного інтелекту та їх найбільш поширених біоінспірованих алгоритмів відображає різноманітність методологій, що застосовуються для оптимізації та інтелектуалізації управлінських і виробничих процесів. Метаевристичні алгоритми базуються на принципах природних і соціальних систем, забезпечуючи здатність адаптуватися до складних і динамічних умов функціонування технологічних систем. До основних груп таких алгоритмів належать еволюційні методи, алгоритми роїння, екологічні алгоритми та мультиоб'єктні оптимізатори.

Еволюційні алгоритми включають класичні генетичні методи, такі як генетичні алгоритми (GA), генетичне програмування (GP), алгоритми диференціальної еволюції (DE), еволюційні стратегії (ES) та нейроеволюційні алгоритми. Вони моделюють природні процеси відбору, мутації та рекомбінації, що дозволяє вирішувати складні оптимізаційні завдання, забезпечуючи високий рівень адаптивності та знаходження глобального оптимуму у багатовимірних просторах.

Алгоритми роїння імітують колективну поведінку тварин і комах, забезпечуючи ефективний розподіл обчислювальних ресурсів та пошук оптимальних рішень у складних середовищах. Сюди входять алгоритм колонії мурах (ACO), оптимізація рою частинок (PSO), алгоритм колекційної поведінки риб (FS), алгоритм оптимізації світлячка (FA), алгоритм пошуку кукушки (CS), алгоритм стрекози (DA) та алгоритм колони бджіл (ABC). Ці алгоритми використовуються для моделювання кооперативної поведінки агентів, що забезпечує швидке знаходження рішень у багатокритеріальних задачах.

Екологічні алгоритми відтворюють принципи адаптації живих організмів до умов середовища, такі як алгоритм сорнякової оптимізації (IWO), оптимізація методом біогеографії (BBO), коеволюційна оптимізація (CC), алгоритм оптимізації теплообміну (TEO), алгоритм оптимізації бактеріального пошуку (BFO) та алгоритм стрибка жаби (SFLA). Їхня специфіка полягає у здатності системи реагувати на зміни зовнішнього середовища та забезпечувати стійкі рішення в умовах невизначеності.

Мультиоб'єктні алгоритми дозволяють вирішувати задачі з одночасною оптимізацією декількох критеріїв, поєднуючи підходи до багатокритеріальної оцінки, як-от NSGA2 (генетичний алгоритм недомінантної сортування), VEGA (генетичний алгоритм із векторною оцінкою), SPEA (многокритеріальний еволюційний алгоритм) та IOSO (косвена оптимізація на базі самоорганізації). Ці методи дозволяють досягти компромісного балансу між конфліктуєчими цілями, що є важливим для промислових систем, де необхідно одночасно забезпечувати продуктивність, енергозбереження та безпеку.

Окрему групу складають алгоритми, які інтегрують штучні нейронні мережі (ANN) для моделювання та прогнозування складних процесів. Поєднання нейронних мереж з еволюційними або роїними алгоритмами дозволяє створювати гібридні системи, що ефективно адаптуються до зміни умов виробництва та забезпечують високоточне управління технологічними процесами.

2.2. Алгоритм оптимізації Ant Colony Optimization, ACO

Алгоритм оптимізації колони мурах (Ant Colony Optimization, ACO) розглядається як один із провідних метаевристичних підходів, що здатний забезпечувати ефективне знаходження рішень у багатовимірних, нелінійних та динамічних просторах оптимізаційних завдань. Його концептуальна основа ґрунтується на моделюванні природної поведінки мурашиних колоній, у яких процес пошуку найкоротшого шляху між гніздом і джерелом їжі визначається колективною взаємодією індивідуумів через феромонові мітки. Саме феномен формування феромонових трас забезпечує надзвичайну ефективність цього алгоритму в інженерних і промислових задачах оптимізації.

У природних колоніях мурах кожна особина залишає на шляху хімічні сліди у вигляді феромонів, інтенсивність яких змінюється внаслідок випаровування. Короткі та ефективні маршрути зберігають високу концентрацію феромонів, що стимулює наступних мурах рухатися тим самим шляхом, тоді як довгі або неефективні маршрути поступово зникають через інтенсивніше випаровування. Цей природний механізм саморегуляції перетворено у математичний апарат, який дозволяє моделювати процес пошуку оптимального маршруту в задачах комбінаторної та параметричної оптимізації. У результаті маршрути з більшою феромоновою концентрацією перетворюються на домінантні рішення, а малоперспективні траєкторії поступово втрачають своє значення, що забезпечує поступове наближення алгоритму до глобального оптимуму.

Збільшення розміру початкової популяції штучних мурах сприяє ширшому охопленню простору рішень і підвищує ймовірність знаходження глобально

оптимального варіанта. Це пов'язано з тим, що більша кількість агентів здатна паралельно досліджувати більшу кількість потенційних траєкторій, знижуючи ризик передчасної збіжності алгоритму до локального мінімуму. У складних технологічних системах, де оптимізаційні задачі характеризуються мінливими умовами, цей принцип забезпечує адаптивність та підвищує стійкість процесу пошуку.

Ймовірність того, що штучний агент-мураха обере певний перехід у процесі пошуку оптимального маршруту, визначається співвідношенням

$$\begin{cases} P_{m,n}^{Ant}(t) = \frac{([\tau_{m,n}(t)]^\alpha \cdot [\mu_{m,n}]^\beta)}{\sum ([\tau_{m,n}(t)]^\alpha \cdot [\mu_{m,n}]^\beta)}, & \text{коли } (m, n) \in W^{Ant}; \\ 0 & \text{коли } (m, n) \notin W^{Ant} \end{cases} \quad (2.1)$$

У цьому співвідношенні $\mu_{i,j}$ позначає функцію видимості, що забезпечує здатність алгоритму віддавати пріоритет близьким вузлам та знижувати ймовірність вибору надмірно віддалених сегментів маршруту. Параметр $\tau_{i,j}(t)$ визначає інтенсивність феромонного сліду на відповідному ребрі в момент часу t , а показники α та β відображають відносний вплив накопиченого феромону та функції видимості на процес прийняття рішення штучним агентом. Позначення W^{Ant} використовується для характеристики поточного маршруту, яким рухається агент у процесі формування нового рішення. Пара (m, n) описує фрагмент шляху між віртуальним гніздом мурашиної колонії та джерелом умовної «їжі», тобто цільовою точкою оптимізаційної задачі.

Механізм випаровування феромонів відіграє провідну роль у запобіганні накопиченню непродуктивних шляхів. Зменшення феромонної інтенсивності дозволяє поступово усувати маршрути, що не демонструють оптимальних характеристик, завдяки чому система уникає передчасної конвергенції до локальних мінімумів та зберігає здатність до дослідження глобального простору рішень. Цей процес відображено рівнянням оновлення феромонного сліду

$$\tau_{m,n}(t+1) = \gamma \cdot \tau_{m,n}(t) + \sum (\Delta \tau_{m,n}^{Ant}(t)), \quad Ant = 1 \dots N. \quad (2.2)$$

Тут $\Delta \tau_{m,n}^{Ant}$ характеризує кількість феромону, який окремий агент залишає на

вибраному ним маршруті, тоді як N позначає загальну кількість агентів у системі. Коефіцієнт γ описує інтенсивність випаровування, змінюючись у межах від 0 до 1 і таким чином контролюючи баланс між експлуатацією відомих вигідних рішень та дослідженням нових можливих траєкторій.

Структурна логіка алгоритму оптимізації колони мурах включає ініціалізацію параметрів, розміщення агентів у вихідній точці, послідовне формування індивідуальних маршрутів та їхню оцінку за критерієм ефективності, після чого відбувається процес оновлення феромонів, який забезпечує еволюційний характер пошуку. Після досягнення умов завершення алгоритм формує оптимальне рішення, що відображає глобально найкоротший або найефективніший маршрут у заданій оптимізаційній постановці.

Важливо підкреслити властивості, що визначають наукову й прикладну значущість АСО. Його здатність до паралельного дослідження багатовимірного простору рішень забезпечує ефективність у задачах, де класичні детерміновані методи втрачають продуктивність через надмірну складність пошукового простору. Пластичність алгоритму дозволяє системі пристосовуватися до зміни вхідних даних та структури середовища, що є особливо актуальним у промислових умовах із високою динамічністю процесів. Збіжність алгоритму до стабільного розв'язання ґрунтується на взаємодії між механізмами підсилення перспективних рішень та згасання неефективних траєкторій, що формує стійкий еволюційний пошук у напрямку оптимального рішення.

У сучасних системах автоматизації АСО дедалі частіше інтегрується з іншими інтелектуальними технологіями, зокрема з нейронними мережами, нечіткою логікою та цифровими двійниками виробничих об'єктів. Це розширює сферу його застосування, охоплюючи оптимізацію багатопараметричних режимів роботи технологічних установок, синтез оптимальних схем керування, маршрутизацію потоків у промислових мережах, а також адаптивне керування енергетичними й транспортними системами.

2.3. Алгоритм Cuckoo search, CS

Алгоритм пошуку кукушки належить до метаевристичних підходів оптимізації та демонструє високу результативність під час розв'язання задач керування технологічними процесами, що підтверджується його перевагою над генетичним алгоритмом та алгоритмом рою частинок. Основою цього методу виступає модельована репродуктивна поведінка кукушок, котра характеризується відкладанням яєць у гнізда інших птахів. Така стратегія біологічної експансії збільшує імовірність продовження роду, оскільки значна частка потомства отримує шанс на розвиток за рахунок догляду приймаючої особини. Якщо ж власник гнізда розпізнає сторонні яйця, він може знищити їх або залишити гніздо, що створює еволюційний тиск, за якого деякі види кукушок виробили здатність мімікрувати, набуваючи забарвлення та форми яєць, майже тотожних яйцям господаря. Завдяки цьому зростає ймовірність виживання потомства, що і стало основою для формування алгоритмічної інтерпретації природного механізму [7].

Алгоритм пошуку кукушки формалізує процес еволюційного пошуку через застосування Levy flights, що забезпечують довгі випадкові стрибки, здатні виходити за межі локальних мінімумів і посилювати глобальні пошукові можливості. Узагальнена математична форма опису руху імітованої особини в $k+1$ -й ітерації задається як:

$$x_m^{k+1} = x_m^k + \alpha \times Levy(s, \mu), \quad (2.3)$$

де функція Levy(s, μ) постає у вигляді важкохвостого розподілу:

$$Levy(s, \mu) = \frac{[\mu \times \Gamma(\mu) \times \sin(\frac{\pi\mu}{2})]}{[\pi \times s^{1+\mu}]}, \quad (2.4)$$

та описує випадковий крок, що поєднує значну мінливість траєкторій та інтенсивну здатність до дослідження пошукового простору.

Алгоритм моделює процес відкладання яєць у різні гнізда, перевірку їх виживаності, реакцію господаря та відбір найуспішніших яєць, з яких формується нове покоління кукушок. Така логіка створює динамічний пошуковий простір, де кожна ітерація репрезентує співвідношення експлуатації найкращих розв'язків і

дослідження нових перспективних зон.

У межах кожної ітерації кожна кукушка створює лише одне яйце, що забезпечує керованість процесу генерації нових рішень. Гнізда, які демонструють підвищену ймовірність виживання, зберігаються у наступних ітераціях, утворюючи механізм елітарності. Імовірність розпізнавання яйця господарем варіює у діапазоні від 0 до 1, що дозволяє алгоритму гнучко налаштовуватися під умови завдання та підтримувати баланс між ризикованими й консервативними стратегіями пошуку.

Алгоритм вирізняється здатністю проводити пошук у багатовимірних просторах за рахунок ефективної рандомізації. Його поведінка демонструє як локальні, так і глобальні переміщення, оскільки крок Levy може мати малі та великі значення, що сприяє обходу точок локального мінімуму. Метод вирізняється мінімальною кількістю параметрів налаштування, що підвищує його практичну зручність у завданнях оптимізації технологічних процесів, де важливим є не лише знаходження оптимального рішення, а й забезпечення стабільної поведінки алгоритму за умов високої розмірності простору.

2.4. Алгоритм Dragonfly Algorithm, DA

Алгоритм оптимізації стрекози (Dragonfly Algorithm, DA) належить до сучасних методів роевого інтелекту, що сформувалися на основі моделювання колективної поведінки групи стрекоз під час міграції та полювання на дрібних комах. У природних умовах рій стрекоз демонструє складні механізми самоорганізації, які проявляються у здатності розподілятися на окремі функціональні групи, адаптувати траєкторії руху до мінливих характеристик середовища та забезпечувати стабільний напрямок переміщення за рахунок поєднання індивідуальних і групових реакцій [8].

У описі поведінкових механізмів стрекози виокремлюється п'ять характерних реакцій, що визначають динаміку її руху. Перша реакція описує процес сепарації, тобто віддалення окремої особини від сусідніх агентів з метою

підтримання необхідного інтервалу між елементами рою. Вона подається у вигляді рівняння:

$$Se_{(n,t)} = - \Sigma [Y_{(n,t)} - Y_{(m,t)}], \quad (2.5)$$

де n позначає конкретну стрекозу, m – сусідню особину, t – номер ітерації, N – кількість сусідів, $Y_{(n,t)}$ і $Y_{(m,t)}$ – відповідно вектори поточного розташування особини та її сусіда.

Друга поведінкова характеристика виражає прагнення стрекози узгоджувати свою швидкість із середнім значенням швидкостей сусідів. Вона описується формулою:

$$Al_{(n,t)} = \frac{(\Sigma v_{(m,t)})}{N}, \quad (2.6)$$

де $v_{(m,t)}$ – швидкість сусідньої особини, а $Al_{(n,t)}$ – результуюча швидкісна стабілізація.

Третій механізм відображає когезію, тобто прагнення окремої стрекози рухатися в напрямку центру мас сусідніх агентів. Це наведено у формі:

$$Co_{n,t} = \frac{(\Sigma Y_{m,t})}{N} - Y_{n,t}. \quad (2.7)$$

Четверта складова характеризує рух стрекози у напрямку джерела їжі, що визначається різницею між координатами знайденого джерела та положенням особини:

$$F_{(n,t)} = X_{(f,t)} - X_{(n,t)}, \quad (2.9)$$

де $X_{(f,t)}$ позначає місце розташування джерела їжі на ітерації t .

П'ята реакція представляє уникнення хижака, що моделюється як вектор руху у бік, протилежний положенню об'єкта загрози:

$$D_{(n,t)} = D_{(хижак,t)} + X_{(n,t)}, \quad (2.10)$$

де $D_{(хижак,t)}$ задає позицію хижака у середовищі.

Усі наведені складові інтегруються в єдиний вираз, який визначає коригувальний крок переміщення стрекози. Він ураховує вагові коефіцієнти, що регулюють інтенсивність впливу кожної поведінкової компоненти. Узагальнена формула набуває вигляду:

$$\Delta Y_{(n,t+1)} = se \cdot Se_{(n,t)} + al \cdot Al_{(n,t)} + co \cdot Co_{(n,t)} + f \cdot F_{(n,t)} +$$

$$+d \cdot D_{(n,t)} + \omega \cdot Y_{(n,t)}, \quad (2.11)$$

де se , al , co , f , d та ω є ваговими коефіцієнтами відповідних поведінкових детермінант.

Позиція особини у просторі на наступній ітерації визначається шляхом додавання коригувального кроку ΔY до поточного положення:

$$Y_{(n,t+1)} = Y_{(n,t)} + \Delta Y_{(n,t)}. \quad (2.12)$$

Ця функціональна залежність характеризує еволюцію положення особини у багатовимірному просторі пошуку та визначає траєкторію руху стрекози у відповідності до змін параметрів середовища.

Алгоритм стрекози вважається ефективною методологією для розв'язання задач багатокритеріальної та бінарної оптимізації. Його ефективність обумовлюється високим рівнем сходимості, адаптивністю щодо просторових особливостей пошукового середовища та невеликою кількістю параметрів, які потребують налаштування. Здатність алгоритму формувати збалансоване поєднання глобального й локального пошуку забезпечує точне виявлення оптимальних рішень у складних багатовимірних задачах, що робить DA перспективним інструментом під час дослідження та оптимізації технічних і технологічних процесів.

2.5. Алгоритм Enhanced grey wolf optimizer, EGWO

Алгоритм оптимізації сірого вовка (GWO) ґрунтується на моделюванні природної поведінки вовчої зграї під час полювання, де соціальна структура та взаємодія між особинами формують складну ієрархічну систему, здатну до ефективного пошуку розв'язань у багатовимірних просторах. У природі лідером зграї виступає альфа-вовк, який приймає стратегічні рішення, визначає напрям пересування й розподіляє ролі між іншими членами групи. Другим за впливом є бета-вовк, що виконує функцію радника та координатора. Дельта-вовки підпорядковуються альфі та беті, перебуваючи на проміжному рівні ієрархії, тоді як омега-вовки займають найнижче положення, але відіграють стабілізуючу роль,

підтримуючи соціальну структуру зграї. Така ієрархія створює чітку систему розподілу рішень, яка імітується у відповідному алгоритмі оптимізації [9].

У природних умовах полювання вовча зграя організовує переслідування жертви таким чином, щоб поступово оточити її та позбавити можливості втекти, після чого відбувається скоординована атака. Ця модель взаємодії переноситься у математичний опис оптимізаційного алгоритму, де шукане оптимальне рішення інтерпретується як «д здобич», яку необхідно наблизити через колективну взаємодію агентів. Алгоритм відтворює стадії розвідки, переслідування та наближення, що дозволяє реалізувати адаптивне маневрування у пошуковому просторі.

Математична модель, що описує процес оновлення позиції агента на ітерації, ґрунтується на рівнянні:

$$\vec{Y}(k+1) = \vec{Y}_{\text{здобич}}(k) - \vec{N} \times \vec{D}, \quad (2.13)$$

де \vec{Y}_k визначає положення конкретного агента, а $\vec{Y}_{\text{здобич}}(k)$ задає орієнтир, відповідно до якого виконується корекція. Вектор \vec{N} представляє поведінковий коефіцієнт, що моделює інтенсивність дослідницької активності, а \vec{D} описує відстань між агентом і цільовою позицією.

Відстань між «вовком» та умовною здобиччю формується таким чином:

$$\vec{D} = | \vec{R} \times \vec{Y}_{\text{здобич}} - \vec{Y}(k) |, \quad (2.14)$$

що забезпечує варіативність траєкторій руху. Задається також набір коефіцієнтів стохастичної природи:

$$\vec{N} = 2a\vec{r}_1 - a, \quad \vec{R} = 2\vec{r}_2, \quad (2.15)$$

де a поступово зменшується зі збільшенням ітерацій відповідно до співвідношення:

$$a = 2 - k \left(\frac{2}{K} \right), \quad (2.16)$$

що приводить до поступового переходу алгоритму від глобального пошуку до локального уточнення положення наближеного розв'язання.

Динаміка параметра a набуває особливо важливого значення, оскільки саме він визначає баланс між дослідженням простору та експлуатацією отриманих

результатів. На початкових ітераціях значення параметра є високим, що сприяє інтенсивному пошуку у різних регіонах простору рішень. У кінцевих ітераціях алгоритм переходить до уточнення знайдених перспективних точок, що забезпечує наближення до глобального оптимуму.

Система ранжує агентів відповідно до їх результативності, після чого відтворює процеси координації, притаманної поведінці альфа-, бета- та дельта-вовків, формуючи три опорні орієнтири, за якими коригується рух усієї популяції. Така модель дає змогу досягати високої точності наближення, що підтверджено результатами численних експериментів у задачах, пов'язаних із пошуком екстремумів складних функцій.

Алгоритм GWO характеризується високою здатністю до сходимості та демонструє значну ефективність у порівнянні з іншими біоінспірованими методами. Простота програмної реалізації поєднується із здатністю адаптивно змінювати поведінку зграї залежно від стану пошукового процесу, що робить цей підхід придатним для широкого спектра задач, включно з нелінійними, багатовимірними та багатомодальними системами.

2.6. Розробка системи керування для МІМО-об'єкта дистиляційної колони

У дослідженнях розглядається комплексна задача формування структури обчислювальної системи автоматичного керування та подальшого визначення параметрів регуляторів для багатовимірної системи очищення газу, що функціонує в дистиляційній колоні. Такий підхід ґрунтується на застосуванні концепції *decoupling*, яка забезпечує істотне зменшення впливу міжконтурних взаємодій, що виникають у багатовимірних динамічних об'єктах. Реалізація цього підходу спрямована на створення структури керування, у якій кожен регулятор впливає переважно на свій канал, що підвищує ступінь керованості та стабільність системи, а також сприяє більш надійному функціонуванню колонної установки в умовах технологічних збурень [10].

Для забезпечення повноцінного функціонування такої системи потрібне створення модифікованих критеріїв якості, адаптованих до специфіки багатоканального об'єкта. Подібні критерії враховують особливості часових затримок, різну інерційність контурів, нерівномірність впливу змінних стану та підвищену чутливість моделі до неузгоджених впливів. Вони формують підґрунтя для подальшої розробки програмного комплексу, що здійснюватиме автоматизований розрахунок параметрів ПІ-регуляторів, орієнтованих на покращене відтворення динаміки реального процесу очищення газу.

Важливою складовою дослідження є застосування сучасних біоінспірованих алгоритмів оптимізації, оскільки конфігурація параметрів регуляторів у багатоканальних системах часто формується як задача нелінійного багатопараметричного пошуку. Використання алгоритмів, що моделюють поведінку природних колективних систем, надає можливість знаходити параметри, які забезпечують збалансоване співвідношення швидкодії, точності та енергоефективності. У цьому контексті аналізуються алгоритм оптимізації колонії мурах, метод кукушкового пошуку, підхід, що моделює динаміку стрекоз, алгоритм оптимізації сірого вовка, генетичний алгоритм і методи, що базуються на механізмах клональної селекції штучної імунної системи. Для кожного з них наведено структурні схеми, математичні моделі та описано особливості, що визначають придатність цих методів для налаштування регуляторів дистиляційної колони як складного МІМО-об'єкта.

Побудова ефективної системи керування для дистиляційної колони потребує усунення небажаного впливу поперечних зв'язків, які є характерною рисою об'єктів типу МІМО. Наявність таких зв'язків призводить до того, що зміна одного керувального впливу породжує реакцію не лише у відповідному каналі, але й у суміжних, що ускладнює процес регулювання та унеможливорює незалежне налаштування контурів. Концепція decoupling дозволяє трансформувати структуру об'єкта так, щоб його передаточна матриця на рівні керування ставала наближено діагональною. У такому разі взаємний вплив змінних значно зменшується, а кожен контур отримує більшу автономність, що формує сприятливі умови для

високоточних алгоритмів налаштування ПІ-регуляторів.

У загальному випадку процедуру розв'язки можна описати рівнянням

$$F(s) = D(s)G(s), \quad (2.17)$$

де $D(s)$ визначає структуру компенсуючого елемента, який усуває або мінімізує взаємозалежності в багатоканальній системі, $G(s)$ характеризує передаточну функцію вихідного багатозв'язкового об'єкта керування, а $F(s)$ є перетвореним об'єктом з ослабленими або повністю усуненими крос-зв'язками.

Для досліджуваної дистиляційної колони, математична модель якої наведена у рівнянні (2.17), обчислювальюча матриця визначається шляхом оптимізаційного пошуку та має вигляд

$$D(s) = \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0.8038 \\ 1.206 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Ця матриця забезпечує значне пригнічення небажаних міжканальних взаємодій, формуючи підґрунтя для ефективної роботи двох регуляторів, які у подальшому налаштовуються шляхом застосування біоінспірованих методів оптимізації.

Структурна схема системи регулювання, що використовує обчислюючий елемент $D(s)$ у поєднанні з алгоритмами ACO, DA, CS та GWO, представлена на рисунку 2.1. Така схема описує повний цикл функціонування системи, починаючи від впливу керувальних сигналів до формування оптимального рівня динамічного реагування об'єкта.

На рисунку 2.1 представлена структурна схема системи, що застосовується для багатовимірного об'єкта дистиляційної колони. У межах цієї схеми передаточні функції G_{11} , G_{12} , G_{21} , G_{22} відображають динамічні властивості колонної установки та характеризують взаємозв'язки між керувальними впливами й вихідними змінними. Елементи D_{11} , D_{12} , D_{21} , D_{22} реалізують обчислювальний вплив і забезпечують усунення або істотне послаблення поперечних зв'язків, що формують складність МІМО-структури. Штучні інтелектуальні алгоритми ACO, DA, GWO та CS використовуються як інструменти оптимізаційного пошуку параметрів регуляторів, оскільки здатні ефективно досліджувати високорозмірні

простори рішень і знаходити наближені глобальні екстремуми.

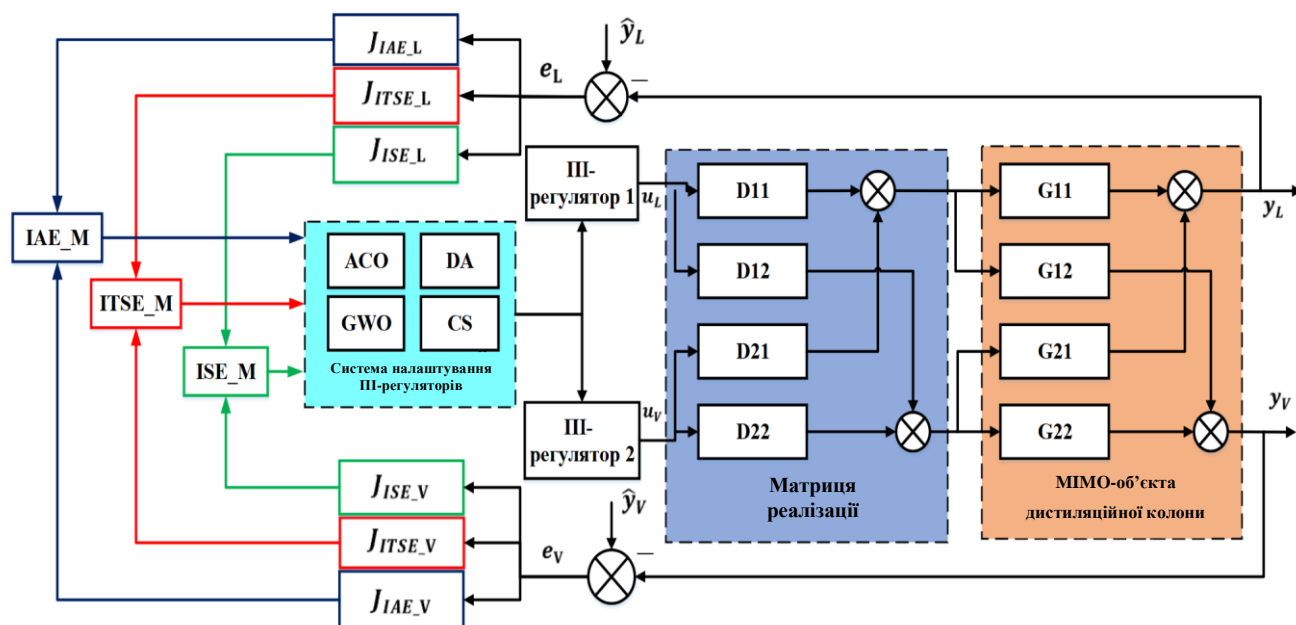


Рис. 2.1. Структурна схема МІМО-об'єкта ДК

У схемі передбачено інтеграцію класичних та модифікованих критеріїв якості. Стандартні інтегральні критерії J_{IAE_L} , J_{IAE_V} , J_{ITSE_L} , J_{ITSE_V} , J_{ISE_L} , J_{ISE_V} описують поведінку індивідуальних контурів L і V і дозволяють оцінити точність, енергетичність та швидкодію процесу регулювання. У той час як модифіковані критерії IAE_M , $ITSE_M$ та ISE_M відображають специфічні властивості багатовимірної системи та враховують вплив залишкових міжконтурних взаємодій, що робить процес оптимізації адекватним щодо природної структури МІМО-об'єкта [11].

Помилки e_L та e_V описують ступінь відхилення між бажаними характеристиками y^L , y^V та поточними значеннями вихідних сигналів y_L , y_V , формуючи вхід для алгоритмів оптимізації. Сигнали u_L та u_V визначають керувальні дії, що генеруються регуляторами на основі оптимізованих параметрів, і спрямовані на приведення системи до бажаного режиму. Така конфігурація забезпечує узгоджене функціонування обох контурів, навіть за наявності неминучих динамічних взаємодій усередині колонної установки.

Структура, подана на рисунку 2.1, демонструє, що алгоритми штучного

інтелекту розв'язують задачу багатопараметричної оптимізації двох ПІ-регуляторів L–V структури, орієнтованої на керування дистиляційною колоною. Мета цього процесу полягає в мінімізації модифікованих критеріїв якості, що забезпечують комплексну оцінку функціонування системи з урахуванням і внутрішньоконтурних динамік, і взаємних перешкод між контурами. Такий підхід дає можливість отримати параметри регуляторів, здатні підтримувати стабільність, точність і високу швидкодію об'єкта в умовах багатовимірної структури та значної нелінійності технологічного процесу.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі магістерської роботи було здійснено системне дослідження методів побудови адаптованого управління для багатовимірної дистиляційної колони та сформовано комплексний підхід до оптимізації параметрів ПІ-регуляторів на основі біоінспірованих алгоритмів. У результаті було обґрунтовано доцільність застосування методу *decoupling*, що надає можливість усунути вплив поперечних зв'язків на основні канали й забезпечити структурну узгодженість контурів L та V. Продемонстровано, що формування діагоналізованої структури передаточних функцій створює передумови для стабільного керування та зменшує чутливість системи до зміни технологічних параметрів.

Проведені дослідження дозволили встановити, що ефективне налаштування ПІ-регуляторів МІМО-об'єкта неможливе без використання розширених критеріїв якості. Запропоновані модифіковані критерії забезпечили можливість комплексного аналізу динамічних властивостей колонної установки з урахуванням взаємного впливу контурів, що підвищило точність оцінки роботи регуляторів та адекватність оптимізаційної процедури.

Застосування біоінспірованих алгоритмів ACO, CS, DA та GWO продемонструвало високу ефективність при розв'язанні багатопараметричної задачі оптимізації, оскільки дозволило сформувати параметри регуляторів, здатні забезпечити стійке керування за умов різномірної динаміки каналів і складної

структури передаточних функцій. Дослідження їхньої математичної моделі та алгоритмічної реалізації показало, що такі методи здатні адаптивно знаходити глобально оптимальні налаштування, що сприяє отриманню збалансованої роботи об'єкта та підвищенню стійкості технологічного процесу.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОЧИСТКИ ГАЗУ В ДИСТИЛЯЦІЙНІЙ КОЛОНІ

3.1. Розробка моделі системи управління дистиляційною колонією в Simulink

У цьому розділі здійснюється розробка програмного забезпечення для визначення оптимальних параметрів ПІ-регуляторів із врахуванням модифікованих критеріїв якості, що базуються на алгоритмах штучного інтелекту. В ході дослідження проводиться моделювання процесу очищення газу в дистиляційній колоні з використанням пакета прикладних програм MathWorks MATLAB (Simulink), а також здійснюється детальний аналіз ефективності інтелектуальних алгоритмів управління. На основі порівняльного аналізу різних комбінацій розроблених критеріїв якості та алгоритмів штучного інтелекту визначається оптимальна конфігурація за такими параметрами, як час регулювання, величина перерегулювання, час наростання системи та середньоквадратична помилка розрахунку алгоритму.

Одним із найбільш поширених програмних засобів, що застосовуються для вирішення складних технічних завдань у галузі автоматизації, є MathWorks MATLAB. Використання цього програмного продукту дозволяє ефективно вирішувати завдання моделювання, ідентифікації, оцінки ефективності алгоритмів управління, а також проведення оптимізаційних розрахунків для складних багатовимірних систем.

Формулювання задачі полягає у визначенні оптимальних параметрів ПІ-регуляторів для багатовимірної системи управління контурами рівня та витрати дистиляційної колоні з використанням інтелектуальних алгоритмів оптимізації, таких як ACO, GWO, DA та CS. Метою є мінімізація модифікованих критеріїв якості, визначених через функції ISE_M, IESE_M та IAE_M, а також проведення моделювання процесу та аналіз отриманих результатів з точки зору ефективності

керування технологічними змінними.

Закони управління ПІ-регуляторів для відповідних контурів формально визначаються рівняннями:

$$u_L(t) = Kp_L \cdot e_L(t) + Ki_L \cdot \int e_L(t) dt, \quad (3.1)$$

$$u_V(t) = Kp_V \cdot e_V(t) + Ki_V \cdot \int e_V(t) dt, \quad (3.2)$$

де L та V відповідають контурам управління рівнем та витратою, Kp_L , Kp_V , Ki_L , Ki_V – пропорційні та інтегральні коефіцієнти ПІ-регуляторів для відповідних контурів, $e_L(t)$, $e_V(t)$ – сигнали похибки між бажаними та фактичними значеннями технологічних змінних, а $u_L(t)$, $u_V(t)$ – управляючі сигнали для контурів L та V.

Моделювання процесу очищення газу в дистиляційній колоні виконане з урахуванням взаємозв'язків технологічних параметрів та системи розв'язуючого управління в середовищі Simulink (рисунок 3.1). Створена модель інтегрується зі скриптами алгоритмів оптимізації та цільовою функцією для розрахунку коефіцієнтів ПІ-регуляторів, що дозволяє реалізувати інтелектуальний підхід до регулювання процесу та забезпечити високий рівень точності та адаптивності системи управління [7].

Додатково модель передбачає можливість проведення сценарного аналізу, що дозволяє досліджувати поведінку системи управління за змінних зовнішніх умов і випадкових коливань технологічних параметрів. Це забезпечує більш глибоке розуміння взаємодії контурів управління та дозволяє оптимізувати роботу регуляторів в умовах виробничої невизначеності та багатовимірної динаміки процесу.

Для забезпечення ефективного підбору параметрів ПІ-регуляторів застосовувалися різні алгоритми оптимізації. Загальні параметри налаштування цих алгоритмів включали чотири пошукові змінні, сто ітерацій процесу оптимізації, а також межі варіації параметрів від 0,01 до 30.

3.2. Визначення параметрів алгоритмів

Початкові параметри алгоритмів визначалися наступним чином:

- Для мурашиного алгоритму (ACO) використовувалися 400 агентів (мурах), коефіцієнт впливу пройденого шляху альфа дорівнював 0,8, коефіцієнт важливості інформації бета – 0,2, а швидкість випаровування феромону становила 0,7;
- Для алгоритму стрекози (DA) максимальна кількість поколінь дорівнювала 100, а число пошукових агентів становило 25;
- Для алгоритму пошуку кукушки (CS) використовували 25 гнізд, а ймовірність виявлення яєць господарем складала 0,25;
- Для алгоритму сірого вовка (GWO) кількість агентів (вовків) встановлювалася рівною 100.

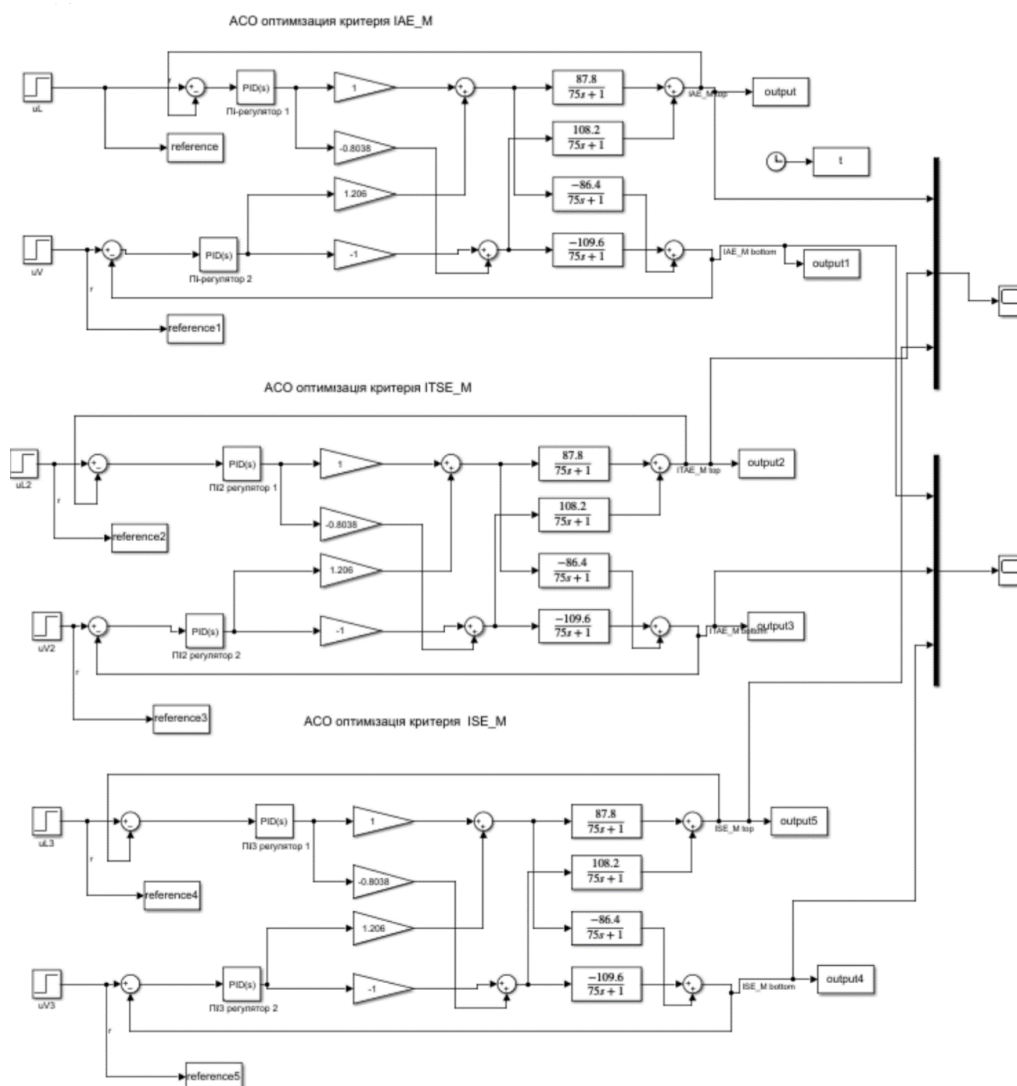


Рис. 3.1. Моделювання процесу очищення газу в дистиляційній колоні в середовищі Matlab, Simulink

Всі ці параметри дозволяли реалізувати інтелектуальний підхід до оптимізації ПІ-регуляторів, забезпечуючи баланс між швидкістю збіжності алгоритму та точністю визначення оптимальних коефіцієнтів.

У таблиці 3.1 представлені результати розрахунків коефіцієнтів ПІ-регуляторів для відповідних контурів управління дистиляційної колони, отримані за критеріями якості ISE_M, IESE_M та IAE_M. Дослідження дозволяє порівняти ефективність кожного алгоритму і визначити оптимальні налаштування регуляторів, що забезпечують мінімальні перерегулювання, швидке наростання та високу стабільність системи.

Таблиця 3.1

Розраховані коефіцієнти ПІ-регуляторів

Алгоритм оптимізації	Критерій якості	Перший контур управління, L		Другий контур управління, V	
		Kp_L	Ki_L	Kp_V	Ki_V
Ant Colony Optimization	IAE-M	5,712	0,127	21,632	0,011
	ITSE-M	3,268	0,048	14,529	0,122
	ISE-M	5,781	0,029	26,412	0,041
Dragonfly Algorithm	IAE-M	11,512	0,338	29,985	0,326
	ITSE-M	7,214	0,139	29,997	2,305
	ISE-M	4,857	0,105	29,593	0,579
Cuckoo Search	IAE-M	1,308	0,123	6,352	0,012
	ITSE-M	20,890	0,281	25,782	16,071
	ISE-M	19,631	0,515	29,338	21,318
Gray Wolf Optimization	IAE-M	4,823	0,102	29,960	0,102
	ITSE-M	4,962	0,110	30,005	0,294
	ISE-M	4,919	0,083	30,010	0,012

Статистичні оцінки основних критеріїв якості роботи інтелектуальних алгоритмів, зокрема величини перерегулювання, часу встановлення режиму та часу наростання, наведені у таблиці 3.2. Аналіз цих показників дозволяє оцінити ефективність роботи різних алгоритмів оптимізації у контексті керування багатовимірною системою дистиляційної колони.

Таблиця 3.2 відображає продуктивність алгоритмів на основі середніх

значень, які демонструють, наскільки швидко система досягає стабільного стану, а також величину коливань регульованих параметрів у процесі переходу. Використання таких статистичних оцінок дозволяє об'єктивно порівняти алгоритми та обрати оптимальний для практичного застосування, з урахуванням балансу між швидкістю реакції системи та мінімізацією перерегулювання.

Таблиця 3.2

Продуктивність роботи інтелектуальних алгоритмів

Алгоритм оптимізації	Критерій якості	Перерегулювання, %	Час наростання, с	Час встановлення режиму, с
Перший контур управління L з ПІ-регулятором 1				
ACO	ISE-M	5,012	7,513	46,032
	ITSE-M	0,362	9,871	39,492
	IAE-M	5,089	7,487	45,701
GWO	ISE-M	5,879	7,502	42,401
	ITSE-M	2,819	9,091	41,407
	IAE-M	6,016	8,402	30,541
DA	ISE-M	0,068	17,545	65,921
	ITSE-M	0,003	13,257	36,079
	IAE-M	3,123	12,902	43,191
CS	ISE-M	1,618	47,586	73,335
	ITSE-M	1,892	47,475	72,963
	IAE-M	0,543	47,828	74,072
Другий контур управління V з ПІ-регулятором 2				
ACO	ISE-M	7,546	8,682	29,224
	ITSE-M	7,035	10,548	32,261
	IAE-M	6,667	7,991	28,515
GWO	ISE-M	11,328	7,465	28,064
	ITSE-M	9,651	7,783	27,892
	IAE-M	4,926	10,048	50,371
DA	ISE-M	3,337	19,941	44,991
	ITSE-M	28,586	6,099	33,524
	IAE-M	27,574	5,805	32,728
CS	ISE-M	2,065	49,251	66,743
	ITSE-M	2,878	49,209	67,014
	IAE-M	2,483	49,264	66,422

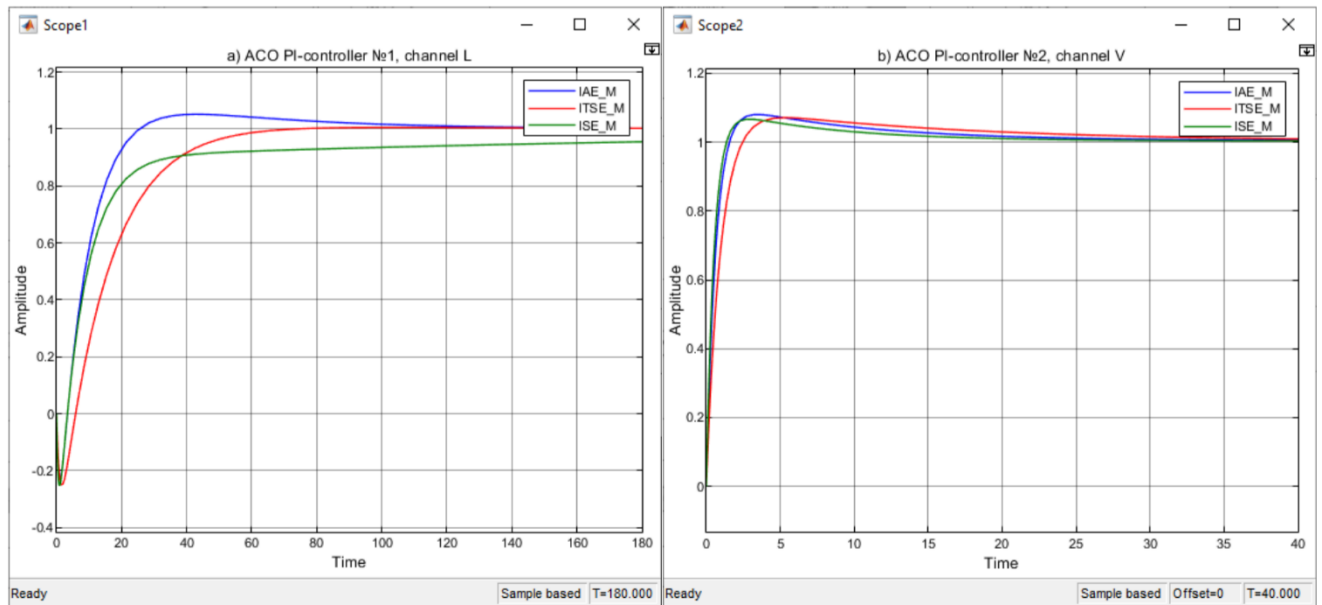
Розглянуті результати демонструють ефективність різних інтелектуальних алгоритмів оптимізації у процесі налаштування ПІ-регуляторів для багатовимірної системи управління дистиляційною колонією. Аналіз основних показників – перерегулювання, час наростання та час встановлення режиму – дозволяє оцінити як швидкість реакції системи на зміну технологічних параметрів, так і стабільність підтримки заданих значень.

Для першого контуру управління рівнем (L) алгоритм Ant Colony Optimization (ACO) демонструє середні значення перерегулювання близько 5 %, час наростання приблизно 7,5 секунд і час встановлення режиму в межах 46 секунд. Це свідчить про збалансовану роботу регулятора: система реагує досить швидко і без значних коливань, що забезпечує ефективний контроль рівня у колоні. У той же час алгоритм Dragonfly (DA) показав мінімальне перерегулювання (близько 0,07 %), але значно більший час наростання і встановлення режиму, що вказує на надмірну «консервативність» регулятора – швидкість реакції системи зменшується, хоча стабільність підтримки значень підвищується. Алгоритми GWO та CS показують проміжні результати, демонструючи компроміс між швидкістю наростання та мінімізацією коливань.

Для другого контуру управління витратою (V) спостерігаються інші тенденції. ACO та GWO забезпечують порівняно швидке досягнення встановленого режиму та низьке перерегулювання, тоді як алгоритм DA показує значно більший час наростання, що пояснюється специфікою його пошукових стратегій – алгоритм концентрується на глобальній оптимізації, але жертвуючи швидкістю локальної реакції. Алгоритм CS демонструє високу стабільність у підтриманні режиму, але значний час наростання вказує на те, що його використання доцільне у системах, де швидкість регулювання не є критичною.

Загальний аналіз демонструє, що вибір оптимального алгоритму залежить від конкретних вимог до системи управління: якщо пріоритетом є швидка реакція, перевагу варто віддавати ACO або GWO, тоді як для систем, де головним є мінімізація перерегулювання та точність підтримки режиму, більш придатними будуть DA та CS.

На рисунках (3.2), (3.3), (3.4) та (3.5) представлені перехідні характеристики для контурів управління рівнем (L) та витратою (V) з використанням елементів розв'язуючого управління та ПІ-регуляторів, налаштованих за допомогою інтелектуальних алгоритмів оптимізації: відповідно Ant Colony Optimization (ACO), Dragonfly Algorithm (DA), Cuckoo Search (CS) та Gray Wolf Optimization (GWO).



а) перший контур L;

б) другий контур V

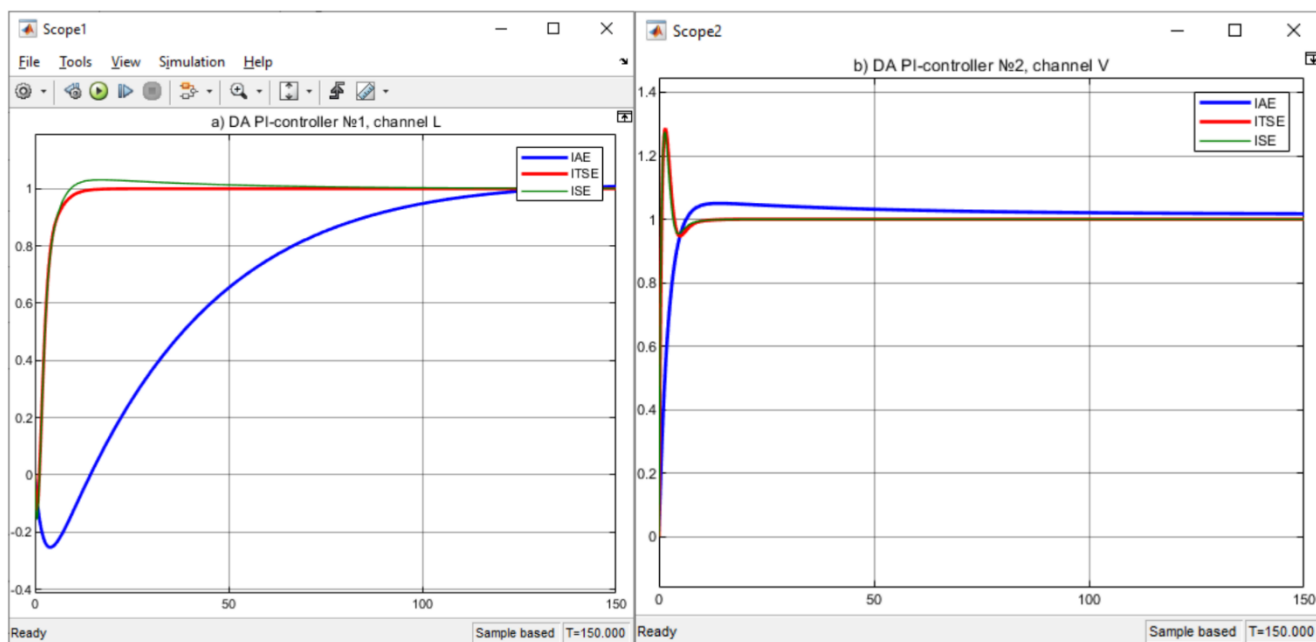
Рис. 3.2. Перехідні характеристики підсистем з ПІ-регуляторами, налаштованими за допомогою алгоритму Ant Colony Optimization (ACO)

Для оцінки динамічних властивостей системи на входи кожного контуру управління подано одиничне ступінчасте впливове збурення $u(t)=1$. Такий підхід дозволяє дослідити реакцію системи на різкі зміни вхідних сигналів і визначити часові параметри переходу: час наростання, час встановлення режиму та величину перерегулювання. Аналіз перехідних характеристик забезпечує візуальне та кількісне порівняння ефективності різних алгоритмів оптимізації при регулюванні багатовимірних контурів, дозволяючи оцінити адаптивність та стабільність роботи ПІ-регуляторів у умовах зміни технологічних параметрів.

Аналіз результатів моделювання показав, що для успішного пошуку оптимального рішення за алгоритмом АСО сто ітерацій виявилися недостатніми

для досягнення глобального мінімуму критерію якості з урахуванням встановлених обмежень. Це обмеження призвело до підвищеного перерегулювання, яке перевищує 5% для другого контуру управління V (таблиця 3.1). Така поведінка системи свідчить про те, що алгоритм потребує більшої кількості ітерацій або додаткової оптимізації параметрів, щоб досягти більш стабільної та швидкої реакції контуру [12].

Незважаючи на це, перший контур L демонструє відносно збалансовану динаміку: час наростання та час встановлення режиму залишаються в межах допустимих значень, що забезпечує ефективний контроль рівня в колоні. Однак підвищене перерегулювання у другому контурі вказує на необхідність подальшого вдосконалення параметрів алгоритму АСО або комбінованого використання з іншими методами оптимізації для забезпечення більш точного та стабільного регулювання витрати.



а) перший контур L;

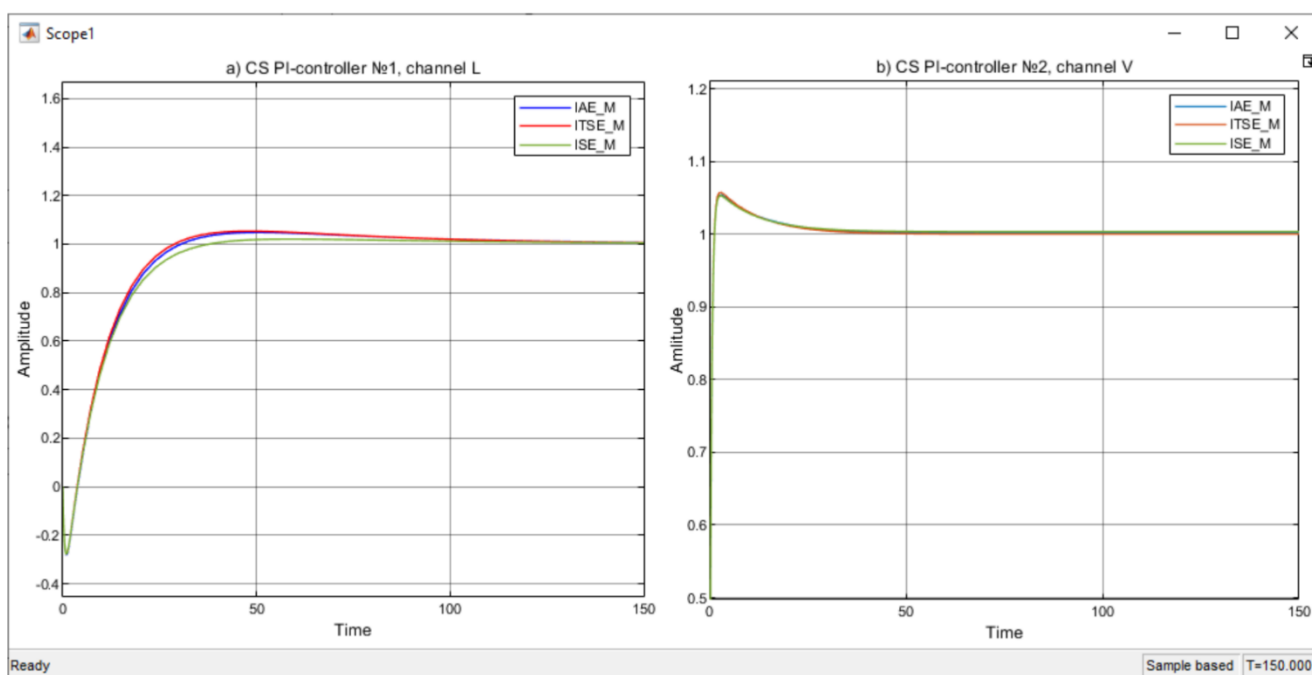
б) другий контур V

Рис. 3.3. Перехідні характеристики підсистем з ПІ-регуляторами, налаштованими за допомогою алгоритму Dragonfly Algorithm (DA)

Розрахунок параметрів ПІ-регуляторів за допомогою алгоритму DA показав певну нестабільність результатів при використанні критеріїв ITSE-М та ISE-М (рисунок 3.3). Це проявлялося у підвищеному перерегулюванні та значному

збільшенні часу наростання та встановлення режиму для обох контурів управління, що свідчить про недостатню адаптивність алгоритму при заданих початкових параметрах та обмеженнях.

Водночас, розрахунки для критерію ІАЕ-М продемонстрували найкращі результати, забезпечивши оптимальний баланс між швидкістю наростання, часом встановлення режиму та мінімізацією перерегулювання. Такий результат пояснюється тим, що критерій ІАЕ-М більш чутливий до інтегральних похибок, що дозволяє алгоритму ефективніше коригувати параметри ПІ-регуляторів і стабілізувати систему управління.



а) контур L;

б) контур V

Рис. 3.4. Перехідні характеристики підсистем з ПІ-регуляторами, налаштованими за допомогою алгоритму Cuckoo Search (CS)

Моделювання системи з ПІ-регуляторами, налаштованими за допомогою алгоритму CS, продемонструвало високу стабільність роботи обох контурів управління у межах встановлених обмежень. Перехідні характеристики свідчать про мінімальне перерегулювання та помірний час наростання, що забезпечує ефективну підтримку технологічних параметрів системи. Результати підтверджують здатність алгоритму CS забезпечувати точне регулювання навіть у

багатовимірних системах з сильними взаємозв'язками між контурами.

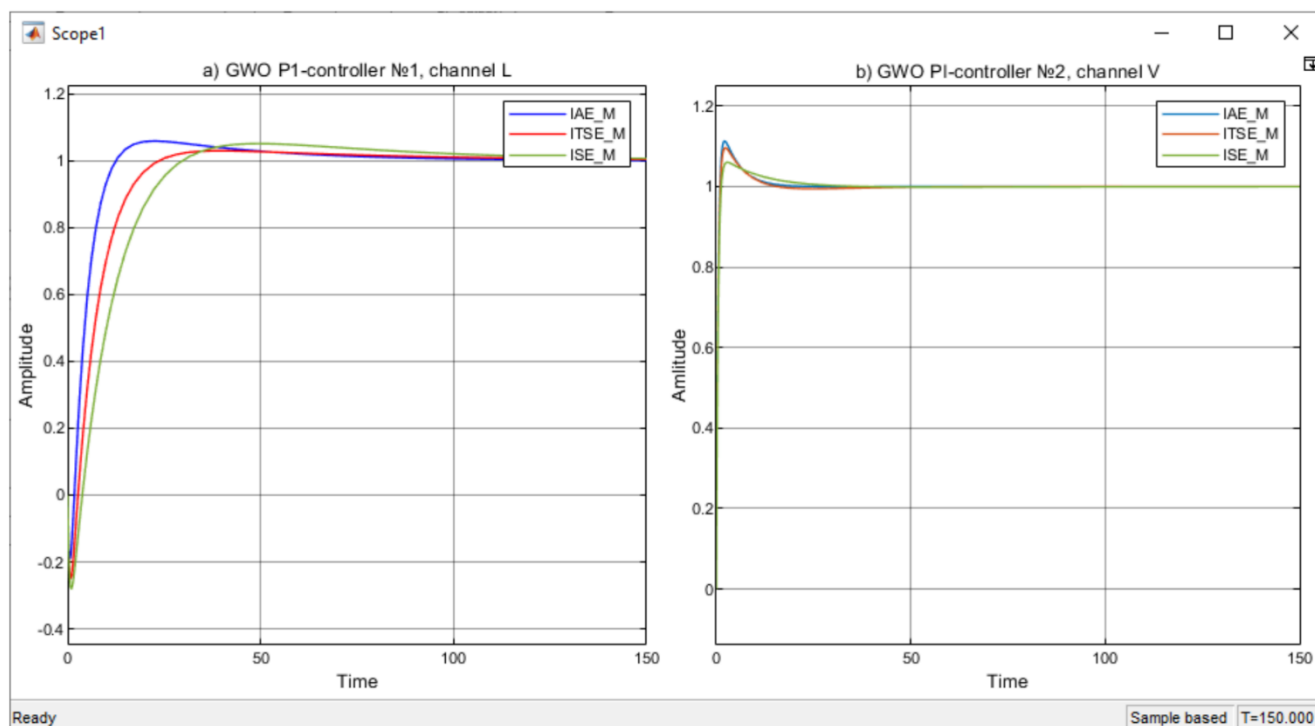


Рис. 3.5. Перехідні характеристики підсистем з ПІ-регуляторами, налаштованими за допомогою алгоритму Gray Wolf Optimization (GWO)

Моделювання системи з регуляторами, оптимізованими за допомогою GWO, показало високу швидкодію, особливо для другого контуру управління V, при збереженні прийнятної рівня перерегулювання. Цей результат вказує на те, що GWO забезпечує оптимальний компроміс між швидкістю реакції системи та стабільністю підтримки встановлених значень. Алгоритм дозволяє досягти ефективного регулювання навіть за умов швидких змін технологічних параметрів, що робить його придатним для застосування у промислових установках, де важливим є швидкий контроль процесу.

За результатами моделювання та аналізу перехідних характеристик, наведених у таблиці 3.1, можна стверджувати, що найефективнішим методом налаштування ПІ-регуляторів для процесу очищення газу в дистиляційній колоні виявляється алгоритм Dragonfly Algorithm при використанні критерію якості IAE-

М. Такий результат зумовлений тим, що інтегральна абсолютна похибка дозволяє уникати значних відхилень як у фазі перехідного процесу, так і в усталеному режимі, що сприяє формуванню гладкої та стабільної траєкторії переходу системи до заданого операційного стану. Водночас, алгоритм Cuckoo Search також продемонстрував достатньо високий рівень точності регулювання, проте характеризувався збільшеним часом встановлення режиму порівняно з DA, хоча й забезпечував менше перерегулювання, що свідчить про більш консервативний характер дії регулятора.

Для підтвердження ефективності застосованих метаевристичних алгоритмів необхідним етапом є статистичний аналіз похибок на основі середньої абсолютної процентної помилки MAPE. Цей показник є особливо інформативним для систем управління з високою динамічністю, оскільки дозволяє оцінювати якість налаштування регуляторів як у режимах із малими відхиленнями, так і при значних динамічних змінах. Використовуваний критерій має вигляд:

$$MAPE = \left(\frac{100\%}{N} \right) * \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|. \quad (3.3)$$

У таблиці 3.3 наведено статистичну оцінку ефективності алгоритмів оптимізації для модифікованих критеріїв якості IAE-M, ITSE-M та ISE-M. Аналіз отриманих значень дає змогу стверджувати, що значення MAPE для більшості розрахунків не перевищує одного відсотка, що вказує на високу точність роботи регуляторів, налаштованих за допомогою інтелектуальних алгоритмів.

Таблиця 3.3

Статистична оцінка ефективності алгоритмів для модифікованих критеріїв якості

Алгоритм	IAE-M	IAE-M	ITSE-M	ITSE-M	ISE-M	ISE-M
	Контур L	Контур V	Контур L	Контур V	Контур L	Контур V
ACO	0.1521	0.4128	0.158	0.047	4.09	0.27
GWO	0.1189	0.0123	0.384	0.012	0.645	0.021
DA	0.8542	1.7014	0.012	0.011	0.087	0.012
CS	0.6437	0.1588	0.593	0.023	0.504	0.331

Винятком є результати, отримані алгоритмом АСО для критерію ISE-M у першому контурі L, а також алгоритмом DA для критерію IAE-M у контурі V, де величина помилки перевищує зазначений поріг. Це пояснюється чутливістю відповідних критеріїв до різких змін у структурі перехідних процесів, а також особливостями функції пошуку в цих алгоритмах, що інколи може призводити до відхилень у процесі мінімізації інтегральних показників.

Наведені результати свідчать, що використання метаевристичних підходів для задачі налаштування ПІ-регуляторів у багатовимірному об'єкті управління дистиляційної колони є ефективним і забезпечує значне покращення динамічних характеристик системи. Кожен із розглянутих алгоритмів має свої особливості, що формують різні траєкторії збіжності до оптимального рішення, однак загальна тенденція підтверджує доцільність застосування інтелектуальних методів оптимізації для технологічних процесів із вираженими перехресними зв'язками та нелінійною поведінкою.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі магістерської роботи було здійснено порівняльне дослідження ефективності параметричного налаштування ПІ-регуляторів для двоконтурної системи керування шляхом застосування оптимізаційних алгоритмів CS та GWO. Моделювання дозволило оцінити динамічні властивості обох підходів та встановити характер впливу обраних методів оптимізації на якість перехідних процесів у підсистемах L та V.

Застосування алгоритму CS забезпечило формування стійких режимів із дотриманням заданих обмежень, що проявилось в рівномірності динамічної реакції та відсутності коливальних компонент, які могли б порушити узгодженість дії контурів. Отримані перехідні характеристики демонструють здатність системи підтримувати інваріантність до зовнішніх та внутрішніх збурювальних чинників у рамках обраної структури керування.

Алгоритм GWO показав іншу динаміку роботи системи, що дозволяє

говорити про його придатність для задач, де домінує вимога до підвищеної швидкодії. Для другого контуру було отримано інтенсивнішу реакцію на зміну завдання, яка характеризується скороченим часом встановлення. При цьому рівень перерегулювання залишився у межах, що допускають подальшу експлуатацію системи без ризику дестабілізації.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ОПЕРАТОРСЬКОГО ІНТЕРФЕЙСУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДИСТИЛЯЦІЙНОЮ КОЛОННОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЗ HONEYWELL

4.1. Створення мнемосхеми для системи автоматичного керування

Розділ присвячено розробленню та інтеграції комплексної мнемосхеми системи керування багатовимірним і багатозв'язним технологічним об'єктом, яким виступає дистиляційна колона, у розподілену систему керування Experion PKS компанії Honeywell. У цьому підході мнемосхема розглядається не лише як графічний інтерфейс, що відображає параметри роботи технологічного обладнання, а як структурована модель, що репрезентує взаємозв'язки між каналами регулювання, станами процесу, сигналами тривоги, логічними залежностями та алгоритмами автоматичного керування. Актуальність цього напряму зумовлена тим, що сучасні промислові системи дедалі частіше потребують гармонізованого поєднання об'єктивної технологічної інформації з візуальною логікою, яка забезпечує інженерові можливість оперативного аналізу режимів, оцінювання динаміки процесів та своєчасного втручання у випадках відхилень від нормативних параметрів.

Устаткування Honeywell тривалий час застосовується на технологічних об'єктах нафтової та газової промисловості, починаючи з операцій видобутку в районах Чорного моря та завершуючи транспортно-переробними комплексами, що функціонують у складі інтегрованих виробничих ланцюгів. Реалізація мнемосхеми у середовищі Experion PKS забезпечує можливість прямих інтеграцій з промисловими контролерами, інтерпретації сигналів у реальному часі та візуалізації робочих режимів технологічної установки в єдиному інформаційному просторі. Прикладний ефект такої інтеграції полягає в можливості перенесення результатів моделювання, регулювання та аналізу в реальне виробництво без суттєвих структурних змін логіки контролю, оскільки мнемосхема стає

операційною проекцією всієї системи керування.

Створення мнемосхеми для системи автоматичного керування реалізується за допомогою програмних модулів платформи Experion PKS R500, яка включає інструментарій HMI Web Display Builder, Control Builder та Enterprise Model Builder. Кожен із цих компонентів забезпечує специфічний внесок у формування повного інформаційного представлення процесу: від графічного оформлення мнемосхеми до побудови логіки контролерів та зв'язків між технологічними параметрами.

Архітектура мнемосхеми системи керування ґрунтується на програмному забезпеченні Experion Process Knowledge System, що функціонує як сучасна розподілена система керування підприємством. Її відмінність від SCADA-систем полягає в децентралізації оброблення сигналів та підвищеній стійкості до відмов окремих елементів, що створює додаткові можливості для безперервності керування технологічним процесом. Система характеризується розвиненою мережею конфігураційних зв'язків, що забезпечує високий рівень захисту даних, масштабування та інтеграції з хмарними платформами, які дозволяють здійснювати моніторинг станів обладнання з будь-якої точки світу, спираючись на інструменти віртуалізації та віддаленого адміністрування.

Побудова мнемосхеми системи автоматичного керування дистиляційною колоною охоплює послідовність етапів, які забезпечують перехід від первинних технологічних сигналів до цілісного візуального простору, що узагальнює поведінку багатозв'язного об'єкта. На першому етапі здійснюється інтеграція даних, що надходять від технологічної установки через розподілену систему керування Experion PKS. У поле візуалізації потрапляють показники полівих датчиків, сигнали аварійних подій, часові мітки перехідних процесів, а також інформація про технічний стан програмованих логічних контролерів, що включає навантаження обчислювальних модулів, параметри комунікаційних каналів та теплові характеристики електронних блоків. Така деталізація дозволяє сформувати не просто статичне зображення, а динамічну мнемосхему, яка у реальному часі реагує на зміни стану об'єкта.

Другий етап пов'язаний із відображенням у мнемосхемі результатів налаштування ПІ-регуляторів, що керують багатоканальною системою МІМО. Параметри регуляторів, отримані на основі оптимізаційних розрахунків, інтегруються у структурну логіку мнемосхеми, формуючи наочні взаємозв'язки між вхідними величинами, проміжними станами об'єкта та сигналами регулювання. Візуалізація цих залежностей дозволяє інженерові отримати цілісне уявлення про внутрішню структуру алгоритмів керування та оцінювати ступінь впливу окремих контурів на загальну динаміку колони.

Третій етап полягає у відтворенні технологічного процесу на базі змодельованих регуляторів у середовищі Unisim Design, яке використовується для статичних і динамічних досліджень технологічних процесів у нафтогазовому й хімічному виробництві. Результати моделювання транслюються у мнемосхему як графічні відображення режимів, траєкторій та перехідних процесів, створюючи узгоджену систему, у якій моделювання, візуалізація та реальні дані функціонують у єдиному інформаційному полі.

4.2. Поєднання математичної моделі дистиляційної колони з системою керування Honeywell Experion PKS

Підхід до поєднання математичної моделі дистиляційної колони з реалізованою структурою автоматичного ПІ-керування та з розподіленою системою керування Honeywell Experion PKS ґрунтується на застосуванні технології OPC, яка забезпечує стандартизований канал обміну інформацією між різнорідними апаратними платформами. OPC формується як універсальний інтерфейс, що дозволяє узгодити взаємодію між моделлю, інтелектуальними алгоритмами та промисловими контролерами, забезпечуючи цілісність потоку даних і відсутність залежності від конкретного виробника обладнання [13].

Передавання технологічної інформації починається на рівні аналогових і дискретних модулів серій Honeywell C або Process Manager, де первинні вимірювальні сигнали проходять перетворення та цифровізацію. Вони надходять у

контролер C300 або C200E через протоколізаційну платформу IOLink, яка організовує структурований обмін даними між модулями I/O та обчислювальними ядрами керуючи забезпечує синхронізацію технологічних змінних і гарантує стабільність часових характеристик системи. Контроль інформаційних потоків і захист мережевого середовища здійснюється за допомогою модуля Control Firewall, який виконує функції фільтрації, сегментації і моніторингу мережевої активності, тим самим запобігаючи небажаним впливам на систему керування.

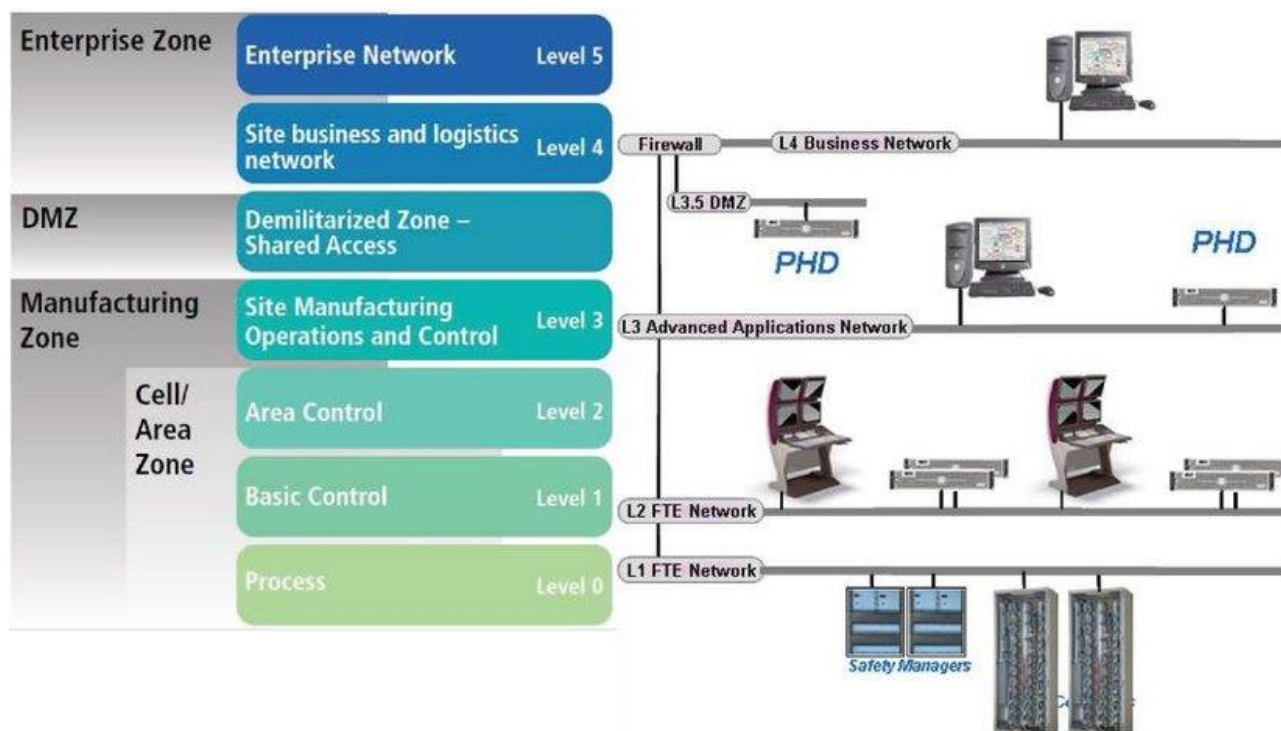


Рис. 4.1. Рішення Honeywell для модернізації системи TPS та інтеграції Experion PKS

Структура комунікаційної топології будується на базі Fault Tolerant Ethernet, що реалізує концепцію двоканальної надлишковості з двома незалежними комунікаційними сегментами, які традиційно позначають «жовтим» та «зеленим» каналами. Така архітектура підсилює надійність транспортного рівня та забезпечує збереження інформаційних потоків навіть у разі відмови одного з сегментів мережі, що є необхідною умовою для систем, які регулюють критично важливі процеси. Передавання даних здійснюється через протокол TCP/IP, що забезпечує сумісність EPKS із широким спектром промислових та наукових програмних середовищ.

На сервері EPKS розміщується база даних реального часу, яка містить інформацію про конфігурацію розподіленої системи керування, актуальні параметри роботи обладнання та значення технологічних змінних. Оператор або інженер отримує доступ до цих даних через станції керування або через віддалене підключення до сервера, що створює можливість одночасного централізованого спостереження та географічно розподіленого управління технологічним об'єктом. Трансляція інтелектуальної логіки керування, що формується у середовищі Matlab, реалізується через OPC-клієнт, який інсталюється на персональному комп'ютері та взаємодіє з OPC-сервером, інтегрованим у програмний дистрибутив Experion PKS. Такий механізм створює двонаправлений канал обміну, у якому модель отримує значення реальних технологічних точок, а сервер РСК – нові керувальні дії, що визначаються алгоритмами регуляторів.

У системі Honeywell Experion PKS поняття технологічної точки розглядається як упорядкована структура змінних, що описує окремий параметр процесу або стан фрагмента обладнання. Аналогові, статусні та акумуляторні точки формують кількісну та логічну основу для всієї архітектури керування. Наприклад, аналогова точка LC01, що відповідає за рівень рідини у визначеній позиції колони, зберігає числові значення змінної процесу, вихідного сигналу регулятора, уставки та параметрів режиму роботи. Саме ці дані стають базовими елементами для побудови мнемосхеми, яка відображає логіку технологічного процесу. Мнемосхема створюється як візуальна модель, що демонструє взаємодію між технологічними точками, станами регуляторів, потоками матеріальних і теплових ресурсів та динамікою керувальних впливів, забезпечуючи операторові інтуїтивно зрозуміле середовище для моніторингу складного багатозв'язного об'єкта.

Розвиток систем навчання персоналу з використанням таких мнемосхем набуває стратегічного значення для сучасної промисловості. Підготовка технічних фахівців потребує поглибленого моделювання реальних технологічних ситуацій, що дозволяє формувати стійкі навички роботи з автоматизованими системами, зменшувати ймовірність помилок та підвищувати ефективність роботи технологічного обладнання. У низці країн вже діють нормативні акти, які

зобов'язують промислові підприємства впроваджувати тренажерні комплекси, що моделюють поведінку реальних процесів, адаптованих до умов конкретного виробництва. Потреба у розробниках таких комплексів продовжує зростати, оскільки впровадження цифрових тренажерних систем значно зменшує експлуатаційні ризики та оптимізує процес навчання операторів.

4.3. Розроблення мнемосхеми в програмному забезпеченні Honeywell

Розроблення мнемосхеми в програмному забезпеченні Honeywell ґрунтується на перетворенні технологічного процесу на структурну, логічно впорядковану та когнітивно зручну графічну модель, яка відображає поведінку дистиляційної колони у реальному часі. У цьому контексті мнемосхема розглядається як інтелектуальна візуальна репрезентація складної системи, що інтегрує параметри технологічних точок, режими роботи регуляторів, стан обладнання, динаміку потоків та іншу інформацію, яка визначає працездатність установки й потребує постійного контролю.

Створення такої мнемосхеми в середовищі Experion PKS реалізується за допомогою програмного модуля HMI Web Display Builder, що забезпечує гнучкі можливості графічного моделювання та підтримує єдиний стиль відображення інформації, притаманний системам Honeywell. Концептуальна основа розробки спирається на стандарти ANSI/ISA 101.01.2015 та ANSI/ISA 18.2-2016, у яких викладено вимоги до систем людино-машинної взаємодії та до логіки управління сигналізацією. Ці стандарти визначають фундаментальні принципи побудови інтерфейсу, у якому оператор повинен швидко орієнтуватися у стані об'єкта, без труднощів розпізнавати проблемні ділянки, відокремлювати нормальні режими від аварійних та своєчасно приймати правильні інженерні рішення.

У процесі реалізації мнемосхеми особлива увага приділяється кольоровим моделям, графічним акцентам і структурним зонам екрана. Використання кольору набуває функціонального змісту і не може бути декоративним, оскільки ANSI/ISA 101 встановлює суворі правила кольорового кодування для технологічних

процесів. Візуальне середовище повинно спрямовувати увагу оператора на потенційно небезпечні ситуації, що виникають унаслідок відхилення параметрів від допустимих значень, перевищення технологічних меж або спрацювання системи сигналізації. Тому всі елементи, які інформують про надзвичайні стани, повинні бути чітко виділені, а їхнє сприйняття має відбуватися на рівні автоматичного візуального розпізнавання.

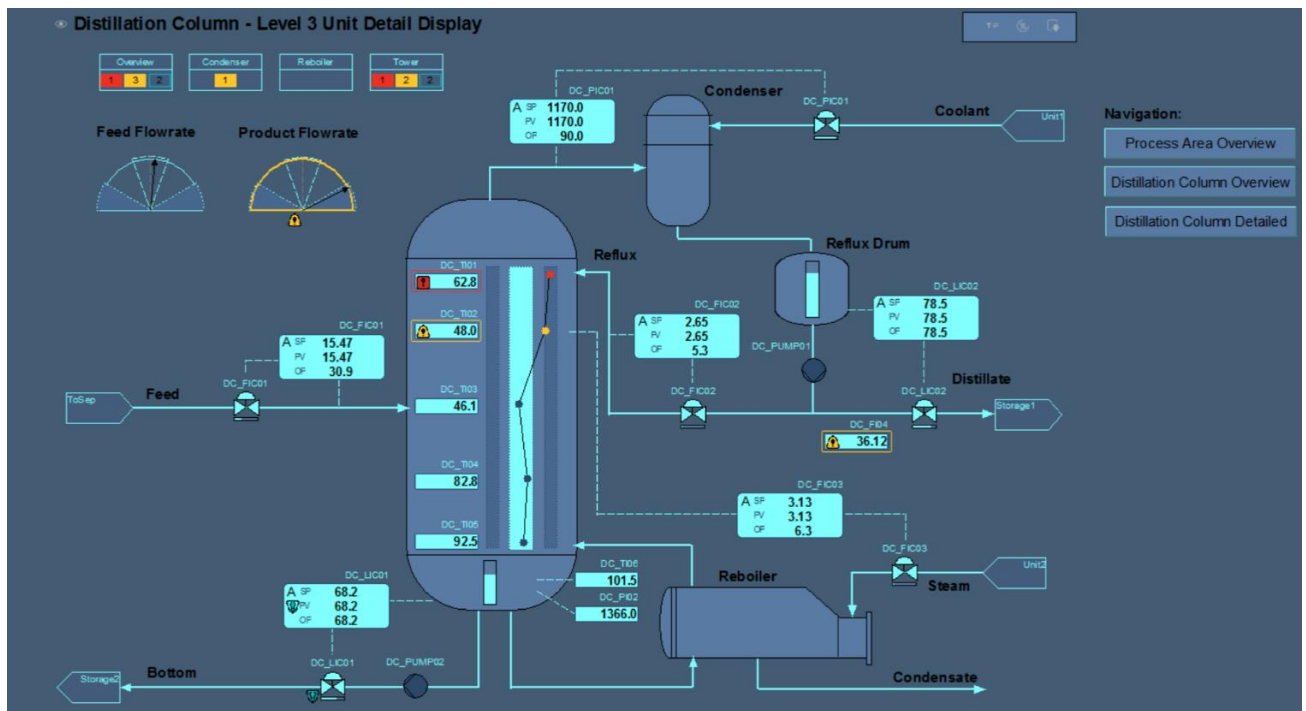


Рис. 4.1. АРМ оператора, що обслуговує дистиляційну колону

Реалізація мнемосхеми також враховує положення стандарту ISO 9241-210, що регламентує принципи побудови систем людино-машинної взаємодії. У процесі проектування враховується поведінкова специфіка оператора, зокрема характер прийняття рішень у стресових ситуаціях, швидкість зчитування інформації, здатність до візуальної сегментації екранних елементів та психологічні аспекти уваги. Наукові засади когнітивної ергономіки визначають потребу у мінімізації візуального шуму, упорядкуванні інформаційних блоків та створенні логічних шляхів сприйняття, які дозволяють операторові у будь-який момент отримати доступ до визначальних параметрів технологічного об'єкта.

Побудова мнемосхеми в HMI Web Display Builder реалізується шляхом створення ієрархічних шарів, у яких відображаються фізичні компоненти

дистиляційної колони, канали зв'язку між вузлами, положення технологічних точок, індикатори параметрів, тренди, сигнали аварій та логічні зв'язки між регуляторами. Відображення процесів здійснюється з використанням стилістики ASM (Abnormal Situation Management), яка формує уніфікований стиль для високонавантажених операторських станцій, що повинні функціонувати в умовах підвищених вимог до точності і швидкості прийняття рішень. ASM-підхід робить акцент на мінімалізмі графічних елементів, домінуванні нейтральних кольорів у нормальних режимах та виразній візуалізації порушень роботи системи, що спрощує інтерпретацію складних технічних ситуацій.

У контексті дистиляційної колони мнемосхема стає інтегрованим відображенням тепломасообмінних процесів, зміни концентрацій компонентів, поведінки ректифікаційних потоків та роботи регуляторів рівня, тиску й температури. Застосування структурної логіки Honeywell дозволяє пов'язати кожен технологічну точку з відповідною частиною мнемосхеми, забезпечивши візуальну кореляцію між параметрами SP, PV, OP, режимами регуляторів та їхніми атрибутами.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було проведено дослідження процесу розробки інтелектуальної системи управління дистиляційною колонною очищення газу на базі сучасного обладнання компанії Honeywell. Було описано інтеграцію моделі технологічного процесу з розподіленою системою управління Experion PKS, що забезпечує збір і обробку даних від технологічних сенсорів, контроль стану ПЛК та безпечну передачу інформації за допомогою мережі Fault Tolerant Ethernet і протоколу OPC. Розглянуто процес побудови динамічної моделі колони у програмному забезпеченні Unisim Design, що дозволяє проводити статичний та динамічний аналіз режимів роботи, а також налаштовувати ПІ-регулятори з використанням алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації керування МІМО-об'єктом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було здійснено дослідження процесів автоматизованого керування технологічними об'єктами на прикладі дистиляційної колони очищення газу, що поєднує традиційні експериментальні методи, математичне моделювання та сучасні алгоритми оптимізації.

У першому розділі магістерської роботи було проведено комплексне дослідження технологічного процесу очищення газу в дистиляційній колоні як об'єкта автоматизації та створено цифрову модель установки для подальшого аналізу і оптимізації. Було розглянуто фізико-хімічну сутність процесу, описано особливості тепломасообміну між фазами, визначено рівноважні параметри системи та фактори, що впливають на зміну складу газової суміші. На основі аналізу вхідного потоку та специфікацій колонного апарата було налаштовано конфігурацію тарілок, визначено оптимальні параметри їх геометрії, включно з висотою та відстанню між тарілками, діаметром секцій і довжиною перегородок. Розрахунки в сталому стані показали досягнення заданої чистоти дистиляту на рівні 97,7–98 %, що підтверджує ефективність обраної конструкції та налаштувань системи. Створено динамічну модель дистиляційної колони, яка включає контролери рефлюксу та пари, ПІД-регулятори з параметрами, розрахованими за критерієм ІТАЕ-М, а також панелі управління і графічне відображення концентрацій компонентів. Модель дозволяє відтворювати реальні процеси у часі, оцінювати стабільність та стійкість установки, тестувати режими роботи контролерів і перевіряти системи сигналізації. Результати динамічного моделювання показали, що при швидкості потоку дистиляту 8,844 м³/год досягається чистота продукту 98,29 %, що відповідає встановленим технологічним критеріям.

У другому розділі магістерської роботи було здійснено системне дослідження методів побудови адаптованого управління для багатовимірної дистиляційної колони та сформовано комплексний підхід до оптимізації параметрів ПІ-регуляторів на основі біоінспірованих алгоритмів. У результаті було

обґрунтовано доцільність застосування методу *decoupling*, що надає можливість усунути вплив поперечних зв'язків на основні канали й забезпечити структурну узгодженість контурів L та V. Продемонстровано, що формування діагоналізованої структури передаточних функцій створює передумови для стабільного керування та зменшує чутливість системи до зміни технологічних параметрів. Проведені дослідження дозволили встановити, що ефективне налаштування ПІ-регуляторів МІМО-об'єкта неможливе без використання розширених критеріїв якості. Запропоновані модифіковані критерії забезпечили можливість комплексного аналізу динамічних властивостей колонної установки з урахуванням взаємного впливу контурів, що підвищило точність оцінки роботи регуляторів та адекватність оптимізаційної процедури. Застосування біоінспірованих алгоритмів ACO, CS, DA та GWO продемонструвало високу ефективність при розв'язанні багатопараметричної задачі оптимізації, оскільки дозволило сформувавши параметри регуляторів, здатні забезпечити стійке керування за умов різнорідної динаміки каналів і складної структури передаточних функцій. Дослідження їхньої математичної моделі та алгоритмічної реалізації показало, що такі методи здатні адаптивно знаходити глобально оптимальні налаштування, що сприяє отриманню збалансованої роботи об'єкта та підвищенню стійкості технологічного процесу.

У третьому розділі магістерської роботи було здійснено порівняльне дослідження ефективності параметричного налаштування ПІ-регуляторів для двоконтурної системи керування шляхом застосування оптимізаційних алгоритмів CS та GWO. Моделювання дозволило оцінити динамічні властивості обох підходів та встановити характер впливу обраних методів оптимізації на якість перехідних процесів у підсистемах L та V. Застосування алгоритму CS забезпечило формування стійких режимів із дотриманням заданих обмежень, що проявилось в рівномірності динамічної реакції та відсутності коливальних компонент, які могли б порушити узгодженість дії контурів. Отримані перехідні характеристики демонструють здатність системи підтримувати інваріантність до зовнішніх та внутрішніх збурювальних чинників у рамках обраної структури керування. Алгоритм GWO показав іншу динаміку роботи системи, що дозволяє говорити про

його придатність для задач, де домінує вимога до підвищеної швидкодії. Для другого контуру було отримано інтенсивнішу реакцію на зміну завдання, яка характеризується скороченим часом встановлення. При цьому рівень перегулювання залишився у межах, що допускають подальшу експлуатацію системи без ризику дестабілізації.

У четвертому розділі магістерської роботи було проведено розроблення мнемосхеми інтелектуальної системи управління дистиляційною колонною очищення газу на базі програмного забезпечення компанії Honeywell. Було описано інтеграцію моделі технологічного процесу з розподіленою системою управління Experion PKS, що забезпечує збір і обробку даних від технологічних сенсорів, контроль стану ПЛК та безпечну передачу інформації за допомогою мережі Fault Tolerant Ethernet і протоколу OPC. Розглянуто процес побудови динамічної моделі колони у програмному забезпеченні Unisim Design, що дозволяє проводити статичний та динамічний аналіз режимів роботи, а також налаштовувати ПІ-регулятори з використанням алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації керування МІМО-об'єктом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kolmetz Handbook of Process Equipment Design. Distillation Column Selection, Sizing, and Troubleshooting // Engineering design guidelines. – KLM Technology Group. – 2013. – 24 p.
2. Buckley P.S., Luyben W.L., Shunta J.P. Distillation column control systems. – New York, Publishers Creative Services Inc. – 1985. – 529 p.
3. Speight J.G. The refinery of the future. CD&W Inc, Laramie, Wyoming, United States. – 2020. – 647 p.
4. Çelik E. Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems // Soft Computing. – 2021. – Vol. 25. – P. 1193–1217 // <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05215-w>
5. Schaschke C. A Dictionary of Chemical Engineering. – Oxford University Press, USA. – 2014. – 435 p.
6. Skogestad S., Morari M. LV-control of a high-purity distillation column // IFAC Proceedings Volumes. – Vol. 20, Issue 5, Part 8. – P. 387-396.
7. Dréo J., Siarry P., Pétrowsky A., Taillard E. Metaheuristics for Hard Optimization // Springer, Berlin, Heidelberg. – 2006. – P. 123-150.
8. Ünal M., Ak A., Topuz V., Erdal H. Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms // Studies in Computational Intelligence. – 2013. – P. 96.
9. Abdmouleh Z., Gastli A., Ben-Brahim L., Haouari M., Al-Emadi N.A.. Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources // Renewable Energy. – 2017. – Vol. 131. – P. 266-280.
10. Hu L., Lohse N., Liu Y., Tang R. Sequencing the features to minimize the non-cutting energy consumption in machining considering the change of spindle rotation speed // Energy. – 2017. – Vol. 139. – P. 935-946.
11. Chiha I., Liouane N., Borne P. Tuning PID Controller Using Multi objective Ant Colony Optimization // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. – Vol. 2012 // <https://doi.org/10.1155/2012/536326>.

12. Agarwal M., Srivastava G.M.S. A cuckoo search algorithm-based task scheduling in cloud computing // Advances in Computer and Computational Science. – 2017. – P. 293-299.

13. Honeywell UniSim® Design Suite. [Электронный ресурс]. – URL: <https://process.honeywell.com/us/en/products/industrial-software/process-optimization/unisim-design-suite>