

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

МР.АКПМ-12.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

**Іван Квич**

**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**

Квич Іван Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:66.061.3

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи автоматичного керування процесом ректифікації

(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)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКПМ-24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

І. В. Квич

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

к.т.н., доцент

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

Л.І. Фешанич

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

к.т.н., доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я. Чигур

(ініціали та прізвище)

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

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

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

(шифр і назва)

робототехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

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

Квичу Івану Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматичного керування процесом  
ректифікації

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

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

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

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025

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

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

1. Аналіз технологічного процесу RECTИФІКАЦІЇ та ДИСТИЛЯЦІЇ.

2. Синтез та моделювання МІ-МО системи керування RECTИФІКАЦІЙНОЮ КОЛОНОЮ

3. Методи оптимізації параметрів регулятора та їх застосування в системі  
автоматичного керування

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

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 20.11.2024

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу ректифікації та дистиляції	1.10.2025	
2	Синтез та моделювання МІ-МО системи керування ректифікаційною колоною	3.11.2025	
3	Методи оптимізації параметрів регулятора та їх застосування в системі автоматичного керування	4.12.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Квич І.В. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Фешанич Л.І. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Описано технологічні основи процесу ректифікації та його значення для сучасних хімічних і нафтохімічних виробництв. Виконано аналіз будови та принципу роботи ректифікаційних колон, а також розглянуто функціональні схеми їх автоматизації.

Синтезовано математичну модель МІМО-системи керування ректифікаційною колоною, що дозволяє досліджувати взаємозв'язки між багатьма вхідними та вихідними параметрами процесу. Виконано параметричне налаштування типових регуляторів та проведено порівняльний аналіз їх роботи. Описано застосування сучасних оптимізаційних методів, зокрема методу зозулі, симплекса та відпалу металу, для підвищення якості перехідних процесів та забезпечення стабільності системи.

Синтезовано удосконалену модель процесу ректифікації з використанням оптимізаційних алгоритмів, що дало змогу зменшити енерговитрати та підвищити ефективність автоматичного керування. Виконано комп'ютерне моделювання та імітаційні експерименти, які підтвердили працездатність запропонованих рішень та їх практичну значущість для промислових технологій.

### **Ключові слова:**

автоматичне керування, МІМО-система, математичне моделювання, регулятор, оптимізація, ректифікація, енергоефективність, імітаційне моделювання.

## ANNOTATION

The technological fundamentals of the rectification process and its significance for modern chemical and petrochemical industries are described. The structure and operating principle of rectification columns have been analyzed, and functional schemes of their automation have been considered.

A mathematical model of the MIMO control system for a rectification column has been synthesized, allowing the study of interrelations between multiple input and output parameters of the process. Parametric tuning of typical controllers has been carried out, and a comparative analysis of their performance has been conducted. The application of modern optimization methods, including the cuckoo search, simplex, and simulated annealing, has been described to improve the quality of transient processes and ensure system stability.

An improved model of the rectification process has been synthesized using optimization algorithms, which made it possible to reduce energy consumption and increase the efficiency of automatic control. Computer modeling and simulation experiments have been performed, confirming the effectiveness of the proposed solutions and their practical relevance for industrial technologies.

### **Keywords**

automatic control, MIMO system, mathematical modeling, controller, optimization, rectification, energy efficiency, simulation modeling.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ ТА ДИСТИЛЯЦІЇ.....</b>	<b>12</b>
1.1. Процес ректифікації та способи видобутку газу.....	12
1.2. Будова ректифікаційних колон.....	17
1.3. Принцип роботи ректифікаційної колони.....	19
1.4. Функціональна схема ректифікаційної колони.....	25
Висновки до розділу 1.....	26
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>СИНТЕЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МІМО-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕКТИФІКАЦІЙНОЮ КОЛОНОЮ.....</b>	<b>28</b>
2.1. Отримання вихідних значень.....	28
2.2. Математичне моделювання процесу.....	29
2.3. Обґрунтування вибору регулятора.....	34
2.4. Параметричне налаштування типових регуляторів.....	36
Висновки до розділу 2.....	43
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
<b>МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ .....</b>	<b>44</b>
3.1. Оптимізаційні методи забезпечують покращення якості перехідного процесу .....	44
3.2 Метод зозулі.....	44
3.3. Метод симплекса.....	47
3.4. Метод відпалу металу.....	49
3.5. Удосконалення моделі процесу ректифікації з використанням методу оптимізації.....	52

Висновки до розділу 3.....	62
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>63</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>65</b>

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Ректифікація є одним із ключових технологічних процесів у хімічній, нафтопереробній, харчовій та фармацевтичній промисловості, оскільки вона дозволяє розділяти рідкі суміші на високочисті компоненти шляхом багаторазового випаровування та конденсації. На відміну від дистиляції, яка забезпечує лише одноразове розділення суміші, ректифікація дає змогу досягти значно вищого ступеня очищення та точності регулювання складу продукту, що є критично важливим для виробництва спиртів, розчинників, палива, медичних препаратів та інших речовин із заданими параметрами чистоти.

Сучасні ректифікаційні установки характеризуються високою енергоємністю та складною багатозмінною динамікою, що робить ручне керування малоефективним і призводить до втрат продуктивності та якості. Тому впровадження систем автоматичного керування стає необхідною умовою оптимізації технологічного процесу. Автоматизація дозволяє забезпечити стабільність температурних режимів, контроль подачі сировини та відбору продуктів, мінімізацію енергетичних витрат і підвищення виходу цінних компонентів.

Розроблення сучасної системи автоматичного керування процесом ректифікації є актуальним також у контексті вимог енергоефективності, цифровізації виробництв та підвищення конкурентоспроможності хімічних та харчових підприємств України. Впровадження таких систем сприяє зменшенню людського фактору, підвищенню безпеки технологічних процесів і дає можливість використовувати адаптивні та інтелектуальні методи регулювання для покращення якості кінцевої продукції.

Таким чином, оптимізація та автоматизація процесу ректифікації є важливою науково-практичною задачею, що має значний економічний та технологічний ефект для сучасної промисловості.

## **Обґрунтування вибору теми дослідження**

Вибір теми зумовлений високою значущістю ректифікації як одного з базових процесів у хімічній, нафтохімічній, харчовій, фармацевтичній та біотехнологічній промисловості. Ефективність роботи ректифікаційних колон безпосередньо впливає на якість продукції, енергетичні витрати та економічні показники підприємства, що робить оптимізацію та автоматизацію даного процесу надзвичайно актуальною.

Процес ректифікації характеризується складною нелінійною динамікою, значною інерційністю та чутливістю до зовнішніх збурень, що ускладнює ручне керування та потребує застосування сучасних автоматизованих систем регулювання. Умови нестабільності зовнішніх факторів, варіативність складу сировини та високі вимоги до точності підтримання температурних і концентраційних режимів зумовлюють необхідність удосконалення режимів управління та впровадження інтелектуальних методів оптимізації.

Оптимізація систем автоматичного регулювання відіграє ключову роль у досягненні цих цілей. Використання передових методів оптимізації дозволяє знаходити оптимальні рішення для регулювання процесів дистиляції як за нормальних умов роботи, так і під час виникнення різних збурень. Це включає автоматичне коригування параметрів процесу, підтримання стабільності роботи системи за змінних умов і максимізацію виробничої ефективності.

Таким чином, модернізація й оптимізація систем автоматичного регулювання процесів дистиляції стають важливим напрямом розвитку газової галузі, дозволяючи покращити якість продукції, знизити витрати та забезпечити більш ефективно використання ресурсів.

### **Мета і завдання дослідження.**

Розроблення багатовимірної МІМО-системи автоматизації процесу ректифікації.

Головними завданнями даної магістерської роботи є:

- опис технологічного процесу підготовки газу, а також будови, структури й складу ректифікаційної колони;

- аналіз системи автоматичного регулювання багатовимірної (МІМО) системи керування;
- пошук оптимальних регуляторів для цієї системи;
- синтез системи автоматичного регулювання багатовимірної (МІМО) системи керування;
- дослідження системи та її роботи з різними методами підбору коефіцієнтів для регуляторів;
- застосування методів оптимізації для покращення стабільності системи;
- порівняння отриманих результатів моделювання до та після проведеного регулювання.

#### *Об'єктом дослідження*

Зміна технологічних параметрів в ректифікаційній колоні.

#### *Предметом дослідження*

Предметом дослідження є процес ректифікації та система автоматичного керування ректифікаційною колоною, зокрема методи синтезу, моделювання та оптимізації параметрів регуляторів для забезпечення стабільності та енергоефективності технологічного процесу.

#### **Методи дослідження**

Використовується математичне моделювання для побудови моделей МІМО-системи керування та дослідження її динаміки. Застосовуються оптимізаційні методи, такі як метод зозулі, симплекса та відпалу металу, з метою налаштування параметрів регуляторів. Проводиться комп'ютерне моделювання та імітаційні експерименти для перевірки ефективності алгоритмів керування. Виконується порівняльний аналіз результатів роботи різних регуляторів та методів оптимізації.

#### **Наукова новизна отриманих результатів**

Наукова новизна розробки системи автоматичного регулювання процесів ректифікаційної колони в газовій галузі полягає у впровадженні передових методів оптимізації. Наукова новизна цього підходу полягає у створенні інтелектуальної системи, здатної адаптуватися до різних умов виробництва та знаходити

оптимальні рішення для досягнення необхідних технічних і економічних показників. Аналізуючи численні вхідні дані, включно з параметрами сировини, процесу та готової продукції, система використовує сучасні алгоритми оптимізації для формування оптимальних стратегій управління, спрямованих на максимізацію виробничої ефективності, мінімізацію енергоспоживання та скорочення витрат.

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

Тематика роботи «Розроблення системи автоматичного керування процесом ректифікації» узгоджується з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки України, зокрема у сферах енергоефективності, хімічних технологій та інформаційних систем. Дослідження виконується у рамках планів науково-дослідних робіт закладу та може бути інтегроване у державні й галузеві програми модернізації виробництва.

### **Практичні значення отриманих результатів**

Використання методів оптимізації в системі автоматичного регулювання ректифікаційної колони дозволяє підвищити якість продукції, покращити стабільність процесу та зменшити вплив людського фактора на роботу установки, що, своєю чергою, сприяє підвищенню ефективності виробництва та зниженню експлуатаційних витрат.

### **Структура та обсяг магістерської роботи.**

Магістерська робота складається зі вступу, трьох основних розділів, загальних висновків і списку використаних джерел, що охоплює 76 сторінку, включає 40 рисунки, 5 таблиць і 7 літературних джерел .

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ ТА ДИСТИЛЯЦІЇ

#### 1.1. Процес ректифікації та способи видобутку газу

У всьому світі широко застосовується метод ректифікації для розділення сумішей. Цей метод ґрунтується на різних умовах, необхідних для зміни стану компонентів суміші. Для поділу рідини можна використовувати метод нагрівання, який дає змогу перевести компоненти з різними температурами кипіння у паровий стан [1]. Після цього газ знову конденсується в рідку форму й збирається. Якщо необхідно досягти ще більшої чистоти отриманої рідини, рекомендується застосувати метод подвійної ректифікації. Цей термін може бути використаний як щодо рідин, так і щодо газів; розділення газів відбувається через зворотний процес, у якому газоподібні компоненти зріджуються шляхом зміни температури і/або тиску.

Рефлюкс, який використовується у промислових ректифікаційних колонах, є частиною кондинсату й повертається у верхню частину колони для підвищення якості розділення продуктів. Рефлюкс працює таким чином: його подавання в колону сприяє охолодженню та конденсації парів, що проходять крізь неї, що збільшує ефективність ректифікаційної колони. Чим більше рефлюксу використовується в колоні, тим ефективніше вона розділяє компоненти з низькою температурою кипіння від матеріалів із більш високою точкою кипіння [2]. Рівень рефлюксу підбирається залежно від характеристик сировини та бажаних результатів.

Також існує велика кількість різновидів дистиляційних процесів, включаючи фракційну дистиляцію, парову дистиляцію та вакуумну дистиляцію. У нафтопереробній промисловості часто застосовується фракційна ректифікація для розподілу сирової нафти на такі компоненти, як бензин, дизельне пальне та інші вуглеводні. Термочутливі речовини, такі як ефірні олії, можна виділити за

допомогою парової ректифікації [3]. Вакуумна ректифікація корисна для розділення термічно нестабільних компонентів, оскільки вона проводиться за знижених температур.

Наразі газ видобувається як на газових, так і на газоконденсатних родовищах, після чого доставляється до споживачів магістральними трубопроводами. У зв'язку з цим необхідно забезпечити якісну підготовку природного газу. В газопроводах потрібно гарантувати повну відсутність конденсації води та вуглеводнів за робочого тиску — це є ключовою вимогою до підготовки природного газу [4]. Це важливо, оскільки в природному газі, що видобувається безпосередньо з надр Землі, міститься значна кількість сторонніх домішок: краплі рідин, важкі вуглеводні та домішки, такі як пісок.

Висока концентрація водяної пари під час транспортування газу може спричинити аварійні ситуації. Тривалість роботи газопроводу залежить від швидкості його корозії, яка прискорюється за наявності вологи в складі перекачуваного газу [5]. Крім того, у природному газі можуть утворюватися гідрати внаслідок взаємодії краплинної води з леткими вуглеводнями, що може створити перешкоди для руху газу й призвести до пошкодження системи.

Щоб запобігти цим проблемам, газ необхідно осушувати, що є важливим етапом забезпечення нормальної роботи всієї системи підготовки та транспортування природного газу до кінцевих споживачів.

Установки комплексної підготовки газу (УКПГ) використовуються для здійснення процесу підготовки природного газу разом із єдиною системою збору газу. Існує чотири основні типи систем збору газу: лінійні, променеві, кільцеві та групові. На рисунку 1.1 зображені зазначені системи.

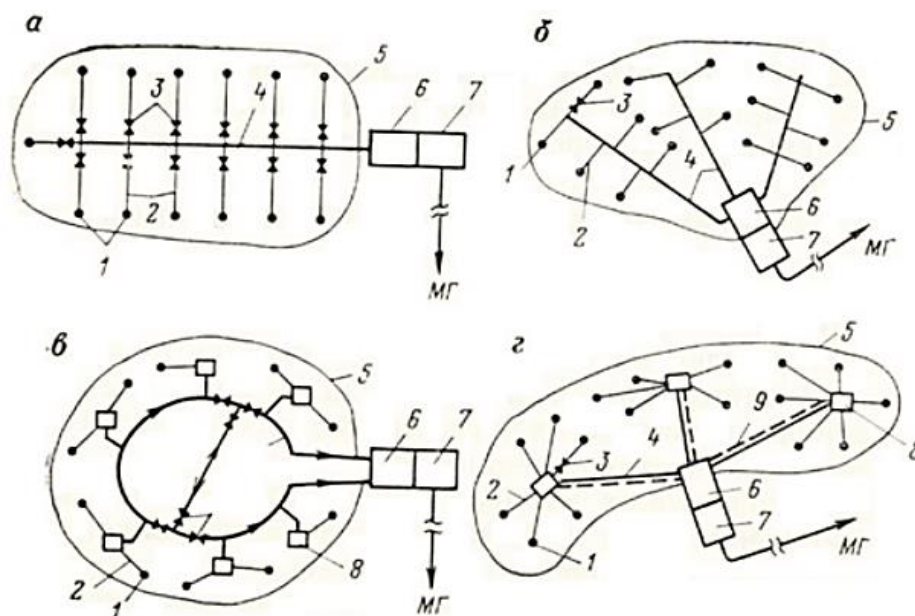


Рис. 1.1 – Види збору газу на газових родовищах

На рисунку 1.1. прийнято наступні позначення: а – лінійна; б —променева; в – кільцева; г —групова; 1 — свердловина; 2 – шлейфи; 3 —засувки відключаючі; 4 — газозбірний колектор; 5 — контур газоносності родовища; 6 — промислова газорозподільча станція (ПГРС); 7 – головні споруди; 8 — групові пункти збору газу (ГПЗГ); 9 — конденсатопровід; МГ —магістральний газопровід [2].

Почнемо з лінійної системи збору газу (а). Ця схема застосовується переважно на газових родовищах із витягнутою площею газоносності. Вона ефективна для ділянок, де газові свердловини розташовані лінійно.

Наступна система збору — променева схема (б). Вона використовується тоді, коли розробка газових пластів ведеться роздільно, а початкові тиски та склад газу відрізняються. У разі аварійної ситуації на такій системі більшість свердловин відключається, що може призвести до тимчасової втрати видобутку на значній частині родовища.

Третій вид збору газу — кільцева схема (в). Ця схема застосовується на великих площах пласта з великою кількістю свердловин і різними споживачами газу. Хоча кільцева схема дорожча, ніж променева, вона є значно надійнішою. У разі аварії відключається лише пошкоджена ділянка, а решта свердловин продовжують працювати у штатному режимі, що мінімізує втрати.

Останній вид збору природного газу — групова схема (г). Вона відрізняється від попередніх тим, що забезпечує роздільне транспортування газу та конденсату від точки збору до головних споруд. Це дозволяє ефективніше керувати потоками й мінімізувати ризик змішування та подальшого розділення [6].

У газовій промисловості існують три основні методи підготовки природного газу: абсорбція, адсорбція та низькотемпературна сепарація. Абсорбція — це процес очищення та осушки природного газу, під час якого з газового потоку видаляються рідкі вуглеводні та вода за допомогою рідких абсорбентів, таких як гліколи та масла. Адсорбція передбачає використання твердих адсорбентів, таких як пісок чи оксид заліза, для видалення тих самих компонентів. Низькотемпературна сепарація вилучає рідкі вуглеводні та вологу з газового потоку за низьких температур.

Найпоширенішим методом осушки газу сьогодні є адсорбція. Цей метод має кілька економічних і технологічних переваг порівняно з низькотемпературною сепарацією та абсорбцією:

- Низькі витрати на будівництво об'єктів (приблизно у 3–4 рази менші, ніж при абсорбції).
- Мінімальні втрати тиску в установці.
- Простота та безперервність експлуатації, легкість керування процесом.
- Можливість створення компактних, легких і транспортабельних систем.
- Низькі втрати сорбенту.
- Довговічність сорбенту порівняно з твердою адсорбцією.
- Нижча вартість.

Але абсорбція також має свої недоліки:

- Менша ефективність видалення вологи порівняно з адсорбцією.
- Можливі підвищені втрати сорбенту у присутності важких вуглеводнів через схильність розчинів до піноутворення.

Абсорбція є фізичним процесом, оскільки між поглиненим компонентом (влогою) з газової фази та абсорбентом не відбувається хімічної реакції.

Підготовка природного газу до транспортування методом адсорбційної осушки в установці комплексної підготовки газу (УКПГ) виконується у замкненому циклі, у рідкій фазі. Процес відбувається за низької температури (приблизно 10–20 °С) і високого тиску (7,5–10,5 МПа). Процес десорбції, навпаки, здійснюється за високої температури (до 164 °С) і низького тиску (атмосферного або технічного вакууму).

Система «Абсорбція» включає три підсистеми й представлена на рисунку 1.2.

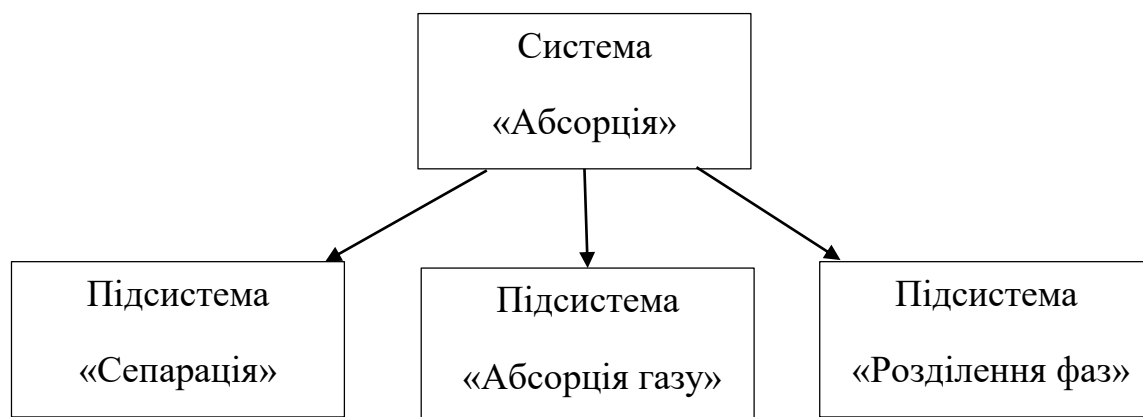


Рис. 1.2 – Види підсистем системи «Абсорбція»

Підсистема «сепарація» здійснює процеси фракційного розділення механічних домішок і краплинної рідини від газової суміші [3].

Підсистема «абсорбція газу» використовує різноманітні абсорбенти з метою вилучення вологи з газу.

Підсистема «розділення фаз» призначена для поділу газорідинної суміші на легку й важку рідку фази, а також на газову фазу. Цей процес є ключовим у процесі осушки газу, не здійснюючи при цьому значного впливу на динаміку адсорбційної осушки газу в замкненому контурі.

Після етапу попереднього очищення в сепараторі вологий газ надходить в абсорбер. Біля входу в абсорбер розташований розподільник потоку, який частково відокремлює краплинну рідину від газу. Відокремлена краплинна фаза надходить у кубову частину абсорбера через отвір у дозаторі. Після цього газ проходить через спеціальну пластину, призначену для рівномірного розподілу газу по всій секції абсорбера, і входить у секцію масообміну, де контактує з потоком абсорбенту, що рухається вниз.

Діетиленгліколь та триетиленгліколь часто застосовуються як сорбенти в установках комплексної підготовки газу, переважно через їхню здатність не спричиняти корозію обладнання. У результаті контакту газу з сорбентом відбувається вилучення вологи до температури точки роси води. За встановлених значень температури й тиску сорбент досягає певної концентрації насичення. Підтримання цих параметрів на постійному рівні є головним завданням системи автоматичного регулювання.

Після досягнення сорбентом рівня насичення вологою він надходить у дегазаційний апарат, де здійснюється розділення сорбенту та газу за допомогою кількох шарів пластин. На виході з апарата відфільтрований газ, що містить не більше ніж  $0,005 \text{ г/м}^3$  вологи, спрямовується у газопровідні магістралі.

У цілому система абсорбції включає низку підсистем, таких як повітряне охолодження, насосне й ємнісне обладнання, вентиляція та фільтрація, а також коригування.

## **1.2. Будова ректифікаційних колон**

Ректифікаційні колони складаються з циліндричного корпусу, усередині якого розміщені тарілки або насадка для контакту парів і рідин. Корпус оснащений люками та оглядовими вікнами для технічного обслуговування. Тарілки — такі як ситчасті, клапанні й ковпачкові — створюють горизонтальні поверхні, на яких відбувається розділення компонентів суміші. Насадка (кільця Рашига, сідла Берля) забезпечує альтернативну поверхню для контакту фаз. У верхній і нижній частинах колони встановлюються конденсатор і ребойлер для відповідного конденсації парів та випаровування рідини.

Структура ректифікаційних колон, або дистиляційних башт, включає кілька ключових компонентів: вертикальну оболонку, внутрішні елементи колони, ребойлер, конденсатор для охолодження та рефлюкс-барабан.

Розглянемо кожен із цих компонентів детальніше.

Вертикальна оболонка, зображена на рисунку 1.3, є основною конструктивною частиною колони, у якій відбувається процес розділення вихідної сировини на її складові компоненти.

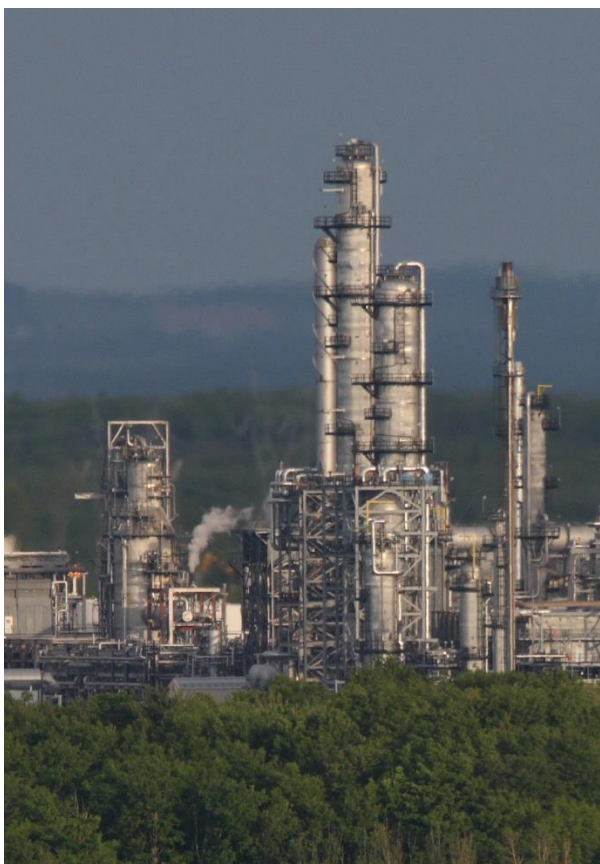


Рис. 1.3 – Вертикальна оболонка

На рисунку 1.4 показано внутрішні компоненти колони, включаючи лотки, пластини та насадку. Ці елементи відіграють важливу роль у забезпеченні більш ефективного розділення компонентів у процесі ректифікації.

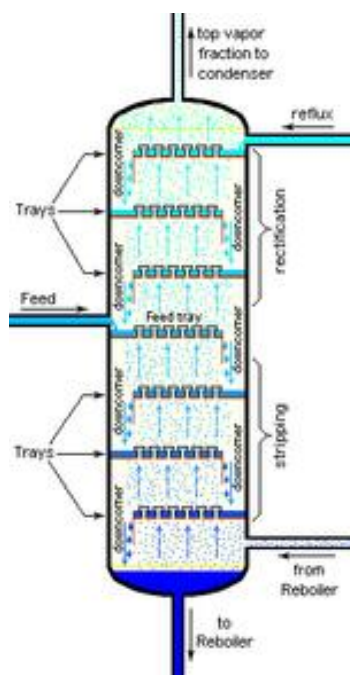


Рис. 1.4 – Внутрішні елементи колони

На рисунку 1.5 зображено конденсатор, який виконує важливу функцію охолодження та конденсації пари, що виходить із верхньої частини колони.



Рис. 1.5 – Конденсатор

На рисунку 1.6 зображено рефлюкс-барабан, який відіграє ключову роль у зберіганні конденсованої пари у верхній частині колони. Це необхідно для

повернення рідини, тобто рефлюксу, назад у колону, забезпечуючи її безперебійну роботу.



Рис. 1.6 – Рефлюкс-барaban

Під час експлуатації ректифікаційної колони з часом виникають ризики її пошкодження або виходу з ладу. Щоб мінімізувати або запобігти таким ризикам, необхідно проводити систематичну діагностику та своєчасний ремонт обладнання. Дистиляційні колони є високими циліндричними конструкціями, усередині яких міститься нагріта та легкозаймиста рідина, що становить основне джерело небезпеки. Більшість аварій пов'язана з ризиком «ефекту доміно» під час пожежі, коли пошкодження можуть поширюватися на прилеглі конструкції.

Для зменшення або повного усунення таких ризиків проводиться низка аналізів і планувальних робіт на ранніх етапах проектування, щоб правильно розмістити всі конструктивні елементи.

Ректифікаційні колони небезпечні тим, що всередині них перебуває легкозаймиста рідина під високим тиском, що може спричинити різні аварійні ситуації виходу обладнання з ладу. Наприклад, ребойлер приймає велику кількість тепла з колони, тоді як конденсатор, навпаки, відводить значну кількість тепла на виході.

Якщо ребойлер втрачає тепловий потік на вході, це призводить до падіння тиску в колоні. У випадку втрати охолодження в конденсаторі виникає протилежна

ситуація — тиск у колоні зростає, що може спричинити її пошкодження. Для захисту конденсатора встановлюють запобіжні клапани й байпаси, а для запобігання зниженню тиску в колоні — пристрої для скидання тиску. Також встановлюються конструкції для створення повного вакууму, вакуумні вимикачі та системи упорскування інертного газу, щоб запобігти осіданню легкозаймистої рідини на поверхні насадок, що може спричинити займання.

При виникненні значного парового тиску в ребойлері інколи відбувається витік пари через його елементи, такі як трубки. Це призводить до потрапляння пари в колонну, що, у свою чергу, створює підвищений тиск усередині й може спричинити пошкодження або навіть відрив від кріплень тарілок і насадок.

Принцип роботи ректифікаційних колон полягає в розділенні суміші на складові компоненти завдяки різним температурам кипіння. Тому пара, що виділяється з киплячої суміші, здебільшого складається з компонентів із нижчою температурою кипіння. Після охолодження вона конденсується в рідину, залишаючи в колоні суміш із вищою температурою кипіння та меншим вмістом летких компонентів.

Ректифікаційна колона складається з чотирьох основних елементів: самої колони — циліндричної посудини, у якій відбувається процес розділення газорідинної суміші; насадки або тарілок, через які проходить пара; ребойлера — джерела тепла; та конденсатора, де здійснюється охолодження й конденсація газу [15].

Існує два типи колон, що відрізняються типом обробки сировини й конструктивною моделлю. Вони представлені на рисунку 1.7.

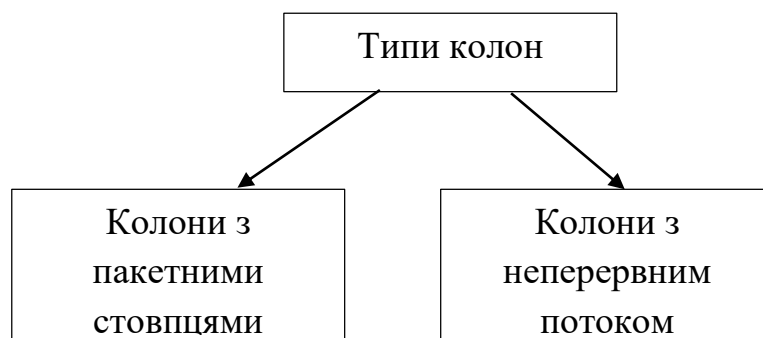


Рис. 1.7 – Типи дистиляційних колон

Колони з пакетними (періодичними) робочими секціями передбачають процес, у якому відбувається послідовне введення порцій (пакетів) суміші в колону. Це означає, що в апарат завантажується певна кількість сировини, яка буде замінена новою порцією після досягнення попередньою потрібного ступеня обробки або готовності продукту.

У випадку безперервної колони здійснюється постійна подача газорідної суміші для ректифікації. Після запуску ректифікаційної колони сировина надходить у неї безперервно. Припинення подачі можливе лише у разі аварії, необхідності проведення діагностики, ремонту або заміни елементів обладнання. Наразі саме безперервні колони є найбільш поширеними в нафтогазовій промисловості.

Безперервні колони класифікуються за основним принципом, показаним на рисунку 1.8.

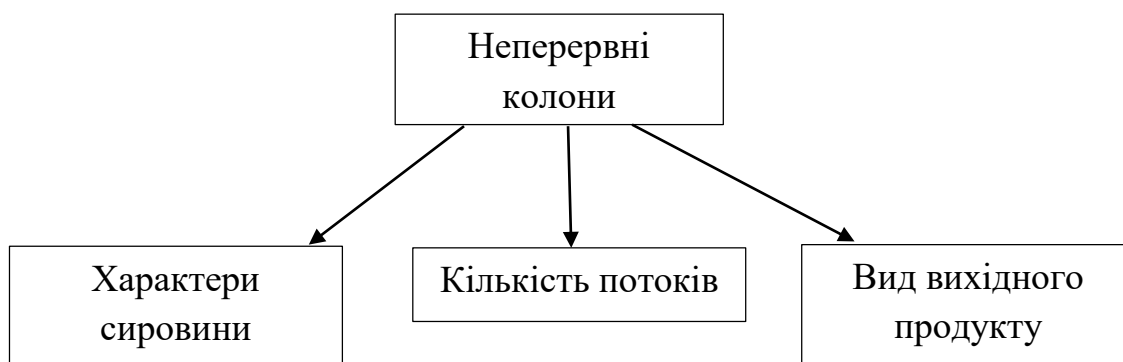


Рис. 1.8 – Класифікація безперервних колон

У першому випадку характер подачі сировини до ректифікаційної колони залежить від складу живлення, тобто від того, яка суміш надходитиме та скільки компонентів вона містить. Зазвичай такі процеси включають щонайменше два компоненти, але їх може бути значно більше — залежно від вимог виробництва. Наприклад, якщо потрібно отримати продукт певної чистоти чи складу, у колону вводять визначені компоненти у визначених пропорціях.

У другому випадку кількість потоків, задіяних у процесі ректифікації, залежить від того, скільки функцій необхідно реалізувати для досягнення бажаного складу або характеристик кінцевого продукту. Це можуть бути різні газові або

рідинні потоки, кожен із яких виконує свою роль у процесі та впливає на якість продукції.

У третьому випадку тип кінцевого продукту визначає, який метод ректифікації застосовується в конкретній колоні.

- Екстрактивна ректифікація: додаткові компоненти, введені для полегшення розділення, утворюють рідку фазу, що накопичується в нижній частині потоку.

- Азеотропна ректифікація: утворений азеотроп відділяється у верхній частині потоку.

Вибір методу залежить від вимог до чистоти продукту, складу сировини та технологічних умов виробництва.

Таблиця 1.2

### Компоненти ректифікаційної колони та їх опис

Компонент	Опис
Підігрівач	Підігріває суміш рідини й пари перед введенням у дистиляційну колону, забезпечуючи необхідну температуру та фазовий стан.
Тарілки (опорні плити)	Горизонтальні плоскі елементи, розташовані всередині колони перпендикулярно потоку. Забезпечують контакт між рідкою та газовою фазами, сприяють масообміну, мають отвори або канали для проходження пари та рідини.
Насадка	Матеріал (наприклад, металеві чи пластикові елементи) усередині колони, що забезпечує велику поверхню контакту фаз для ефективного розділення. Має різні форми — кільця, спіралі, сітки тощо.
Конденсатор	Конденсує пару, що виходить з верхньої частини колони, перетворюючи її назад у рідину для отримання продукту високої чистоти.
Рефлюксний резервуар	Накопичує частину конденсованої рідини та повертає її назад у верхню частину колони для покращення процесу розділення.
Колектор	Збирає відокремлені компоненти з ректифікаційної колони для подальшої обробки або виведення.

Представлена таблиця описує компоненти, що формують внутрішню структуру ректифікаційної колони, та їх функціональне призначення в процесі ректифікації. Підігрівач відіграє важливу роль у забезпеченні оптимальної температури суміші, яка подається в колону, що є необхідною умовою для ефективного розділення компонентів. Тарілки (або опорні плити) та насадка створюють велику поверхню контакту між рідкою та газовою фазами, забезпечуючи інтенсивний масообмін і дифузію компонентів для їх розділення. Конденсатор конденсує пари, що виходять із верхньої частини колони, назад у рідку фазу, що дозволяє отримати продукт високої чистоти. Рефлюксний резервуар накопичує частину конденсованої рідини та повертає її у верхню частину колони для покращення процесу розділення компонентів. Нарешті, колектор збирає відокремлені компоненти з ректифікаційної колони для подальшого використання або обробки.

### 1.3. Принцип роботи ректифікаційної колони

На рисунку 1.9 зображено загальну схему ректифікаційної колони.

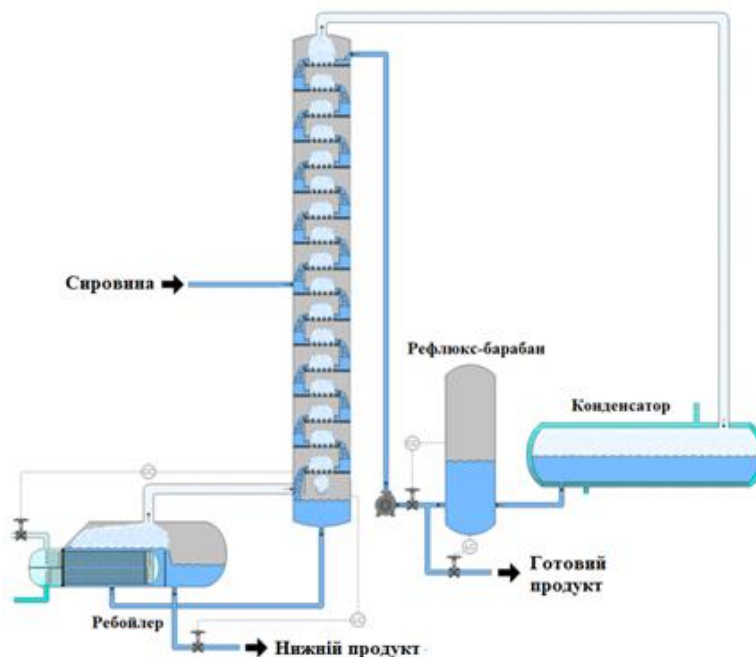


Рис. 1.9 – Будова ректифікаційної колони

Принцип роботи ректифікаційної колони полягає в наступному: починаючи з моменту надходження нерозділеної газорідинної суміші, яку також називають живленням, у колону, вона рухається вниз по тарілках башти, після чого потрапляє в ребойлер, де відбувається нагрівання суміші до утворення пари. Утворена пара завдяки своїй нижчій густині та вищій температурі піднімається вгору по колоні. Процес ректифікації починається тоді, коли пара проходить через тарілки, розділяючи потік живлення. Насичений паром газ потім направляється в конденсатор, де, завдяки постійній подачі холодної води та відведенню гарячої, починає конденсуватися.

Після конденсації пара переходить у рефлюкс-барабан, де частина дистилляту виводиться як готовий продукт, а решта повертається у верхню частину колони для підвищення її ефективності та, відповідно, якості продукту. У моїй дисертації буде використана дистиляційна колона з безперервною подачею живлення, яка має два входи та два виходи.

#### **1.4. Функціональна схема ректифікаційної колони**

Функціональна схема ректифікаційної колони представлена на рисунку 1.10

Ця схема відображає процес ректифікації, який застосовується для розділення рідких сумішей на окремі компоненти. Основним елементом системи є ректифікаційна колона, куди подається вихідна суміш (живлення). Знизу колони подається пара, яка підіймається вгору, контактуючи зі стікаючою вниз рідиною. Теплообмінники (позначені як FC і TC) регулюють температуру та потік пари.

У верхній частині колони розташований конденсатор, де пара конденсується, і частина конденсату повертається назад у колону у вигляді рефлюксу для підтримання процесу розділення. Залишок конденсату виводиться як дистиллят. У нижній частині колони знаходиться випарник, де концентруються менш леткі компоненти, що виводяться як нижній продукт.

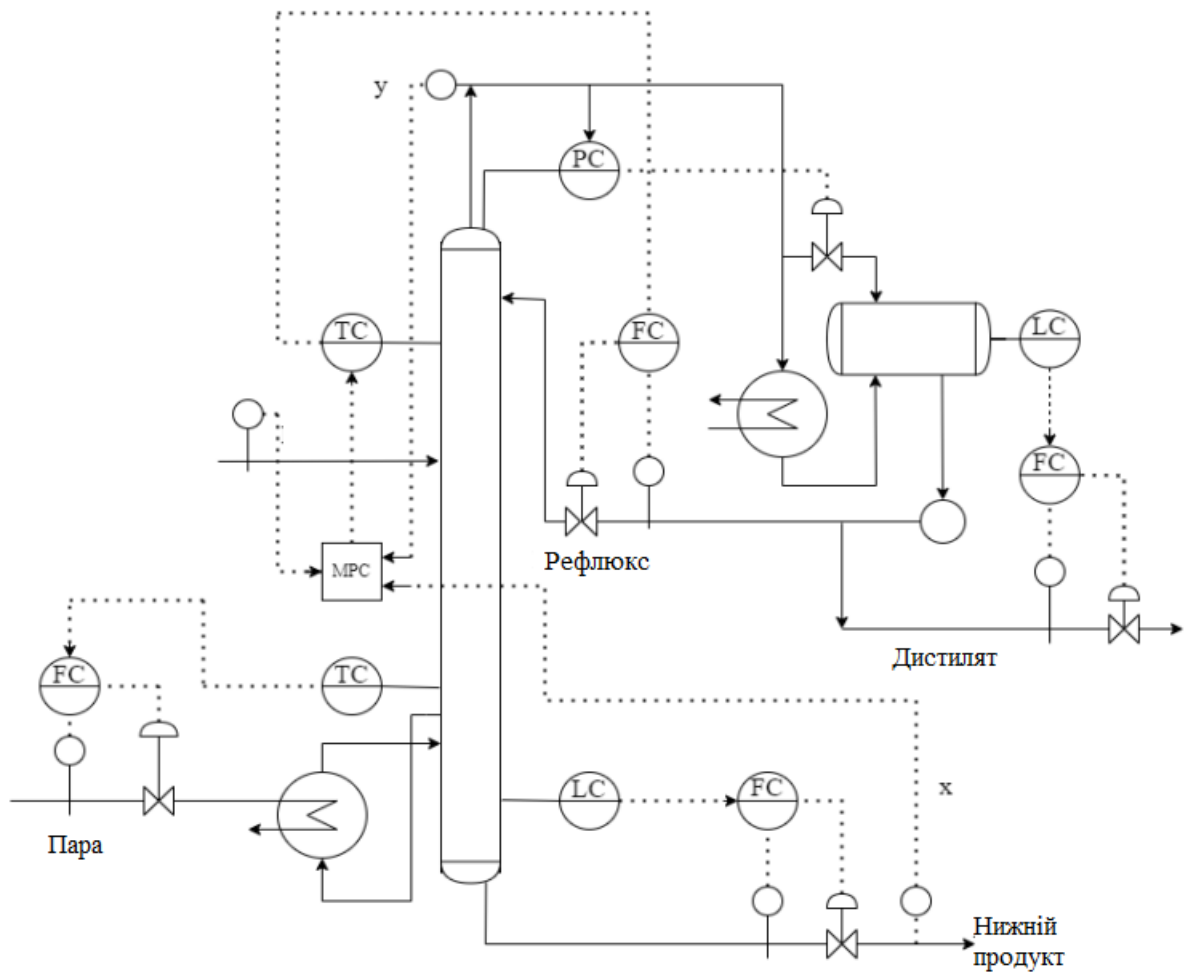


Рис. 1.10 – Функціональна схема

Контрольовальні елементи, такі як датчики температури (ТС), тиску (РС) і рівня (LC), а також регулятори потоку (FC), забезпечують автоматизоване управління процесом.

### Висновки до розділу 1

У першому розділі магістерської роботи розглянуто технологічні основи процесів ректифікації та дистиляції, що мають ключове значення для розділення багатоконпонентних сумішей у хімічній, нафтохімічній та газовій промисловості. Проаналізовано принцип дії ректифікації як багаторазового чергування процесів випаровування та конденсації, що забезпечує високий ступінь очищення продуктів.

Також наведено огляд основних способів видобутку та підготовки газу, що визначають вхідні параметри для подальших процесів переробки.

Розглянуто конструктивні особливості дистиляційних та ректифікаційних колон, включаючи їх основні елементи: тарілки, насадки, дефлегматори, кип'ятильники та систему відбору продуктів. Встановлено, що вибір конструкції значною мірою впливає на продуктивність, енергоефективність та якість розділення.

Аналіз принципу роботи ректифікаційної колони дав змогу визначити основні тепло- та масообмінні процеси, а також ключові технологічні параметри, які підлягають контролю та регулюванню. Розгляд функціональної схеми дозволив виокремити основні контури керування, керуючі впливи та збурювальні фактори, що є визначальними для забезпечення стабільної роботи об'єкта.

## РОЗДІЛ 2

### СИНТЕЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МІМО-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕКТИФІКАЦІЙНОЮ КОЛОНОЮ

#### 2.1. Отримання вихідних значень

Спершу необхідно визначити значення змінних  $X_d$  та  $X_b$ . Змінна  $X_d$  представляє кількість дистиляту, що виходить із верхньої частини колони, а  $X_b$  — кількість дистиляту (нижнього продукту), що утворюється в нижній частині.

Для кожного етапу в колоні встановлюється рівняння матеріального балансу компонентів. Це включає накопичення рідини, що надходить на  $i$ -ту стадію,  $i$  пари, що надходить на  $i$ -ту стадію, а також рідину та пару, що залишають  $i$ -ту стадію.

Отже, матеріальний баланс для всіх стадій (за винятком змін витрат у конденсаторі та ребойлері) має вигляд:

$$\frac{d(MiXi)}{dt} = Li - 1.Xi - 1 + Vi + 1.Yi + 1 - LiXi - ViYi \quad (2.1)$$

Далі спростимо рівняння, прийнявши накопичення, загальний конденсатор та резервуар рідини сталими. Також виключимо можливі зовнішні впливи, підставивши значення густини сировини та швидкості її кипіння в конденсаторі. Додатково введемо значення молярної витрати рідини на тарілках та на їх виході.

Після цього отримаємо результат і занесемо його до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

## Дані обчислень рівняння

Параметр	Значення
Якість живлення	1
Витрата подачі	1 кмоль/хв
Продукт дна $X_b$	0,01 мольної фракції
Швидкість рефлюксу $R$	2,706 кмоль/хв
Швидкість кипіння пари $V$	3,206 кмоль/хв
Склад дистилляту $X_d$	0,99 мольної фракції
Молярна частка ( $Z_f$ )	0,5

## 2.2. Математичне моделювання процесу

У цьому розділі досліджуємо взаємозв'язок між дистиллятом верхньої частини колони  $X_d$ , нижнім складом  $X_b$ , швидкістю рефлюксу  $L$  та швидкістю кипіння пари  $V$ . Розглядається вплив множинних входів на кожен із множинних виходів у системі типу МІМО (multi-input multi-output) [5].

Для зменшення цього МІМО-впливу застосуємо методи декуплера та Циглера—Нікольса.

У якості вихідних змінних приймемо значення дистилляту верхньої частини колони:  $X_d(s)$  та дистилляту нижнього продукту  $X_b(s)$ . На цьому етапі ми ігноруємо зовнішні збурення, щоб уникнути небажаних шумів.

Керованими величинами будуть:

- швидкість рефлюксу  $L(s)$ ,
- швидкість кипіння пари  $V(s)$ .

Це система з кількома входами та кількома виходами, де кожен вхід впливає на кожен вихід. Необхідно спроектувати систему так, щоб кожен вихід залежав лише від одного входу. Для цього застосовуємо розв'язку (декуплінг), відокремлюючи верхню та нижню частини колони для більш точної настройки.

Вихідні значення функції наведені нижче

$$[Xd(s)Xb(s)] = \left[ \frac{0.878}{(75s+1)} \quad \frac{-0.864}{(75s+1)} \quad \frac{1.082}{(75s+1)} \quad \frac{-1.096}{(75s+1)} \right] [L(s)V(s)] \quad (2.2)$$

Як показує це рівняння, обидві керовані змінні  $Xd(s)$  і  $Xb(s)$  залежать як від  $L(s)$ , так і від  $V(s)$ , що робить цей процес багатовимірним. Об'єкт керування буде представлений у такому вигляді:

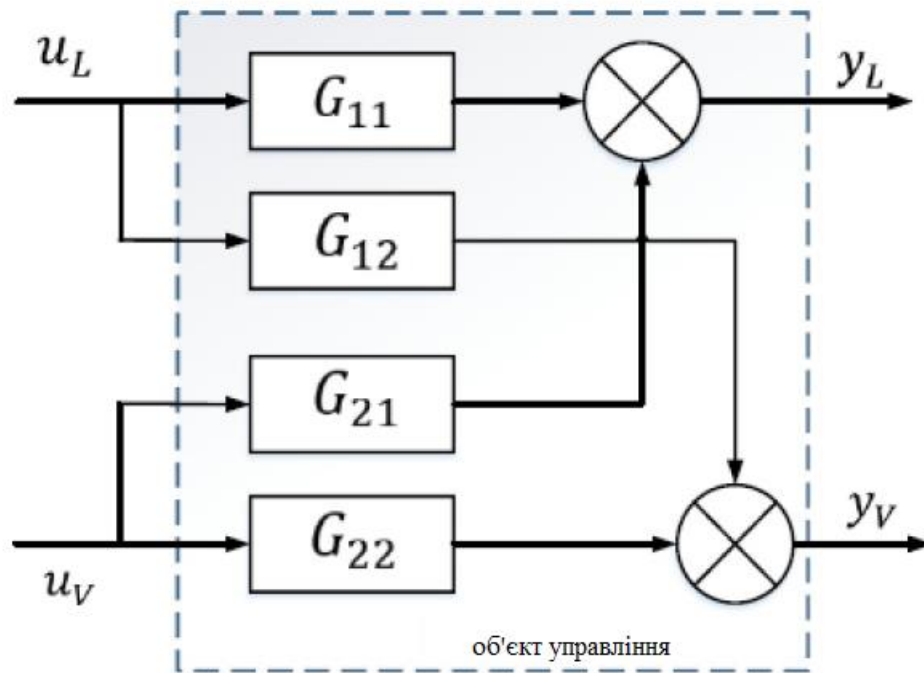


Рис. 2.1 – Структурна схема ректифікаційної колони

На основі рівняння (2.2) отримуюмо такі передавальні функції системи (2.3–2.6):

$$G_{11} = \frac{87.8}{75s+1} \quad (2.3)$$

$$G_{12} = \frac{87.8}{75s+1} \quad (2.4)$$

$$G_{21} = \frac{108.4}{75s+1} \quad (2.5)$$

$$G_{22} = \frac{108.4}{75s+1} \quad (2.6)$$

Багатовимірність цього процесу означає, що зміни швидкості рефлюксу ( $L$ ) та швидкості кипіння пари ( $V$ ) можуть впливати як на склад дистилату верхньої частини ( $Xd$ ), так і на склад нижнього продукту ( $Xb$ ). Для ефективного управління

такими системами потрібен комплексний підхід до налаштування регуляторів, а застосування методів декуплювання дозволяє зменшити взаємний вплив між цими змінними.

Структурна схема цього процесу наведена на рисунку 2.2.

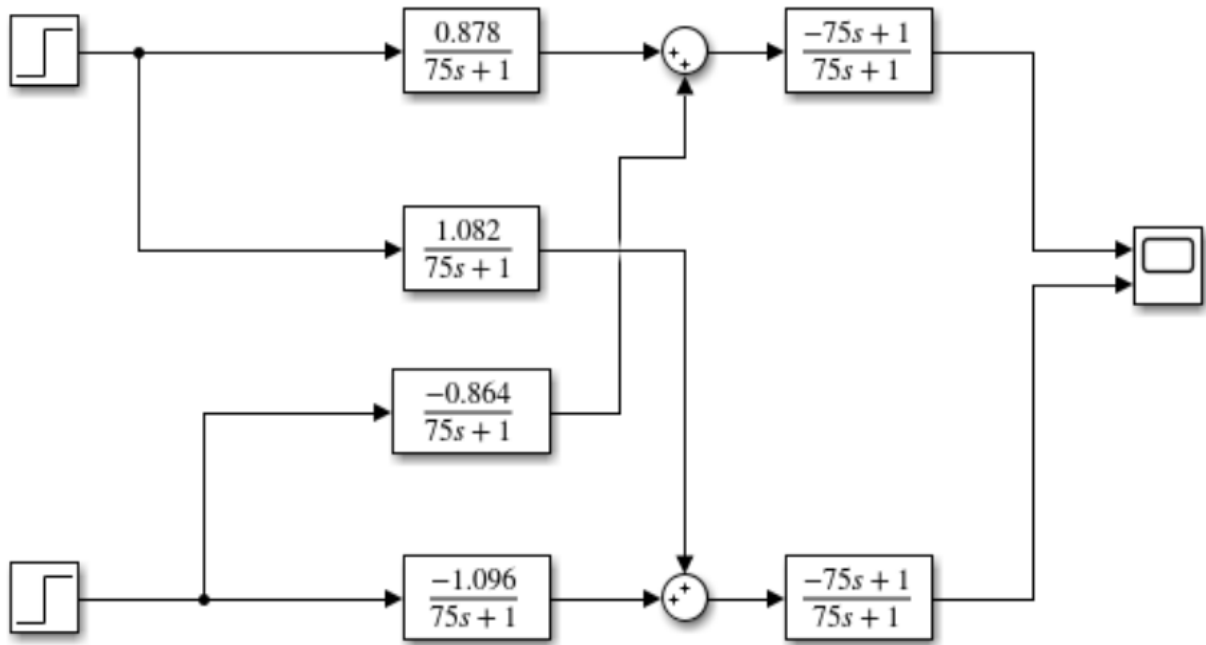


Рис. 2.2 – Структурна схема процесу ректифікаційної колони

Для отримання перехідної характеристики верхньої частини ректифікаційної колони була використана передавальна функція в середовищі MATLAB. У результаті виконання даної операції було змодельовано перехідний процес верхньої частини ректифікаційної колони. Детальне графічне представлення перехідного процесу наведено на рисунку 2.3 нижче.

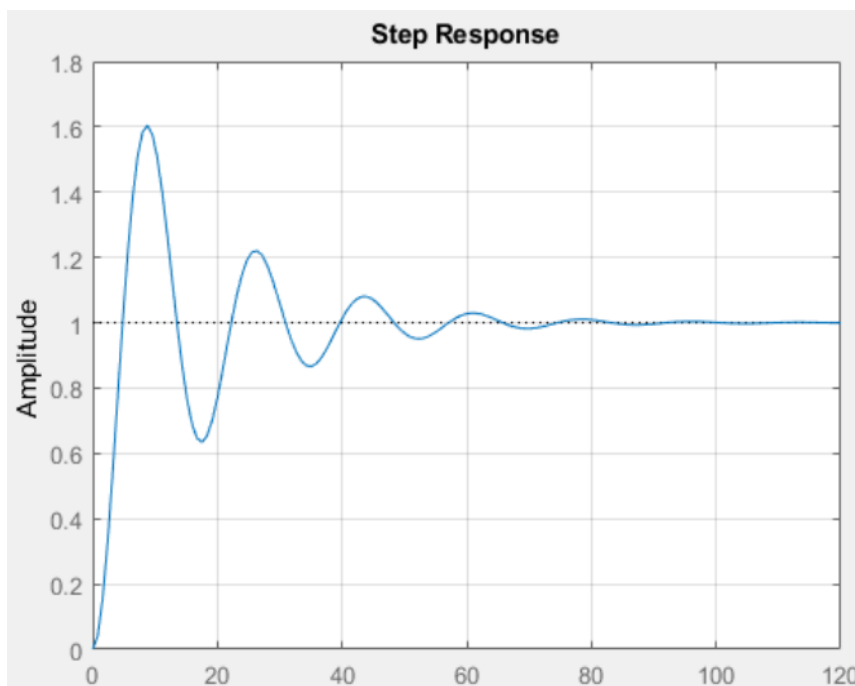


Рис. 2.3 – Перехідний процес верхньої частини ректифікаційної колони

Оскільки верхня та нижня частини ректифікаційної колони взаємопов'язані, результати перехідних процесів в обох частинах колони мають подібні характеристики.

Для коректного налаштування колони необхідно здійснити розділення верхньої та нижньої частин ректифікаційної колони, усуваючи їх взаємний вплив. На даний момент структурна схема системи в її спрощеному вигляді представлена на рисунку 2.4.

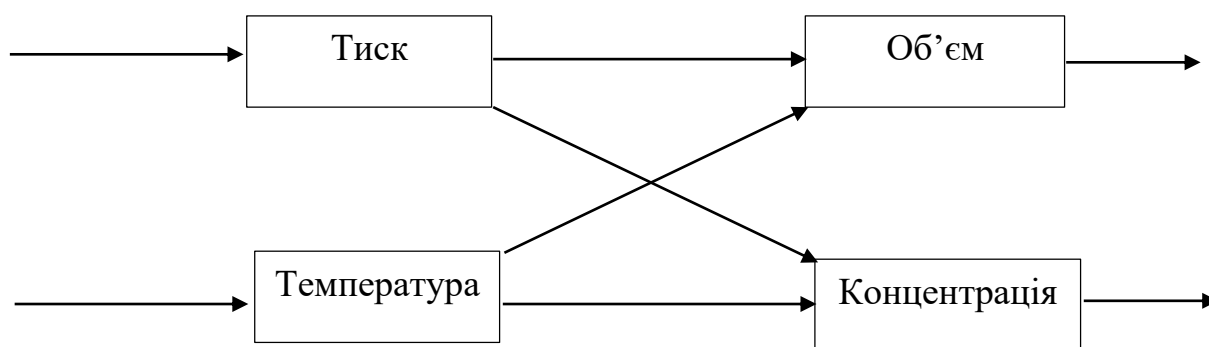


Рис. 2.4 – Спрощена модель ректифікаційної колони

Упровадження регулятора приводить до скорочення часу, необхідного для досягнення усталеного стану системи.

Під час налаштування колони з активними зв'язками спостерігається такий результат, як наведено на рисунку 2.5.

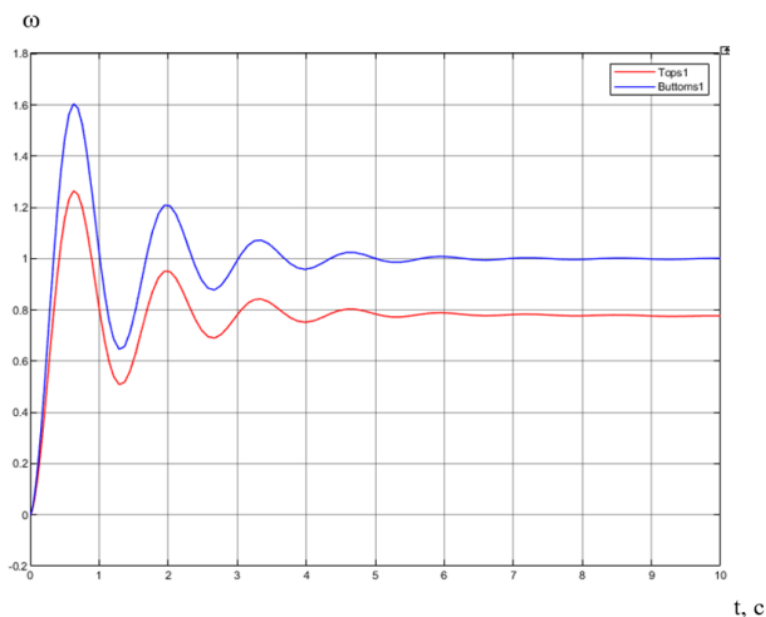


Рис. 2.5 – Результат з увімкненими зв'язками

Як видно з графіка вище, коли один із двох регуляторів налаштовується, наприклад регулятор для нижньої частини колони, виникає проблема: налаштування верхньої частини колони порушується. Це не відповідає нашим вимогам, оскільки ми прагнемо до точної настройки, зберігаючи при цьому незалежність налаштування кожного регулятора.

Для досягнення цієї цілі ми вводимо процес розв'язки (декуплювання), який представлено на рисунку 2.6.

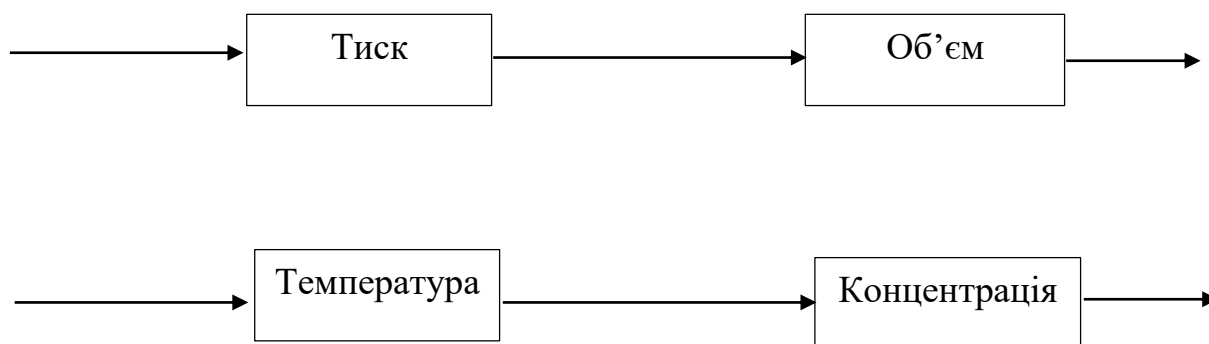


Рис. 2.6 – Ізольовані контури системи

### 2.3. Обґрунтування вибору регулятора

Тепер, коли систему можна налаштовувати, переходимо до вибору регулятора для даної системи. Як видно з перехідного процесу, система проявляє коливання та має значне перерегулювання. Для усунення цих проблем розглянемо P-, PI-, PD- та PID-регулятори, порівняємо їх і виберемо оптимальний варіант, що показано на рисунку 2.7.

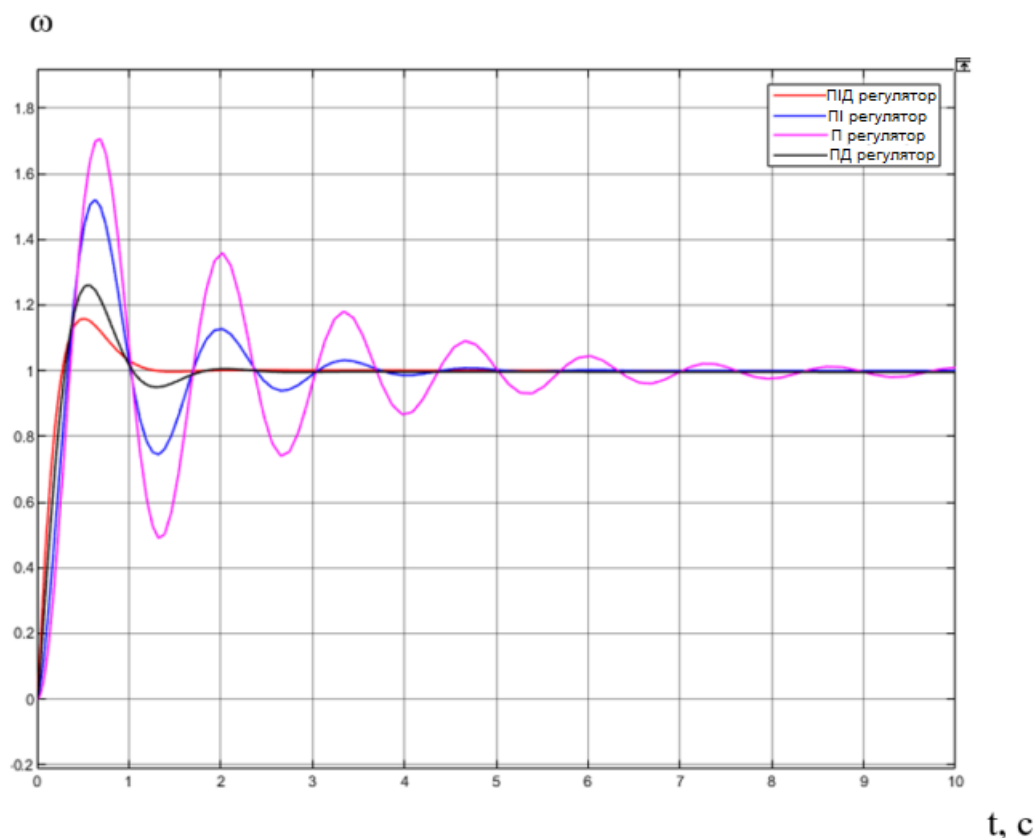


Рис. 2.7 – Моделювання системи з різними підібраними регуляторами

Як видно вище, P-регулятор не вирішив проблему перерегулювання та коливань; фактично, він лише збільшив коливальність системи та рівень перерегулювання.

PI-регулятор скоротив час, необхідний для досягнення усталеного значення, проте не усунув коливання системи, тому цей варіант також не підходить.

PD-регулятор зменшив коливання, але рівень перерегулювання залишився високим, що підкреслює необхідність використання інтегрального компонента I.

PID-регулятор успішно усунув коливання та знизив рівень перерегулювання до невеликих значень, що робить його оптимальним вибором для нашої системи.

Далі ми опишемо процес налаштування коефіцієнтів для цього регулятора, виконаємо перевірку та порівняємо різні методи налаштування коефіцієнтів, щоб визначити, який із них є найбільш придатним для даної системи. Спочатку створимо модель у Simulink (MATLAB), зображену на рисунку 2.8.

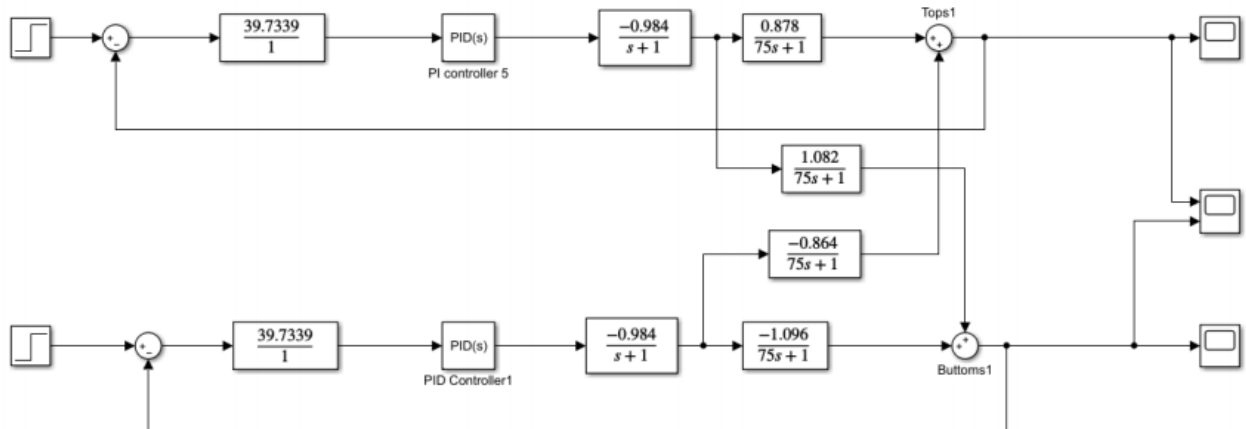


Рис. 2.8 – Модель ректифікаційної колони в Simulink

Потім ми проведемо процес розв'язки, тобто усунемо взаємний зв'язок між верхньою та нижньою частинами ректифікаційної колони. Результат цієї операції подано на моделі, показаній на рисунку 2.9.

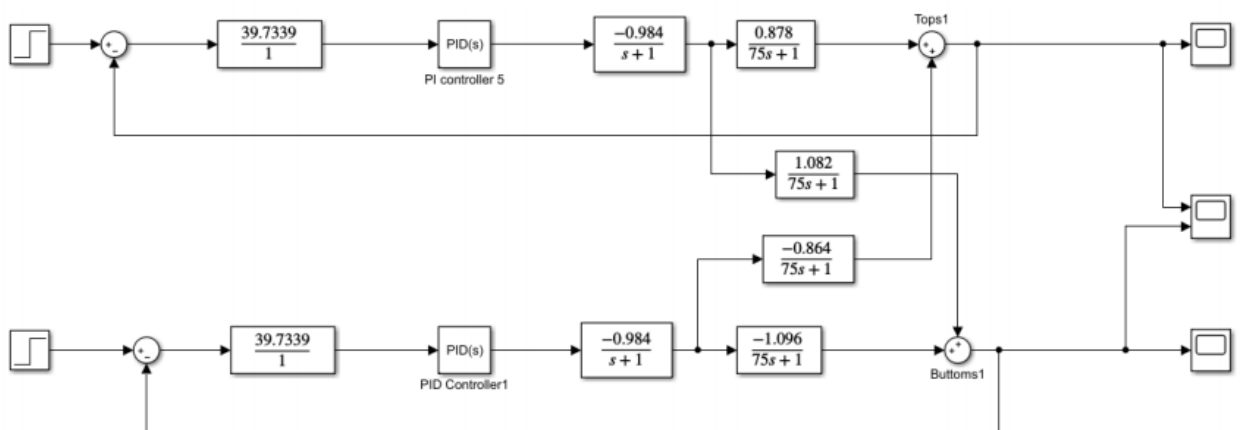


Рис. 2.8 – Модель ректифікаційної колони в Simulink

Далі проведемо процес розв'язки, що означає усунення зв'язку між верхньою та нижньою частиною ректифікаційної колони. Результат цієї операції представлений у моделі на рисунку 2.9.

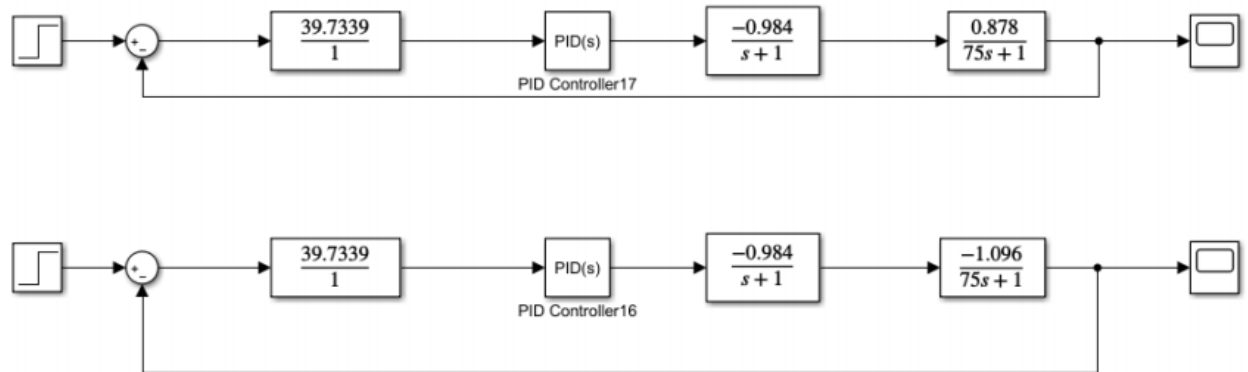


Рис. 2.9 – Модель розв'язаної ректифікаційної колони в Simulink

Для налаштування і визначення коефіцієнтів ми використаємо декілька методів, включно з *tune*, *SLtuner*, *Fine-tuning*, емпіричним методом та методом Циглера—Ніколса.

Спочатку застосуємо *SLtuner* і команду *looptune* для роботи з багатовимірною системою у командному рядку MATLAB. Цей процес налаштування PID-регулятора за допомогою *SLtuner* буде виконуватися у кілька етапів.

## 2.4. Параметричне налаштування типових регуляторів

**Крок 1.** Коротко повторимо основні поняття, з якими працюємо. Ми розглядаємо регульовані змінні, такі як рефлюкс і кипіння, а також керовані змінні — концентрацію та хімічний склад на вершині й у нижній частині ректифікаційної колони.

Установка моделюється як передаточна функція першого порядку з такими входами та виходами:  $L$ ,  $V$ ,  $y_D$ ,  $y_B$ . Передаточна функція має вигляд (2.3):

$$[Xd(s)Xb(s)] = \left[ \frac{0.878}{(75s+1)} \frac{-0.864}{(75s+1)} \frac{1.082}{(75s+1)} \frac{-1.096}{(75s+1)} \right] [L(s)V(s)] \quad (2.3)$$

**Крок 2.** На цьому етапі ми вводимо необхідні дані в командний рядок та створюємо розв'язану модель ректифікаційної колони в середовищі Simulink.

Процес починається з відкриття заздалегідь створеної моделі ректифікаційної колони в Simulink за допомогою відповідної команди. Після відкриття модель виводиться на екран, що показано на рисунку 2.10.

У цій математичній моделі міститься низка важливих елементів. Серед них основні параметри системи колони ( $Dsp$  і  $Bsp$ ), які відіграють ключову роль у її роботі. Також присутній головний блок керування ( $DM$ ), що відповідає за регулювання процесу.

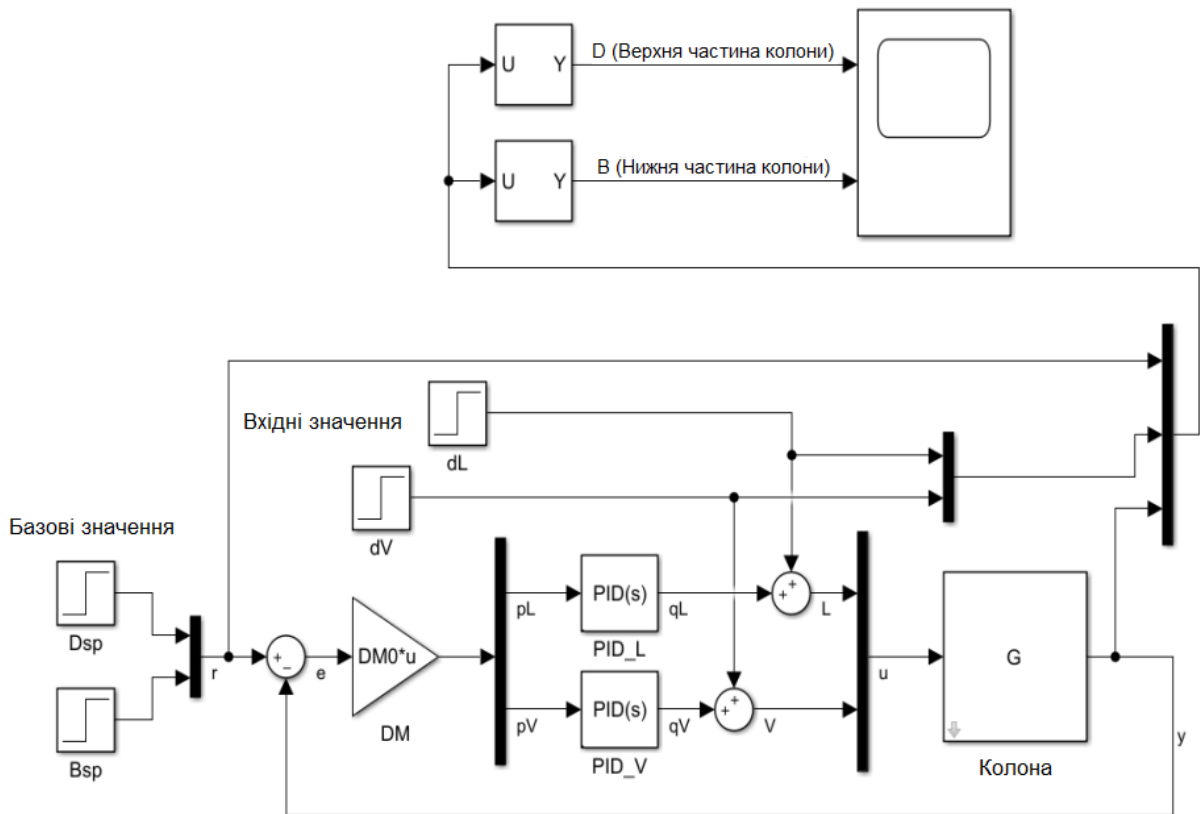


Рис. 2.10 – Модель розв'язувального контролера для ректифікаційної колони в Simulink

Вхідні сигнали ( $dL$  і  $dV$ ) впливають на роботу системи, а PID-регулятори та об'єкт керування дистиляційною колоною інтегровані в модуль ( $G$ ), забезпечуючи стабільність та ефективність процесу.

Крім того, модель включає параметри, що відповідають за керування потоками рідини ( $L$ ) та пари ( $V$ ) у колоні, а також за контроль концентрації та хімічного складу у верхній частині ( $yD$ ) та внизу ( $yB$ ) колони. Ці параметри відіграють важливу роль у визначенні ефективності та стабільності процесу ректифікації.

Отже, створення розв'язаної моделі в Simulink дозволяє точніше аналізувати й налаштовувати параметри системи для досягнення потрібних результатів.

Об'єкт керування ( $G$ ) має вигляд, зображений на рисунку 2.11.

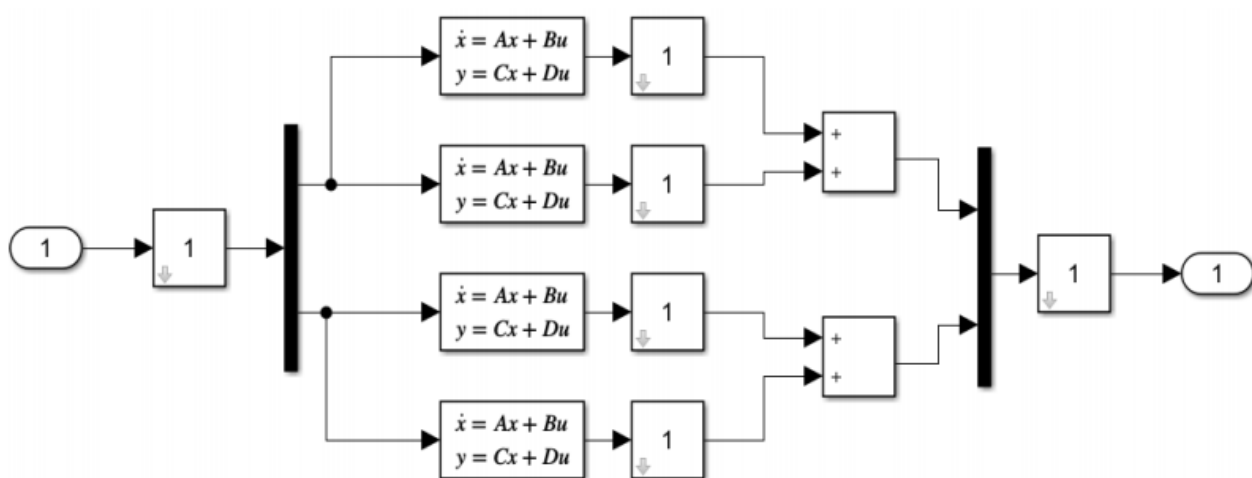


Рис.2.11 – Модель ректифікаційної колони

У зазначених блоках наведено вхідні значення, включно з блоками простору станів, чотири види яких необхідні для ефективної роботи даної системи ректифікаційної колони. Далі, для позначення налаштованих блоків введення–виведення контролера та сигналів, що мають значення для перевірки замкненого циклу SLtuner, використовується відповідний інтерфейс.

Під час налаштування обмеження реакції на команду *step* встановлені на рівні 15%, час осідання — 20 хвилин, а коефіцієнт підсилення — 4.

Після цього для налаштування контролера з урахуванням вимог до зниження впливу збурень застосовується метод *looptune*. Результати цієї процедури подані на рисунку 2.12.

Final: Peak gain = 0.998, Iterations = 58  
 Achieved target gain value TargetGain=1.

Рис. 2.12 – Результати обчислення кількості ітерацій

З аналізу наведених обчислень можна зробити такі висновки. Для досягнення оптимальних значень параметрів нашої ректифікаційної колони необхідно виконати 58 ітерацій. Кінцеве значення є близьким до 1, що свідчить про виконання всіх встановлених вимог.

Для візуальної перевірки та підтвердження отриманих результатів ми використовуємо команду *loopview*. На графіках, наведених на рисунках 2.13–2.17, бажані криві повинні розташовуватися поза заштрихованими областями.

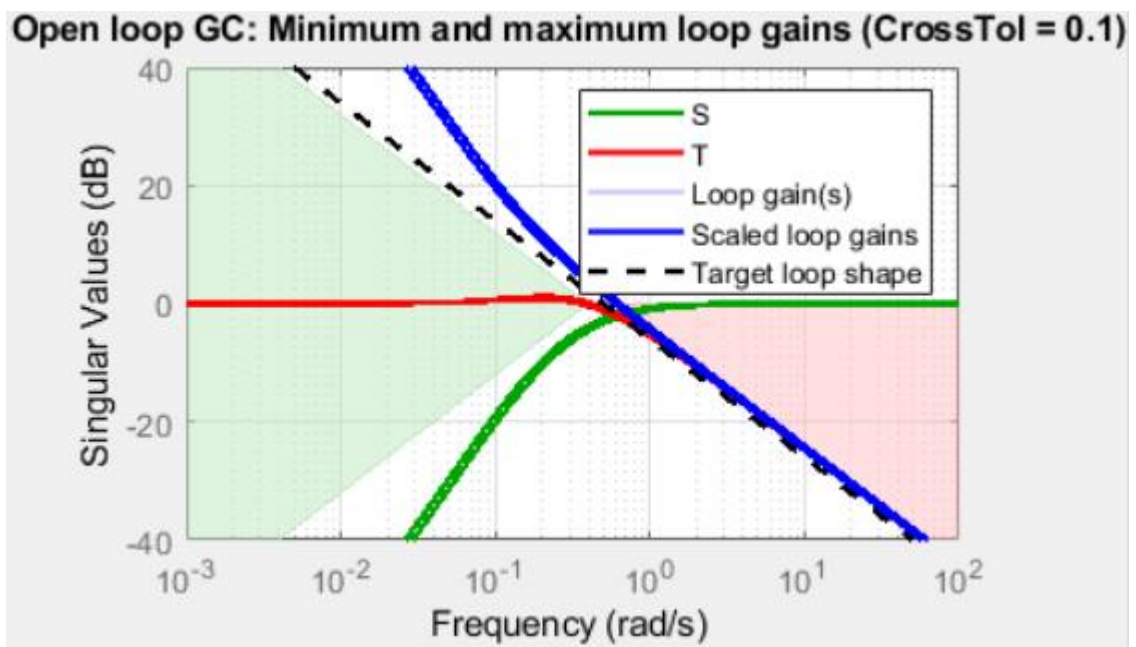


Рис. 2.13 – Мінімальне та максимальне підсилення контуру

Як показано на наведеному графіку, цикловий коефіцієнт підсилення, масштабований коефіцієнт підсилення контуру та цільовий коефіцієнт підсилення контуру не потрапляють у затемнену область, що свідчить про коректний перебіг процесу.

Далі, розглядаючи результати перерегулювання, відмічаємо, що його значення становить менше ніж 15%, що є показником успішної роботи системи.

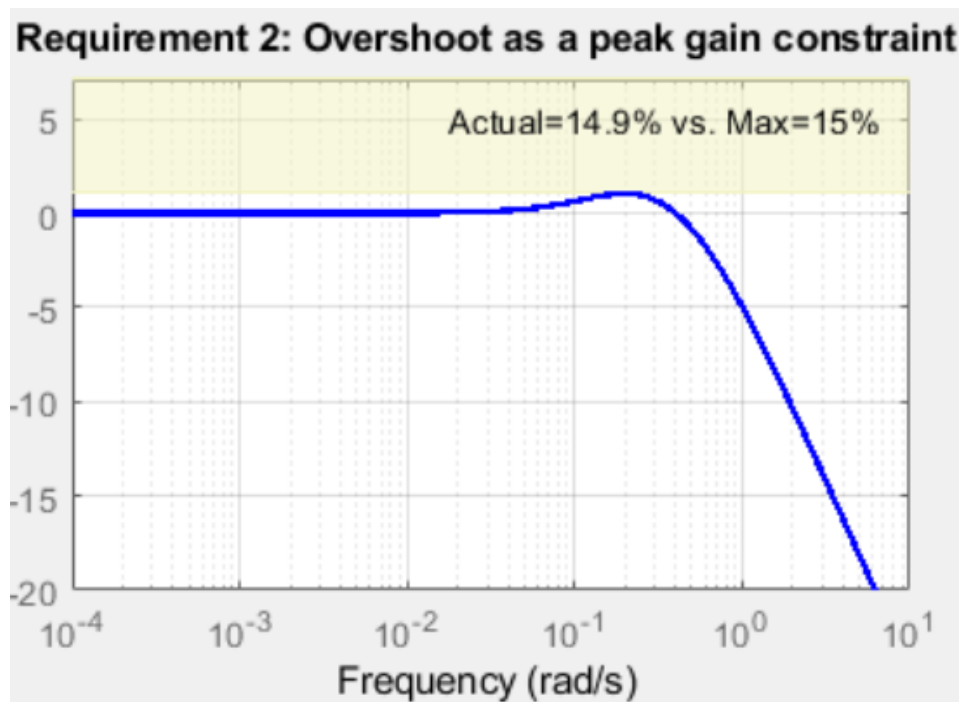


Рис. 2.14 – Перерегулювання системи

Подана нижче реакція системи на збурення знаходиться всередині контуру та залишається в межах безпечної зони, не досягаючи та не торкаючись краю найгіршої можливої реакції системи. У разі виходу за цю межу система автоматично вимикається.

Такий рівень контролю та автоматичної реакції забезпечує надійний захист від потенційних проблем і збоїв у роботі. Механізм гарантує, що система функціонуватиме у безпечному режимі, мінімізуючи ризик аварійних ситуацій та забезпечуючи стабільну продуктивність протягом усього періоду експлуатації.

Це має ключове значення для забезпечення безперервності роботи та захисту обладнання від пошкоджень.

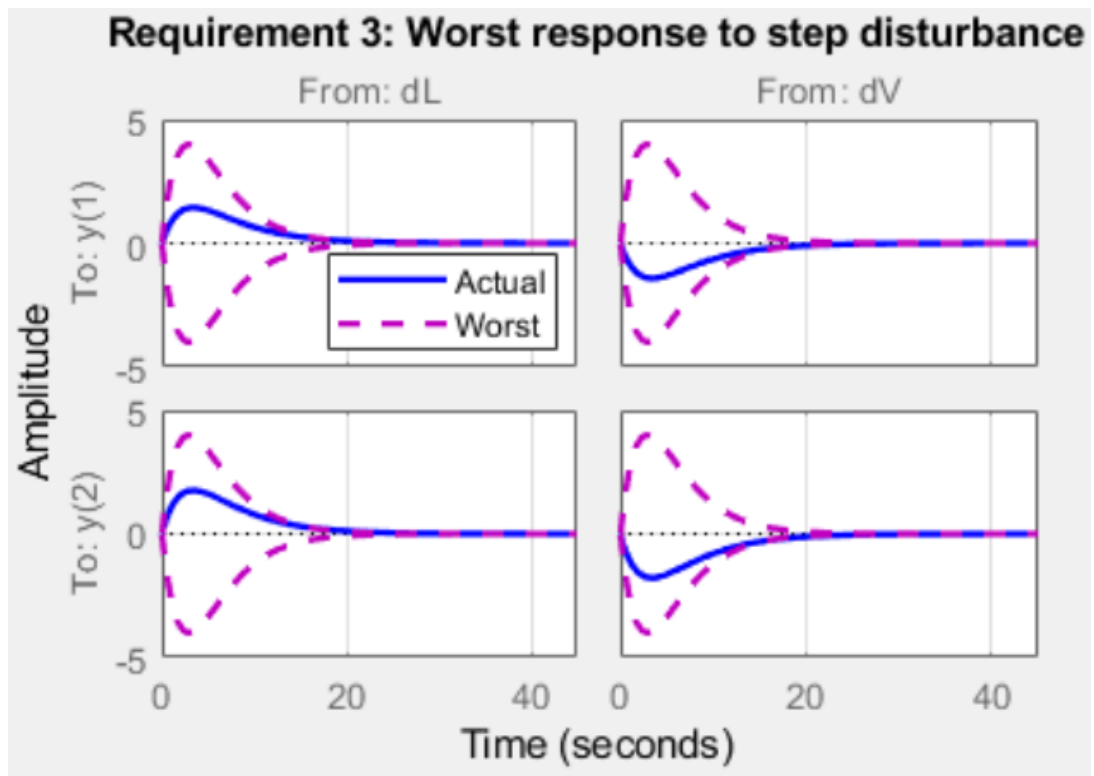


Рис.2.15 – Реакція системи на збурення

Нижче наведені графіки, що демонструють запаси стійкості. Як і в попередніх випадках, якщо система залишається поза затемненою областю, це свідчить про її надійну роботу та успішне проходження всіх процесів.

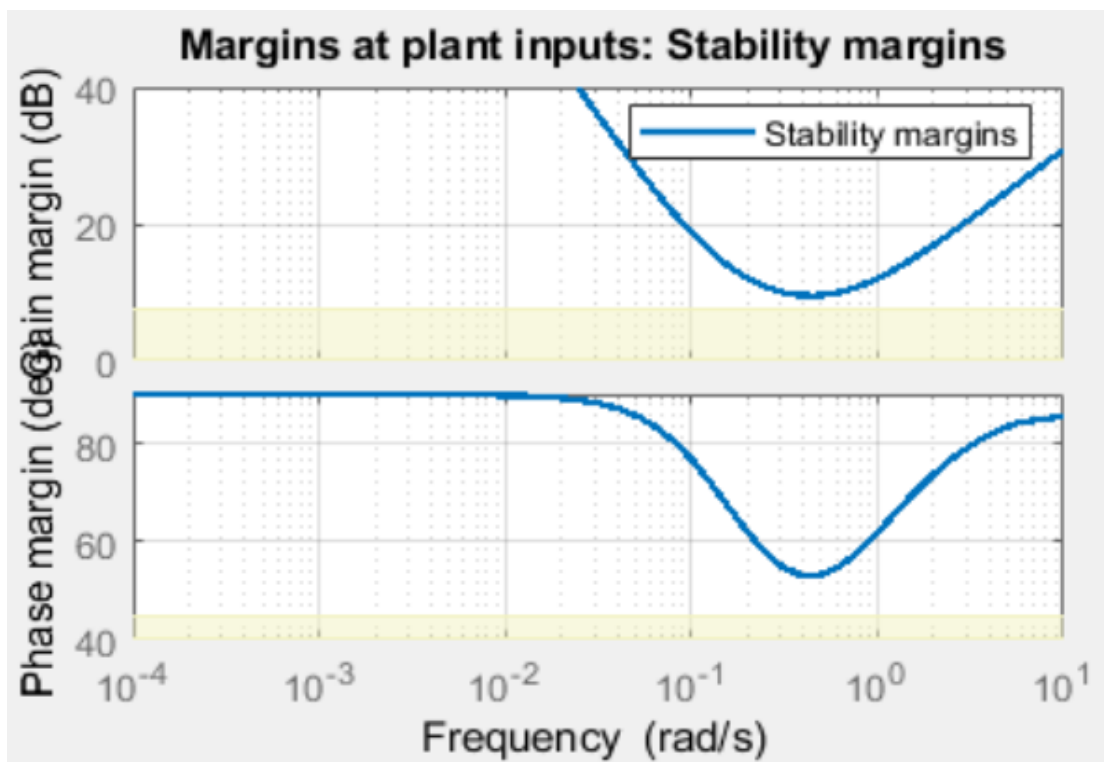


Рис. 2.16 – Запаси стійкості

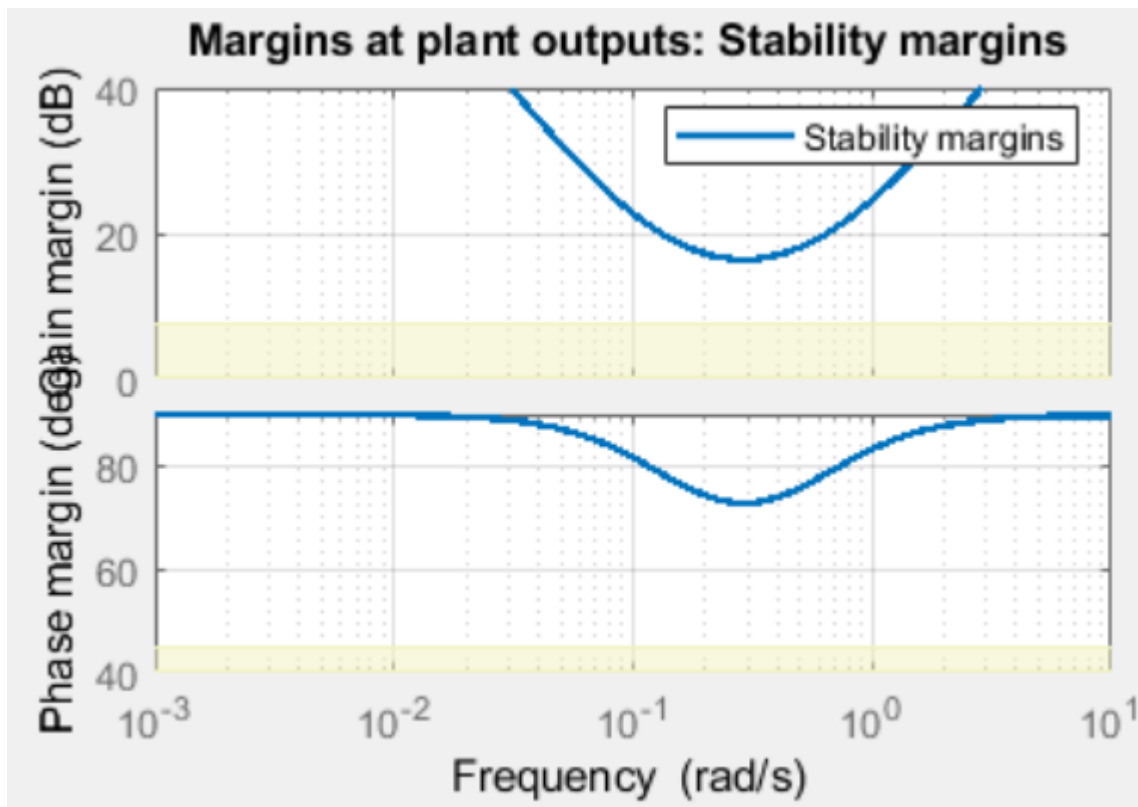


Рис. 2.17 – Запаси стійкості

З аналізу наведених обчислень можна зробити такі висновки. Для досягнення оптимальних значень параметрів ректифікаційної колони знадобилося 58 ітерацій, при цьому фінальне значення близьке до 1, що свідчить про виконання всіх поставлених вимог. На графіках видно, що фактичний максимум перерегулювання становить 14,9% при допустимому максимумі 15%, петлеві підсилення та їх масштабовані значення перебувають у межах цільової форми петлі, а фактичні та найгірші відгуки на ступінчасте збурення підтверджують стабільність системи, оскільки бажані відповіді розташовані поза затемненими областями — що підтверджує відповідність системи заданим параметрам.

Відгуки на ступінчасте збурення підтверджують стабільність системи, бо бажані відповіді знаходяться поза затемненими областями. У розділі «Margins at plant outputs: Stability margins» також показано, що фазовий та амплітудний запаси перебувають у допустимих межах, що додатково підтверджує стійкість системи. Загалом результати графіків демонструють, що система стабільно працює в межах встановлених вимог, забезпечуючи необхідну якість регулювання та відгуку на

збурення, що підтверджено візуальною перевіркою за допомогою команди *loopview*.

## **Висновки до розділу 2**

У межах розділу 2 було виконано синтез та моделювання МІМО-системи керування ректифікаційною колоною, що дозволило сформулювати математичну основу для подальшого проектування ефективної системи автоматичного регулювання. На основі отриманих вихідних значень проведено формалізацію динаміки процесу та побудовано математичні моделі, які адекватно відтворюють взаємозв'язки між основними технологічними параметрами — температурою, концентрацією, витратою та тепловими потоками.

У ході моделювання досліджено поведінку об'єкта в багатозв'язному режимі та визначено ключові перехресні впливи, що є критично важливими при побудові МІМО-системи. На основі аналізу частотних характеристик та критеріїв стійкості обґрунтовано вибір оптимального типу регулятора, здатного забезпечити швидкодію, точність та мінімальний рівень перерегулювання в умовах змінних навантажень і високої чутливості ректифікаційного процесу.

Проведене параметричне налаштування дозволило визначити оптимальні коефіцієнти типових регуляторів, що забезпечують стабільність системи, зменшення переходних коливань та підвищення якості розділення суміші. Таким чином, результати розділу підтверджують можливість ефективного застосування МІМО-підходу для керування ректифікаційною колоною та створюють теоретичну і практичну основу для подальшої оптимізації системи.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

#### **3.1. Оптимізаційні методи забезпечують покращення якості перехідного процесу**

Процес налаштування параметрів регуляторів у системах автоматичного керування є одним із ключових етапів забезпечення їхньої стабільної та ефективної роботи. Традиційні аналітичні методи синтезу регуляторів не завжди дозволяють отримати оптимальні параметри, особливо у випадку нелінійних, багатофакторних або складноструктурованих об'єктів, характерних для енергетичних та промислових установок. Тому виникає потреба у застосуванні сучасних методів оптимізації, здатних ефективно знаходити мінімум цільової функції навіть у разі наявності локальних екстремумів або значного рівня шуму.

Вибір методу оптимізації [7] для налаштування параметрів регуляторів визначається вимогами до точності, швидкодії та надійності системи. У роботі розглянуто можливості застосування сучасних стохастичних та детермінованих алгоритмів оптимізації — зокрема, методу зозулі (Cuckoo Search), симплекс-методу Нелдера–Міда та методу імітаційного відпалу. Кожен із цих підходів має свої переваги, що дозволяє здійснити ефективний пошук оптимальних коефіцієнтів регулятора у складному просторі параметрів.

Оптимізаційні методи забезпечують покращення якості перехідного процесу, зменшення енергетичних затрат та підвищення точності керування, що є критично важливим для систем подачі твердого палива та інших технологічних процесів, де стабільність режиму роботи прямо впливає на ефективність і безпеку установки.

#### **3.2 Метод зозулі**

Метод зозулі — це алгоритм оптимізації, натхненний поведінкою зозуль, які підкидають свої яйця в чужі гнізда. Запропонований у 2009 році Янгом і Дебом,

цей метод ґрунтується на випадковому переміщенні «зозуль» у просторі пошуку, використанні найкращих рішень для покращення поточного положення та підтриманні балансу між інтенсифікацією і диверсифікацією в процесі оптимізації. Алгоритм зозулі довів свою ефективність у різних сферах оптимізації, зокрема й у моїй системі.

Суть методу полягає у випадковому переміщенні агентів, що дозволяє уникнути потрапляння в локальні оптимуми й забезпечує більш повне дослідження простору рішень. Агенти також використовують інформацію про найкращі знайдені рішення для покращення своїх поточних позицій. Метод містить метопараметри, які забезпечують баланс між інтенсифікацією та диверсифікацією у процесі оптимізації.

Основні принципи методу включають випадковий пошук і використання найкращих рішень для покращення поточного положення. Переміщення «зозуль» або агентів може бути подано формулою, що містить випадкову складову та враховує найкраще рішення:

$$xi(t + 1) = xi(t) + \alpha \times rand() \times best() - xi(t) \quad (3.1)$$

Де  $xi(t)$ — поточне положення зозулі ( $i$ ) у момент часу ( $t$ ),  $\alpha$  — коефіцієнт руху,  $rand()$  — випадкова величина із заданого інтервалу,  $best()$  — інформація про найкраще знайдене рішення.

Недоліки методу зозулі:

- залежність від параметрів,
- можливість потрапляння у локальні оптимуми,
- відсутність гарантії знаходження глобального оптимуму,
- чутливість до вибору початкової точки та відсутність використання градієнтів.

Нижче на рисунку 3.1 наведено блок-схему, що демонструє принцип роботи алгоритму:

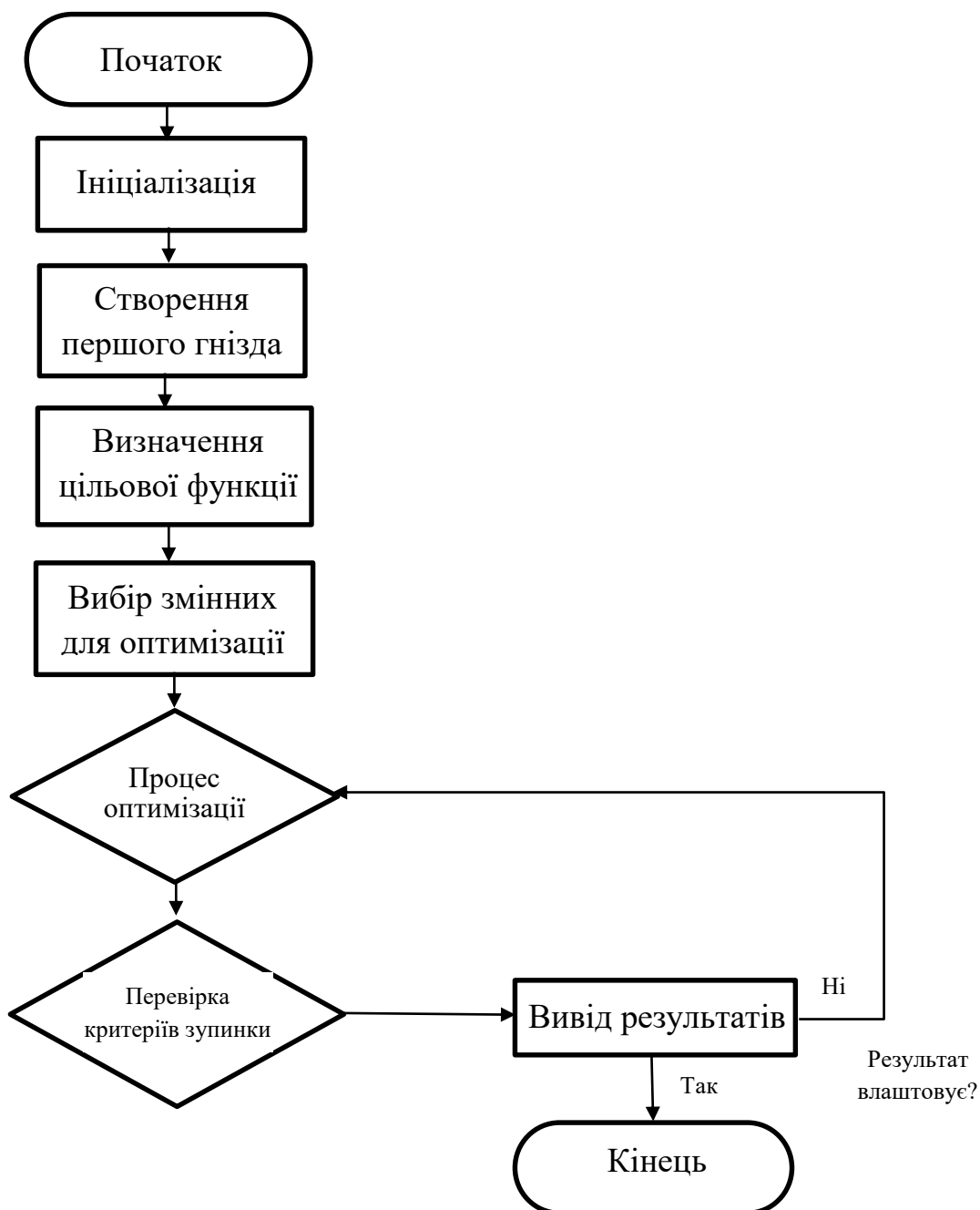


Рис. 3.1 – Блок-схема методу оптимізації зозулі

Далі цей алгоритм був реалізований у Python у додатку Г.

### 3.3. Метод симплекса

Наступним кроком буде розгляд методу симплекса, також відомого як метод Нелдера–Міда (Nelder–Mead). Цей алгоритм оптимізації не використовує

градієнтів і ідеально підходить для моєї системи, оскільки дозволяє знаходити мінімум або максимум у просторі параметрів.

Основні принципи методу симплекса включають створення початкового симплекса навколо стартової точки, виконання різних операцій із симплексом — таких як відбиття, розтягування, стискання та скорочення — для дослідження простору параметрів, а також його адаптивність, яка дозволяє змінювати розмір симплекса у процесі оптимізації відповідно до характеру функції.

Формули для цього методу виглядають так:

$$x_{\text{ц}} \xrightarrow{n=1} \frac{1^n}{n} \times x_i;$$

$$x_{\text{від}} = (1 + \beta\beta) \times x_{\text{ц}} - \beta \times xh ;$$

де:

$x_{\text{ц}}$  — центральна точка симплекса,

$x_{\text{від}}$  — відображена точка,

$xh$  — найгірша точка в симплексі,

$\beta\beta$  — коефіцієнт відбиття, що зазвичай набуває значень у діапазоні  $[0, \infty)$ .

Цей параметр визначає відстань між центральною та відображеною точками у процесі відбиття: при більшому значенні  $\beta$  нова точка буде далі від центра симплекса. Формула використовується для обчислення нової точки у просторі параметрів для оцінки значення цільової функції. Відбиття є важливим етапом алгоритму Нелдера–Міда, який забезпечує ефективне дослідження простору параметрів.

Недоліки методу симплекса включають:

- нестійкість до екстремальних точок у просторі параметрів,
- залежність від вибору початкового симплекса,
- чутливість до розміру кроку та коефіцієнтів,
- відсутність гарантії знаходження глобального оптимуму,
- низьку ефективність у просторах високої розмірності,

- невикористання градієнта,
- відсутність суворої теоретичної бази, що може вплинути на ефективність у різних задачах.

Нижче наведено блок-схему, яка ілюструє принцип роботи цього методу оптимізації:

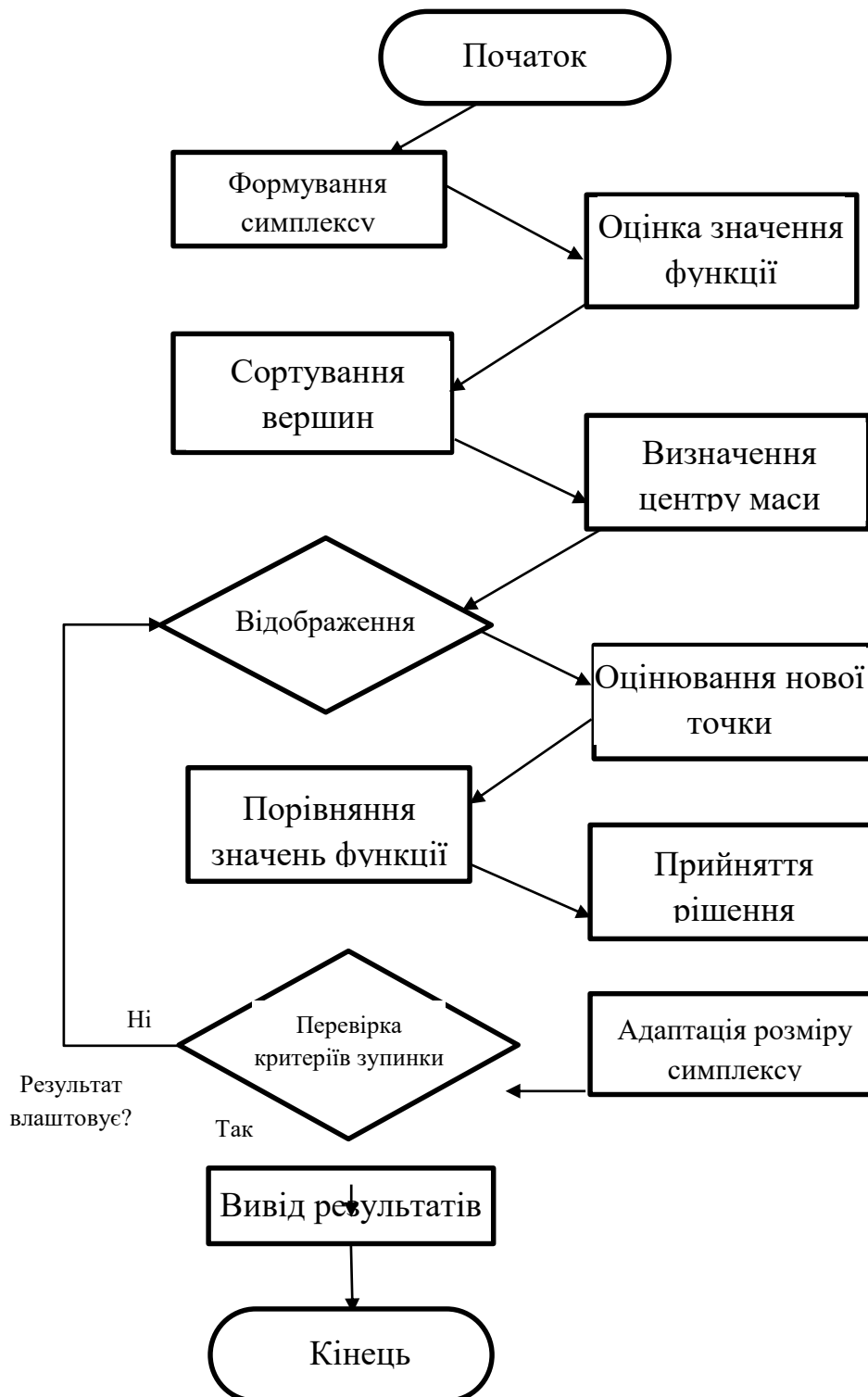


Рис. 3.2 – Блок-схема методу оптимізації симплекса

Далі цей алгоритм був реалізований у Python у додатку Д.

### 3.4. Метод відпалу металу

Метод відпалу, натхнений процесом термічного відпалу металів у металургії, є стохастичним методом глобальної оптимізації, ефективним у просторах змінних з великою кількістю локальних оптимумів. Його основна ідея полягає в імітації процесу відпалу металу, коли нагрітий матеріал поступово впорядковує свою структуру. В оптимізаційній задачі це означає випадкові зміни поточного розв'язку, прийняття нових рішень навіть у тому випадку, якщо вони погіршують значення цільової функції, а також поступове зменшення імовірності прийняття гірших рішень.

Метод відпалу є стохастичним, що допомагає уникати потрапляння в локальні мінімуми. Адаптивність температури дає змогу починати з грубих кроків для глобального пошуку, поступово уточнюючи рішення. Ймовірнісний характер алгоритму дозволяє приймати гірші рішення з певною ймовірністю, що запобігає «застряганню» в локальних оптимумах і забезпечує гнучкість у дослідженні простору параметрів.

Основні елементи методу відпалу включають поняття енергії та кроку. Енергію (цільову функцію) позначимо як  $E(x)$  — саме її потрібно мінімізувати.

Крок Метрополіса — це випадкові зміни параметрів, які виконуються за допомогою правила Метрополіса. Якщо  $x'$  — новий стан, а  $x$  — поточний, то перехід здійснюється з імовірністю:

$$P(x') \min\left(1, \exp\left(\frac{E(x) - E(x')}{T}\right)\right)$$

де  $T$  — поточна температура.

Зменшення температури: температура зменшується за графіком відпалу, наприклад:

$$T_{\text{нов}} = \alpha \times T_{\text{пот}}$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт охолодження.

Нижче наведена блок-схема цього методу оптимізації.

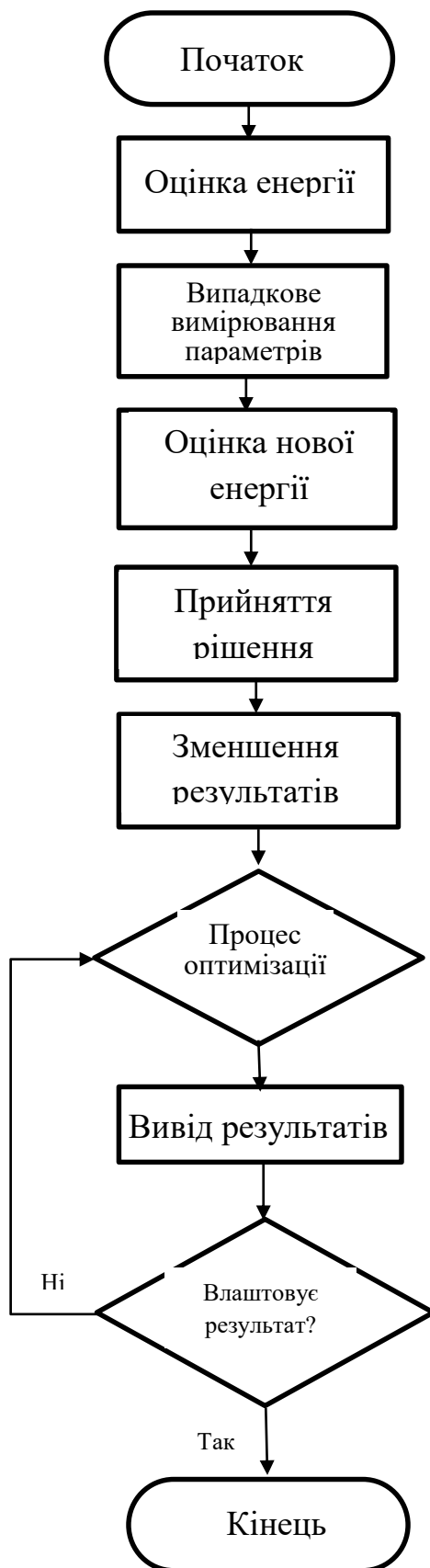


Рис. 3.3 – Блок-схема методу оптимізації відпалу

Далі цей алгоритм був реалізований у Python у додатку E.

Усі результати моделювання методів оптимізації були внесені до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

### Результати обчислень алгоритмів

Метод оптимізації	Найкраще знайдене рішення	Значення функціонала якості (сума квадратів)
Метод зузулі	$[-3.56520281, 0.52000871, 2.86847197, -0.66984095, 0.34512448]$	21.77700936928991
Метод симплекса	$[-2.70843631e - 05, 3.39862354e - 05, 1.64547266e - 05, 3.97013231e - 05, 3.40322189e - 05]$	4.893771922522847
Метод відпалу металу	$[0.30827278612486486, -0.1288000060704103407109322392917, -0.259514399037747025357827240500654]$	0.180773134332681

Після аналізу різних методів оптимізації для розв'язання задачі найбільш підходящим спочатку здавався метод симплекса. Цей метод особливо ефективний для багатозв'язаних систем, подібних до нашої, де потрібно оптимізувати декілька взаємопов'язаних змінних. Такі системи через свою складність та наявність численних локальних екстремумів висувають високі вимоги до методів оптимізації. Метод симплекса, завдяки здатності знаходити глобальний мінімум, показав себе доволі придатним для наших цілей.

Однак для підтвердження цього вибору було проведено додаткове моделювання мовою Python. У процесі моделювання були протестовані кілька методів оптимізації, зокрема метод симплекса та метод відпалу металу. Результати показали, що метод відпалу металу продемонстрував найкращий результат.

Зокрема, значення функціонала якості при використанні методу відпалу металу виявилось найменшим і становило 0.1807. Це значення суттєво нижче, ніж

у всіх інших протестованих методів, що свідчить про високу ефективність методу відпалу металу для нашої задачі.

Метод відпалу металу, завдяки стратегії глобального пошуку та здатності уникати локальних мінімумів, забезпечив найбільш оптимальне рішення.

### 3.5. Удосконалення модесі процесу пектифікації з використанням методу оптимізації

Наступним етапом після вибору найбільш придатного методу оптимізації буде налаштування регуляторів із застосуванням методу відпалу металу, значення для регулятора наведено нижче на рисунку 3.4.

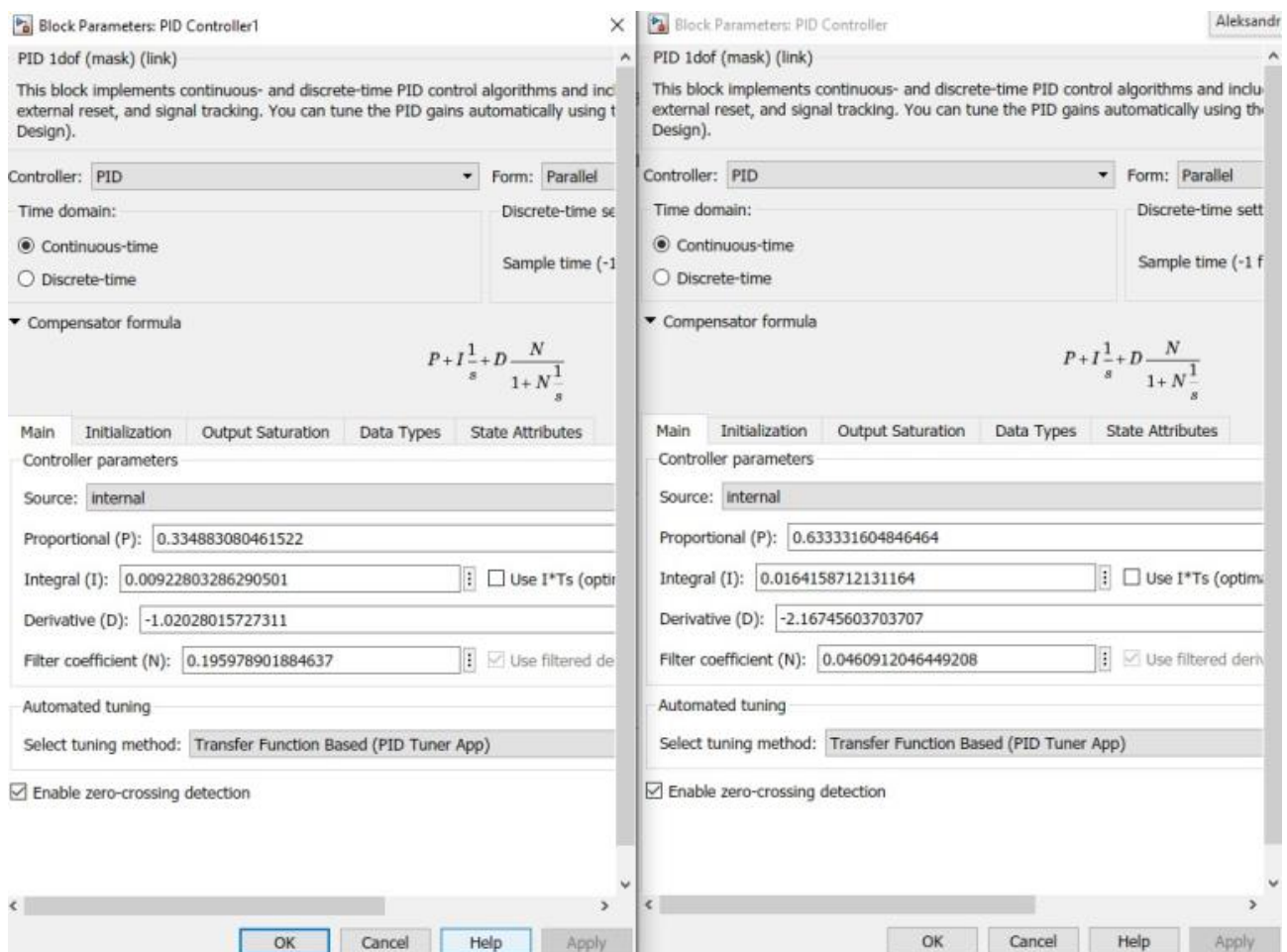


Рис. 3.4 – Налаштування регуляторів із застосуванням методу оптимізації

Після проведення моделювання та застосування методу відпалу металу наша модель набула остаточного вигляду, який представлено на рисунку 3.5. Модель включає в себе багато взаємопов'язаних елементів, кожен із яких був оптимально налаштований.

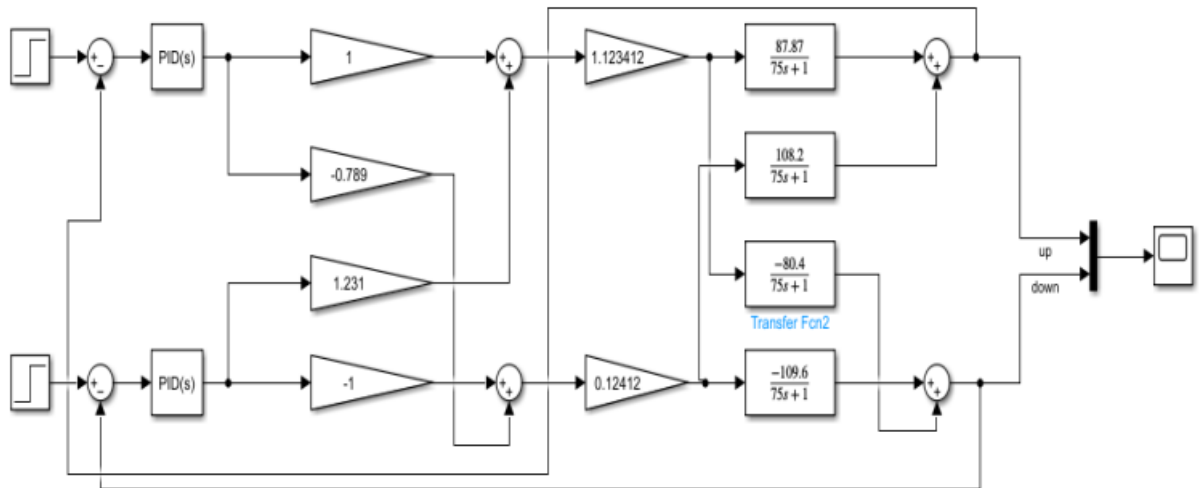


Рис. 3.5 – Модель у Simulink після оптимізації

Також був отриманий результат моделювання, який наведено на рисунку 3.6.

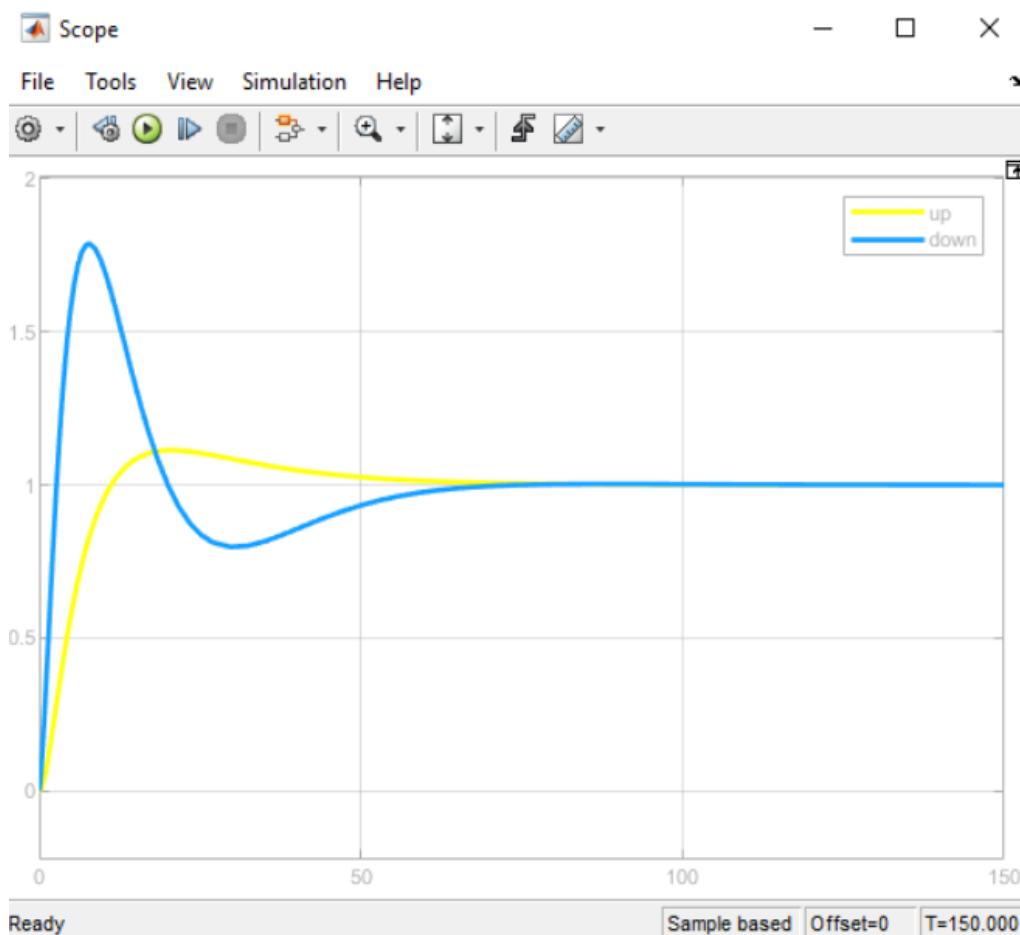


Рис.3.6 – Вихідний сигнал після оптимізації

Далі були отримані прямі оцінки якості, наведені нижче в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

### Прямі оцінки якості

Вид оцінки	Без регулятора	З регулятором	Примітки
Час регулювання	100 с	60 с	Значний приріст швидкості
Перерегулювання	60%	21.8%	Відповідає
Кількість коливань	4	1	Відповідає
Коливальність	36.7%	–	Відповідає
Період коливань	20 с	–	Відповідає

Продовження таблиці 3.2

Вид оцінки	Без регулятора	З регулятором	Примітки
Установлена помилка	–	–	–
Перший максимум	14 с	9 с	Відповідає
Час наростання	10 с	8 с	Відповідає
Декремент затухання	0.33	–	–

Аналізуючи результати прямих оцінок якості, можна зробити висновок, що налаштування регуляторів пройшло успішно. Перерегулювання зменшилось утричі, швидкість переходу системи до усталеного значення суттєво зросла, а правильно налаштований регулятор дозволив усунути коливання в системі. Ці покращення свідчать про високу якість налаштування регуляторів та ефективність застосованого методу оптимізації.

Наступним етапом дослідження є визначення запасу стійкості для цієї системи. Для цього за допомогою Matlab були побудовані графіки Боде, Найквіста та сингулярних значень. Графіки Боде дають змогу аналізувати амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики системи, графік Найквіста відображає її частотні характеристики на комплексній площині, а графіки сингулярних значень показують максимальні та мінімальні підсилення системи на різних частотах.

Ці графіки наочно демонструють поведінку системи в частотній області та дозволяють оцінити її стійкість і запас стійкості. Детальний код для побудови цих графіків наведений у додатку В, що забезпечує можливість відтворення та подальшого аналізу отриманих результатів.

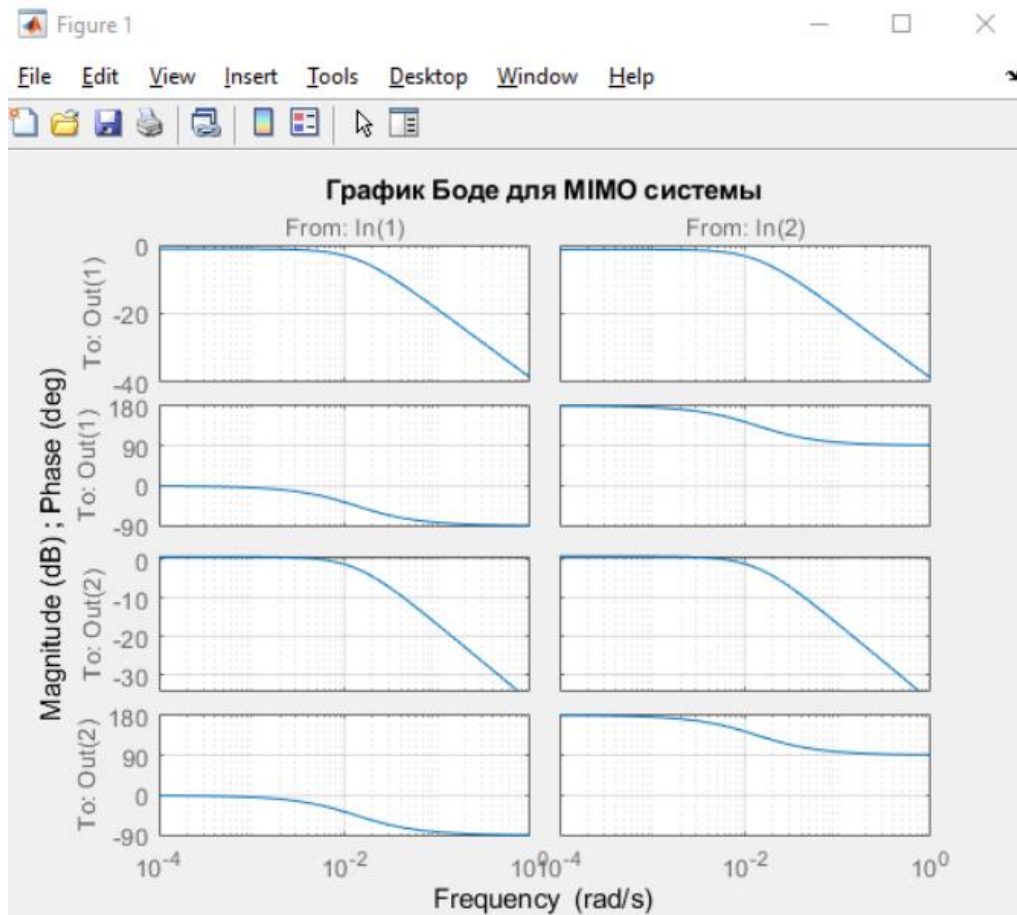


Рис. 3.7 – Графік Боде для МІМО-системи

Графік Боде демонструє амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики системи для кожної пари вхід–вихід. З графіка видно, як змінюється амплітуда та фаза передатних функцій залежно від частоти.

- Амплітуда (Magnitude) для всіх пар вхід–вихід зменшується зі зростанням частоти, що вказує на фільтрувальну поведінку системи, тобто ослаблення сигналів на високих частотах.

- Фаза (Phase) також змінюється з частотою, демонструючи фазову затримку при високих частотах, що свідчить про часові затримки в системі та її реакцію на швидкозмінні вхідні сигнали.

Далі був побудований графік Найквіста, який наведений нижче на рисунку 3.8.

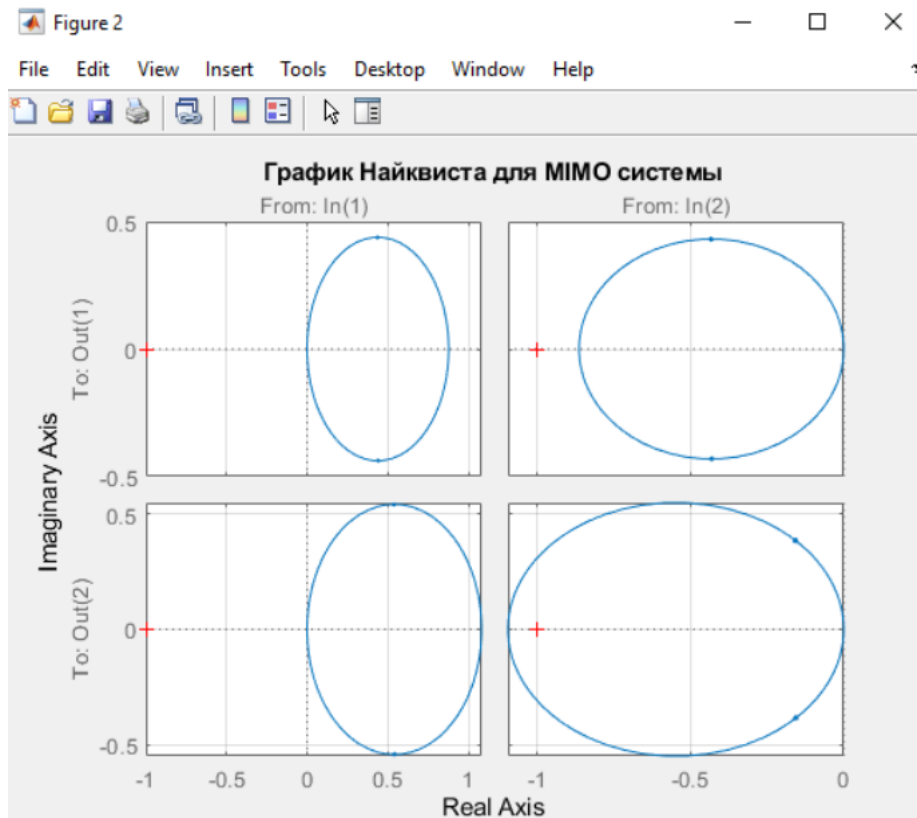


Рис. 3.8 – Графік Найквіста для ММО-системи

Графік Найквіста показує траєкторію, якою рухається система в комплексній площині при зміні частоти. Кожна петля на цьому графіку відповідає реакції однієї з пар «вхід-вихід». Петлі на графіку Найквіста не перетинають від'ємну дійсну вісь, що є позитивним показником стійкості системи, оскільки це свідчить про відсутність точок із критичним підсиленням та фазовим зсувом, які могли б спричинити нестабільність.

Форма петель також вказує на відносну стійкість системи, демонструючи, що система зберігає стабільність за різних частот, мінімізуючи амплітуду коливань і запобігаючи виникненню резонансних ефектів. Такий аналіз підтверджує, що система не схильна до коливань або нестабільної поведінки під час зміни частоти вхідного сигналу.

Далі були отримані сингулярні значення для ММО-системи, наведені на рисунку 3.9.

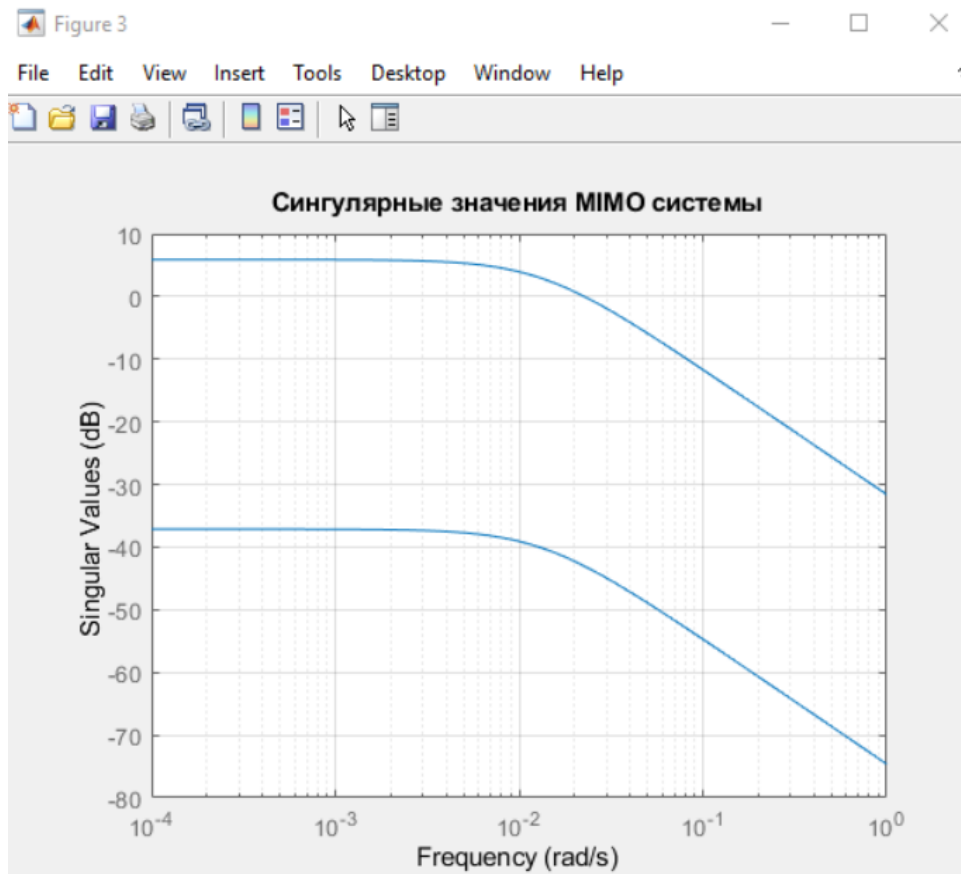


Рис. 3.9 – Сингулярні значення МІМО-системи

Сингулярні значення відображають максимальне та мінімальне підсилення системи залежно від частоти. Максимальні сингулярні значення зменшуються зі зростанням частоти, що означає, що система стає менш чутливою до збурень на високих частотах. Це вказує на фільтрувальну поведінку системи, коли високочастотні шуми та збурення ефективно приглушуються.

Мінімальні сингулярні значення також зменшуються, що свідчить про зниження чутливості системи на високих частотах. Це означає, що система стає менш реактивною до вхідних сигналів при високих частотах, що сприяє підвищенню стійкості системи щодо частотних збурень.

Наступним кроком є аналіз графіків запасу стійкості для чотирьох каналів даної системи, наведених на рисунках 3.10–3.13.

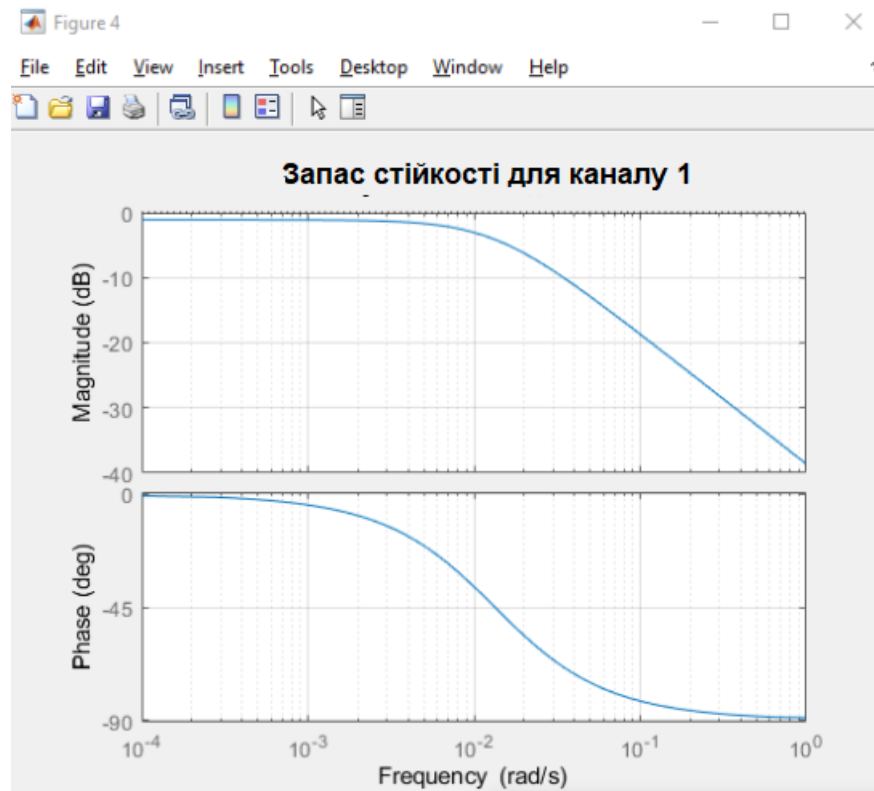


Рис. 3.10 – Запаси стійкості для каналу 1

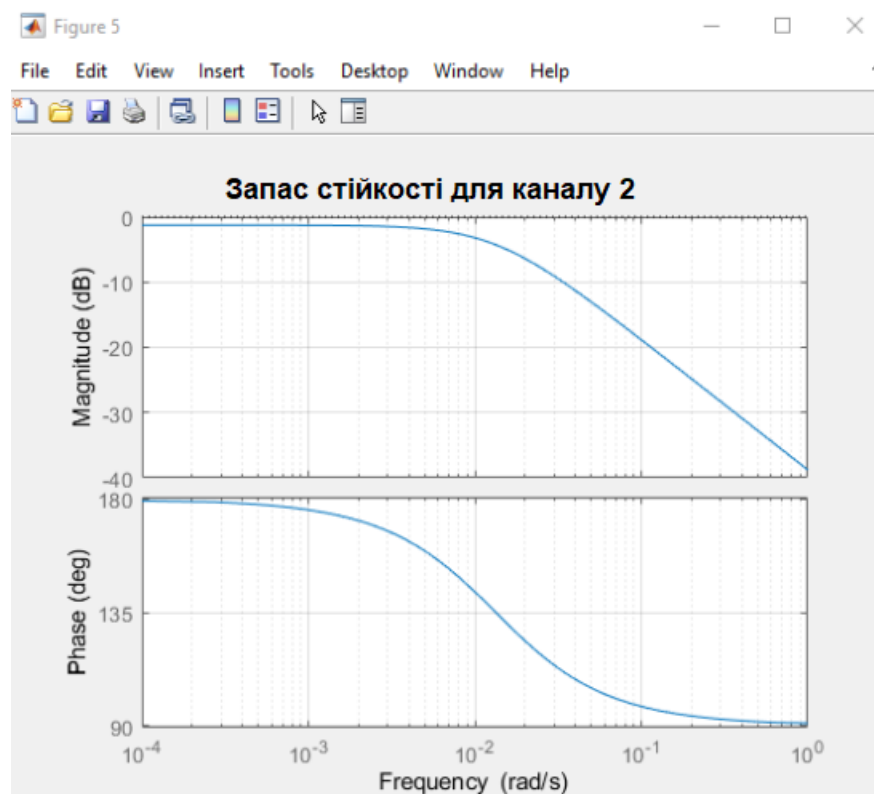


Рис. 3.11 – Запаси стійкості для каналу 2

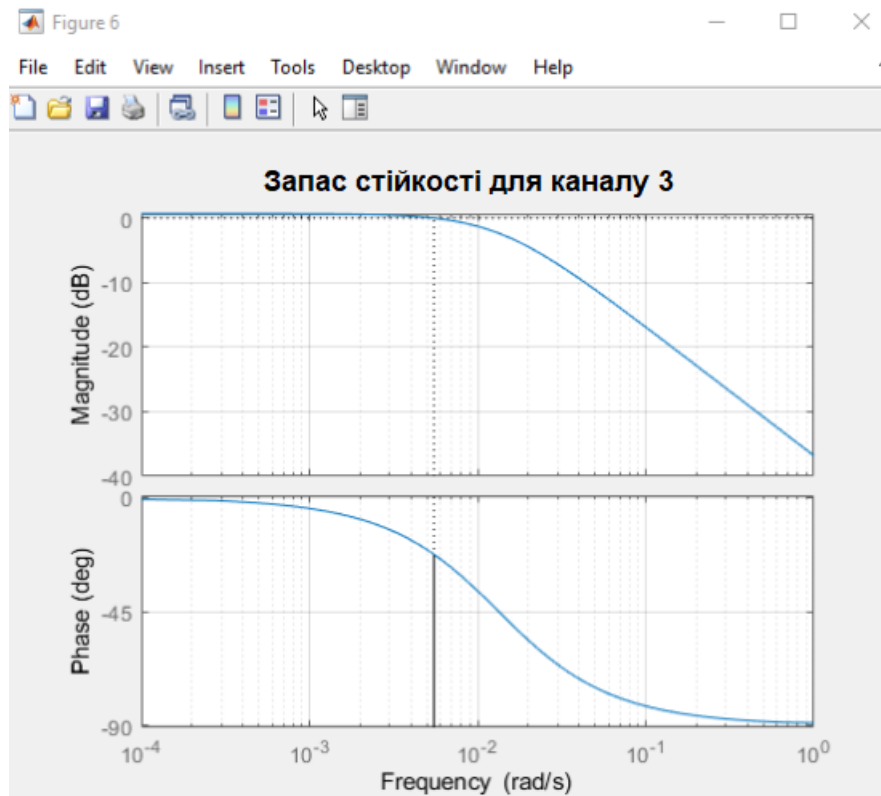


Рис. 3.12 – Запас стійкості для каналу 3

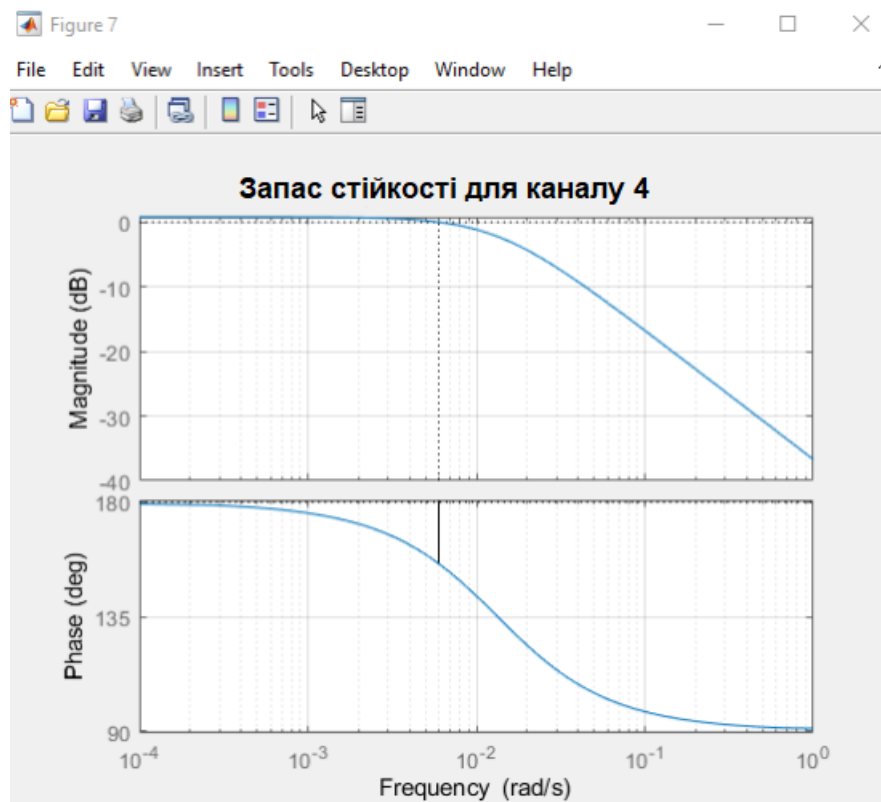


Рис. 3.13 – Запас стійкості для каналу 4

Аналіз каналів МІМО-системи показує, що кожен канал має свою специфічну характеристику, проте всі канали демонструють стійку поведінку за різних частот. Максимальні та мінімальні сингулярні значення, а також запаси стійкості свідчать про здатність системи зберігати стабільність навіть за змін параметрів підсилення та фази. Це робить систему надійною для застосування в реальних умовах експлуатації.

Завдяки графікам та роботі в командному рядку Matlab були отримані значення запасів стійкості за амплітудою та фазою — 21.45 дБ і 161 градус, що є чудовим показником та підтверджує високу стійкість системи.

### **Висновки до розділу 3**

У розділі 3 було розглянуто та проаналізовано сучасні методи оптимізації параметрів регуляторів, що дозволяють підвищити ефективність систем автоматичного керування складними технологічними процесами, зокрема ректифікації. Показано, що застосування оптимізаційних алгоритмів забезпечує покращення динамічних характеристик системи, зменшення перерегулювання, скорочення часу перехідного процесу та підвищення точності стабілізації керованих параметрів.

Детально досліджено особливості трьох евристичних методів — методу зозулі, методу симплекса та методу імітації відпалу. Кожен із них продемонстрував здатність знаходити оптимальні або близькі до оптимальних значення коефіцієнтів регулятора за умов нелінійності, багатовимірності та сильної взаємозалежності між змінними, що характерно для процесів ректифікації. Проведений порівняльний аналіз підтвердив, що різні методи мають власні переваги: метод зозулі забезпечує швидко глобальну збіжність, метод симплекса дає точні локальні рішення без потреби в похідних, а метод відпалу металу дозволяє уникати потрапляння в локальні мінімуми.

Застосування цих оптимізаційних алгоритмів для удосконалення математичної моделі ректифікаційної колони продемонструвало суттєве

підвищення якості регулювання. Модифікована модель виявила покращені показники стабільності та керованості, а оптимізовані параметри регулятора забезпечили більш ефективну роботу системи за змінних технологічних умов. Таким чином, результати даного розділу підтверджують доцільність використання методів оптимізації як ключового інструмента для підвищення ефективності систем автоматичного керування в процесах ректифікації.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження процесів ректифікації та дистиляції, математичного моделювання багатовимірних систем керування, а також застосування сучасних методів оптимізації для підвищення ефективності систем автоматичного регулювання. Отримані результати дозволили сформулювати цілісну науково-прикладну основу для вдосконалення системи керування дистиляційною колоною газової промисловості та підтвердили доцільність використання МІМО-підходів і евристичних алгоритмів оптимізації у складних технологічних процесах.

У першому розділі роботи було проаналізовано фізико-технологічні принципи процесів ректифікації та дистиляції, а також конструктивні особливості колонного обладнання. Розглянуто основні елементи ректифікаційної колони, механізми тепло- та масообміну, а також типові контури керування, що формують динаміку процесу. Дослідження показало, що ефективне управління ректифікаційною колоною вимагає комплексного врахування взаємозалежних параметрів, таких як температура, концентрація та витрати потоків, що визначає необхідність використання багатовимірних систем керування.

У другому розділі проведено математичне моделювання та синтез МІМО-системи керування ректифікаційною колоною. Створено адекватні моделі процесу, що враховують перехресні зв'язки між каналами, та проведено аналіз частотних характеристик для вибору оптимальної структури регулятора. Параметричне налаштування регуляторів дозволило отримати стабільну систему з покращеними динамічними показниками, зменшеними перехідними коливаннями та високою точністю регулювання. Результати моделювання підтвердили доцільність використання МІМО-керування для підвищення точності та надійності процесу розділення сумішей.

У третьому розділі досліджено сучасні евристичні методи оптимізації параметрів регуляторів, зокрема метод зозулі, метод симплекса та метод імітації відпалу. Проведений аналіз показав, що кожен з методів має специфічні переваги

при роботі з нелінійними та багатовимірними моделями ректифікаційного процесу. Використання оптимізаційних алгоритмів дало змогу підвищити точність стабілізації вихідних параметрів, скоротити час перехідних процесів та забезпечити кращу збіжність системи за умов змін технологічних навантажень.

У заключній частині роботи підтверджено, що розроблена система автоматичного керування демонструє високий рівень стійкості та надійності. Дослідження запасів стійкості (21.45 дБ за амплітудою та  $161^\circ$  за фазою) засвідчили готовність системи до промислового застосування. Оптимізація параметрів регуляторів сприяла покращенню якості продукції, зменшенню енергоспоживання, підвищенню продуктивності та мінімізації впливу людського фактора. Отримані результати мають значний практичний потенціал і можуть бути використані для модернізації дистиляційних та ректифікаційних установок у газовій, нафтохімічній та хімічній промисловості.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Склабінський В.І. С 43 Технологічні основи нафто- та газопереробки: навчальний посібник / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.Є.Артюхов. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 186 с.:
2. Система видобування, збирання і підготовки газу і газоконденсату [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0\\_%D0%B2%D0%B8%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F,\\_%D0%B7%D0%B1%D0%B8%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F\\_%D1%96\\_%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%B3%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B8\\_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D1%83\\_%D1%96\\_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B0%D1%82%D1%83](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%B2%D0%B8%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F,_%D0%B7%D0%B1%D0%B8%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D1%96_%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%B3%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B8_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D1%83_%D1%96_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B0%D1%82%D1%83)
- 3 Великонська Н.М., Надточій А.А. Поверхневі явища та дисперсні системи: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 78 с.
4. Автоматизація процесів ректифікації. Режим доступу: [https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib\\_upload/... /lek1/lek7.html](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/... /lek1/lek7.html).
5. Тимофеев, Є. М. ., & Лисенко, О. І. . Застосування технології МІМО для підвищення ефективності функціонування мобільних сенсорних мереж. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», 2025, с. 308–311. Режим доступу: <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/333380>.
6. Кравчук С.О., Голубничий О.Г., Тараненко А.Г., Потапов В.Г., Ткалич О.П. Системи зв'язку з рухомими об'єктами: Підручник. – Спец. видання. – К.: Вид-во ТОВ «Спринт-Сервіс», 2012. – 452 с.
7. Жалдак М.І., Триус Ю.В. Основи теорії і методів оптимізації: Навчальний посібник. - Черкаси: Брама-Україна, 2005. - 608 с. Режим доступу: [https://shron1.chtyvo.org.ua/Zhaldak\\_Myrosлав/Osnovy\\_teorii\\_i\\_metodiv\\_optymizatsii.pdf](https://shron1.chtyvo.org.ua/Zhaldak_Myrosлав/Osnovy_teorii_i_metodiv_optymizatsii.pdf).

# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

```

% Створення оператора Лапласа
s = tf('s');

% Модель об'єкта керування (передавальні функції)
G = [87.8 -86.4 ; 108.2 -109.6] / (75*s + 1);

% Імена входів та виходів моделі
G.InputName = {'L','V'};      % Входи: L - рівень, V - витрата
G.OutputName = {'yD','yB'};  % Виходи: yD - верхній продукт, yB - нижній продукт

% Відкриваємо модель у Simulink
open_system('rct_distillation')

% Ініціалізація блоку SISO LTI-Regulator в Simulink
ST0 = slTuner('rct_distillation', {'PID_L','PID_V','DM'});

% Вказуємо точки лінеаризації
addPoint(ST0, {'r','dL','dV','L','V','y'})

% Частота зрізу регулятора (ціль оптимізації)
wc = 0.5;

% Цілі тюнінгу:
OS = TuningGoal.Overshoot({'r','y'},15);      % Обмеження перерегулювання
DR = TuningGoal.StepRejection({'dL','dV'},'y',4,20); % Придушення збурень

% Задаємо, які сигнали є керуючими
Controls = {'L','V'};

% Задаємо вимірювані сигнали
Measurements = 'y';

% Налаштування регулятора (оптимізація)
[ST, gam, Info] = looptune(ST0, Controls, Measurements, wc, OS, DR);

% Побудова графіка частотних характеристик відкритої петлі
figure('Position',[0,0,1000,1200])
loopview(ST, Info)

% Отримуємо передавальну функцію по каналу "задання → вихід"
Ttrack = getIOTransfer(ST, 'r', 'y');

figure
step(Ttrack,40), grid
title('Setpoint tracking') % Відслідковування заданого сигналу

% ПФ для придушення збурень
Treject = getIOTransfer(ST, {'dV','dL'}, 'y');

figure
step(Treject,40), grid
title('Disturbance rejection') % Придушення збурень

% Частотний аналіз
clf
sigma(G, Treject), grid
title('Principal gains from input disturbances to outputs')
legend('Open-loop','Closed-loop')

% Отримуємо PID-параметри

```

```
PIDV = getBlockValue(ST, 'PID_V');

% Отримуємо параметри демпфувального модуля
DM = getBlockParam(ST0, 'DM');

% Корекція значень демпфування
DM.Gain.Value = diag([1 -1]); % Матриця посилень

DM.Gain.Free = [false true false]; % Фіксуємо деякі параметри

% Записуємо змінені параметри
setBlockParam(ST0, 'DM', DM)

% Переналаштування після змін
[ST, gam, Info] = looptune(ST0, Controls, Measurements, wc, OS, DR);

figure('Position', [0, 0, 700, 350])
subplot(121)

% Канал від завдання до виходу
Ttrack = getIOTransfer(ST, 'r', 'y');
step(Ttrack, 40), grid
title('Setpoint tracking')

subplot(122)

% Канал збурення до виходу
Treject = getIOTransfer(ST, {'dV', 'dL'}, 'y');
step(Treject, 40), grid
title('Disturbance rejection')

% Показати змінні регулятора, доступні для тюнінгу
showTunable(ST)
```

## Додаток Б

```

%-----
% Створення тюнованого елемента розв'язувача (Decoupler)
% Матриця діагональна: [1 0; 0 -1]
% Використовується для часткового розв'язання каналів L та V
%-----
DM = tunableGain('Decoupler', diag([1 -1]));
DM.Gain.Free = [false true false]; % Дозволяємо зміну тільки центрального
елемента

%-----
% Створення PI-регуляторів для каналів L та V
%-----
PI_L = tunablePID('PI_L', 'pi'); % PI-регулятор для L
PI_V = tunablePID('PI_V', 'pi'); % PI-регулятор для V

%-----
% Об'єднання регуляторів у блочну діагональ
% Потім множимо на розв'язувач DM, щоб сформувати МІМО-регулятор
%-----
C0 = blkdiag(PI_L, PI_V) * DM * [eye(2) -eye(2)];

% Вхідні та вихідні сигнали контролера
C0.InputName = {'Bsp', 'Bsp'}; % Сигнали помилки/задання
C0.OutputName = {'L', 'V'}; % Керуючі впливи

%-----
% Бажана частота зрізу (ціль оптимізації)
%-----
wc = 0.5;

%-----
% Цілі тюнінгу
%-----

% 1) Обмеження перерегулювання Output ← Setpoint
OS = TuningGoal.Overshoot({'Bsp', 'Bsp'}, {'yD', 'yB'}, 15);

% 2) Придушення збурень (L та V → yD, yB)
DR = TuningGoal.StepRejection({'L', 'V'}, {'yD', 'yB'}, 4, 20);

%-----
% Налаштування регулятора (оптимізація)
% G – модель процесу
% C0 – початкова структура контролера
%-----
[~, C] = looptune(G, C0, wc, OS, DR);

%-----
% Побудова передавальних функцій замкненої системи
%-----
Tcl = connect(G, C, {'Bsp', 'Bsp', 'L', 'V'}, {'yD', 'yB'});

figure('Position', [0, 0, 700, 350])

%-----
% Відслідковування заданого – step(Bsp → y)
%-----
subplot(121)
Ttrack = Tcl(:, 1:2); % Канали від Bsp до виходів
step(Ttrack, 40), grid

```

```
title('Setpoint tracking')

%-----
% Придушення збурень – step({dL,dV} → y)
%-----
subplot(122)
Treject = Tc1(:, 3:4);      % Канали від збурень до виходів
Treject.InputName = {'dL','dV'};
step(Treject, 40), grid
title('Disturbance rejection')
```

## Додаток В

```

%% Визначення змінної s для роботи з передавальними функціями
s = tf('s');

%% Визначення передавальних функцій для кожної пари вхід-вихід
G11 = 0.878 / (75*s + 1);
G12 = -0.864 / (75*s + 1);
G21 = 1.082 / (75*s + 1);
G22 = -1.096 / (75*s + 1);

%% Формування матриці передавальних функцій МІМО-системи
G = [G11, G12;
     G21, G22];

%% Побудова Боде-діаграм для всієї системи
figure;
bode(G);
grid on;
title('Боде-діаграма МІМО системи');

%% Побудова діаграми Найквіста
figure;
nyquist(G);
grid on;
title('Діаграма Найквіста для МІМО системи');

%% Аналіз сингулярних значень (σ-діаграма)
figure;
sigma(G);
grid on;
title('Сингулярні значення МІМО системи');

%% Визначення мінімального та максимального підсилення
[ mag, phase, w ] = bode(G); % Частотні характеристики
mag = squeeze(mag); % Перетворення 3D → 2D матриці

max_gain = max(mag(:)); % Максимальне сингулярне підсилення
min_gain = min(mag(:)); % Мінімумальне сингулярне підсилення

fprintf('Максимальне підсилення: %f\n', max_gain);
fprintf('Мінімумальне підсилення: %f\n', min_gain);

%% Обчислення запасів стійкості для кожної SISO-передавальної функції
G_asis = {G11, G12, G21, G22}; % Масив окремих каналів

for i = 1:length(G_asis)
    [gm, pm, Wcg, Wcp] = margin(G_asis{i});

    figure;
    margin(G_asis{i});
    grid on;
    title(sprintf('Запаси стійкості для каналу %d', i));

    fprintf('Канал %d:\n', i);
    fprintf(' Запас за коефіцієнтом підсилення = %f\n', gm);
    fprintf(' Запас за фазою = %f градусів\n', pm);
    fprintf(' Частота перетину по модулю = %f рад/с\n', Wcg);
    fprintf(' Частота перетину по фазі = %f рад/с\n\n', Wcp);
end

```

## Додаток Г

```

import random
import numpy as np

# -----
# Функція для оцінки якості рішення (міра придатності)
# Тут використовується сума квадратів усіх змінних
# -----
def evaluate_solution(solution):
    return np.sum(solution**2)

# -----
# Генерація випадкового рішення у заданому діапазоні
# -----
def generate_random_solution(dim):
    return np.random.uniform(-5, 5, dim)

# -----
# Реалізація алгоритму кукушкового пошуку (Cuckoo Search)
# -----
def cuckoo_search(num_nests, dim, num_iterations):

    # --- Початкова ініціалізація гнізд ---
    nests = [generate_random_solution(dim) for _ in range(num_nests)]

    # --- Основний цикл алгоритму ---
    for _ in range(num_iterations):

        for i in range(num_nests):

            # Вибір випадкового гнізда для переміщення
            j = random.randint(0, num_nests - 1)
            while j == i:
                j = random.randint(0, num_nests - 1)

            # --- Переміщення "кукушки" у нове гніздо ---
            step_size = 0.01 * random.random() * (nests[i] - nests[j])
            new_nest = nests[i] + step_size

            # --- Оцінка якості поточного і нового рішення ---
            current_fitness = evaluate_solution(nests[i])
            new_fitness = evaluate_solution(new_nest)

            # --- Заміна на краще рішення ---
            if new_fitness < current_fitness:
                nests[i] = new_nest

        # (За бажанням можна додати крок оновлення гнізд для різноманітності)

    # --- Повернення найкращого знайденого рішення ---
    fitness_values = [evaluate_solution(n) for n in nests]
    best_index = np.argmin(fitness_values)
    best_solution = nests[best_index]
    best_fitness = fitness_values[best_index]

    return best_solution, best_fitness

# -----
# Налаштування параметрів алгоритму
# -----
num_nests = 10
dim = 5

```

```
num_iterations = 100

# -----
# Запуск алгоритму кукушкового пошуку
# -----
best_solution, best_fitness = cuckoo_search(num_nests, dim, num_iterations)

# -----
# Вивід результатів
# -----
print("Найкраще знайдене рішення:", best_solution)
print("Значення функціонала якості (сума квадратів):", best_fitness)
```

## Додаток Д

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize

# Визначаємо цільову функцію, яку потрібно мінімізувати (сума квадратів елементів
вектора)
def objective_function(x):
    return np.sum(x**2)

# Початкове наближення (можемо задати випадкові значення в діапазоні [-5, 5])
initial_guess = np.random.uniform(-5.0, 5.0, size=5)

# Обмеження (у цьому випадку їх немає, залишаємо порожній список)
constraints = []

# Кількість змінних у задачі оптимізації (5 змінних)
num_variables = 5

# Запускаємо оптимізацію методом Нелдера-Міда (Nelder-Mead)
result = minimize(
    objective_function,
    initial_guess,
    method='Nelder-Mead',
    constraints=constraints
)

# Виведення результатів оптимізації
print("Знайдене розв'язання (мінімум функції):", result.x)
print("Значення функціонала якості (сума квадратів):", result.fun)
```

## Додаток Е

```

import math
import random

# Функція, яку ми хочемо мінімізувати (приклад функції з кількома змінними)
# Тут рахуємо суму квадратів елементів вектора
def objective_function(x):
    return sum([x1**2 for x1 in x])

# Функція для генерації випадкового сусіднього стану
# step_size визначає максимальний крок зміни координат
def generate_neighbor(current_state, step_size):
    return [x1 + random.uniform(-step_size, step_size) for x1 in current_state]

# Реалізація методу імітаційного відпалу
def simulated_annealing(initial_state, initial_temperature, cooling_rate,
                        min_temperature, num_iterations):

    current_state = initial_state
    current_temperature = initial_temperature

    best_state = current_state
    best_value = objective_function(current_state)

    # Головний цикл ітерацій
    for i in range(num_iterations):

        # Генеруємо випадкове сусіднє рішення
        neighbor_state = generate_neighbor(current_state, current_temperature)

        # Обчислюємо значення функції для поточного та сусіднього станів
        current_value = objective_function(current_state)
        neighbor_value = objective_function(neighbor_state)

        # Правило прийняття нового стану:
        # - Якщо він кращий – приймаємо одразу
        # - Якщо гірший – приймаємо з певною ймовірністю (залежить від
температури)
        if neighbor_value < current_value or random.random() <
math.exp((current_value - neighbor_value) / current_temperature):
            current_state = neighbor_state
            current_value = neighbor_value

        # Оновлюємо найкраще знайдене рішення
        if current_value < best_value:
            best_state = current_state
            best_value = current_value

        # Зменшуємо температуру за правилом охолодження
        current_temperature *= cooling_rate

        # Якщо температура стала надто низькою – завершуємо
        if current_temperature < min_temperature:
            break

    return best_state, best_value

# ==== Задаємо параметри методу відпалу ====

initial_state = [1.2, -0.8, 3.0, 4.0, -1.5] # Початковий вектор
initial_temperature = 10.0 # Початкова температура

```

```
cooling_rate = 0.95 # Коефіцієнт охолодження
min_temperature = 0.001 # Мінімальна температура
num_iterations = 1000 # Кількість ітерацій

# Запускаємо метод імітаційного відпалу
best_state, best_value = simulated_annealing(
    initial_state, initial_temperature, cooling_rate,
    min_temperature, num_iterations
)

# Виведення результатів
print("Найкраще знайдене стан:", best_state)
print("Значення функції в найкращому стані:", best_value)
```