

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»
(повне найменування вищого навчального закладу)

ІНЖЕНЕРНО - ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
«___» _____ 20__ р

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»

з напрямку підготовки 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему: Автоматизація процесу очищення газу від CO₂ розчином метилдиетаноламіну

Виконав: студент 4 курсу, групи ЛА-11
(шифр групи)

Билбас Дмитро Олексійович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Керівник доцент, к.т.н., с.н.с. Бугаєва Л. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Охорона праці ст. викл, к.т.н. Ковтун А. І.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що в цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань
Студент _____

(підпис)

Київ - 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інженерно-хімічний факультет
(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і назва)

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
хімічних виробництв»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віталій ЦАПАР
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Билбас Дмитру Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизація процесу очищення газу від CO₂ розчином метилдиетаноламіну,

керівник проекту Бугаєва Людмила Миколаївна, к. т. н., доцент,

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

затверджені наказом по університету від «__» травня

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту Загальна характеристика процесу очищення газу від CO₂; Автоматизація процесу очищення газу за допомогою MDEA; Математичне моделювання процесу абсорбції CO₂ у розчині MDEA; Дослідження системи керування технологічними параметрами процесу очищення; Оптимізація процесу очищення газу з використанням MDEA; Охорона праці при роботі з MDEA та вибухонебезпечними газами

4. Зміст пояснювальної записки Загальна характеристика процесу очищення газу від CO₂; Автоматизація процесу очищення газу за допомогою MDEA

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

Математичне моделювання процесу абсорбції CO₂; Дослідження системи керування в контурі очищення газу; Оптимізація процесу очищення газу з використанням MDEA; Охорона праці в установках абсорбції та регенерації.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Схема автоматизації процесу очищення газу від CO₂ за допомогою MDEA; Принципова електрична схема керування та аварійного захисту електромоторів при аварійній ситуації; Принципова електрична схема живлення приладів у контурі регулювання технологічного параметра

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Ковтун А. І., ст. викл., к.т.н.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз процесу очищення газу розчином метилдіетаноламіну	14.02.2025	
2	Проектування системи автоматизації	4.03.2025	
3	Математичне моделювання статичного режиму	25.03.2025	
4	Математичне моделювання динамічного режиму	3.04.2025	
5	Синтез та дослідження системи керування	23.04.2025	
6	Оптимізація процесу очищення газу розчином поташу	5.05.2025	
7	Розробка креслень	20.05.2025	
8	Охорона праці	24.05.2025	

Студент

_____ (підпис)

Билбас Д.О.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

_____ (підпис)

Бугаєва Л. М

(ініціали, прізвище)

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

РЕФЕРАТ

Проект складається із пояснювальної записки обсягом 96 сторінок, 27 рисунків, 13 літературних джерел, 3 додатків, 3 листа креслень формату А3.

У дипломному проекті досліджено та автоматизовано процес очищення газу від вуглекислого газу (CO_2) за допомогою розчину метилдиетаноламіну (MDEA). Розглянуто основні методи очищення промислових газів від CO_2 , їх переваги та недоліки, а також проаналізовано технологічну схему процесу. Особливу увагу приділено використанню MDEA як ефективного абсорбента, що забезпечує високу ступінь очищення газу при мінімальних енергетичних витратах. Розроблено схему автоматизації процесу, яка включає контури контролю основних параметрів (тиск, температура, концентрація CO_2 , рівень рідини), а також систему дистанційного керування насосами, регулюючими клапанами та іншими технологічними апаратами. Описано монтажно-комутаційну схему, що забезпечує надійну роботу всіх елементів системи автоматизації. Досліджено математичну модель процесу абсорбції CO_2 у розчині MDEA, реалізовану за допомогою програмного середовища MATLAB та проведено налаштування регуляторів різними методами (ПІД-регулятори, методи оптимізації) та вибрано оптимальні параметри, що забезпечують стабільність процесу та мінімальний час встановлення.

Отримані результати досліджень основних показників якості керування підтверджують ефективність запропонованої системи автоматизації та її відповідність сучасним вимогам енергоефективності та екологічної безпеки.

Ключові слова: очищення газу, вуглекислий газ (CO_2), метилдиетаноламін (MDEA), автоматизація, контур контролю, математична модель, регулятор, оптимізація, MATLAB.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

The project consists of a 99-page explanatory note, 27 figures, 13 literary sources, 3 appendices, 3 sheets of A3 drawings.

The thesis project explores and automates the process of gas purification from carbon dioxide (CO₂) using a methyldiethanolamine (MDEA) solution. The main methods of industrial gas purification from CO₂, their advantages and disadvantages, are considered, and the technological scheme of the process is analyzed. Particular attention is paid to the use of MDEA as an effective absorbent, which provides a high degree of gas purification with minimal energy consumption. An automation scheme for the process has been developed, which includes control loops for the main parameters (pressure, temperature, CO₂ concentration, liquid level), as well as a remote control system for pumps, control valves, and other technological equipment. A wiring diagram is described, ensuring reliable operation of all elements of the automation system. A mathematical model of the CO₂ absorption process in the MDEA solution, implemented using the MATLAB software environment, is investigated. The controllers are tuned using various methods (PID controllers, optimization methods), and optimal parameters are selected to ensure process stability and minimal settling time. The obtained results of the research on the main quality control indicators confirm the effectiveness of the proposed automation system and its compliance with modern requirements for energy efficiency and environmental safety.

Keywords: gas purification, carbon dioxide (CO₂), methyldiethanolamine (MDEA), automation, control loop, mathematical model, controller, optimization, MATLAB.

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ЗМІСТ

ВСТУП	8
Постановка задачі.....	10
1 Загальна характеристика процесу очищення газу від CO ₂	11
1.1 Методи видалення CO ₂ із промислових газів	11
1.2 Властивості метилдиетаноламіну (MDEA) як абсорбента.....	12
1.3 Технологічний процес очищення газу за допомогою MDEA	14
1.4 Аналіз технологічної схеми установки очищення газу від CO ₂	15
1.5 Визначення основних параметрів, що підлягають контролю	17
2 Автоматизація процесу очищення газу від CO ₂	20
2.1 Вибір засобів автоматизації на основі аналізу технологічної схеми	20
2.2 Вибір та аналіз об'єкта автоматизації	22
2.3 Аналіз існуючих систем автоматизації	24
2.4 Опис контурів автоматичного контролю та керування схеми автоматизації 27	
2.5 Розробка та опис роботи принципової електричної схеми	31
2.6 Розробка та опис монтажно-комутаційної схеми.....	33
3 Математичне моделювання абсорбера	36
3.1 Постановка задачі моделювання процесу абсорбції CO ₂	36
3.2 Створення та опис математичної моделі.....	37
3.2.1 Статична модель	37
3.2.2 Динамічна модель	43
4. Синтез системи керування	49
4.1 Використання сучасних програмних засобів для моделювання та розрахунку	49
4.2 Налаштування параметрів регуляторів	49
4.2.1 Налаштування параметрів регуляторів через Tune.....	50
4.2.2 Частотний метод автоматичного налаштування.....	54
4.3 Аналіз системи керування на стійкість	59
Критерій стійкості за Найквістом	60
5 Статична оптимізація технологічного процесу абсорбції	63
5.1 Постановка задачі оптимізації. Формування критеріїв оптимальності	63
5.2 Розв'язання задачі умовної статичної оптимізації з використанням методу штрафних функцій	65

5.3 Розв’язання задачі умовної статичної оптимізації з використанням методу послідовного квадратичного програмування (SQP)	68
6 Охорона праці	72
6.1. Вплив хімічних речовин.....	73
6.2. Електробезпека.....	75
6.3. Пожежна безпека	76
6.4. Виробничий шум	78
6.5 Рекомендовані засоби індивідуального захисту.....	79
Висновки	82
Список використаної літератури:	83

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Сучасні технології газоочищення відіграють важливу роль у промисловості, особливо у контексті зменшення викидів парникових газів та збереження навколишнього середовища. Очищення від вуглекислого газу (CO_2) є критично важливим процесом для хімічної, металургійної, енергетичної та інших галузей промисловості. Одним із найефективніших методів видалення CO_2 є хімічна абсорбція за допомогою розчину метилдиетаноламіну (MDEA), який широко використовується у промислових системах очищення газу.

Метилдиетаноламін (MDEA) є третинним аміном, що має високу селективність до CO_2 при одночасному збереженні низької реакційної здатності до інших компонентів газової суміші, таких як сірководень. Це дозволяє ефективно видаляти CO_2 , мінімізуючи втрати інших компонентів. Традиційно у промисловстві використовують процес абсорбції CO_2 гарячим розчином поташу, який забезпечує високу ефективність очищення завдяки хімічним реакціям карбонатно-бікарбонатної рівноваги, що дозволяє уловлювати значну кількість CO_2 . Однак за кордоном усе більше набуває переваги метод очищення газу за допомогою метилдиетаноламіну (MDEA), так як є одним із найефективніших способів хімічної абсорбції. MDEA має високу селективність до CO_2 при одночасному збереженні низької реакційної здатності до інших компонентів газової суміші, що дозволяє мінімізувати побічні втрати. Перевагами використання MDEA є низька енергоємність регенерації розчину, висока стійкість до термічного та хімічного розкладу, зменшення корозійного впливу на обладнання, а також економічна та екологічна доцільність у порівнянні з традиційними амінами, такими як моноетаноламін (MEA) або діетаноламін (DEA).

Для підвищення ефективності процесу очищення газу необхідне автоматизоване керування, яке забезпечить стабільність параметрів, знизить витрати енергії та реагентів, а також підвищить загальну продуктивність системи. Автоматизація дозволяє підтримувати оптимальну концентрацію MDEA,

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювати температуру, тиск та витрату абсорбенту, а також контролювати баланс між швидкістю абсорбції CO₂ та витратами на регенерацію розчину.

Метою дипломного проекту є розробка автоматизованої системи керування процесом очищення газу від CO₂ за допомогою метилдиетаноламіну, що дозволить підвищити ефективність процесу, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільність роботи установки. Для досягнення цієї мети необхідно провести такі дослідження:

- Дослідити технологічний процес очищення газу від CO₂ за допомогою MDEA та визначити його ключові параметри.
- Проаналізувати існуючі методи автоматизації подібних процесів та обрати оптимальні підходи.
- Розробити відповідні схеми автоматизації, а саме: технологічну, функціональну та принципову схеми. Забезпечити відповідне обладнання для автоматизації процесу.
- Створити алгоритми автоматичного регулювання концентрації абсорбента, температури та витрати газу.
- Провести моделювання та аналіз ефективності впровадженої автоматизованої системи.

Впровадження запропонованої системи автоматизації дозволить оптимізувати процес поглинання CO₂, підвищити точність контролю технологічних параметрів, мінімізувати втрати реагентів та сприятиме загальному покращенню екологічних показників підприємства.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Постановка задачі

У зв'язку з посиленням екологічних вимог до промислових викидів та необхідністю енергоефективного функціонування технологічних процесів, постає актуальна задача автоматизації процесу очищення газу від вуглекислого газу (CO_2). У дипломному проекті розглядається використання метилдиетаноламіну (MDEA) як абсорбента, що забезпечує високу селективність до CO_2 при низькому енергоспоживанні, хімічній стабільності та зменшеній корозійній активності.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування процесом очищення газу, яка забезпечить точний контроль параметрів, стабільність процесу, зменшення втрат абсорбенту та підвищення загальної продуктивності установки. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати існуючі технології очищення газу, дослідити фізико-хімічні властивості MDEA як абсорбента, побудувати математичну модель процесу абсорбції CO_2 , реалізувати її в середовищі MATLAB для дослідження динаміки та стійкості процесу. На основі отриманих моделей слід здійснити синтез та налаштування системи автоматичного регулювання, обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації, розробити електричні схеми керування і захисту електромеханічного обладнання. Також важливим завданням є забезпечення вимог охорони праці при роботі з токсичними речовинами та вибухонебезпечними газами. Реалізація зазначених етапів дозволить створити ефективну автоматизовану систему очищення газу, що відповідає сучасним вимогам безпеки, екологічності та надійності.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1 Загальна характеристика процесу очищення газу від CO₂

1.1 Методи видалення CO₂ із промислових газів

Видалення діоксиду вуглецю (CO₂) із промислових газів є критично важливим процесом у багатьох галузях промисловості, зокрема у виробництві аміаку, де CO₂ є основним домішковим компонентом. На сьогодні існує кілька методів очищення газів від CO₂, які базуються на різних фізико-хімічних принципах. Найпоширенішими з них є хемосорбційні методи, які передбачають використання хімічних реагентів для поглинання CO₂. Загальноприйнятими для видалення CO₂ із технологічних газів у виробництві аміаку використовуються методи, зокрема з використанням розчину моноетаноламіну (MEA) або гарячого розчину поташу (K₂CO₃), активованого діетаноламіном. Ці методи базуються на хімічних реакціях між CO₂ та абсорбентами, що дозволяє ефективно видаляти домішки з газових потоків [1].

Фізичні методи очищення газу базуються на розчиненні CO₂ у спеціальних фізичних абсорбентах або на його уловлюванні за допомогою мембранних технологій. До таких методів належить фізична абсорбція, що передбачає розчинення CO₂ у рідких розчинниках, таких як метанол, пропіленкарбонат. Перевагами цього методу є низькі енергетичні витрати та можливість регенерації абсорбенту без високотемпературного нагріву, проте ефективність значно залежить від тиску газу, а також обмежена розчинність CO₂. Мембранна сепарація передбачає використання напівпроникних мембран, що селективно пропускають CO₂, і має переваги у вигляді компактності, простоти експлуатації та низького енергоспоживання. Водночас вона має високу вартість мембран та обмежений ступінь очищення при низьких концентраціях CO₂ [1].

Хімічна абсорбція є найпоширенішим методом очищення газів від CO₂ і базується на хімічних реакціях між CO₂ та реагентами, що утворюють розчинні сполуки. Одним із найбільш використовуваних реагентів є моноетаноламін (MEA), що характеризується високою швидкістю реакції та здатністю поглинати значну

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

кількість CO₂. Однак цей метод має значні недоліки, серед яких висока енергоємність регенерації, корозійна активність та деградація розчину під час експлуатації. Альтернативою є гарячий розчин поташу (K₂CO₃), активований діетаноламіном, який потребує менше енергії для регенерації та є більш стабільним. Водночас цей метод є менш ефективним при низьких концентраціях CO₂ та потребує підвищених температур для забезпечення ефективної роботи. [1]

У XXI столітті були запропоновані нові методи очищення газів від CO₂, зокрема з використанням розчину метилдіетаноламіну (МДЕА), активованого піперaziном. Цей метод характеризується низькою енергомісткістю регенерації, меншою корозійною активністю та зниженою деградацією розчину порівняно з традиційними методами. Його основним недоліком є нижча швидкість реакції з CO₂ порівняно з MEA, через що для підвищення ефективності процесу застосовують активатори, наприклад, піперазин [2].

З метою підвищення ефективності очищення газу від CO₂ у деяких випадках застосовують комбіновані методи, такі як амінокарбонатні процеси, що поєднують використання амінів (наприклад, MDEA) та карбонатних розчинів для прискорення поглинання CO₂. Також активно використовуються гібридні мембранно-абсорбційні технології, які передбачають попереднє мембранне відділення CO₂, а потім його доочищення хімічною абсорбцією [3].

1.2 Властивості метилдіетаноламіну (MDEA) як абсорбента

Метилдіетаноламін (MDEA) є третинним аміном, що широко використовується в промислових процесах очищення газів від вуглекислого газу (CO₂) та інших кислих компонентів. Завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям MDEA забезпечує високу ефективність поглинання CO₂ при порівняно низькому споживанні енергії. МДЕА є ефективним абсорбентом, який дозволяє знизити витрати тепла на регенерацію. Однак, на відміну від MEA, МДЕА

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

має нижчу швидкість поглинання CO_2 , що обмежує його застосування. Ще одна відмінність від первинних (MEA) та вторинних (DEA) амінів, MDEA не утворює карбаматів безпосередньо з CO_2 . Замість цього він реагує з CO_2 через механізм гідролізу. Для підвищення ефективності використовується активатор піперазин, який значно покращує глибину абсорбції. Використання піперазину як активатора дозволяє підвищити ефективність поглинання CO_2 , зберігаючи при цьому переваги MDEA, такі як низька корозія обладнання та стабільність розчину [4].

Хімічна структура і лужність MDEA має формулу $\text{C}_5\text{H}_{13}\text{NO}_2$ і є третинним аміном, що означає відсутність здатності утворювати карбамат-іони при взаємодії з CO_2 . Це суттєво відрізняє його від первинних і вторинних амінів, таких як моноетаноламін (MEA) або діетаноламін (DEA), і дозволяє досягти вищого навантаження CO_2 [4].

Фізико-хімічні характеристики

- Температура кипіння: $\sim 247^\circ\text{C}$
- Молекулярна маса: 119.17 г/моль
- Розчинність у воді: висока
- В'язкість (при 25°C): 54.6 мПа·с
- Лужність нижча, ніж у MEA та DEA, що зменшує енергетичні витрати при регенерації розчину

Механізм поглинання CO_2 MDEA, на відміну від первинних та вторинних амінів, реагує з CO_2 шляхом фізичної розчинності та утворення бікарбонату замість карбаматів. Цей механізм сприяє зниженню енергетичних витрат під час регенерації абсорбента, що є ключовою перевагою MDEA у промислових процесах. Це також дозволяє використовувати його у високотемпературних процесах [4].

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.3 Технологічний процес очищення газу за допомогою MDEA

Процес очищення газу від CO₂ за допомогою метилдіетаноламіну (MDEA) на базі рідинно-газовій абсорбції в абсорбері та подальшій термічній десорбції у стріпері наведено на рисунку 1.1. Синтез-газ, що містить CO₂, подається у нижню частину абсорбера CO₂ (101-E), де він контактує зі збідненим розчином MDEA, який поглинає вуглекислий газ. У результаті очищений газ із мінімальним вмістом CO₂ (до 100 ppm) виходить із верхньої частини абсорбера, тоді як насичений CO₂ розчин MDEA (збагачений розчин) прямує до теплообмінника збідненого/збагаченого розчину (109-C), де він нагрівається перед подачею у стріпер CO₂ (102-EA, 102-EB). У стріпері відбувається десорбція CO₂ під впливом тепла, що подається через перегрівники (105-CA, 105-CB). Десорбція проходить при температурі 107°C та тиску 0,6-1,1 кг/см² г. Відокремлений CO₂ прямує у відстійник рефлюкс-конденсату (103-F), де частково конденсується. Чистий CO₂ виходить із системи як кінцевий продукт. Регенований MDEA після десорбції CO₂ охолоджується в теплообміннику (109-C) і додатково в охолоджувачі збідненого розчину (108-C). Після цього розчин подається назад у абсорбер за допомогою насоса збідненого розчину (107-J) для повторного використання.

Допоміжні системи включають сепаратор конденсату (102-F), що відводить використану пару та конденсат, а також насос конденсату (106-J), який транспортує конденсат із системи. Частина використаної пари повертається у вигляді конденсату пари, а для підтримки балансу додається необхідна кількість додаткової води. Для покращення ефективності процесу можливе використання добавок, наприклад піперазину (Pz), що прискорює кінетику абсорбції CO₂. Оптимальний склад розчинника становить 35-37% MDEA, 3-5% Pz, решта — вода. Додаткове вдосконалення теплообмінників дозволяє зменшити втрати тепла, що сприяє зниженню енергетичних витрат та підвищенню ефективності очищення газу від CO₂ [5].

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1.4 Аналіз технологічної схеми установки очищення газу від CO₂

Процес очищення газу від CO₂ за допомогою MDEA починається з подачі газу, що містить CO₂, у нижню частину абсорбера CO₂ (101-E). У цій колоні відбувається контакт газу зі збідненим розчином MDEA, який поглинає вуглекислий газ. Очищений газ із мінімальним вмістом CO₂ (до 100 ppm) виходить із верхньої частини абсорбера. Поглинений CO₂ залишається в збагаченому розчині MDEA, який відводиться знизу колони та спрямовується у теплообмінник збідненого/збагаченого розчину (109-C), де попередньо нагрівається перед подачею в стрипер [5].

У стриперах CO₂ (102-EA, 102-EB) відбувається десорбція вуглекислого газу під впливом тепла, що подається через перегрівники (105-CA, 105-CB). Процес регенерації проходить при температурі близько 107°C і тиску 0.6-1.1 кг/см² г. Вивільнений CO₂ спрямовується у верхню частину стриперів і далі в відстійник рефлюкс-конденсату (103-F), де частково конденсується. Чистий CO₂ після цього виходить із системи у вигляді кінцевого продукту [5].

Регенований MDEA після видалення CO₂ охолоджується в теплообміннику (109-C), після чого проходить додаткове охолодження у охолоджувачі збідненого розчину (108-C). Після цього він подається назад в абсорбер за допомогою насоса збідненого розчину (107-J) і повторно використовується в процесі абсорбції [5].

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

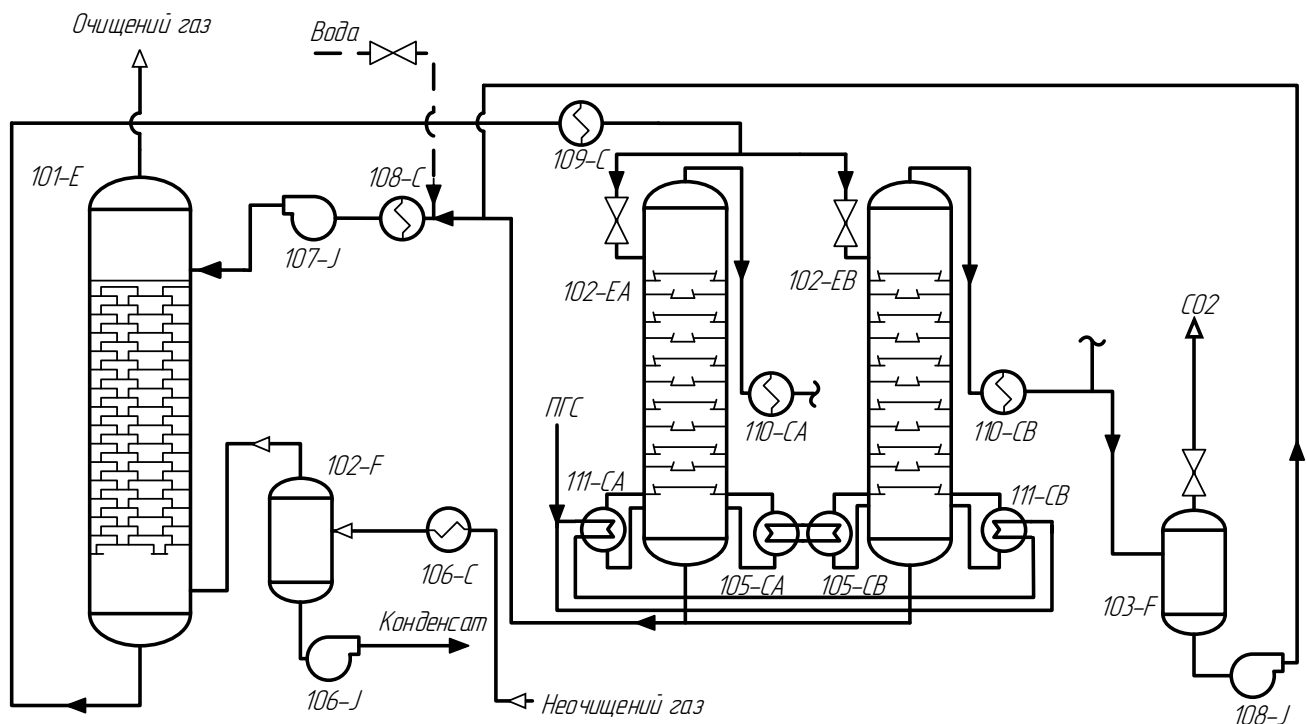


Рисунок 1.1 – Система видалення CO₂ на основі MDEA для аміачного заводу:

102-E – абсорбер, 102-F – сепаратор конденсату, 102-EA/102-EB – регенератор, 103-F – відстійник рефлюкс-конденсату, 105-CA/105-CB – нагрівник регенератора, 106-J – насос конденсату, 107-J – насос збідненого розчину, 108-C – охолоджувач збідненого розчину, 109-C – теплообмінник збагаченого розчину, 110-CA, 110-CB – конденсатор регенератора, 111-CA/111-CB – паровий нагрівач.

Допоміжні системи забезпечують стабільну роботу установки. Конденсат із процесу збирається у сепараторі конденсату (102-F) та відводиться за допомогою насоса конденсату (106-J). Частина використаної пари конденсується і повертається у вигляді конденсату пари, а для підтримки балансу в систему додається необхідна кількість додаткової води. Оптимізація процесу включає використання добавок, таких як піперазин (Pz), що покращує кінетику абсорбції, а також оптимізацію складу розчинника (35-37% MDEA, 3-5% Pz, решта — вода) і вдосконалення теплообмінних апаратів для зменшення втрат тепла. Це забезпечує

високу ефективність процесу очищення газу від CO₂ при низьких енергетичних витратах [5].

1.5 Визначення основних параметрів, що підлягають контролю

Визначення основних параметрів, що підлягають контролю, є важливим етапом у процесі очищення газу від CO₂. Контроль цих параметрів здійснюється за допомогою спеціальних засобів вимірювання та аналізу, які дозволяють виявляти відхилення від заданих значень та приймати відповідні коригувальні заходи. У цьому розділі розглянуто основні параметри, що підлягають контролю у процесі очищення газу розчином метилдиетаноламіну (MDEA), а також методи їх вимірювання, що застосовуються у промисловості. Процес очищення газу від CO₂ є складним і багатостадійним, тому для забезпечення його ефективності та стабільності необхідно контролювати кілька ключових технологічних параметрів. Основні аспекти контролю описані нижче:

1. Контроль тиску та температури

Тиск і температура є одними з найважливіших параметрів у процесі абсорбції CO₂. Вони безпосередньо впливають на ефективність розчинення CO₂ у MDEA та швидкість регенерації поглинача.

- Контроль тиску в абсорбері забезпечує стабільність процесу та запобігає втратам газу. Вимірювання тиску здійснюється за допомогою електронних або механічних датчиків тиску.
- Контроль температури абсорбційного та регенераційного процесів дозволяє підтримувати оптимальні умови для хімічних реакцій, що відбуваються між CO₂ і MDEA. Температура в абсорбері зазвичай контролюється за допомогою термопар або електронних термометрів.

2. Контроль концентрації CO₂ у газовому потоці

Концентрація CO₂ у вхідному та вихідному газах є важливим показником ефективності процесу очищення.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

- Контроль вхідної концентрації CO₂ дозволяє оцінити рівень забруднення газового потоку та налаштувати відповідні параметри абсорбції.
- Контроль вихідної концентрації CO₂ дає змогу визначити ефективність роботи установки та своєчасно реагувати на відхилення від норми. Для аналізу вмісту CO₂ використовують газоаналізатори, інфрачервону спектроскопію або мас-спектрометрію.

3. Контроль рівня рідини в технологічних апаратах

Рівень рідини в абсорбері та регенераційній колоні повинен залишатися у визначених межах, щоб уникнути перевитрати MDEA або його недостатнього контакту з газовим потоком.

- Перевищення рівня рідини може призвести до непередбачуваних хімічних реакцій та утворення піни, що ускладнює роботу установки.
- Низький рівень MDEA може зменшити ефективність очищення газу та призвести до втрат розчинника. Контроль рівня рідини здійснюється за допомогою поплавкових, ультразвукових або ємнісних рівнемірів.

4. Контроль витрати MDEA та газового потоку

Забезпечення правильного співвідношення витрати MDEA та газу дозволяє оптимізувати процес очищення та зменшити енергетичні витрати.

- Контроль витрати MDEA необхідний для збереження балансу між споживанням розчинника та його регенерацією. Витратоміри (турбінні, ультразвукові або диференційного тиску) допомагають здійснювати точні вимірювання.
- Контроль витрати газу дозволяє регулювати швидкість подачі газового потоку та підтримувати оптимальні умови для абсорбції.

Висновок

У результаті аналізу об'єкта автоматизації було з'ясовано, що процес очищення технологічного газу від CO₂ за допомогою метилдиетаноламіну (MDEA)

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

є складним динамічним процесом із багатьма взаємозалежними параметрами. Ідентифіковано основні вузли установки: абсорбер, регенератор, насосне обладнання, теплообмінники та система зберігання абсорбенту. Встановлено перелік контрольованих параметрів (температура, тиск, рівень рідини, витрати), що мають істотний вплив на ефективність процесу. Результати аналізу стали основою для розробки технічних рішень з автоматизації процесу та побудови математичної моделі, необхідної для подальшого керування й оптимізації.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

2 Автоматизація процесу очищення газу від CO₂

2.1 Вибір засобів автоматизації на основі аналізу технологічної схеми

Автоматизація виробництва є одним із ключових напрямків науково-технічного прогресу, розвиток якого є обов'язковою умовою для сучасних виробничих систем. Основне завдання автоматизації – це підвищення ефективності виробництва та поліпшення умов праці. У хімічній промисловості, де технологічні процеси відрізняються високою складністю та швидкістю, автоматизація має особливе значення. Автоматизований контроль та управління технологічними процесами забезпечують високу якість продукції, ефективне використання сировини та енергоресурсів, збільшення термінів міжремонтного періоду обладнання та зменшення потреби в обслуговуючому персоналі. Саме тому автоматизація хіміко-технологічних процесів є надзвичайно важливою.

Автоматизація процесу очищення газу від CO₂ відіграє ключову роль у забезпеченні стабільної роботи установки, зниженні енергетичних витрат та підвищенні ефективності абсорбції. Вибір засобів автоматизації базується на аналізі технологічної схеми процесу, що включає абсорбцію CO₂ метилдиетаноламіном (MDEA) та подальшу регенерацію абсорбенту.

Для ефективного контролю та регулювання процесу очищення газу від CO₂ необхідно забезпечити контроль наступних параметрів:

- Температура газу на вході в абсорбер
- Тиск газу на вході в абсорбер
- Тиск насиченого розчину MDEA в регенераторі
- Температура насиченого розчину MDEA після нагріву перед подачею в регенератор
- Концентрація CO₂ на виході з абсорбера
- Чистота CO₂ після регенерації

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- Температура збідненого МДЕА після охолодження перед поверненням в абсорбер
- Витрата циркуляції МДЕА

Результати аналізу подано в таблиці 2.1 [5].

Таблиця 2.1. – Параметри контролю процесу

№ п/п	Найменування стадії процесу (технологічний об'єкт), місце заміру параметра	Найменування параметра, що контролюється чи регулюється	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Вимоги до схеми автоматизації (контроль, регулювання, сигналізація)
1	Тиск газу в абсорбері	Тиск	2.41-2.75 МПа	Контроль, сигналізація
2	Температура газу на вході в абсорбер	Температура	43-60 °С	Контроль, сигналізація
3	Тиск насиченого розчину МДЕА в регенераторі	Тиск	0.05-0.1 МПа	Контроль, сигналізація
4	Температура МДЕА перед регенератором	Температура	107 °С	Контроль, сигналізація
5	Вихідний газ з абсорбера	Концентрація	≤100 ppm	Контроль
6	Вихідний газ з регенератора	Концентрація	99.42 %	Контроль
7	Розчин МДЕА, трубопровід	Витрата	14.78 м³/хв	Контроль
8	Температура МДЕА перед абсорбером	Температура	46.1 °С	Контроль
9	Температура в регенераторі	Температура	124 °С	Контроль
10	Газ на очистку від CO ₂	Витрата	3240 т/д	Контроль

Продовження таблиці 2.1

11	Очищений газ на виході	Витрата	1550 т/д	Контроль
12	Подача води для розчину МДЕА	Витрата	43.2 т/д	Контроль
13	Витрата ПГС для нагрівача в регенераторі	Витрата	-	Контроль
14	Температура CO ₂ перед сепаратором	Температура	48.8 °C	Контроль, сигналізація

Також в таблиці було вказано параметри для забезпечення безпечної експлуатації установки;

передбачена технологічна сигналізація для наступних критичних параметрів:

- Перевищення або зниження тиску у трубопроводах та колонах;
- Відхилення температури у ключових точках процесу (абсорбер, стрипер, теплообмінники);
- Відхилення рівня рідини у резервуарах та колонах;
- Аварійні ситуації з подачею MDEA (перевищення або недостатній потоку).

2.2 Вибір та аналіз об'єкта автоматизації

Абсорбер є головним елементом системи очищення газу від CO₂, оскільки саме в ньому відбувається ключовий процес — вилучення вуглекислого газу з газового потоку. У процесах очищення газу від CO₂ за допомогою розчину MDEA

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

можуть використовуватись різні типи абсорберів, серед яких найбільш поширеними є насадкові та плівкові.

Насадковий абсорбер — це вертикальна колона, наповнена спеціальними насадками, які створюють велику поверхню для контакту між газом і рідиною. Він забезпечує високу ефективність масообміну та дозволяє обробляти великі об'єми газу, що робить його оптимальним для промислових масштабів. Водночас, такий тип абсорбера має високий гідравлічний опір і може засмічуватись, що ускладнює обслуговування [2].

Плівковий абсорбер, зокрема з падаючою плівкою, працює за принципом стекання рідини тонкою плівкою по внутрішній поверхні труб або пластин, забезпечуючи контакт із газом. Його основні переваги — низький опір, хороша тепловіддача та простота конструкції. Проте через меншу площу контакту масообмін у ньому менш ефективний, що обмежує застосування при великих об'ємах газу [2].

З огляду на це, у системах очищення газу від CO_2 за допомогою MDEA, де важливе максимальне вилучення вуглекислого газу та обробка великих потоків, доцільніше використовувати саме насадковий абсорбер як більш ефективний елемент. Схематичне зображення абсорбера для процесу очищення газу від CO_2 розчином МДЕА наведена на рисунку 2.1 [2].

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

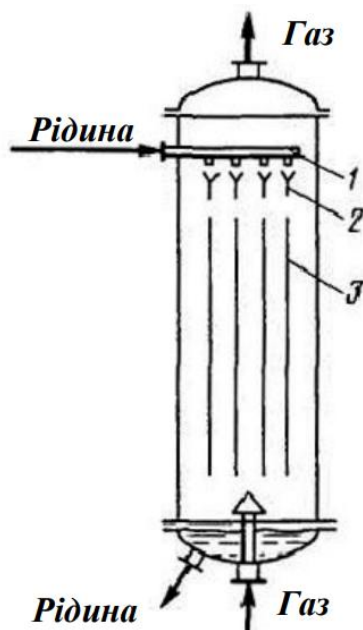


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення насадкового абсорбера

У нижню частину абсорбера подається газ, що містить CO_2 , а зверху — збіднений розчин MDEA, який має високу здатність хімічно та фізично поглинати CO_2 . Завдяки протитечійному русі фаз (газ вгору, рідина вниз), забезпечується ефективний масообмін між газом і розчином, у результаті чого з газу видаляється майже весь вуглекислий газ. Робота абсорбера визначає якість очищення: саме тут формується потік «очищеного» газу з мінімальним вмістом CO_2 (до 100 ppm), який виходить з верхньої частини колони. Якщо ефективність абсорбції буде недостатньою, наступні стадії — десорбція в стриперах, регенерація розчину тощо — не зможуть компенсувати втрати, а кінцевий продукт не відповідатиме вимогам. Таким чином, абсорбер виконує основну функцію всього циклу — поглинання CO_2 [1].

2.3 Аналіз існуючих систем автоматизації

Система автоматизації абсорбера є важливою складовою стабільної та безпечної роботи процесу очищення газу від CO_2 . Вона включає низку елементів, які забезпечують моніторинг, керування та захист обладнання. Основу складають

датчики витрати, температури, тиску та концентрації, що передають дані в систему керування на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК) або промислових комп'ютерів. Ці дані використовуються для регулювання положення клапанів, подачі реагентів і роботи насосів. Сигнали від датчиків обробляються через перетворювачі, які адаптують їх до формату, зрозумілого системі керування. Для оператора передбачений інтерфейс у вигляді панелі або SCADA-системи, де відображається поточний стан процесу; оператор може вносити зміни вручну за допомогою блоків ручного керування.

Розглянемо одну із типових існуючих систем автоматизації абсорберів, яка представлена на рисунку 2.2 [6].

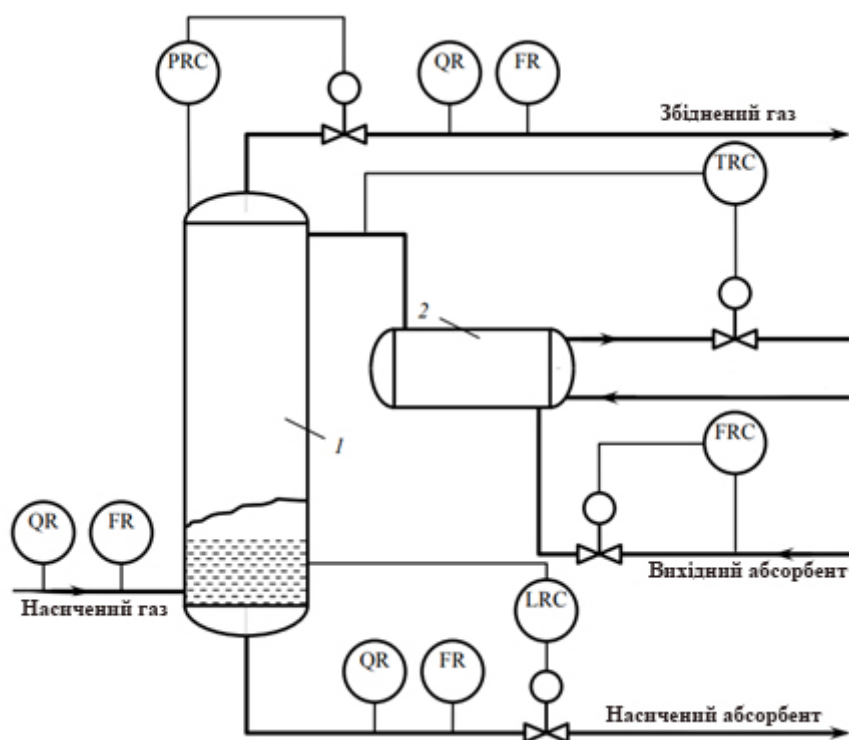


Рисунок 2.2 – Схема автоматизації процесу абсорбції

На даній схемі зображено систему автоматизованого керування абсорбером, яка забезпечує контроль основних параметрів процесу газоочищення. Основний апарат (1) – абсорбер, у який подається насичений газ знизу, а збіднений газ виводиться згори. Контроль і регулювання витрати та тиску газу здійснюється за допомогою вимірювачів FR (витрата) та PRC (тиск). Паралельно контролюється температура та витрата газу після очищення. Важливу роль відіграє і блок

охолодження (2), через який проходить охолоджуючий агент, що впливає на температуру вхідного розчину. Вхід абсорбенту в колонну контролюється витратоміром FRC, а температура – TRC. Рівень насиченого абсорбенту внизу колони контролюється рівнеміром LRC, і при потребі здійснюється автоматичне регулювання витрати за допомогою QR/FR-комплексів. Аналогічно, вихідний потік насиченого абсорбенту також вимірюється та регулюється. Даний варіант схеми автоматизації абсорбера не зовсім підходить для виконання поставлених на меті дипломного проекту задач, а саме контролю вмісту CO₂ в газі на виході, так як керування відбувається за рахунок рівня рідини в абсорбері [6].

Проаналізуємо другу схему, зображену на рисунку 2.3.

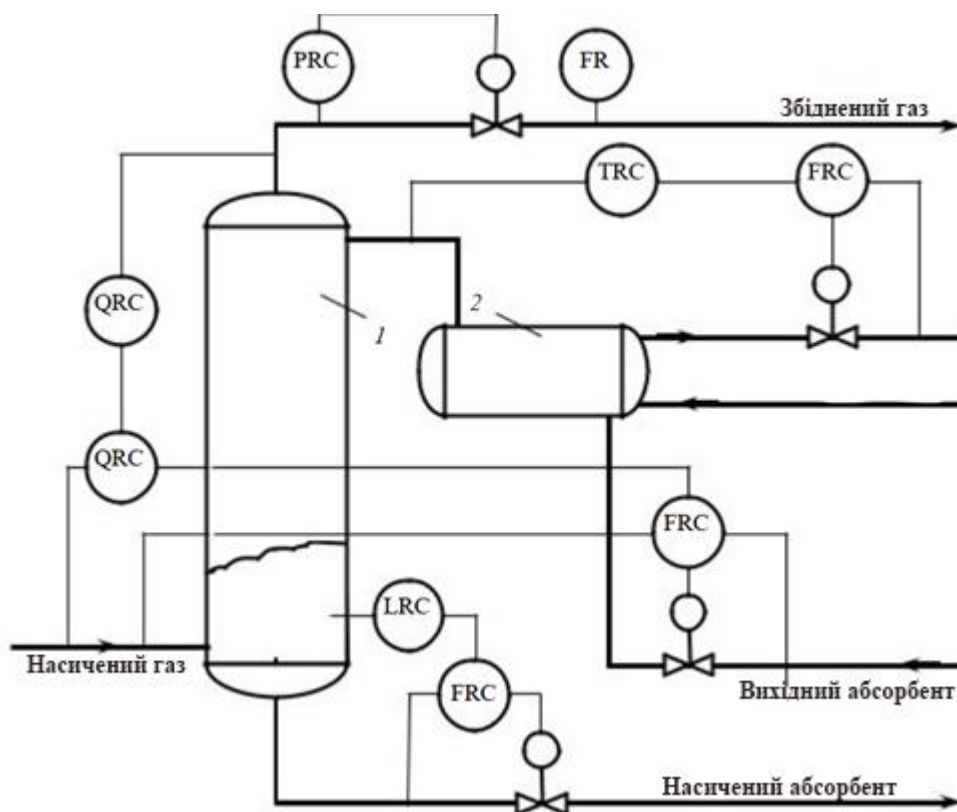


Рисунок 2.3 – Схема автоматизації процесу абсорбції

Дана схема автоматизації так само як і попередня забезпечує контроль основних параметрів процесу газоочищення. Компенсація зміни витрати вихідного насиченого газу (газового завантаження абсорбера) забезпечується використанням регулятора співвідношення витрат цього газу та свіжого абсорбенту. При змінній

концентрації екстрагованого компонента у вихідній газовій суміші додаткове регулювання співвідношення витрат насиченого газу та свіжого абсорбенту забезпечується за допомогою регулятора концентрації екстрагованого компонента у газовій суміші, вихід якого надходить до коригувальної камери регулятора співвідношення. Однак основною керуючою величиною в цій системі є концентрація екстрагованого компонента у збідненому газі на виході. Поточне значення цієї величини подається на його регулятор, який генерує сигнал, що подається як завдання на регулятор концентрації екстрагованого компонента у вихідній газовій суміші, що також призводить до зміни співвідношення витрат речовин, що надходять в абсорбер [6].

Друга схема більше підходить для виконання поставленої мети дипломного проекту, так як тут керуюча величина саме концентрація екстрагованого компонента на виході.

2.4 Опис контурів автоматичного контролю та керування схеми автоматизації

Схема автоматизації очищення газу від CO_2 включає в себе контури контролю, які забезпечують моніторинг витрати, температури, тиску та концентрації CO_2 . Контрольні прилади розташовані як на місці, так і на пульті керування, що дозволяє здійснювати централізоване управління процесом.

Контур 1 забезпечує контроль та сигналізацію температури газу що подається на очистку до абсорбера 1. Цей контур є важливим для ефективної роботи системи, оскільки температура газу впливає на процес абсорбції CO_2 . До його складу входять: термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом 1-1; вторинним прилад виступає ПЛК;

Контур 1-2 забезпечує регулювання температури газу що подається на очистку до абсорбера 1. Цей контур є важливим для ефективної роботи системи, оскільки температура газу впливає на процес абсорбції CO_2 . До його складу

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

входять: тиристорний регулятор який приймає дані з ПЛК та електричний нагрівач 1-2;

Контур 2 забезпечує контроль та сигналізацію температури розчину MDEA, що подається в абсорбер 1. Температура абсорбенту є критичним параметром, оскільки вона впливає на ефективність хімічного поглинання CO₂ та стабільність процесу очищення. До його складу входять: термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом 2-1; вторинним прилад виступає ПЛК;

Контур 2-2 забезпечує регулювання температури розчину MDEA, що подається в абсорбер 1. До його складу входять: тиристорний регулятор який приймає дані з ПЛК та електричний нагрівач 2-2;

Контур 3 забезпечує контроль та сигналізацію температури насиченого розчину MDEA, що подається у регенератор. Температура розчину впливає на ефективність десорбції CO₂, тому її стабільність є важливою для роботи установки. До складу контура входять: термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом 3-1; вторинним прилад виступає ПЛК;

Контур 3-2 забезпечує регулювання температури насиченого розчину MDEA, що подається у регенератор. До його складу входять: тиристорний регулятор який приймає дані з ПЛК та електричний нагрівач 3-2;

Контур 4 забезпечує контроль та сигналізацію температури парогазової суміші, що утворюється внаслідок регенерації MDEA та подається на сепаратор дві виведення CO₂. До складу контура входять: термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом 4-1; вторинним прилад виступає ПЛК;

Контур 4-2 забезпечує регулювання температури парогазової суміші, що утворюється внаслідок регенерації MDEA та подається на сепаратор дві виведення CO₂. До його складу входять: тиристорний регулятор який приймає дані з ПЛК та електричний нагрівач 4-2;

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контур 5 та 6 забезпечують контроль та сигналізацію температури всередині регенераторів 15 та 16, що є критично важливим показником який впливає на процес десорбції CO₂ з розчину МДЕА. До складу контурів входять: термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом 5-1; термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом 6-1; вторинним прилад виступає ПЛК;

Контур 7 забезпечує контроль та сигналізацію витрати збідненого розчину MDEA, що повертається після процесу регенерації в абсорбер 1. Від даного параметру залежить стабільність процесу очищення газу від CO₂ та ефективність використання абсорбенту. До його складу входять - витратомір електромагнітний рідин 7-1; вторинний прилад – ПЛК; лампа сигналізації HL1.

Контур 7-2 забезпечує регулювання витрати збідненого розчину MDEA, що повертається після процесу регенерації в абсорбер 1. До його складу входить частотний перетворювач ЧП2 та насос M2.

Контур 8 забезпечує контроль витрати парогазової суміші, що використовується для нагрівання в процесі регенерації МДЕА. До його складу входять - діафрагма камерна 8-1; пневматичний передавальний перетворювач перепаду тиску із квадратичною функцією перетворення 7-2; вторинний прилад – ПЛК; лампа сигналізації HL2.

Контур 8-2 забезпечує регулювання в витрати парогазової суміші, що використовується для нагрівання в процесі регенерації МДЕА. До його складу входить пропорційний електромагнітний клапан 8-2.

Контур 9 забезпечує контроль концентрації CO₂ на виході з сепаратора 9. До його складу входять - первинний датчик концентрації вуглекислого газу 9-1; вторинний прилад – ПЛК;

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контур 10 забезпечує контроль концентрації CO₂ на виході з абсорбера 1, та є найважливішим показником якості очистити газу від CO₂. До його складу входять – первинний датчик концентрації вуглекислого газу 10-1; вторинний прилад – ПЛК;

Контур 11 забезпечує контроль витрати насиченого розчину MDEA, що надходить до регенератора 15 та 16 після процесу абсорбції. До його складу входять - витратомір електромагнітний рідин 11-1; вторинний прилад – ПЛК; лампа сигналізації HL3.

Контур 11-2 забезпечує регулювання витрати насиченого розчину MDEA, що надходить до регенератора 15 та 16 після процесу абсорбції. До його складу входить пропорціональний електромагнітний клапан 11-2.

Контур 12 забезпечує контроль витрати газу який подається на очищення від CO₂. До його складу входять - діафрагма камерна 12-1; пневматичний передавальний перетворювач перепаду тиску із квадратичною функцією перетворення 12-2; вторинний прилад – ПЛК; лампа сигналізації HL4.

Контур 12-2 забезпечує регулювання витрати газу який подається на очищення від CO₂. До його складу входить пропорціональний електромагнітний клапан 12-2.

Контур 13 забезпечує контроль витрати води що додається до розчину MDEA. До його складу входять - витратомір електромагнітний рідин 13-1; вторинний прилад – ПЛК; лампа сигналізації HL3.

Контур 13-2 забезпечує регулювання витрати води що додається до розчину MDEA. До його складу входить пропорціональний електромагнітний клапан 13-2.

Контур 14 забезпечує контроль та сигналізацію тиску всередині абсорбера 1. Підтримка тиску відповідно до даних технологічного процесу суттєво впливає на

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процес абсорбції CO₂. До його складу входять – датчик перепаду тиску 14-1; вторинний прилад – ПЛК; лампа електрична сигнальна жовтого кольору HL6.

Контур 14-2 забезпечує регулювання тиску всередині абсорбера 1. До його складу входить пропорціональний електромагнітний клапан 14-2.

Контур 15 та 16 забезпечує контроль та сигналізацію тиску всередині регенераторів 15 та 16. Підтримка тиску відповідно до даних технологічного процесу суттєво впливає на процес десорбції CO₂ з розчину МДЕА. До його складу входять – датчик перепаду тиску 15-1 та 16-1; вторинний прилад ПЛК; лампи електричні сигнальні жовтого кольору HL7 та HL8.

Контури 17 та 18 дистанційного керування насосами включають в себе частотні перетворювачі (не вказані на схемі), які під'єднані до ПЛК через аналоговий сигнал. Мають вбудовану сигналізацію та систему релейного захисту. Контур містить додаткові сигнальні лампи HL9 та HL10, які відображають робочий стан моторів.

Усі контури автоматизації інтегруються у загальну систему керування, що забезпечує стабільну, ефективну та безпечну роботу процесу очищення газу від CO₂. Сигнали з первинних та місцевих приладів надходять до ПЛК, після чого інформація передається на панель оператора. Це дозволяє здійснювати візуалізацію, моніторинг та оперативне втручання у процес з єдиного централізованого інтерфейсу. Такий підхід забезпечує своєчасну реакцію на відхилення параметрів, підтримання оптимальних умов абсорбції та регенерації, зниження енерговитрат і підвищення якості очищення. Функціональну схему автоматизації із відповідно розташованими контурами наведено на схемі 1.

2.5 Розробка та опис роботи принципової електричної схеми

Принципова електрична схема автоматизації системи очищення газу від CO₂ (схема 2) забезпечує дистанційне керування трьома електродвигунами (М1, М2,

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

M3), які відповідають за перекачування розчину MDEA в різних точках технологічного процесу: на подачу, після регенерації та на повторне очищення. Окрім дистанційного запуску та зупинки, схема реалізує функції аварійного захисту, сигналізації та візуального контролю стану.

Основна функція схеми — це забезпечення безпечного, надійного та керованого підключення електродвигунів до мережі живлення, а також виявлення та реагування на аварійні ситуації, як-от перевантаження, зникнення живлення або перевищення тиску в системі.

Схема передбачає підключення до трьохфазної мережі через запобіжники FU1–FU9 для кожного з моторів. До складу кожного кола входить частотний перетворювач Danfoss VLT AutomationDrive FC 301, який забезпечує плавний пуск, захист і керування обертами відповідного електродвигуна (M1, M2 або M3). Електродвигуни підключені до вихідних клем частотника (U, V, W), а до його входів подається керуюча напруга 24V через відповідні клеми (12 – +24V, 18 – Старт/Стоп). Подача сигналу "СТАРТ/СТОП" здійснюється кнопками SA1, SA2, SA3, які виконують функції ручного локального керування.

Аварійний захист реалізується через вбудовані в частотник релейні виходи (наприклад, релейний вихід 1 — нормально замкнутий), які реагують на помилки та аварійні сигнали, а також передають інформацію на систему верхнього рівня або сигналізаційні лампи. Сигналізація про стан системи реалізується через наступні елементи: HL1, HL9, HL10 – сигналізація про вмикання/вимкнення живлення. У разі виникнення аварій або помилок сигнал передається через ПЛК на панель оператора. Кожен двигун має індивідуальну лінію захисту, зокрема: FU1–FU3 — для M1; FU4–FU6 — для M2; FU7–FU9 — для M3. Окрім того, схема враховує сигнали про надмірний тиск у технологічних апаратах — абсорбері та регенераторах — через вхідні сигнали від датчиків тиску, що надходять у ПЛК через модуль аналогових або цифрових входів. Принципова схема розроблена у неробочому стані, тобто всі кнопки відпущені, сигнали "Старт" не активні, а

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

контакти аварійної сигналізації замкнені. Це дозволяє зрозуміти початковий стан кожного кола, перевірити логіку та забезпечити безпечне підключення під час монтажу. Таким чином, схема забезпечує: дистанційне та ручне керування трьома електродвигунами через частотні перетворювачі; повноцінну систему аварійного захисту та сигналізації; можливість інтеграції в автоматизовану систему керування через релейні сигнали та цифрові інтерфейси; захист обладнання та персоналу відповідно до стандартів безпеки. Таким чином, використання частотних перетворювачів значно підвищує гнучкість, надійність та енергоефективність системи автоматизації, а також спрощує реалізацію аварійного захисту та дистанційного керування.

2.6 Розробка та опис монтажно-комутаційної схеми

Для забезпечення правильного електромонтажу технічних засобів автоматизації на базі принципової електричної схеми дистанційного керування електродвигуном М1 розроблено монтажно-комутаційну схему (схема 3). Ця схема визначає, яким чином слід з'єднати між собою всі елементи автоматизованої системи очищення газу від CO₂, зокрема частотний перетворювач, блок живлення, контролер Siemens, клемники, запобіжники та вимірювальні прилади.

Схема розроблена відповідно до технічних вимог щодо монтажу та враховує правила безпеки експлуатації. Монтажно-комутаційна схема виконує функцію переходу від логічного зображення зв'язків (принципової схеми) до фізичного з'єднання дротами, у тому числі через клемні колодки. Зокрема, згідно зі схемою 2, для реалізації керування та захисту електродвигуна насоса застосовано такі елементи:

- Частотний перетворювач Danfoss FC 301 (ПЧ2) — виконує функцію плавного запуску, регулювання частоти обертання та аварійного захисту електромотора М1;

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Електродвигун М1 — основний виконавчий механізм, який забезпечує циркуляцію газу на очищення;
- Блок живлення постійного струму БПС24-2К — подає стабілізовану напругу 24В для живлення модуля керування;
- Плавкі запобіжники FU4, FU5, FU6 — забезпечують захист силового кола двигуна та частотника від коротких замикань і перевантажень;
- Модуль аналогових входів/виходів 6ES7234-4HE32-0XB0 — розширення ПЛК Siemens для зв'язку з датчиком витрати та частотником через аналогові сигнали;
- Витратомір FT 7-1 — підключений до аналогового входу ПЛК, передає дані про витрату MDEA;
- Кнопка «СТАРТ/СТОП» SA1 — дозволяє здійснювати ручне керування двигуном у режимі локального керування;
- Клемники X1, X2, X3 з колодок LTA10, LTA12, LTA4 — забезпечують зручне і впорядковане підключення живлення, сигналів керування та зв'язку з зовнішніми пристроями;
- Контакти клем 18, 53, 54, 12, частотника FC 301 — використовуються для подачі сигналів "ПУСК/СТОП" для ручного керування.

Схема виконується у неробочому стані (тобто контакти кнопок розімкнені, частотник знеструмлений), що дозволяє чітко розуміти початкове положення всіх елементів. Крім того, у схемі враховано можливість майбутнього розширення — передбачено додаткові вільні клеми для підключення нових датчиків або виконавчих механізмів. Відповідні елементи та устаткування для виконання монтажних та налагоджувальних робіт наведено у специфікації (додаток А).

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Висновок

У даному розділі було сформовано технічні вимоги до системи автоматизації очищення газу від CO₂ з використанням MDEA. Розроблено функціональну схему автоматизації, визначено основні контури регулювання, типи датчиків і виконавчих механізмів, які забезпечують підтримку стабільного технологічного режиму. Особливу увагу приділено вибору оптимальної структури керування та забезпеченню надійного зв'язку між компонентами системи. Проектна схема є основою для подальшого моделювання, розробки алгоритмів регулювання.

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

3 Математичне моделювання абсорбера

3.1 Постановка задачі моделювання процесу абсорбції CO₂

Процес абсорбції CO₂ є ключовим етапом очищення технологічних газів у хімічній промисловості. Цей процес дозволяє ефективно видаляти вуглекислий газ із синтез-газу, димових газів або інших промислових потоків шляхом його розчинення в спеціальному абсорбційному розчині MDEA (метилдиетаноламіні).

Абсорбційний метод очищення газів від CO₂ обрано через його значні переваги порівняно з альтернативами, такими як адсорбція, мембранна сепарація чи кріогенне розділення. Основною причиною є висока ефективність вилучення CO₂ (понад 95%) розчинами амінів, зокрема МДЕА, навіть при низьких концентраціях. Важливою є також висока селективність МДЕА до CO₂ при мінімальному поглинанні інших компонентів газу. Можливість багаторазової регенерації розчину шляхом нагрівання знижує експлуатаційні витрати. Абсорбери є гнучкими, масштабованими та легко інтегруються в існуючі технологічні схеми. Розвинена теоретична база спрощує моделювання та керування процесом [3].

Використання МДЕА є екологічно доцільним, мінімізуючи корозію та енергоспоживання. Абсорбційний процес добре піддається комп'ютерному моделюванню, що дозволяє аналізувати параметри та оптимізувати управління установкою. Таким чином, абсорбція CO₂ розчином МДЕА є технологічно обґрунтованим та практично вигідним методом для ефективного очищення газів [1].

Моделювання процесу абсорбції CO₂ передбачає використання математичних методів для аналізу масообміну, рівноваги між фазами та кінетики процесу. Для розрахунків статичного та динамічного режимів роботи буде використано спеціалізоване програмне забезпечення MATLAB.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

3.2 Створення та опис математичної моделі

3.2.1 Статична модель

Модель будується для процесу абсорбції CO_2 з аміаку у насадковому абсорбері із застосуванням метилдіетаноламіну (MDEA) як основного абсорбента. Вона базується на рівняннях масообміну та рівноважному стані між газовою та рідкою фазами. [7]

Основні припущення:

- Процес відбувається у насадковій колоні з рівномірним розподілом потоків.
- Газова фаза містить CO_2 , який абсорбується у рідкій фазі.
- Система розглядається у динамічному та статичному режимах.

Визначальними параметрами (вихідною регульованою величиною) абсорбера є концентрація CO_2 на виході.

Керуючими діями є витрата збідненого розчину МДЕА. Збуренням будемо вважати температуру реакції абсорбції всередині абсорбера.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

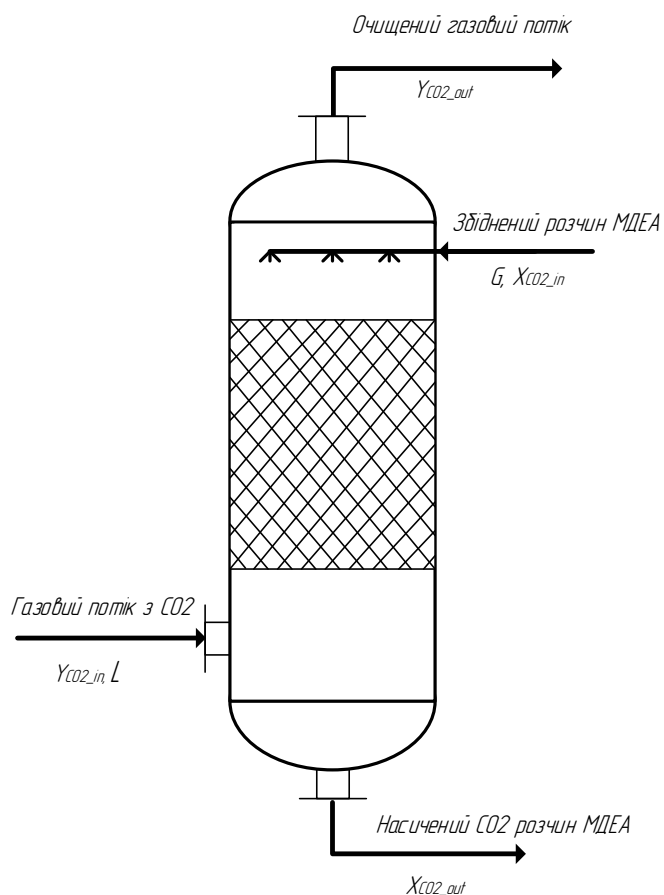


Рисунок 3.1 – Структурно-параметрична схема абсорбера

Де:

Вхідна та вихідна концентрація CO_2 у газі: $Y_{\text{CO}_2,\text{in}}$, $Y_{\text{CO}_2,\text{out}}$

Вхідна та вихідна концентрація CO_2 у розчині: $X_{\text{CO}_2,\text{in}}$, $X_{\text{CO}_2,\text{out}}$

Витрати газу та розчину МДЕА відповідно: L , G

Концентрації на міжфазній поверхні: g_x , g_y

Масообмінні потоки: L_{CO_2} , G_{CO_2} .

Рівняння 3.1 описує матеріальний баланс CO_2 у статичному режимі для процесу абсорбції [7].

$$\begin{cases} L \cdot Y_{CO2_{in}} - L \cdot Y_{CO2_{out}} - L_{CO2} \cdot \frac{(Y_{CO2_{in}} - ry) + (Y_{CO2_{out}} - rx)}{2} = 0 \\ G \cdot X_{CO2_{in}} - G \cdot X_{CO2_{out}} + G_{CO2} \cdot \frac{(ry - X_{CO2_{in}}) + (ry - X_{CO2_{out}})}{2} = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Перша частина являє собою зміну кількості розчиненої речовини в рідкій фазі. Вона залежить від витрати рідкої фази L та різниці концентрацій розчиненої речовини на вході та виході з рідкої фази. Друга частина являє собою зміну кількості розчиненої речовини в газовій фазі. Вона залежить від витрати газової фази G та різниці концентрацій розчиненої речовини на виході та вході з газової фази [7].

Дане рівняння показує, що кількість CO_2 , яка залишає газову фазу, дорівнює масопереносу CO_2 в рідку фазу з урахуванням рівноважної концентрації.

Рівноважний стан між газовою та рідкою фазами описується за законом Генрі:

$$Y = K \cdot X \quad (3.2)$$

- K - коефіцієнт рівноваги, який показує відношення концентрацій CO_2 між двома фазами при рівновазі.

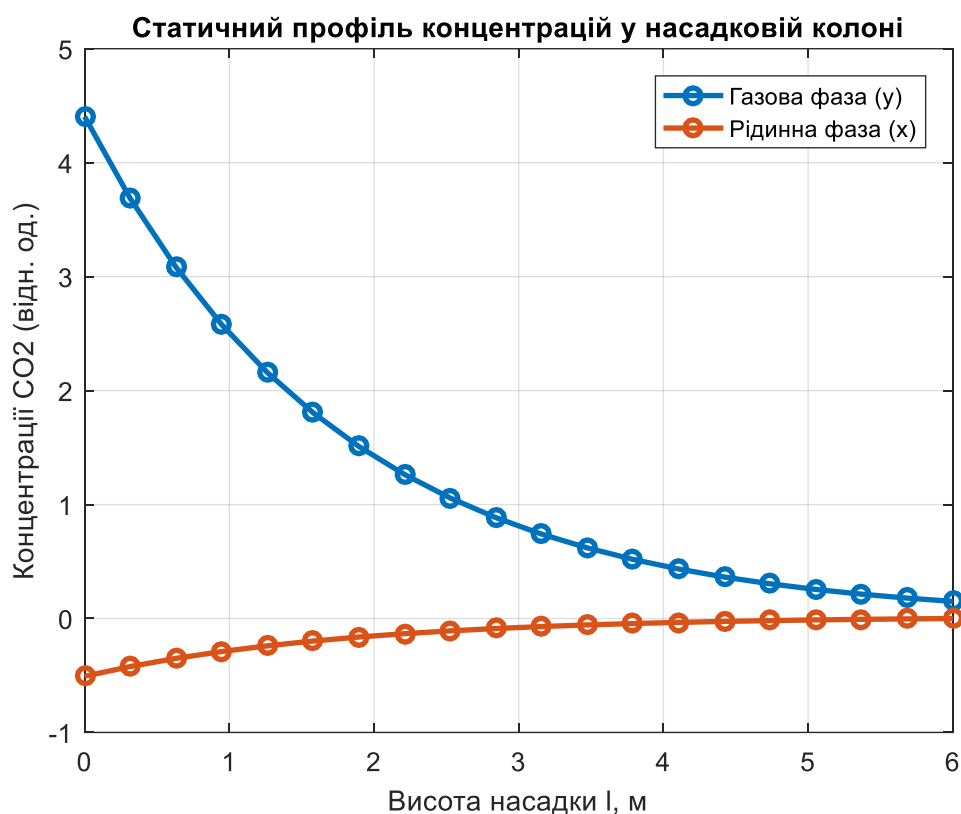


Рисунок 3.2 – Статичний профіль концентрації CO₂ у насадковому абсорбері

Виведемо рівняння статички для каналу «витрата МДЕА – концентрація CO₂ на виході», формула 3.3:

$$Y_{out} = Y_{CO2in} * \exp\left(\frac{S * K_v * H}{G}\right) \quad (3.3)$$

Згідно даних виробництва, підставляємо і будуємо відповідну статичну характеристику:

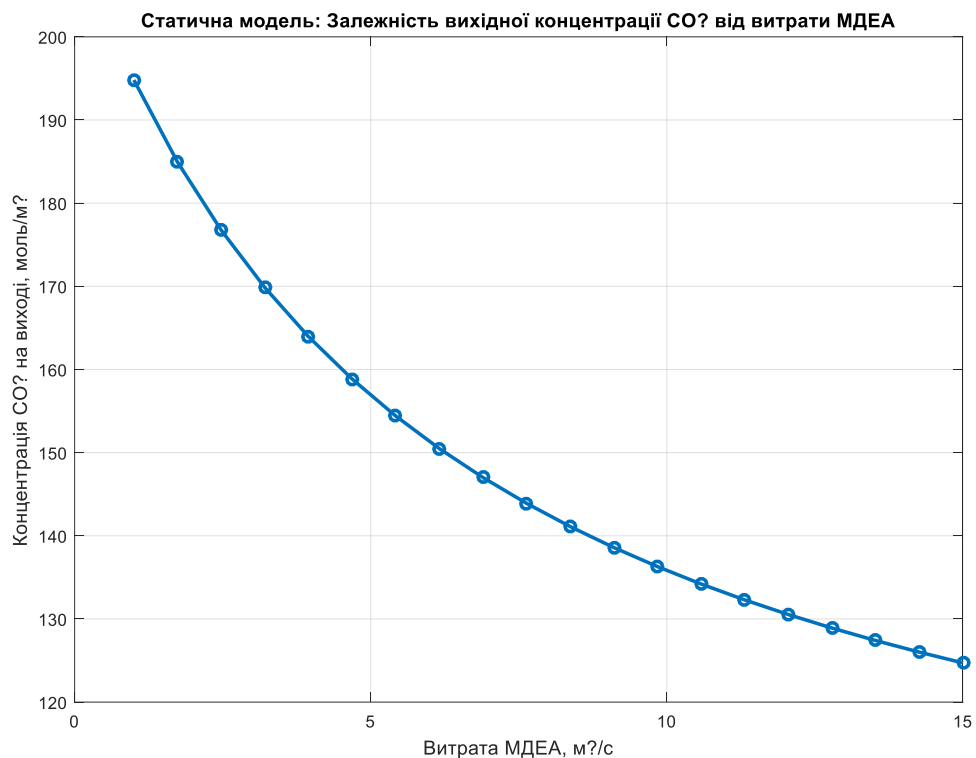


Рисунок 3.3 – Залежність витрати МДЕА – концентрації CO₂ на виході

Виведемо рівняння статички для каналу «зміна температури всередині абсорбера – концентрація CO₂ на виході», де збуренням виступає зміна температури на очищення. Загалом процес абсорбції CO₂ розчином МДЕА, відбувається при майже незмінній температурі 44 – 46.1 °C [4].

Врахуємо що збільшення температури всередині абсорбера є «збуренням». Зі збільшенням температури розчинність CO₂ у МДЕА зменшується, оскільки рівновага зміщується в бік десорбції (виділення CO₂ з рідини). Коефіцієнт рівноваги (K) залежить від температури. Його можна апроксимувати залежністю 3.4:

$$K(T) = K_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (3.4)$$

де: K_0 — значення коефіцієнта рівноваги при базовій температурі T_0 ,

α — емпіричний коефіцієнт температурного впливу,

T — температура процесу.

Виведемо рівняння статики 3.5 для каналу «збурення – концентрація CO₂ на виході»:

$$Y_{out} = Y_{CO2in} * \exp\left(-\frac{K_v S}{G} * \left(1 + \frac{K_0(T)L}{G}\right) H\right) \quad (3.5)$$

Будуємо відповідну статичну характеристику, при зміні температури:

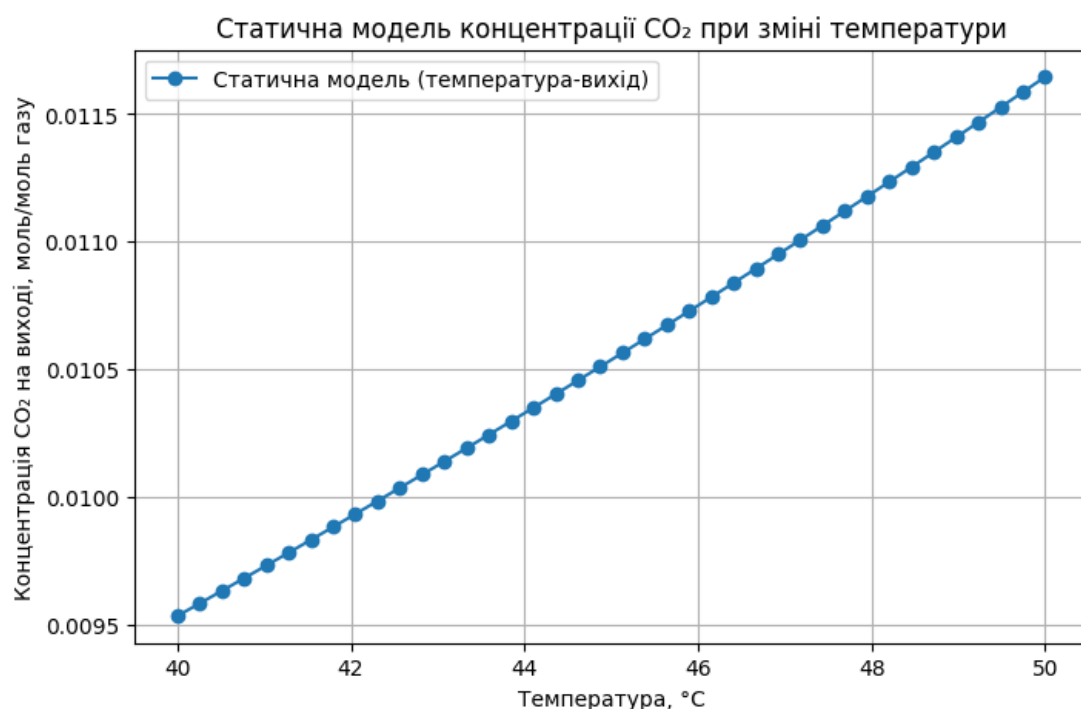


Рисунок 3.4 – Залежність збурення – концентрація CO₂ на виході

Логічним рішенням для системи було б навмисне зменшення температури в абсорбері, так як це призводить до кращої якості очищення, однак цього не роблять з кількох причин:

- При низькій температурі в'язкість MDEA зростає, що погіршує масоперенос і може зменшити швидкість абсорбції.
- Якщо розчин буде занадто холодним, це може знизити загальну ефективність процесу через сповільнення реакцій.

- Економічно вигідніше підтримувати оптимальний баланс між температурою і ефективністю абсорбції, ніж витратити надто багато енергії на охолодження.
- Охолодження (наприклад до 40°C) вимагатиме додаткових витрат енергії на роботу теплообмінників та холодильних установок.
- Якщо абсорбер працює при занадто низькій температурі, це означає, що потім доведеться затрачати більше енергії на підігрів перед регенерацією.

3.2.2 Динамічна модель

Температура в абсорбері впливає на рівноважний коефіцієнт $K(T)$, який змінюється з температурою. Це впливає на швидкість абсорбції CO_2 в розчині MDEA. Температурна залежність рівноважного коефіцієнта виражається формулою 3.6 [7]:

$$K(T) = K_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (3.6)$$

Динамічна модель враховує часові зміни концентрацій CO_2 в процесі абсорбції. Аналіз процесу абсорбції CO_2 у розчині MDEA базується на рівняннях матеріального балансу та рівноваги фаз. Враховуючи масоперенос між газовою і рідкою фазами, система рівнянь набуває вигляду 3.7 [7]:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = \frac{G}{V_g} (Y_{\text{CO}_2\text{in}} - Y) - \frac{K_v S}{V_g} (Y - Y_{\text{CO}_2\text{out}}) \\ \frac{dx}{dt} = -\frac{L}{V_g} (X_{\text{CO}_2\text{in}} - X) - \frac{K_v S}{V_g} (X - X_{\text{CO}_2\text{out}}) \end{cases} \quad (3.7)$$

Де:

X – концентрація CO_2 у рідкому розчині рідини в часі,

V_L – об'єм рідинної фази,

V_g – об'єм газової фази.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Рівняння енергетичного балансу для зміни температури T рідкої фази по висоті абсорбера наведено у формулі 3.8:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{K_T}{V_l} (T_{in} - T) - \frac{K_v S}{V_l \cdot C_p} (Y - Y_{CO2_{out}}) \Delta H \quad (3.8)$$

Ці рівняння описують динамічну зміну концентрації CO_2 на виході з абсорбера з часом, залежно від витрати МДЕА (G) та температури (T). Температура впливає на рівноважну концентрацію CO_2 , що змінює швидкість абсорбції CO_2 з газу в рідину [7].

Для лінеаризації рівняння приймаємо стаціонарні значення для вхідних параметрів і вводимо відхилення від їхніх стаціонарних значень. Таким чином, замість значень, які змінюються, ми працюємо з відхиленнями від стану рівноваги.

$$\Delta X(t) = X(t) - X_0, \quad (3.9)$$

$$\Delta Y_{out}(t) = Y_{out}(t) - Y_{out}, \quad (3.10)$$

$$\Delta Y_{out} = Y_{CO2_{in}} - Y_{CO2_{in,0}} \quad (3.11)$$

$$\frac{d\Delta X}{dt} = \frac{L_0}{V_L} (-\Delta X) + \frac{1}{V_L} (X_{in} - X_0) \Delta L + \frac{K_v S}{V_l} (\Delta Y - K_0 \Delta X) \quad (3.12)$$

Друге рівняння набуде вигляду:

$$\frac{d\Delta Y}{dt} = \frac{G}{V_G} (-\Delta Y_{CO2_{in}} - \Delta Y) - \frac{K_v S}{V_G} (\Delta Y - K_0 \Delta X) \quad (3.13)$$

Рівняння у просторі станів:

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = a_{11} \Delta X + a_{12} \Delta Y + b_1 \Delta L \\ \Delta \dot{Y} = a_{21} \Delta X + a_{22} \Delta Y + b_2 \Delta Y_{CO2_{in}} \end{cases} \quad (3.14)$$

Приймаємо перетворення Лапласа для отриманого рівняння:

$$(sI - A)X(s) = B * U(s) \rightarrow Y(s) = C(sI - A)^{-1}B * U(s) \quad (3.15)$$

Підставивши дані виробництва, отримаємо функцію за каналом «керування-вихід» яка має вигляд:

$$W(s) = \frac{0.0004021}{s^2 + 1.194e04s + 1.379e07} \quad (3.16)$$

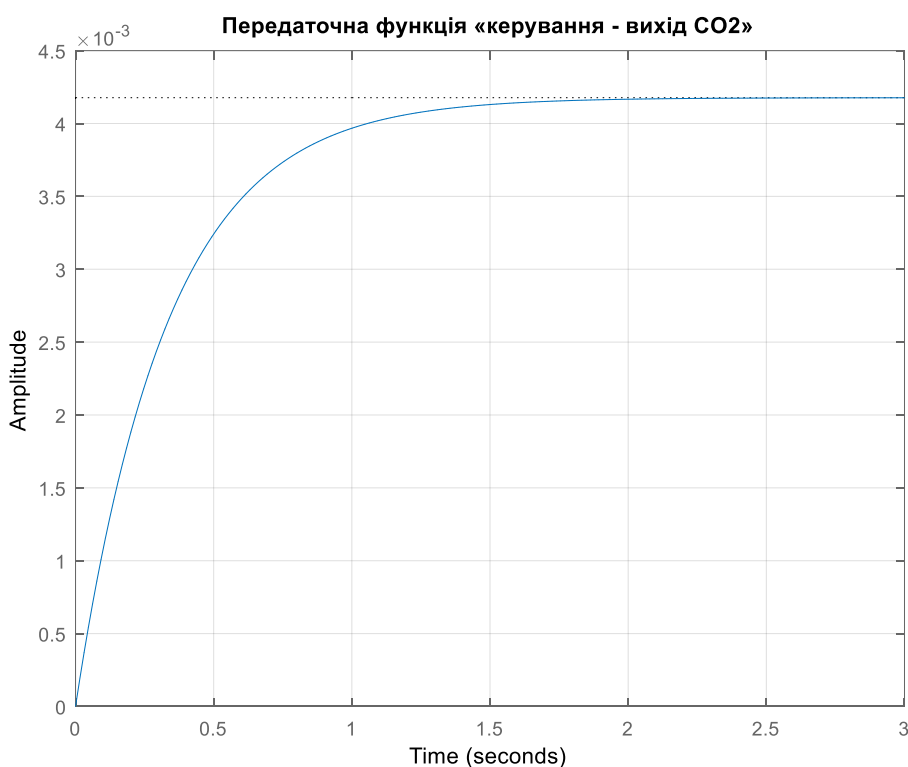


Рисунок 3.5 – Перехідна характеристика керування – вихід

За такою ж самою процедурою формуємо передатну функцію «збурення – вихід», де функція збурення – зміна температури всередині абсорбера. Підставивши дані виробництва, отримаємо функцію за каналом «збурення-вихід» яка має вигляд:

$$W(s) = \frac{1296s + 1.379e07}{s^2 + 1.194e04s + 1.379e07} \quad (3.17)$$

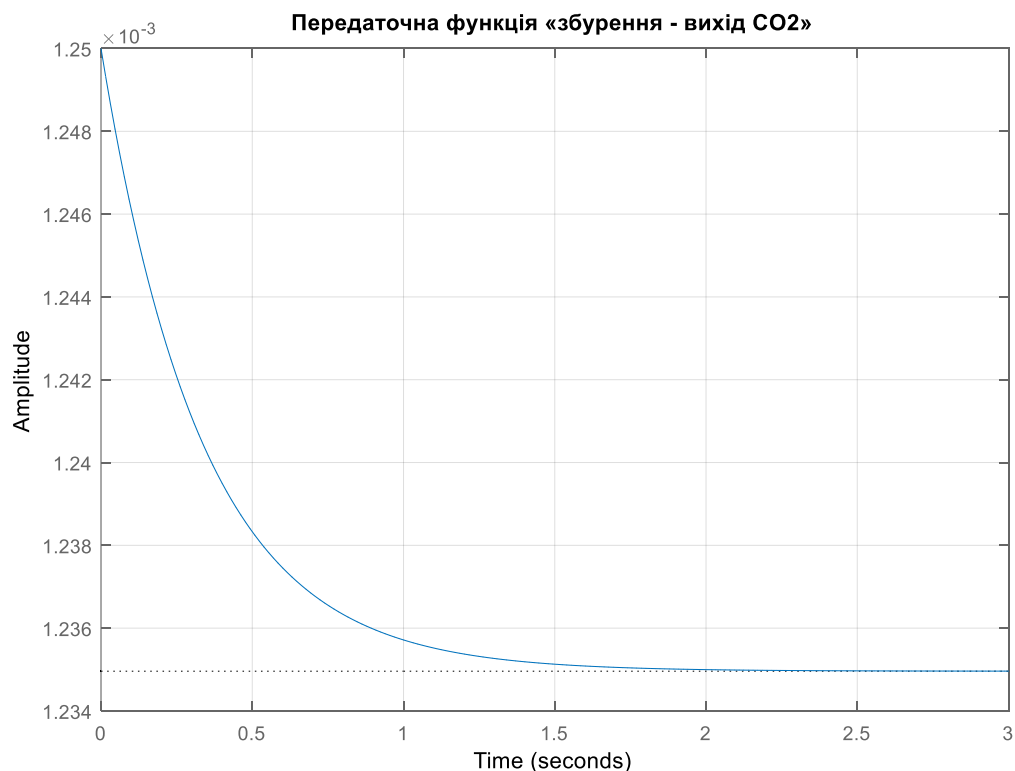


Рисунок 3.6 – Перехідна характеристика збурення – вихід

Параметри використані для моделювання статичної та динамічної моделі наведено в таблиці 3.1 нижче.

Таблиця 3.1– Параметри моделювання

Назва параметра	Значення
Витрата газу, G	1.8 м ³ /с
Вхідна концентрація CO ₂ , C_CO2_in	175.845 моль/м ³
Коефіцієнт масопереносу, kv	0.05 м/с
Площа контакту фаз, A	50 м ²
Об'єм газової фази, V_g	5 м ³
Витрата розчину МДЕА, L	14.78 м ³ /с
Рівноважний коефіцієнт при 45°C, K0	0.1

Продовження таблиці 3.1

Концентрація CO ₂ в рідині на виході, X ₀	0.625
Концентрація CO ₂ в свіжому розчині, X _{in}	0.0001
Діаметр колони, D	5.0 м ³
Емпіричний коефіцієнт температури, alpha	0.02 (1/°C)

Висновок

У розділі 3 було проведено математичне моделювання процесу абсорбції CO₂ в абсорбері за допомогою розчину метилдіетаноламіну (MDEA). Моделювання включало створення статичної та динамічної моделей, що дозволило детально проаналізувати процес очищення газу.

Статична модель зосереджена на визначенні матеріального балансу між газовою та рідкою фазами. Для цього було розроблено рівняння, яке описує залежність концентрації CO₂ в розчині від витрат газу та розчину MDEA, а також температури. Моделювання показало, що зміни температури всередині абсорбера можуть суттєво впливати на розчинність CO₂ в абсорбенті, що в свою чергу позначається на ефективності очищення газу.

Динамічна модель дозволила врахувати часові зміни в концентрації CO₂, залежно від таких змінних, як витрата газу та температурні коливання. Застосувавши рівняння матеріального балансу та кінетики процесу, була отримана динамічна характеристика абсорбції, яка дає можливість оптимізувати управління процесом в реальному часі. Таким чином, створені моделі дозволяють не тільки

теоретично проаналізувати процес очищення, але й оптимізувати його параметри для досягнення максимальної ефективності.

Моделювання та аналіз допомогли встановити ключові параметри для подальшої оптимізації процесу, що сприяє зменшенню енергетичних витрат, покращенню якості очищеного газу та забезпеченню стабільності роботи установки.

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

4. Синтез системи керування

4.1 Використання сучасних програмних засобів для моделювання та розрахунку

Для моделювання та розрахунку системи керування абсорбційним процесом обрано середовище MATLAB/Simulink. MATLAB/Simulink є потужним інструментом для моделювання динамічних систем і має вбудовані засоби для роботи з передатними функціями, регуляторами та нелінійними моделями. Наявність спеціалізованих бібліотек дозволяє ефективно розробляти математичні моделі абсорбційного процесу, інтегрувати регулятори та аналізувати поведінку системи в різних режимах роботи.

Процес налаштування регуляторів буде реалізовано в середовищі Simulink, яке надає інтегровані засоби для моделювання та конфігурування систем керування. В ході дослідження буде проведено експерименти з варіацією параметрів регуляторів із застосуванням методів налаштування, що базуються на аналізі характеристик системи та встановлених вимог. Зазначений підхід забезпечує можливість проведення віртуальних експериментів з метою оптимізації параметрів регуляторів та оцінки їхньої ефективності на основі кількісних метрик і графічних інтерпретацій. У третьому розділі дипломного проекту була створена динамічна модель системи керування, яка буде використана для проведення досліджень з метою оцінки її ефективності та визначення оптимальних параметрів.

4.2 Налаштування параметрів регуляторів

Для забезпечення ефективної роботи системи керування проводиться налаштування параметрів регуляторів, що дозволяє досягти бажаних характеристик динаміки системи. Вибір типу регулятора базується на аналізі передатних функцій та динамічних характеристик об'єкта керування. У рамках цього дослідження розглядаються пропорційний (П), пропорційно-інтегральний (ПІ), пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятори [8].

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Використання відкритої системи керування в цьому випадку не є ефективним, оскільки вона не враховує відхилення вихідного параметра від бажаного значення. Відсутність зворотного зв'язку означає, що система не може автоматично компенсувати зміну вхідних умов, що може призвести до нестабільності та невідповідності концентрації CO_2 на виході заданим нормам. У закритій системі, завдяки використанню регулятора, ми можемо контролювати концентрацію CO_2 , автоматично коригуючи подачу розчину MDEA залежно від реальних значень на виході. Оскільки наша дослідження – забезпечити стабільне та ефективне очищення газу з мінімальними втратами реагенту та максимальною відповідністю вихідної концентрації CO_2 заданому значенню, ми будемо використовувати подальші розрахунки та налаштування регулятора саме для закритої системи керування.

4.2.1 Налаштування параметрів регуляторів через Tune

Налаштування регуляторів здійснюється у середовищі Simulink, що надає зручні інструменти для моделювання та автоматичної оптимізації параметрів регуляторів. Одним із таких інструментів є PID Tuner. Після ініціалізації моделі у Simulink, можна відкрити інструмент Tune, обрати бажану структуру регулятора (наприклад, P, PI або PID) і задати критерії. Tune автоматично лінеаризує модель навколо робочої точки та виконує аналіз частотної характеристики. Отримані параметри можна інтерактивно змінювати через повзунки або графік перехідної характеристики, що дозволяє досягти бажаної якості керування — наприклад, мінімального перерегулювання або заданого часу встановлення [8].

Систему керування з використанням передатної функції отриманої у розділі 3 наведено на малюнку 4.1:

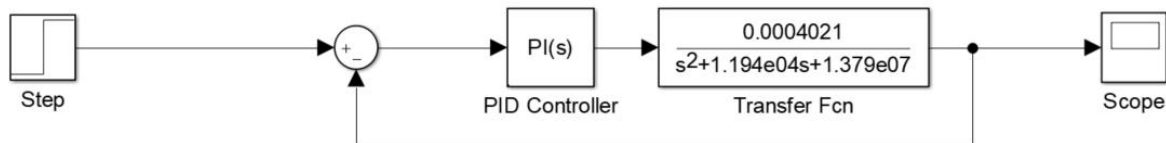


Рисунок 4.1 – Система керування з використанням передатної функції

Схема моделювання системи керування в Simulink складається з таких основних блоків:

- Step (Одиничний стрибок) – генерує вхідний сигнал (ступінчастий вплив).
- Суматор (+, -) – обчислює помилку між бажаним значенням (вихід Step) і фактичним виходом системи (зворотний зв'язок).
- PID Controller – регулятор, який коригує сигнал керування на основі помилки. Він змінює коефіцієнти K_p , K_i , K_d для досягнення бажаного результату.
- Transfer Fcn (Передавальна функція) – об'єкт керування з передавальною функцією.

Для початку використовуючи функцію PID Tuner, створимо налаштування для Р регулятора:

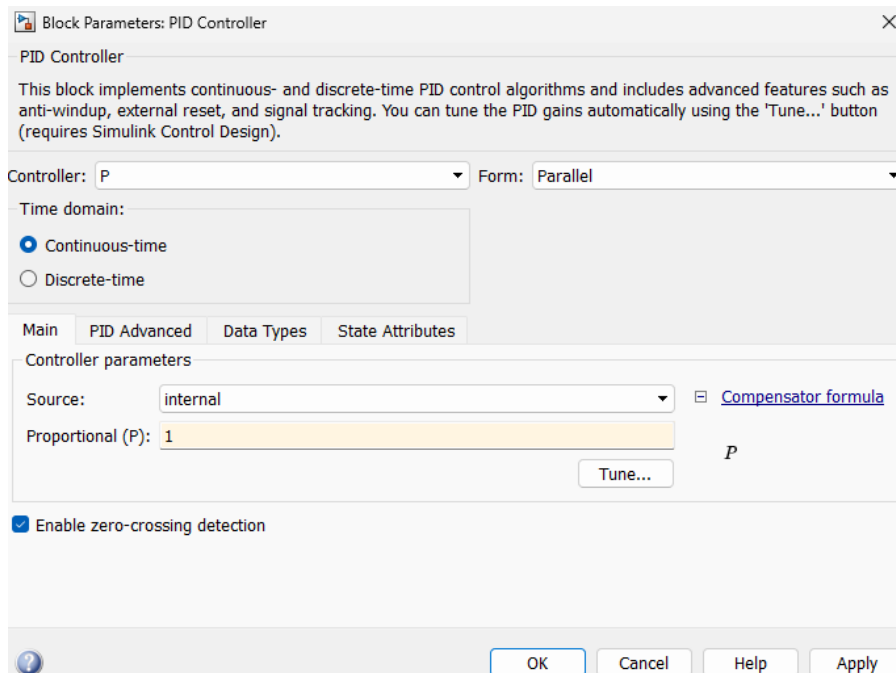


Рисунок 4.2 – Вікно створення та налаштування регулятора

Оберемо відповідний тип контролера, та використаємо Tune:

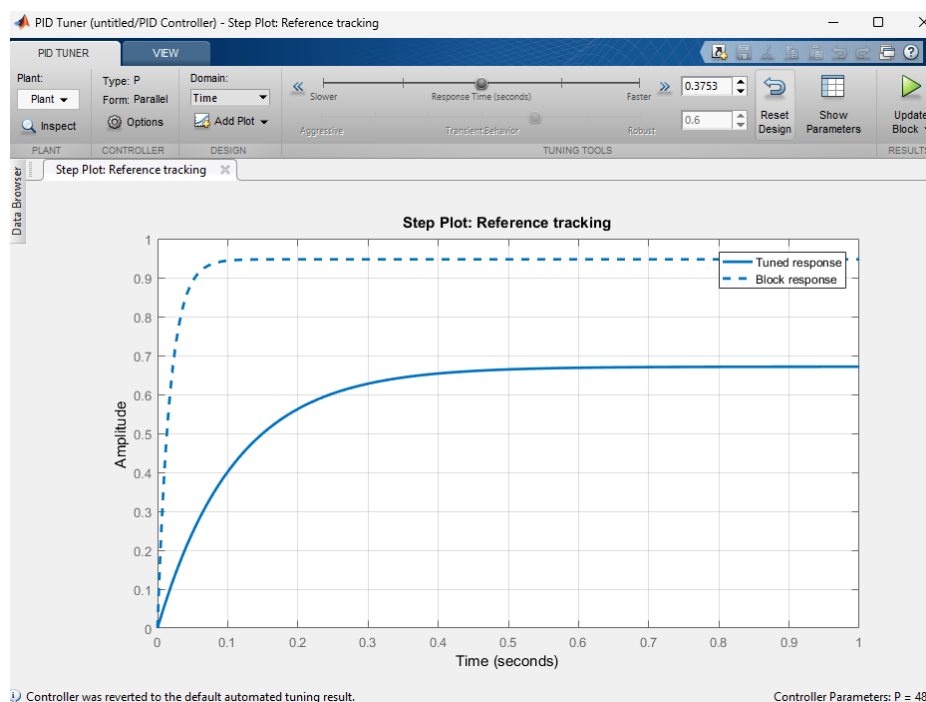


Рисунок 4.3 – Результати налаштування Р-регулятора в середовищі MATLAB PID Tuner

Нажаль можливості в Р-регулятора не вистачило щоб вийти на задане завдання, тому продовжимо так само для PI-регулятора:

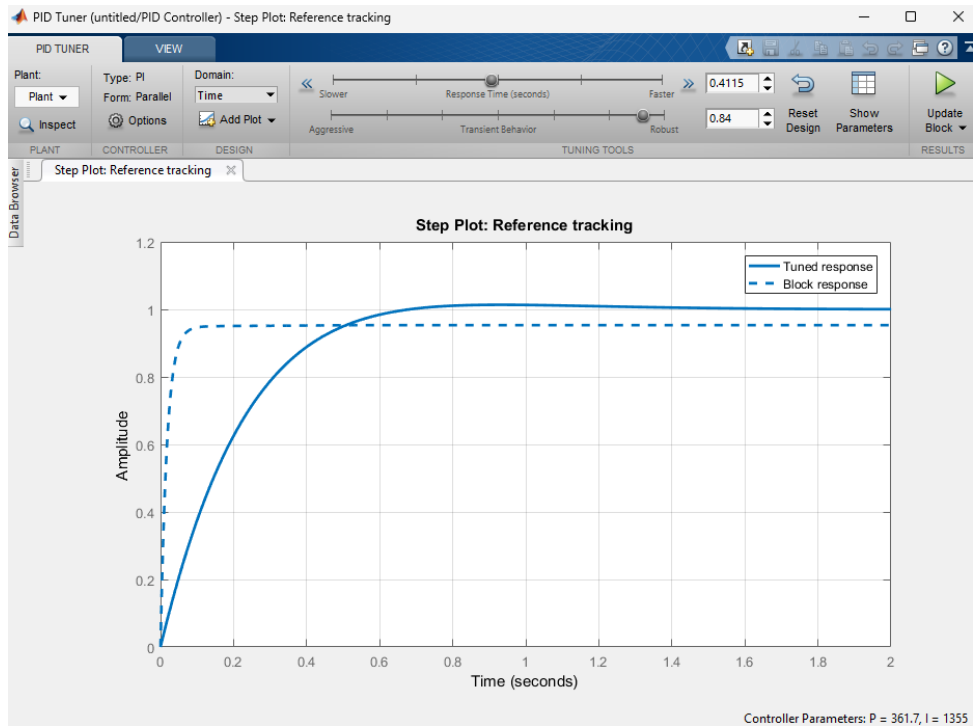


Рисунок 4.4 – Результати налаштування PI-регулятора в середовищі MATLAB
PID Tuner

Результатом налаштування PI-регулятора стали коефіцієнти:
P – 361.701 та I – 1354.622 :

Перехідна характеристика замкненої системи з відповідно налаштованим регулятором зображена на рисунку нижче:

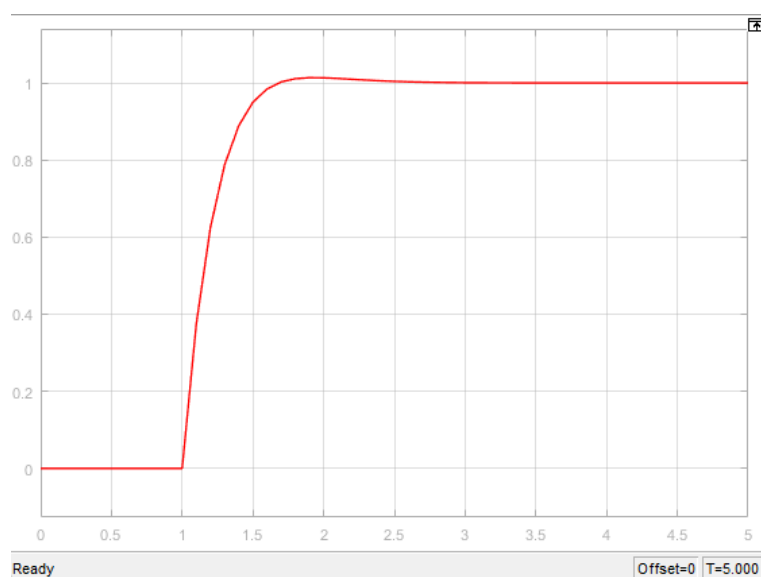


Рисунок 4.5 – Осцилограма вихідного сигналу PI-регулятора

Проведемо ті самі дії для PID-регулятора:

Результатом налаштування PID-регулятора стали коефіцієнти:

$P - 320.214$, $I - 1915.011$, $D - -3.886$.

Перехідна характеристика замкненої системи з відповідно налаштованим регулятором зображена на рисунку нижче:

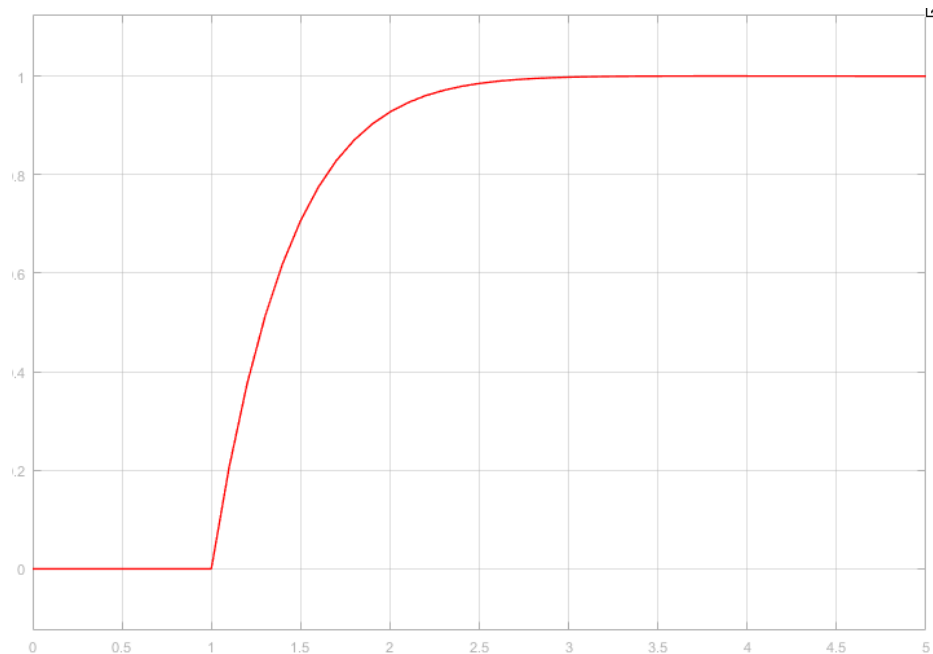


Рисунок 4.6 – Осцилограма вихідного сигналу PID-регулятора

4.2.2 Частотний метод автоматичного налаштування

Даний метод базується на частотному аналізі лінійних систем керування і використовується для дослідження стійкості та динамічних властивостей об'єкта, а також для автоматичного налаштування регулятора. Основна ідея полягає в тому, що замість аналізу системи у часовій області (наприклад, через перехідну характеристику), розглядається її поведінка на різних частотах в усталеному режимі. Для цього будуються частотні характеристики, такі як діаграми Бode, Найквіста та логарифмічна амплітудно-фазова характеристика, які дозволяють оцінити запас стійкості та визначити частоти, на яких система поводить себе нестабільно або має значні коливання. Отримана інформація використовується для

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

автоматичного налаштування регулятора, щоб забезпечити бажану якість перехідного процесу, підвищити точність регулювання та гарантувати стійкість замкненої системи. Метод дозволяє швидко підібрати параметри регулятора без ручного моделювання, що особливо зручно на етапах проєктування або оптимізації систем автоматичного керування [9].

Для PI-регулятора код розрахунку Matlab набуває вигляду:

```
% Передаточна функція
s = tf('s');
W1 = 0.06249 / (5*s + 14.96);
w = logspace(-1, 2, 500); % Частоти від 0.1 до 100 рад/с
[mag1, phase1] = bode(W1, w);

mag1_db = 20*log10(squeeze(mag1));

% Побудова Bode-діаграми
figure;
plot(w, mag1_db);
grid on;
title('Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ)');
xlabel('Частота (рад/с)');
ylabel('Амплітуда (дБ)');

% Оптимізація PID через частотний аналіз
PID_reg = pidtune(W1, 'PI');
Kp = PID_reg.Kp;
Ki = PID_reg.Ki;

disp(['Kp = ', num2str(Kp)]);
disp(['Ki = ', num2str(Ki)]);

% Побудова Bode-діаграми для порівняння
cl_sys = feedback(PID_reg * W1, 1);
W11 = feedback(W1, 1);
figure;
bode(W1, 'b', cl_sys, 'r--');
grid on;
legend('Без налаштування', 'З налаштуванням');
title('Bode-діаграма після налаштування PID');
```

Результатом виконання коду є два відповідних графіка, та коефіцієнти для регулятора. На рисунку 4.7 представлена амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) динамічної системи, яка демонструє зниження амплітуди зі збільшенням частоти. Початкове значення амплітуди складає приблизно -45 дБ, а при частоті 100 рад/с воно падає до -80 дБ. Характер зміни плавний та монотонний, без різких коливань, що вказує на систему першого порядку. Відсутність резонансних ефектів свідчить про стабільність системи та її здатність ефективно придушувати

високочастотні складові сигналу. Можна припустити, що об'єкт керування має полюс у лівій півплощині і демонструє загасаючу динаміку. Це означає, що система є стійкою, інерційною і може бути використана як частина автоматизованої системи керування.

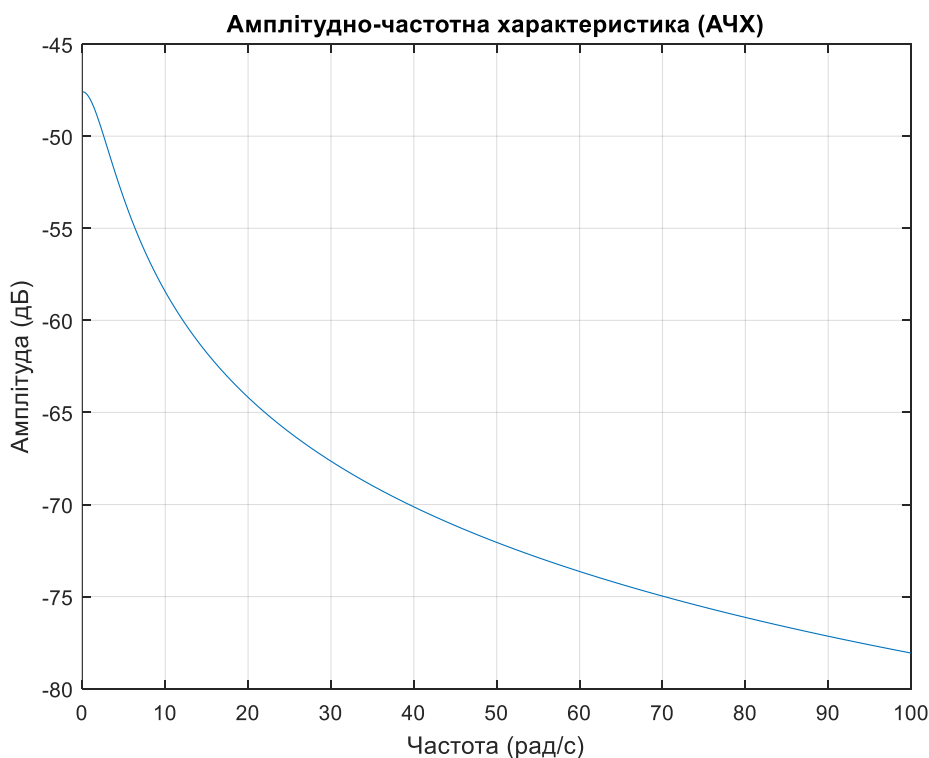


Рисунок 4.7 – Амплітудно-частотна характеристика системи

На рисунку 4.8 представлена Bode-діаграма системи до і після налаштування ПІ-регулятора. Синя лінія позначає систему без налаштування, а червона пунктирна лінія – систему після застосування ПІ-регулятора. Після налаштування спостерігається збільшення амплітуди на низьких і середніх частотах, що вказує на покращення підсилення системи, а також вирівнювання частотної характеристики, що сприяє стабільній роботі. Підбір коефіцієнтів регулятора $K_p = 249.5499$ та $K_i = 2240.8187$ дозволив підвищити динамічні характеристики системи, зокрема покращити її швидкодію та точність, зменшивши вплив збурень і забезпечивши необхідну компенсацію фазового зсуву.

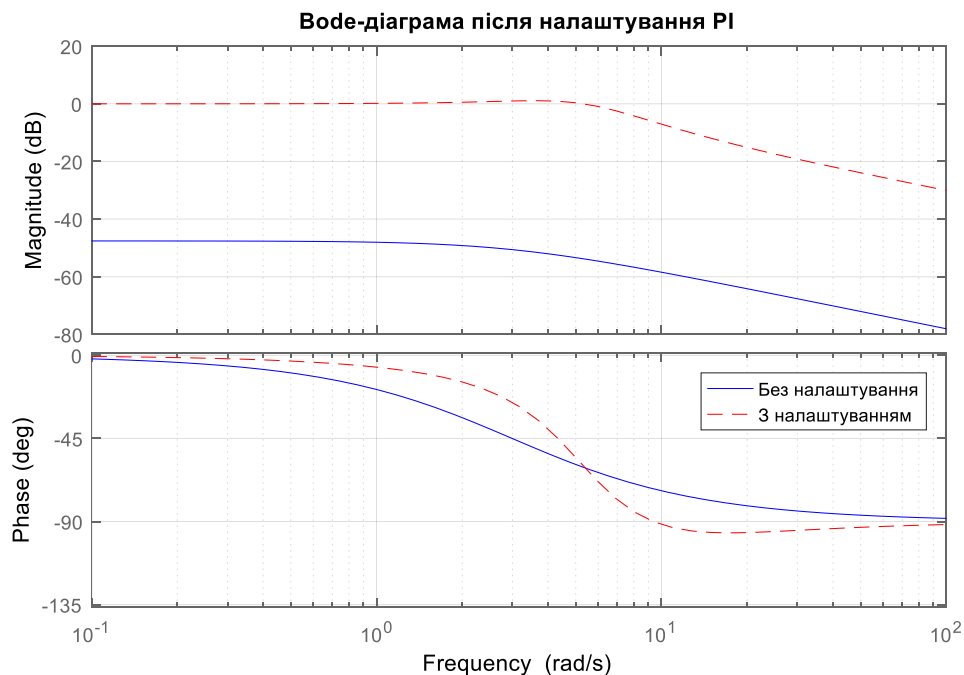


Рисунок 4.8 – Результат до і після налаштувань PI-регулятора

Проведемо ті самі дії, тільки для налаштування PID-регулятора. На рисунку 4.9 представлена Bode-діаграма системи до і після налаштування PID-регулятора.

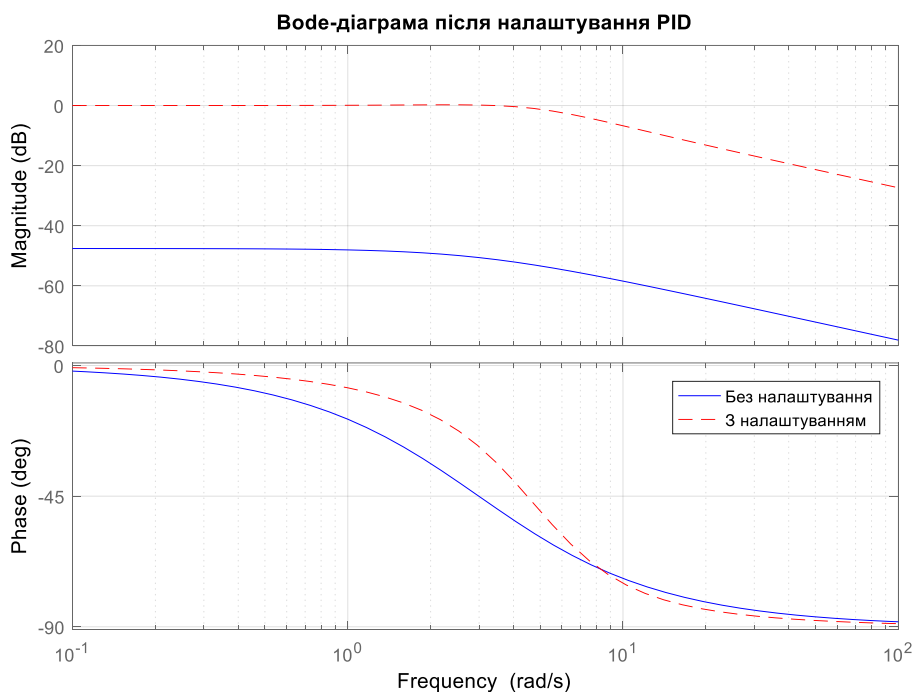


Рисунок 4.9 – Результат до і після налаштувань PID-регулятора

Після налаштування помітне збільшення амплітуди на низьких і середніх частотах, що свідчить про покращення підсилюючих властивостей системи, а також про підвищену стабільність у широкому діапазоні частот. Фазова характеристика після налаштування демонструє зменшення фазового зсуву, що сприяє покращенню запасу стійкості. Використані коефіцієнти регулятора $K_p = 342.714$, $K_i = 1858.6114$ та $K_d = 0$ свідчать про реалізацію PI-регулятора, оскільки диференціальна складова не використовується. Це може бути зумовлено тим, що MATLAB автоматично визначив оптимальні параметри і не включив D-компоненту, оскільки вона не покращує динаміку системи або її вплив є незначним. Крім того, якщо об'єкт керування є аперіодичним або не має різких змін вихідного сигналу, то застосування диференціальної складової не є ефективним. У таких випадках PID-регулятор поводить себе як PI-регулятор, забезпечуючи гарне відпрацювання постійних та повільнозмінних збурень, водночас компенсуючи статичну похибку системи.

Порівняння результатів налаштування PI- та PID-регуляторів показує ключові відмінності у динамічних характеристиках системи. Після застосування обох регуляторів спостерігається покращення підсилюючих властивостей, підвищення запасу стійкості та зменшення фазового зсуву. Відмінності між PI- та PID-регуляторами проявляються у швидкодії та чутливості до шумів. Використання PI-регулятора забезпечує стабільну роботу, ефективно компенсує статичну похибку та покращує перехідний процес, проте незначно поступається PID-регулятору у швидкодії. У свою чергу, PID-регулятор дозволяє прискорити реакцію системи та зменшити перерегулювання завдяки диференціальній складовій, однак може бути більш чутливим до шуму та викликати коливання у нестабільних системах. Аналіз отриманих діаграм показує, що для даної системи PID-регулятор не дає суттєвих переваг у порівнянні з PI-регулятором, оскільки диференціальна складова не відіграє значної ролі через відсутність різких змін у поведінці системи.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З економічної точки зору PI-регулятор є більш вигідним, оскільки він простіший у реалізації, вимагає менше ресурсів для налаштування та обслуговування, а також знижує ризик нестабільності, що важливо для довготривалої роботи системи.

Враховуючи отримані результати, PI-регулятор є оптимальним вибором для цієї системи, оскільки він забезпечує достатню точність і стабільність роботи при мінімальних витратах на впровадження та підтримку.

4.3 Аналіз системи керування на стійкість

Критерій Михайлова

Критерій Михайлова — це графічний метод визначення стійкості лінійних систем автоматичного керування за допомогою аналізу частотних характеристик системи. Критерій Михайлова стверджує, що для стійкої системи на площині комплексних чисел (Re, Im) має бути відображення полінома характеристичного рівняння у вигляді послідовного обертання [10].

```
% Передаточна функція об'єкта
s = tf('s');
W1 = 0.06249 / (5*s + 14.96);

% PI-регулятор
Kp = 249.5499;
Ki = 2240.8187;
C_pi = pid(Kp, Ki);

% Замкнена система
W_cl = feedback(C_pi * W1, 1);
W_cl

% Отримуємо характеристичний поліном (знаменник)
[~, den] = tfdata(W_cl, 'v');
n = length(den) - 1; % порядок системи

% Побудова Михайлової діаграми
w = logspace(-2, 2, 1000); % частоти
D = polyval(den, 1i*w); % D(jw)

% Обчислення аргументу (фази) для кожної точки
phi = unwrap(angle(D)); % розгортка фази для безперервного оберту
delta_phi = (phi(end) - phi(1)) * 180/pi; % зміна фази у градусах

% Побудова діаграми
figure;
plot(real(D), imag(D), 'b', 'LineWidth', 2);
```

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

xlabel('Re D(j?) ');
ylabel('Im D(j?) ');
title('Діаграма Михайлова');
grid on;
hold on;
plot([0 0], ylim, 'r--');
plot(xlim, [0 0], 'r--');
hold off;

```

Результат є годограф Михайлова зображений на рисунку 4.10.

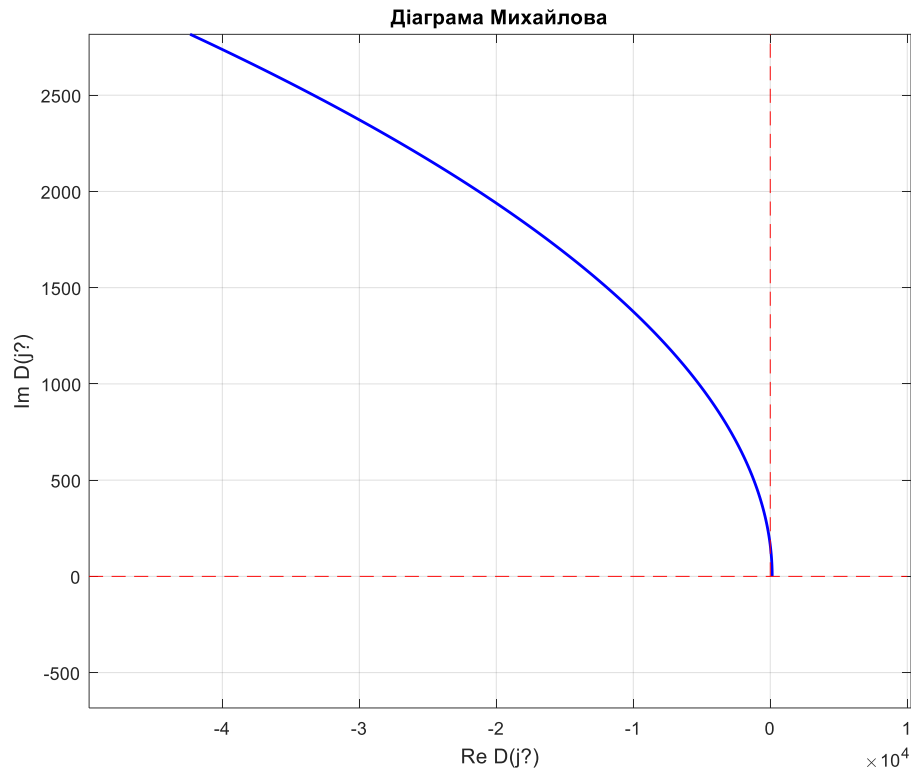


Рисунок 4.10 – Результат стійкості системи за Михайловим

Для стійкої системи траєкторія має пройти навколо початку координат (0,0) n разів проти годинникової стрілки, де n — порядок характеристичного полінома (в даному випадку — 2). Можна стверджувати що система є стійкою за критерієм Михайлова [10].

Критерій стійкості за Найквістом

Для критерію Найквіста необхідно побудувати діаграму Найквіста. Ця діаграма дозволяє візуально визначити стійкість замкненої системи за поведінкою її частотної характеристики [10].

```

% Передаточна функція об'єкта
s = tf('s');
W1 = 0.06249 / (5*s + 14.96);

```

```

% PI-регулятор
Kp = 249.5499;
Ki = 2240.8187;
C_pi = pid(Kp, Ki);

% Замкнена система
W_cl = feedback(C_pi * W1, 1);
W_cl
figure
nyquist(W_cl)

```

Результатом є діаграма Найквіста:

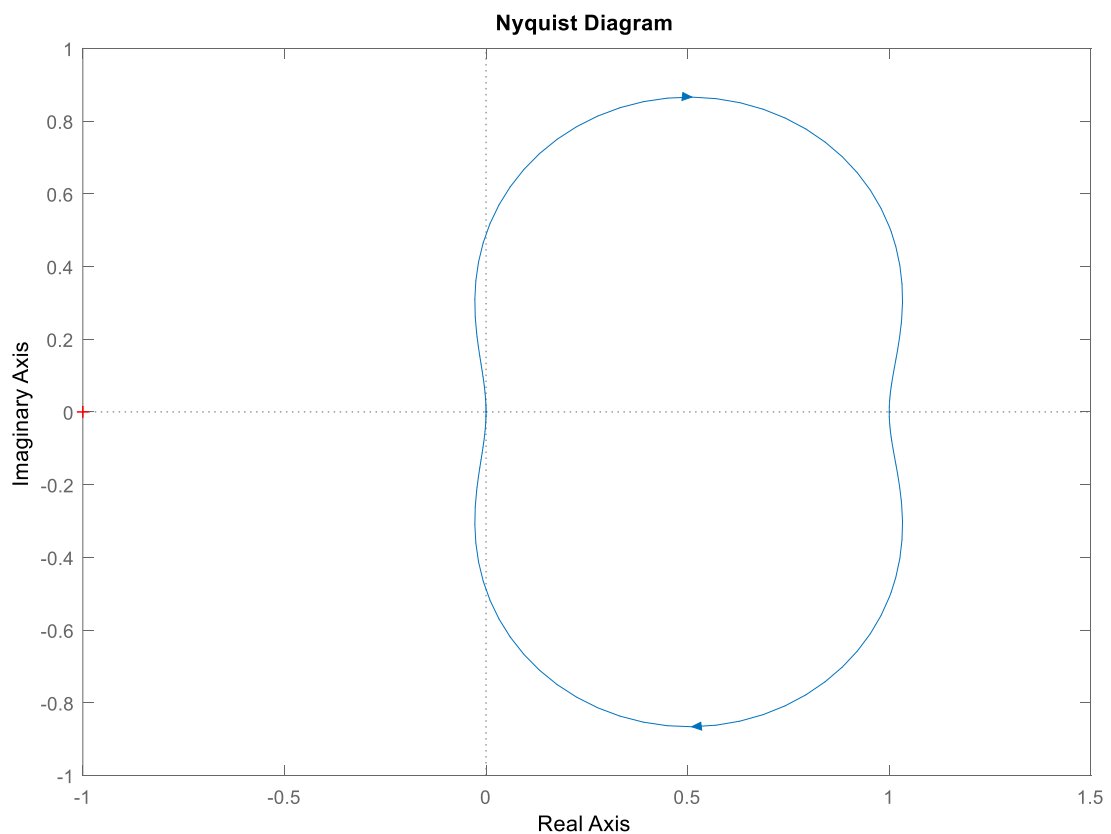


Рисунок 4.11 – Результат стійкості системи за Найквістом

На основі побудованої діаграми Найквіста встановлено, що годограф відкритої системи не охоплює критичну точку $-1 + j0$, а також не проходить через неї. Це свідчить про відсутність нестійких коренів характеристичного рівняння замкненої системи. Згідно з критерієм Найквіста, за таких умов система є

асимптотично стійкою [9]. Отже, розроблена система автоматичного регулювання відповідає вимогам до стійкості Найквіста.

Висновок

У даному розділі виконано синтез системи керування процесом абсорбції CO₂ на основі передатної функції, отриманої в результаті математичного моделювання. Для реалізації системи регулювання використано середовище MATLAB Simulink, де побудовано модель замкненої системи із зворотним зв'язком.

За допомогою інструменту PID Tuner було налаштовано PI-регулятор з коефіцієнтами $P = 361.701$ та $I = 1354.622$. Він забезпечив стабільну динаміку без перерегулювання. Спроба використання PID-регулятора виявилася недоцільною через низьку ефективність диференціальної складової та підвищену чутливість до шумів. Таким чином, PI-регулятор було обрано як оптимальний варіант для даного процесу. Також застосовано частотний метод налаштування, який дозволив оцінити запаси стійкості та швидкодії за діаграмами Боде й Найквіста.

Визначено, що система має адекватний запас стійкості та відповідає вимогам до якості регулювання. Критерій Найквіста підтвердив асимптотичну стійкість: годограф замкненої системи не охоплює критичну точку, що свідчить про її надійність при роботі в динамічному режимі.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

5 Статична оптимізація технологічного процесу абсорбції

5.1 Постановка задачі оптимізації. Формування критеріїв оптимальності

У рамках оптимізації процесу абсорбції вуглекислого газу (CO_2) з газу за допомогою водного розчину метилдиетаноламіну (MDEA) ставиться задача знаходження такого режиму подачі абсорбенту, за якого забезпечується задана ефективність очищення за мінімальних витрат енергії. Керуючий вплив — витрата розчину MDEA (позначимо як G_{MDEA}) Вихідна величина — концентрація CO_2 у газі після абсорбера ($y_{\text{CO}_2, \text{out}}$)

В якості критерію оптимальності обираємо квадратичну функцію 5.1, яка враховує бажане значення концентрації CO_2 на виході з абсорбера [11]:

$$J = q \cdot (y_{\text{CO}_2, \text{out}} - y_{\text{CO}_2, \text{зад}})^2 + r \cdot G_{\text{MDEA}}^2 \quad (5.1)$$

де:

- q, r — вагові коефіцієнти;
- $y_{\text{CO}_2, \text{зад}}$ — задана концентрація CO_2 після очищення (наприклад, 0.01%);
- G_{MDEA} — витрата розчину MDEA (кг/с).

Через обмеження пропускної здатності трубопроводу, потужності насосу, геометричних розмірів апарату виникають певні обмеження на витрату грійних газів. Тому встановимо межі по керуючому впливу [11]:

$$G_{\text{MDEA}}^{\min} \leq G_{\text{MDEA}} \leq G_{\text{MDEA}}^{\max} \quad (5.2)$$

де $G_{\text{MDEA}}^{\min} = 10$ кг/с; $G_{\text{MDEA}}^{\max} = 20$ кг/с.

Забезпечення необхідної якості очищення:

$$y_{\text{CO}_2, \text{out}} \leq y_{\text{CO}_2, \text{зад}} = 0.01\% \quad (5.3)$$

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

На основі математичної моделі процесу (матеріальні та теплові баланси) знайти оптимальне значення G_{MDEA} , яке мінімізує функцію J за заданих обмежень. Математична модель статички абсорбера CO_2 з розчином MDEA [11]:

$$G_g \cdot c_g \cdot (y_{in} - y_{out}) - K_L \cdot F_a \cdot (y_{in} - y^*) = 0 \quad (5.4)$$

$$G_{MDEA} \cdot c_l \cdot (T_{in}^l - T_{out}^l) + \Delta H_{abs} \cdot N_{CO_2} + \alpha \cdot F_a \cdot (T_{out}^g - T_{out}^l) = 0 \quad (5.5)$$

$$G_{MDEA} \cdot (Q_{in} - Q_{out}) - N_{CO_2} = 0 \quad (5.6)$$

де:

- G_g — витрата газу, кг/с
- c_g — теплоємність газу, кДж/(кг·К)
- y_{in}, y_{out} — концентрація CO_2 на вході/виході з абсорбера
- y^* — рівноважна концентрація CO_2 у газі
- K_L — коефіцієнт масопереносу у рідині, м/с
- F_a — поверхня масообміну, м²
- G_{MDEA} — витрата розчину MDEA, кг/с
- c_l — теплоємність рідини, кДж/(кг·К)
- T_{in}^l, T_{out}^l — температура рідини на вході/виході
- T_{out}^g — температура газу на виході
- ΔH_{abs} — теплота хімічної реакції абсорбції CO_2 , кДж/моль
- N_{CO_2} — кількість поглинутого CO_2 , моль/с
- Q_{in}, Q_{out} — концентрація CO_2 у розчині (моль/кг MDEA)
- α — коефіцієнт теплопередачі між фазами, Вт/(м²·К)

5.2 Розв'язання задачі умовної статичної оптимізації з використанням методу штрафних функцій

Метод штрафних функцій дозволяє перетворити умовну задачу оптимізації (тобто з обмеженнями) на безумовну. Це робиться шляхом додавання до цільової функції штрафів за порушення обмежень [11]. Формується штрафна функція як:

$$\Phi(x) = J(x) + M \cdot \text{Штраф}(x) \quad (5.7)$$

Штрафна функція 5.8:

$$\begin{aligned} \Phi(G_{MDEA}) = J(G_{MDEA}) + M \cdot \max(0, G_{min} - G_{MDEA})^2 + \\ + M \cdot \max(0, G_{MDEA} - G_{min})^2 \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$y_{out} = y_{eq} + (y_{in} - y_{eq}) \cdot \exp\left(-\frac{K_L \cdot F_a}{G_g \cdot c_g}\right) \quad (5.9)$$

Кроки для вирішення:

1. Обчислюємо похідну штрафної функції:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial G_{MDEA}} \approx \frac{\Phi(G_{MDEA} + \delta) - \Phi(G_{MDEA} - \delta)}{2\delta} \quad (5.10)$$

2. Оновлюємо значення:

$$G_{MDEA}^{\text{нове}} = G_{MDEA}^{\text{старе}} - \alpha \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial G_{MDEA}} \quad (5.11)$$

3. Обмежуємо у допустимому діапазоні:

$$G_{MDEA} \in [G_{min}, G_{max}] \quad (5.12)$$

4. Повторюємо кроки, поки не знайдемо мінімум.

Лістинг програми наведено в додатку Б.

Результат виконання програми:

$q = 50$: $G_m = 1.60414$, $y_{out} = 0.049630$, $J = 0.335853$

$q = 75$: $G_m = 1.73579$, $y_{out} = 0.038882$, $J = 0.363859$

$q = 100$: $G_m = 1.80802$, $y_{out} = 0.033144$, $J = 0.380456$

Зміну критерію оптимальності, витрати МДЕА, вихідної концетрації наведено на рисунках 1 – 3.

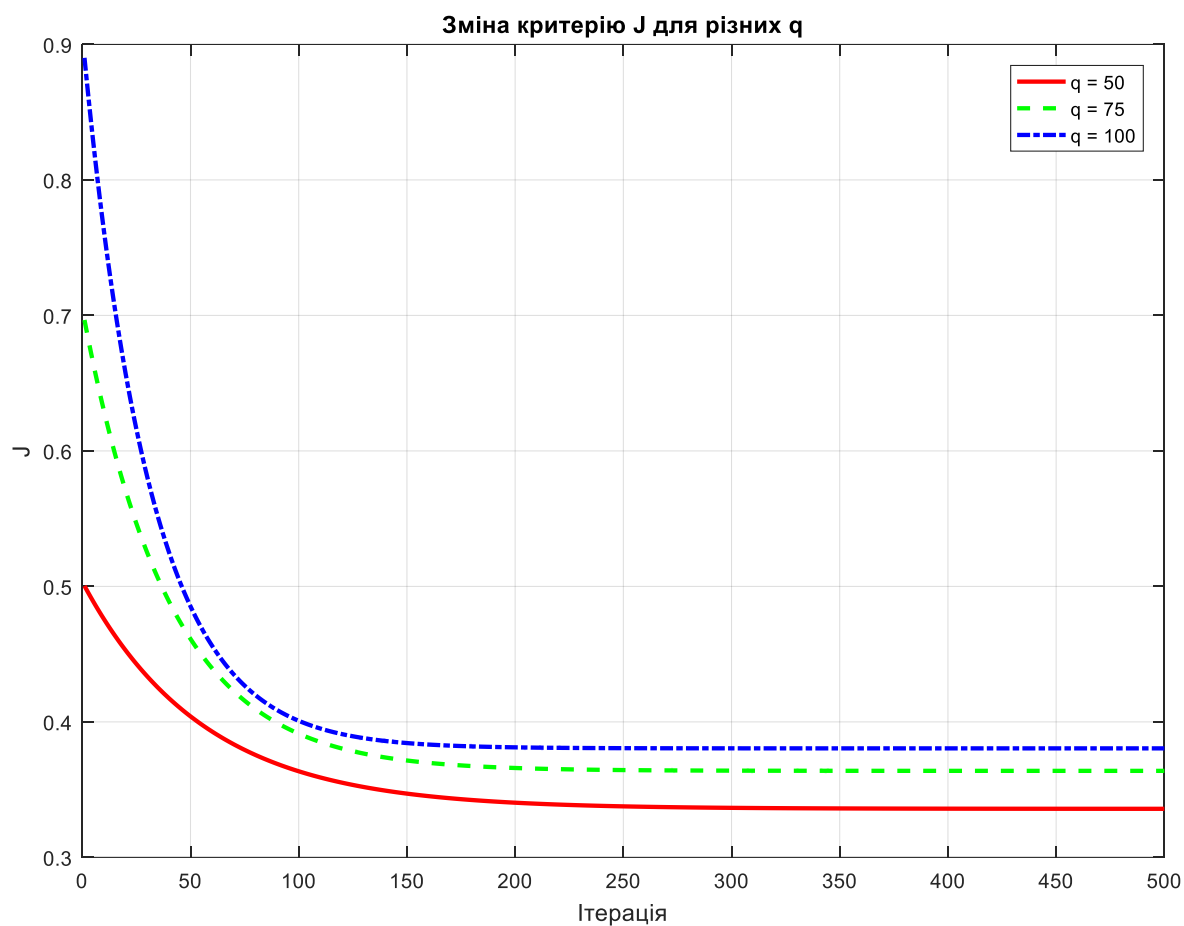


Рисунок 5.1 – Зміна критерію оптимальності

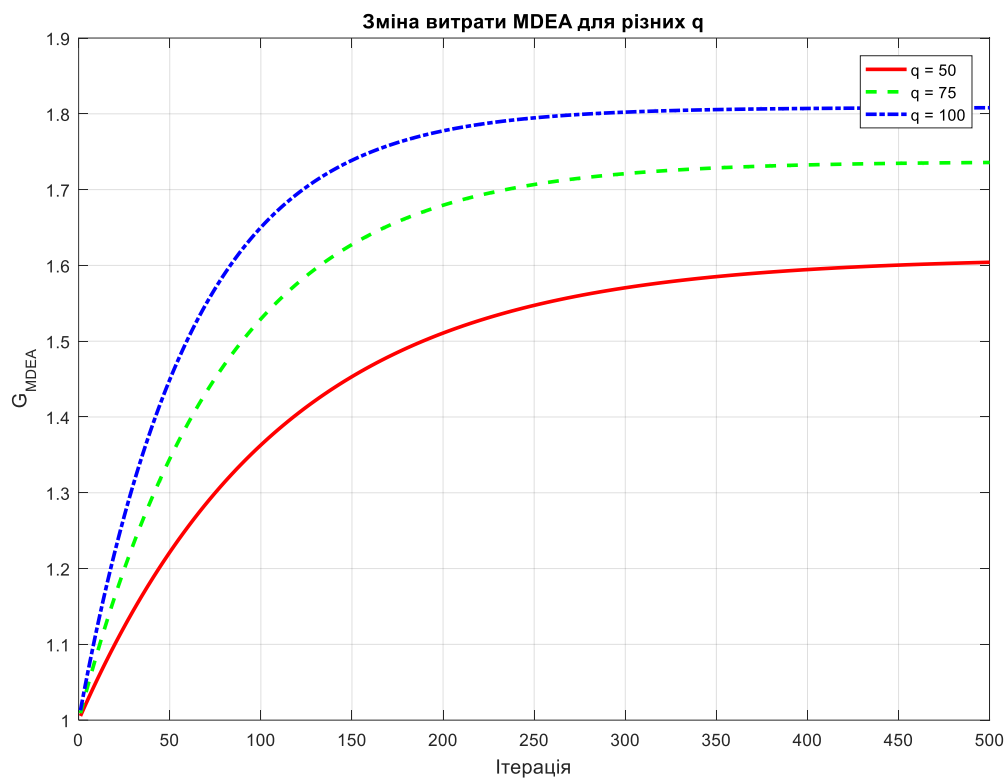


Рисунок 5.2 – Зміна витрати МДЕА

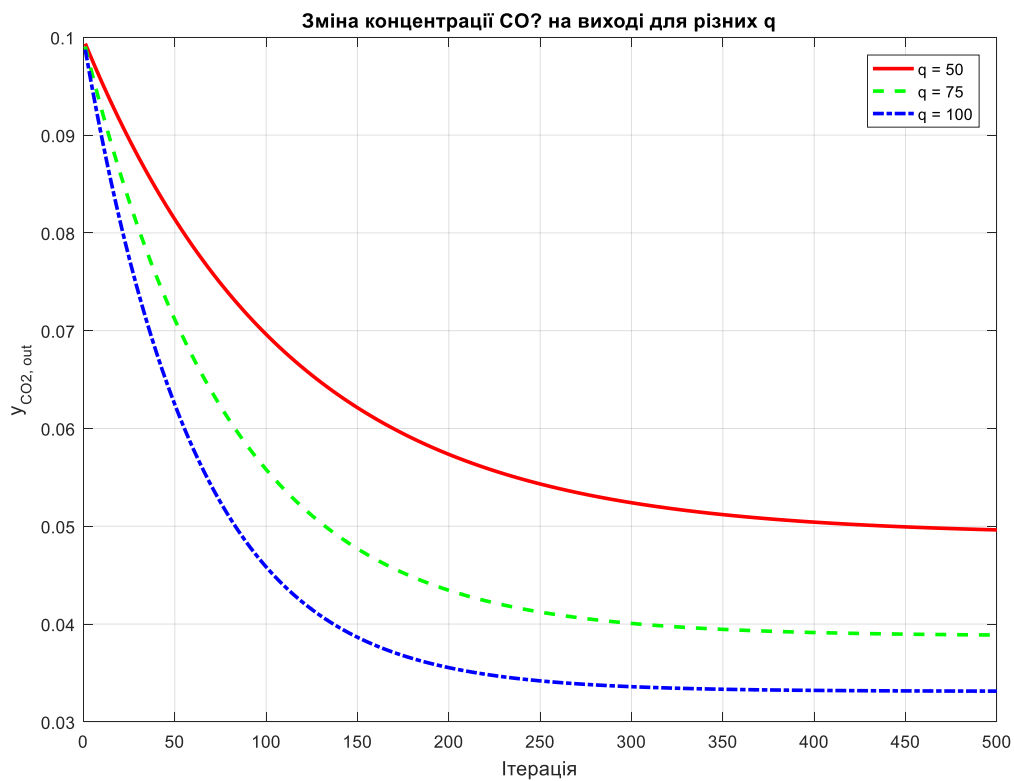


Рисунок 5.3 – Зміна концентрації CO₂ на виході

5.3 Розв'язання задачі умовної статичної оптимізації з використанням методу послідовного квадратичного програмування (SQP)

Сучасні методи нелінійного програмування з урахуванням обмежень базуються на побудові та розв'язанні системи рівнянь, що відповідають умовам Куна–Таккера. У цих умовах формалізуються додаткові припущення щодо обмежень та визначається поняття оптимальності для задач з обмеженнями. Якщо функція цілі $f(x)$ і обмеження $g_i(x)$ є опуклими, то умови Куна–Таккера є необхідними і достатніми для знаходження розв'язку задачі оптимізації. Перші рівняння в системі Куна–Таккера описують умову вирівнювання градієнтів цільової функції та обмежень у точці оптимуму. Оскільки в точці мінімуму градієнт цільової функції має бути скомпенсований градієнтами обмежень, вводяться множники Лагранжа, які коригують цей баланс і дозволяють задовольнити всі умови одночасно [11].

Розглянутий раніше метод оптимізації (градієнтний спуск із використанням штрафної функції) забезпечує достатню точність, але вимагає суттєвих обчислювальних ресурсів і глибшого розуміння принципів побудови критерію, обмежень і самої процедури оптимізації [11].

Для спрощення процесу в середовищі Matlab доступна бібліотека Optimization Toolbox, яка реалізує метод послідовного квадратичного програмування (SQP). Для розв'язання задачі використовується функція `fmincon()`, яка дозволяє врахувати як рівняння статички, так і обмеження на керуючі дії. Для використання `fmincon` спочатку визначимо цільову функцію та обмеження [11]. У нашому випадку:

- Цільова функція: $J(L)=y_{out}(L)$ (визначена через анонімну функцію).
- Обмеження: лінійні межі на L можна задати як `bounds`, а, за необхідності, нелінійні обмеження на y_{out} – через окрему функцію.

Лістинг наведено у додатку В, а результат виконання програми наведено нижче на рисунках 5.4 – 5.6:

Оптимальна витрата MDEA (Gmdea): 1.8083

Оптимальна концентрація CO2 (y_out): 0.033125

Мінімальне значення критерію J: 0.190228

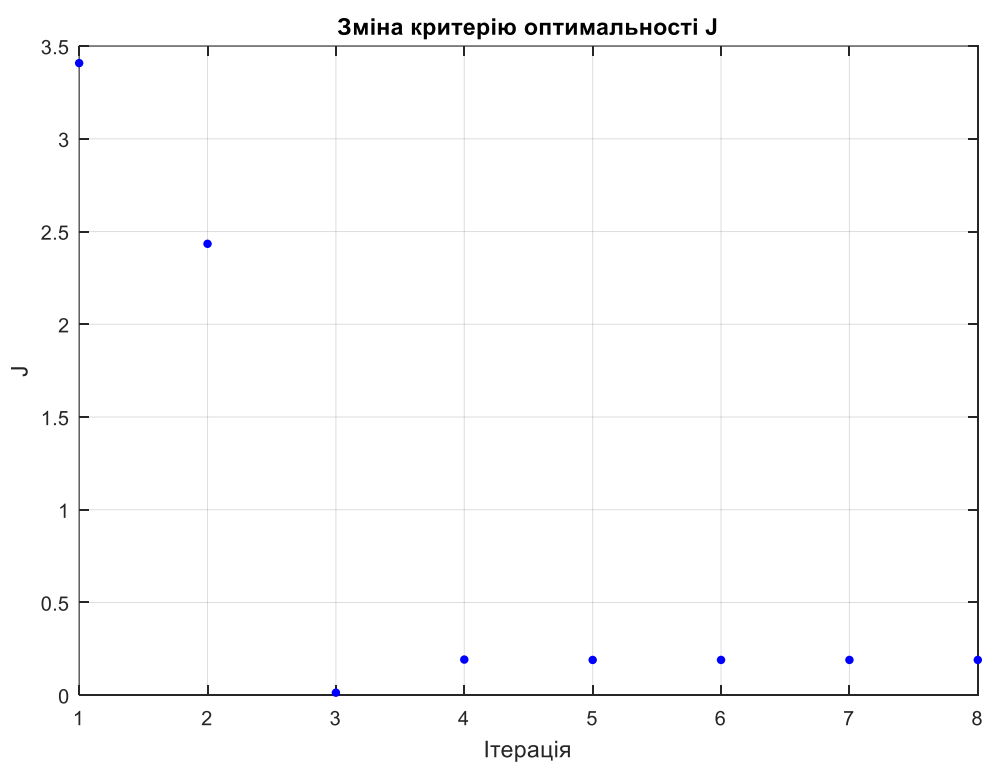


Рисунок 5.4 – Зміна критерію в залежності від ітерацій

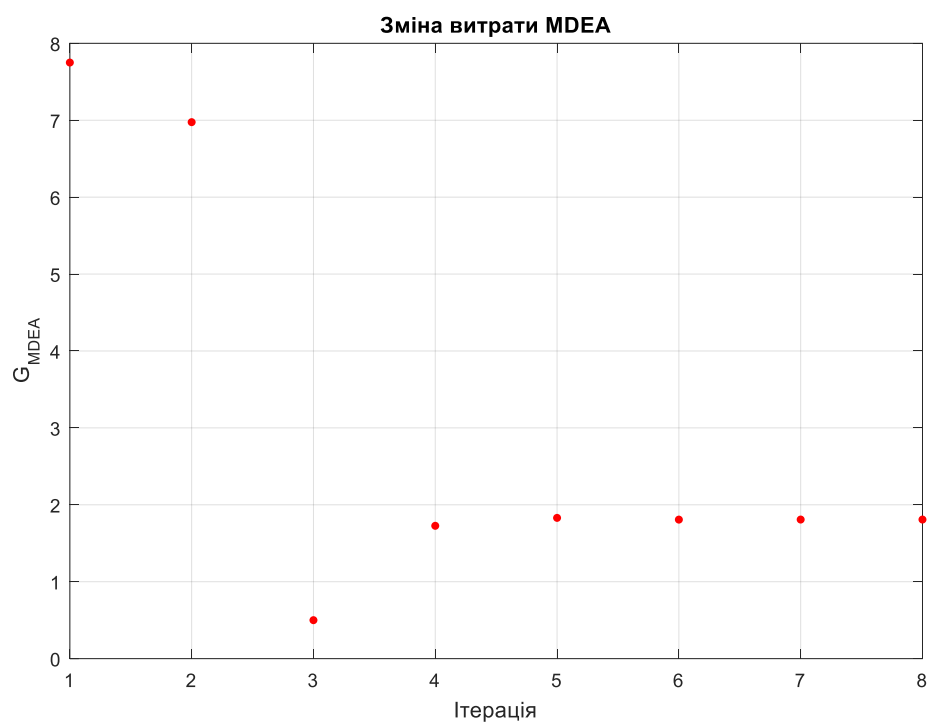


Рисунок 5.5 – Зміна витрати МДЕА в залежності від ітерацій

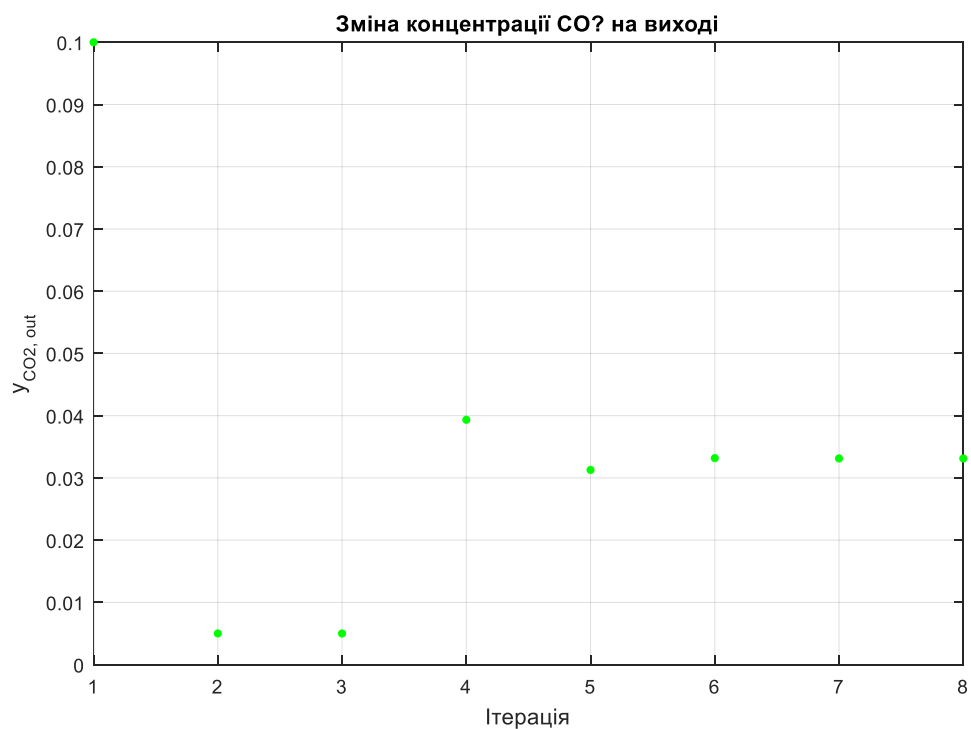


Рисунок 5.6 – Зміна концентрації на виході в залежності від ітерацій

Висновок:

В ході оптимізації було підтверджено, що збільшення подачі поглинального розчину (MDEA) веде до зменшення концентрації CO_2 у газі, що виходить. Критерій J монотонно зменшується разом зі зниженням y_{out} , як і вимагалось. При певному значенні витрати G досягається технологічна межа очищення – подальше зростання G дає все менший ефект, та може викликати оборотку реакцію (концентрація почне збільшуватись), оскільки газ вже майже повністю очищений і наближається до рівноважного залишку CO_2 . На графіку критерію від ітерацій видно різке падіння J на початку (при збільшенні G з низьких значень y_{out} різко падає), а потім поступове насичення до мінімуму (крива виходить на плато). Це відповідає фізичній реальності: більша частина CO_2 забирається першими порціями свіжого розчину, а для вловлювання останніх слідів CO_2 потрібні непропорційно великі витрати абсорбенту.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

6 Охорона праці

Охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності людини в процесі трудової діяльності. Її основною метою є запобігання нещасним випадкам, професійним захворюванням і аваріям шляхом створення безпечних та нешкідливих умов праці.

В даному пункті дипломного проектування розглядаються питання охорони праці для установки «Очищення газу від CO_2 за допомогою розчину метилдиетаноламіну (MDEA)».

Установка розміщена в спеціальному виробничому приміщенні площею $S \approx 48 \text{ м}^2$ та об'ємом $V \approx 144 \text{ м}^3$. У приміщенні розміщено абсорбер, регенератори, насоси, теплообмінники, трубопроводи та інше допоміжне обладнання, необхідне для реалізації процесу газоочищення.

Під час роботи установки з очищення технологічного газу від CO_2 за допомогою розчину MDEA на виробництві можуть виникати різні шкідливі та небезпечні фактори. Одним із головних є вплив хімічних речовин. Пари амінів, зокрема MDEA, можуть подразнювати шкіру, очі та дихальні шляхи, а при тривалому контакті навіть викликати отруєння. Крім того, технологічний процес супроводжується ризиком виникнення пожежі через наявність горючих хімічних речовин, високих температур і електрообладнання. У разі витоку реагентів або короткого замикання можливе займання.

Слід враховувати шум, який створюється роботою насосів та іншого обладнання — його рівень може перевищувати допустимі норми, що шкідливо впливає на слух. Ще одним важливим фактором є мікроклімат, адже через нагрівання трубопроводів та реакційне тепло в приміщенні може бути підвищена температура, що може викликати дискомфорт для персоналу. Варто звернути увагу й на електробезпеку, оскільки більшість апаратів працює від електромережі, а вологість і можливі витoki можуть створювати небезпеку ураження струмом.

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Загалом, основними факторами які становлять загрозу здоров'ю та життєдіяльності працівника на подібному виробництві є:

- Вплив хімічних речовин
- Електробезпека
- Пожежна безпека
- Виробничий шум

6.1. Вплив хімічних речовин

У процесі очищення технологічного газу від домішок CO₂ із застосуванням розчину метилдиетаноламіну на працівників можуть впливати шкідливі хімічні речовини. Основні потенційно небезпечні речовини — пари MDEA, вуглекислий газ (CO₂) та аміак (NH₃) у випадку аварійного витоку.

Відповідно до наказу МОЗ України від 14.07.2020 № 1596 „Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони“, для речовин, які містяться або можуть утворюватися в процесі експлуатації установки, встановлюються допустимі рівні наведені в таблиці 6.1:

Таблиця 6.1 – Гранично допустимі концентрації речовин

Речовина	ГДК, мг/м ³	Клас небезпеки	Характер дії
Метилдиетаноламін (MDEA)	5.0	3	Подразнення слизових оболонки, шкіри; інгаляційна токсичність
Аміак (у разі аварійного витоку)	20.0 (разова) / 10.0 (середньозмінна)	2	Подразнення слизових, токсична дія при

Продовження таблиці 6.1

			високих концентраціях
Вуглекислий газ (CO ₂)	9000.0	4	Задуха при високих концентраціях, порушення дихання

MDEA в умовах підвищеної температури може частково випаровуватись і накопичуватись у повітрі робочої зони, що становить небезпеку при поганій вентиляції. Пари MDEA можуть спричинити подразнення очей, дихальних шляхів, а при тривалому впливі — загальну токсичну дію.

Аміак, хоча і розглядається як основний продукт, який очищується, у разі витoku (пошкодження трубопроводів, фланців, арматури) може потрапити в повітря робочої зони та викликати гостре подразнення органів дихання, головний біль, нудоту. Тому аварійні витoki аміаку повинні враховуватись у сценаріях оцінки ризику.

Для зменшення впливу хімічних чинників необхідно:

- Забезпечити ефективну герметизацію обладнання і регулярний технічний огляд;
- Встановити системи газоаналізу з датчиками на MDEA та NH₃ у приміщенні;
- Застосовувати місцеву витяжну вентиляцію в зонах можливого випаровування MDEA;
- Використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) — респіратори з хімічними фільтрами (згідно з нормативним документом ДСТУ EN 529:2006), захисні окуляри (згідно з нормативним документом ДСТУ

EN 166:2017), рукавички з гуми або неопрену (згідно з нормативним документом ДСТУ EN 374-1:2019);

- Провести інструктаж з безпеки та дії у разі витоку аміаку або розчину.

Усі вищевказані заходи мають відповідати нормам Закону України «Про охорону праці», а також нормативи щодо мікроклімату та шкідливих речовин на виробництві ДСН 3.3.6.042-99.

6.2. Електробезпека

Установка для очищення технологічного газу від CO₂ за допомогою розчину MDEA включає роботу електронасосів, систем автоматики, підігрівачів і засобів контролю, що працюють від електромережі. Відповідно, однією з потенційних небезпек на виробництві є ризик ураження електричним струмом у разі порушення ізоляції, підвищеної вологості або дотику до неізольованих частин. Особливу небезпеку створюють умови експлуатації в середовищі з можливою наявністю пари хімічних речовин і підвищеної температури, що може прискорювати деградацію ізоляції. Також у зоні обслуговування обладнання може накопичуватись конденсат або мати місце витік водного розчину MDEA, що підвищує ризик короткого замикання або утворення небезпечного потенціалу на корпусах приладів. Основні причини ураження електричним струмом на підприємстві:

- Пошкодження ізоляції електропроводів та кабелів
- Відсутність або несправність заземлення
- Порушення правил експлуатації та самовільні підключення
- Підвищена вологість, конденсат або витіки технологічного розчину MDEA
- Недостатній контроль технічного стану обладнання та відсутність профілактичних перевірок

На об'єкті передбачено комплекс технічних та організаційних заходів для забезпечення електробезпеки персоналу. Уся апаратура та обладнання, що працюють в умовах можливого виділення парів хімічних речовин, встановлюються у вибухо- та вологозахищеному виконанні відповідно до класу зони, згідно з

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

вимогами ДСТУ EN 60079. Усі металеві конструкції, корпуси електрообладнання та трубопроводи заземлені з метою усунення потенціалу ураження електрострумом, при цьому виконується вирівнювання потенціалів для запобігання накопиченню напруги між різними частинами системи відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), розділ 1.7 (Заземлення і захисні заходи). З метою запобігання аварійних ситуацій, у мережі передбачене автоматичне вимкнення живлення у разі короткого замикання або витоку струму за допомогою пристроїв захисного вимкнення (УЗО, ПЗВ), що передбачено ПУЕ.

Щитове електрообладнання розміщено в окремих електрошафах із обмеженим доступом виключно для відповідального персоналу. Регулярно проводяться профілактичні огляди стану ізоляції, з'єднань, контактів і клем для виявлення потенційно небезпечних місць. Працівники, що експлуатують установку, повинні проходити інструктаж з електробезпеки, а також регулярну перевірку знань. У процесі роботи обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту — діелектричних рукавичок, калош, ізольованого інструменту та індикаторів напруги — згідно з вимогами ДСТУ EN 60903 (рукавички), ДСТУ EN 50321 (взуття), та НПАОП 0.00-4.33-99 (Порядок застосування ЗІЗ). Згідно з вимогами охорони праці, персонал, що обслуговує електроустановки до 1000 В, повинен мати групу з електробезпеки не нижче II, а працівники, які виконують налагоджувальні чи ремонтні роботи, — групу не нижче III.

6.3. Пожежна безпека

Установка очищення природного газу відноситься до об'єктів з підвищеною пожежо- та вибухонебезпекою, оскільки працює з легкозаймистим газом і горючими речовинами (МДЕА є горючою рідиною). Забезпечення протипожежної безпеки повинно здійснюватися комплексно – через попередження виникнення пожежонебезпечних ситуацій, наявність засобів пожежогасіння та відпрацювання дій персоналу при пожежі або аварії. Основні аспекти пожежної безпеки:

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

- Джерела пожежі. Основні небезпеки – витоки газу, розлив MDEA, перегрів поверхонь, іскри електрообладнання, статична електрика, вогневі роботи. Зони класифікуються як категорії А або Б згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Застосовується вибухозахищене обладнання (ДСТУ EN 60079), заземлення, антистатичний інструмент, контроль температур.
- Засоби гасіння. Використовуються вуглекислотні, порошкові або пінні вогнегасники (ВВК-5, ВП-5), розміщені поблизу потенційних осередків загоряння, згідно з нормативом НАПБ Б.01.008-2018. Передбачаються пожежні крани, гідранти, спринклери або дренчерні системи. У вибухонебезпечних приміщеннях можуть встановлюватися газові системи пожежогасіння. Персонал навчається користуванню ЗПП відповідно до інструкцій.
- Дії персоналу. Розробляється ПЛАС з чітким описом дій у разі пожежі, вибуху, витоку газу. У приміщеннях – схеми евакуації, сигнальні сповіщувачі, аварійні кнопки. При пожежі: повідомлення, відключення обладнання, гасіння вогнегасниками, евакуація на безпечну відстань, виклик ДСНС. Проводиться перекличка, при потребі – рятувальні заходи. Усе обладнання сигналізації й гасіння має відповідати ЗУ «Про пожежну безпеку», НАПБ А.01.001-2014, ДБН В.1.1-7:2016.
- Пожежна сигналізація і навчання. Встановлюються димові/теплові сповіщувачі з передачею сигналу на пульт. Регулярно проводяться тренування з евакуації та дій при умовних аваріях.

На об'єкті також встановлюється система пожежної сигналізації (згідно з ДСТУ EN 54) – теплові або димові пожежні сповіщувачі у приміщеннях, які подають сигнал тривоги на пульт, а також можуть автоматично запускати систему гасіння. Персонал повинен періодично відпрацьовувати аварійні ситуації практично: навчально-тренувальні тривоги, евакуації, ліквідація умовного витоку газу чи пожежі. Це значно підвищує готовність і злагодженість дій у разі реальної небезпеки. Всі заходи пожежної безпеки на установці відповідають нормативним

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

документам (Закон України «Про пожежну безпеку», НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні», ДБН В.1.1-7:2016) і знаходяться під контролем відомчої пожежної інспекції.

6.4. Виробничий шум

Під час експлуатації установки для очищення технологічного газу від CO₂ за допомогою розчину MDEA виникає підвищений рівень виробничого шуму, джерелами якого є електронасоси, компресори, вентилятори, арматура, а також робота систем автоматичного регулювання та контролю. Рівень шуму може перевищувати допустимі значення, встановлені згідно з ДСП 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Тривалий вплив шуму високої інтенсивності на працівників може призводити до погіршення слуху, підвищеної втомлюваності, зниження концентрації уваги, стресу, а також сприяти розвитку серцево-судинних захворювань. Особливої уваги потребують робочі місця, розташовані поблизу насосного обладнання та елементів системи тепло-масообміну, де рівень шуму може досягати критичних значень:

- 85 дБА при тривалості впливу понад 4 год на зміну;
- 80 дБА — при роботі, що вимагає підвищеної концентрації уваги або в приміщеннях з тривалим перебуванням персоналу;
- 70 дБА і менше — для операторських, диспетчерських тощо.

Перевищення допустимих рівнів шуму може призводити до розвитку приглухуватості, головного болю, підвищеної втомлюваності та розладів сну. Також тривалий вплив шуму знижує продуктивність праці й може викликати хронічні захворювання серцево-судинної системи.

З метою зниження впливу шуму на персонал передбачено такі заходи:

- Установлення шумопоглинаючих кожухів на джерела підвищеного шуму (насоси, вентилятори, компресори);
- Віброізоляція обладнання для зменшення передачі вібрацій на будівельні конструкції;

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

- Застосування звукопоглинаючих матеріалів у конструкції приміщення (стіни, стеля, перегородки);
- Обмеження тривалості перебування персоналу в зоні дії підвищеного шуму згідно з ДСП 3.3.6.037-99;
- Використання засобів індивідуального захисту органів слуху (навушники, вкладиші), відповідно до вимог ДСТУ EN 352-1:2018;
- Регулярний контроль рівня шуму на робочих місцях із використанням сертифікованих шумомірів згідно з ДСТУ ISO 9612:2004;
- Організація раціонального режиму праці та відпочинку для мінімізації акустичного навантаження відповідно до НПАОП 0.00-1.28-10.

Працівники, які працюють в умовах підвищеного шуму, проходять попередні та періодичні медичні огляди, а також інструктуються щодо правильного застосування засобів захисту слуху.

6.5 Рекомендовані засоби індивідуального захисту

Для забезпечення безпеки персоналу при роботі з установкою очищення газу від CO₂ за допомогою розчину MDEA, рекомендовано використовувати такі засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) наведені в таблиці 6.2:

Таблиця 6.2 – Рекомендовані засоби індивідуального захисту

Потенційний небезпечний фактор	Засіб індивідуального захисту	Модель	Відповідність стандарту
Пари хімічних речовин (MDEA, NH ₃)	Респіратор багаторазовий	Dnipro-M RS-2	ДСТУ EN 529:2006
Контакт з хімічними речовинами	Хімістійкі рукавички	Dnipro-M Blue nitrile	ДСТУ EN 374-1:2019

Продовження таблиці 6.2

Ризик ураження електричним струмом	Діелектричні рукавички	RD PRO	ДСТУ EN 60903
Підвищений рівень шуму	Протишумові навушники	Навушники Dnipro-M Profi (зниження шуму до 32 дБА)	ДСТУ EN 352
Механічні травми рук	Універсальні рукавички	DNIPRO-M Comfort	ДСТУ EN 388
Попадання рідин або частинок в очі	Окуляри захисні	Окуляри захисні Dnipro-M GS	ДСТУ EN 166:2017

Установки, що працюють із хімічно активними речовинами та електрообладнанням, вимагають суворого дотримання правил охорони праці. Враховуючи наявність токсичних парів, високого шумового навантаження, можливості електричного ураження та термічних опіків, необхідно забезпечити працівників ефективними ЗІЗ.

Окрім технічних заходів, важливу роль відіграє систематичне навчання персоналу, профілактичні медичні огляди та нагляд за станом технічних засобів. Тільки комплексний підхід до безпеки дозволить уникнути нещасних випадків і гарантувати збереження життя та здоров'я працівників.

Висновок до розділу 6

У розділі охорони праці розглянуто основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, притаманні установці очищення газу від CO₂ за допомогою розчину MDEA. Визначено ризики впливу хімічних речовин, електробезпеки,

					ДП/А 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

пожежної небезпеки, виробничого шуму та мікроклімату. Запропоновано ефективні технічні та організаційні заходи, а також підібрані відповідні засоби індивідуального захисту для забезпечення безпечних умов праці. Реалізація викладених заходів дозволяє знизити рівень професійного ризику та гарантує дотримання вимог чинного законодавства з охорони праці.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломному проекті на тему «Автоматизація процесу очищення газу від CO₂ розчином метилдиетаноламіну (MDEA)» виконано повний цикл науково-технічної та проектної роботи відповідно до поставленої мети. Основні результати роботи наведено нижче:

1. Проведено аналіз методів очищення газу від CO₂, встановлено доцільність використання MDEA завдяки його селективності, низьким витратам на регенерацію та корозійну безпеку.

2. Розглянуто технологічну схему установки та виявлено критичні параметри (тиск, температура, витрата, концентрація CO₂), що підлягають автоматичному регулюванню.

3. Розроблено структуру системи автоматизації з використанням ПЛК, контурів регулювання, засобів сигналізації та вимог до безпеки.

4. Створено математичну модель процесу абсорбції CO₂ з урахуванням масо- й теплопереносу. Проведено динамічне моделювання у MATLAB і визначено зони стійкості. Синтезовано систему керування з ПІД-регуляторами та виконано її налаштування в MATLAB, підтверджено стійкість за критерієм Найквіста та Михайлова.

5. Оптимізовано процес за витратою MDEA та якістю очищення методом SQP. Досягнуто зниження витрат абсорбенту при ступені вилучення CO₂ до 99 %.

6. Розроблено електричну схему дистанційного керування та аварійного захисту двигунів, що забезпечує безпечну експлуатацію установки.

7. Запропоновано комплекс заходів з охорони праці, включаючи вентиляцію, заземлення, індикацію та ЗІЗ, що відповідають нормативним вимогам.

8. Результати дослідження оприлюднено на конференції АКИТ-2025.

Підсумувавши все вище наведене, можна стверджувати, що кожен із визначених етапів був реалізований з дотриманням сучасних підходів. Було створено математично обґрунтовану, технологічно ефективну та безпечну автоматизовану систему очищення газу від CO₂.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Герасимов О. І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища. Одеса : ТЕС, 2018. 227 с.
2. Технологія зв'язаного азоту: курс лекцій. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», ОПП «Хімічні технології неорганічних речовин та водоочищення» / А.Л. Концевой, С.А. Концевой ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 8,28 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 293 с.
3. ПРИРОДООХОРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ частина перша ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ / Л. І. Северін та ін. Вінниця : Вінн. нац. техн. ун-т, 2010.
4. N-Methyldiethanolamine. *PubChem*.
URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/N-Methyldiethanolamine> (date of access: 30.04.2025).
5. Combs, G. & McGuire, L. (б. р.). MDEA Based CO₂ Removal System Process Simulation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.chemengservices.com/co2-removal.html> (дата звернення: 06.05.2025).
6. КОНСТРУКЦІЇ І РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ АБСОРБЕРІВ : метод. вказівки для студентів спец. 133 «Галузеве машинобудування» / В. С. Бойко, С. Ф. Буденко, Ф. Ю. Япанич ; Таврійський держ. агротехнол. ун-т. – Мелітополь : ТДАТУ, 2016. – 25 с. – URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/konstrukciyi-i-rozrahunky-parametriv-absorberiv.pdf> (дата звернення: 06.05.2025).
7. Моделирование хіміко-технологічних процесів. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю. А. Запорожець, С.Л. Мердух, С.В. Плашихін. – Електронні текстові данні (1 файл: 4 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 133 с

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

8. Швець В. І., Шостачук Д. М. Виконавчі механізми, регулювальні органи і пристрої. Житомир, 2016. 162 с. URL:
https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/8319/mod_resource/content/1/%D0%92%D0%9C%D0%A0%D0%9E_%D0%BA%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B0.pdf
9. Частотний метод розрахунку параметрів регулятора. StudFiles. URL:
<https://studfile.net/preview/5154631/page:4/> (дата звернення: 28.04.2025).
10. Критерій стійкості Михайлова. StudFiles.
 URL: <https://studfile.net/preview/5131060/page:12/> (дата звернення: 02.05.2025).
11. Л.Р. Ладієва. Оптимізація технологічних процесів.: Навчальний посібник.- К.: НМЦ ВО, 2003. – 209с. URL: <https://tpza.kpi.ua/wp-content/uploads/manuals/ladieva/Optymizatsiya-tehnologichnyh-protsesiv.pdf>
12. Громико А. В., Столяренко Г. С., Позігун М. В. Використання природних сорбентів в процесах очищення поглинальних розчинів поташу виробництв аміаку // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2020. – № 1. – С. 75–80. – DOI: 10.24025/2306-4412.1.2020.189028. URL:
<https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/1492/1/12.pdf>
13. Бугаєва Л. М., Абрамова А. О., Билбас Д. О. Очищення технологічних газів від CO₂ на основі метилдіетаноламіну (MDEA) / Збірник наукових праць XI міжнародної конференції АКІТ-2025. Київ, 7 травня 2025 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2025. – С. 34–35. ISBN 978-966-990-144-6.

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

ДОДАТКИ

Додаток А

Специфікація устаткування виробів, матеріалів

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне зн-ння па-ра	Місце монтажу	Назва та характеристика	Тип моделі	К-сть	Завод-виробник
1	2	3	4	5	6	7	8	9

ПРИЛАДИ ТА УСТАТКУВАННЯ

1. ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

поз.7-1	Витрата	«Збіднений» розчин метилдиетано-ламіну	-	Трубопровід	Електромагнітний витратомір Діапазон температур продукту - 40...+180°C Вихідні сигнали 4...20 мА Діапазон виміру 0...9'600 м3/год	Promag 53P40	2	Endress+Hauser, м. Райнах, Швейцарія
поз.11-1	Витрата	«Насичений» розчин метилдиетано-ламіну	-	Трубопровід				
поз.12-1	Витрата	Неочищений конвертований газ	-	Трубопровід	Електромагнітний витратомір. Робоча температура речовини до +350 °С Робочий тиск до 100 бар Вимірювання масової витрати до 2200 т / год Вихідні сигнали 4...20 мА	Promass 83F15	2	Endress+Hauser, м. Райнах, Швейцарія
поз.8-1	Витрата	Парогазова суміш	-	Трубопровід				

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/А 11.02.00.0000ПЗ

Арк

85

Продовження Додатку А

1	2	3	4	5	6	7	8	9
поз.13-1	Витрата	Вода для розчину поташу	-	Трубопровід	Вимірювальний перетворювач витрати Діапазон витрати: від 0,15 до 8 м/с Живлення: 12–24 В DC $\pm 10\%$ Виходи 4–20 мА (ізольований) Робоча температура: від -20°C до $+70^{\circ}\text{C}$	FLS F6.30	1	FIP Spa, GE Парата Флор, Італія
-	Витрата	-	-	Шафа керування	Модуль розширення аналогових входів/виходів SIMATIC S7-1200 SM 1234: вторинний пристрій для збору та обробки аналогових сигналів, вхідні сигнали: ± 10 В (14 біт), 0...20 мА або 4...20 мА (13 біт), вихідні сигнали: 0...10 В, 0...20 мА або 4...20 мА, основна похибка вимірювання — не більше $\pm 0,2\%$, кількість каналів: 4 AI / 2 АО, живлення 24 ВDC, підключення через клемник, сумісний із контролерами SIMATIC S7-1200.	SIMATIC S7-1200, analog I/O SM 1234	3	Siemens AG, Digital Industries, Factory Automation – Automation Systems, Werner-von-Siemens-Straße 1, 80333 München, Germany (Німеччина).

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/А 11.02.00.000ПЗ

Арк

86

2. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

1	2	3	4	5	6	7	8	9
поз.1-1	Температура	Трубопровід, газ на очищення	43-60 °С	Трубопровід	Промисловий датчик температури діапазон вимірювання 0...150 °С, основна похибка ±0.4°С , точність 0.1°С, довжина монтажно́ї частини 120 мм, Uжив = 9-30 В, Iвих =4...20 мА	Comet P0132	3	COMET System, s.r.o., м. Рожнов- під- Радгоштем, Чеська Республіка
поз.2-1	Температура	Трубопровід, «збіднений» розчин метилди- етаноламіну	46.1 °С	Регенератор				
поз.4-1	Температура	Трубопровід, CO ₂ з залишками метилдиетано- ламіну	48.8 °С	Трубопровід				
поз.3-1	Температура	Трубопровід, «насичений» розчин метилди- етаноламіну	107 °С	Трубопровід	Термоперетворювач опору мідний, НСХ 50П, діапазон вимірювання (-50)...150 °С, P _{max} = 10 МПа, довжина монтажно́ї частини 60...3150 мм, захисна арматура – сталь 8Н10Т; інерційність 40 с, клас допуску 2	ТСМ – 1088	3	НВО «Електротермі- я», Приладобудів- ний з-д, м. Луцьк
поз.5-1	Температура	Регенератори, температура всередині колони регенератора	124 °С	Регенератор				
поз.6-1								

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/А 11.02.00.0000ПЗ

Арк

87

Продовження Додатку А

1	2	3	4	5	6	7	8	9
-	Температура	-	-	Шафа устаткування	Модуль цифрових виходів SIMATIC S7-1200 SM 1222: вторинний пристрій для подачі дискретних керуючих сигналів; 8 або 16 цифрових виходів 24 В DC (транзисторні) або 230 В AC (релейні) — залежно від модифікації; струм виходу – до 0,5 А (транзистор) або 2 А (реле); індикація стану виходів; підключення через знімний клемник; живлення від системної шини контролера; використовується для керування виконавчими механізмами в системах на базі S7-1200.	SIMATIC S7-1200, digital outputs SM 1222	1	Siemens AG, Digital Industries, Factory Automation – Automation Systems, Werner-von-Siemens-Straße 1, 80333 München, Germany (Німеччина).

3. ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

поз.15-1	Тиск	Абсорбер	2.75 МПа	Місцеві	Перетворювач тензометричний надмірного тиску, значення межі вимірювань до 6МПа, основна похибка 0.25%, діапазон температури до 125 °C $I_{\text{вих}}=4\ldots 20$ мА	BD Sensors DMP 331	1	BD SENSORS GmbH, м. Тирштайн, Німеччина
поз.16-1	Тиск	Регенератори	0.1МПа	Місцеві	Перетворювач тензометричний надмірного тиску, діапазон вимірювань 0 – 0.5 МПа, основна похибка 0.5%,	BD Sensors DMP 331	2	BD SENSORS GmbH, м. Тирштайн, Німеччина

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/А 11.02.00.000ПЗ

Арк

88

Продовження Додатку А

1	2	3	4	5	6	7	8	9
поз.17-1					діапазон температури до 125 °C $I_{\text{вих}}=4...20$ мА			
-	Тиск	-	-	Шафа устаткуванн я	Модуль цифрових виходів SIMATIC S7-1200 SM 1222: вторинний пристрій для подачі дискретних керуючих сигналів; 8 або 16 цифрових виходів 24 В DC (транзисторні) або 230 В AC (релейні) — залежно від модифікації; струм виходу – до 0,5 А (транзистор) або 2 А (реле); індикація стану виходів; підключення через знімний клемник; живлення від системної шини контролера; використовується для керування виконавчими механізмами в системах на базі S7-1200.	SIMATIC S7-1200, digital outputs SM 1222	1	Siemens AG, Digital Industries, Factory Automation – Automation Systems, Werner-von- Siemens-Straße 1, 80333 München, Germany (Німеччина).

4. ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ

поз.9-1 поз.10-1	Концентрація	Концентрація CO ₂ на виході після регенерації	99.42%	Трубопровід	Газоаналізатор CO ₂ інфрачервоний, діапазон вимірювання: 0...100%, точність ±1%, робоча температура -40...+50°C, типи виходів: 4...20 мА, Modbus живлення 24В	Vaisala MGP241	2	Vaisala Oyj, м. Вантаа, Фінляндія
---------------------	--------------	---	--------	-------------	---	-------------------	---	---

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/А 11.02.00.000ПЗ

Арк

89

Продовження Додатку А

1	2	3	4	5	6	7	8	9
-	Концентрація	-	-	Шафа устаткування	Модуль розширення аналогових входів/виходів SIMATIC S7-1200 SM 1234: вторинний пристрій для збору та обробки аналогових сигналів, вхідні сигнали: ± 10 В (14 біт), 0...20 мА або 4...20 мА (13 біт), вихідні сигнали: 0...10 В, 0...20 мА або 4...20 мА, основна похибка вимірювання — не більше $\pm 0,2$ %, кількість каналів: 4 AI / 2 AO, живлення 24 ВDC, підключення через клемник, сумісний із контролерами SIMATIC S7-1200.	SIMATIC S7-1200, analog I/O SM 1234	1	Siemens AG, Digital Industries, Factory Automation – Automation Systems, Werner-von-Siemens-Straße 1, 80333 München, Germany (Німеччина).
-	ПЛК	-	-	Шафа устаткування	Програмований логічний контролер (ПЛК): вторинний пристрій керування та обробки дискретних і аналогових сигналів у системах автоматизації; інтерфейси: PROFINET (TCP/IP), підтримка HMI та SCADA; можливість розширення до 8 модулів (входи/виходи, аналогові та спеціальні); живлення: 100–240 В AC; вбудований годинник реального часу, PID-регулятори, модулі позиціонування.	SIMATIC S7-1200 CPU 1214C	1	Siemens AG, Digital Industries, Factory Automation – Automation Systems, Werner-von-Siemens-Straße 1, 80333 München, Germany (Німеччина).

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/А 11.02.00.0000ПЗ

Арк

90

Продовження додатку А

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЕЛЕКТРОАПАРАТИ ТА ПУСКАЧІ								
ПЧ1, ПЧ2, ПЧ3	-	-		Місцевий	Перетворювач частотний, трифазний, з вбудованим релейним захистом. Робоча потужність 15кВт, номінальна напруга живлення 380-500 В. Наявність аналогових та цифрових входів та виходів.	Danfoss Automati-onDrive FC301	3	Danfoss Drives A/S, м. Грааструп, регіон Північна Ютландія, Королівство Данія.
SB1, SB2, SB3	-	-		Щит керування	Пост управління кнопковий, кількість елементів управління – 2; номінальна напруга ізоляції (за змінного струму частотою 50/60 Гц) 660 В, номінальний тепловий струм 10 А; температура довкілля від (-40) °С до 40 °С, відносна вологість повітря 98 %, комутаційна зносостійкість 1 000 000 циклів	ПКУ 15-21-131 У3	3	ЗАТ «Пром-енерго-автоматика», м. Київ
FU1... FU9	-	-		Місцевий	Запобіжник плавкий: змінна (частота 50/60 Гц) 660 В, постійна – 500 В, номінальний тепловий струм – 16 А	ЗП00	9	ТОВ «Кам'янець-Подільський електромеханічний завод»

Закінчення Додатку А

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/А 11.02.00.000ПЗ

Арк

91

1	2	3	4	5	6	7	8	9
HL1, HL2, HL3, HL4, HL5, HL6, HL7, HL8, HL9, HL10	-	-		Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна (LED) з жовтим індикатором, $U_{ном} = 220 \text{ В}$, 50/60 Гц, монтажний діаметр: 22 мм; кріплення на щиті.	XKoren Electric	10	XKoren Electric, Район Орхангазі, Есенюрт/Ста мбул, Туреччина

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/А 11.02.00.0000ПЗ

Додаток Б

Лістинг програми для розв'язання задачі статичної оптимізації методом штрафних функцій

```
y_in = 0.183;
y_target = 0.01;
G = 1;
m = 2.2;
N = 20;

Gm_min = 0.5;
Gm_max = 15.0;

q_vals = [50, 75, 100];
r = 0.1

M = 1000;
alpha = 0.01;
max_iter = 500;

Gm_hist_all = zeros(length(q_vals), max_iter);
J_hist_all = zeros(length(q_vals), max_iter);
y_out_hist_all = zeros(length(q_vals), max_iter);

for j = 1:length(q_vals)
    q = q_vals(j);
    Gm = 1.0;

    Jfun = @(Gm) q * (y_in / sum((Gm / (m * G)).^(0:N)) - y_target).^2 + r *
Gm.^2;

    Phi = @(Gm) Jfun(Gm) + M * max(0, Gm_min - Gm).^2 + M * max(0, Gm -
Gm_max).^2;

    for k = 1:max_iter
        dPhi = (Phi(Gm + 1e-6) - Phi(Gm - 1e-6)) / (2e-6);

        Gm = Gm - alpha * dPhi;
        Gm = max(Gm_min, min(Gm, Gm_max));
```

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						93
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

A = Gm / (m * G);
sum_geom = sum(A .^ (0:N));
y_out = y_in / sum_geom;
J = Jfun(Gm);

Gm_hist_all(j, k) = Gm;
y_out_hist_all(j, k) = y_out;
J_hist_all(j, k) = J;
end

fprintf('q = %d: Gm = %.5f, y_out = %.6f, J = %.6f\n', q, Gm, y_out, J);
end

iters = 1:max_iter;
legends = arrayfun(@(q) sprintf('q = %d', q), q_vals, 'UniformOutput', false);

figure;
plot(iters, J_hist_all(1,:), 'r-', ...
     iters, J_hist_all(2,:), 'g--', ...
     iters, J_hist_all(3,:), 'b-.', 'LineWidth', 2);
xlabel('Ітерація'); ylabel('J');
title('Зміна критерію J для різних q'); grid on;
legend(legends);

figure;
plot(iters, Gm_hist_all(1,:), 'r-', ...
     iters, Gm_hist_all(2,:), 'g--', ...
     iters, Gm_hist_all(3,:), 'b-.', 'LineWidth', 2);
xlabel('Ітерація'); ylabel('G_{MDEA}');
title('Зміна витрати MDEA для різних q'); grid on;
legend(legends);

figure;
plot(iters, y_out_hist_all(1,:), 'r-', ...
     iters, y_out_hist_all(2,:), 'g--', ...
     iters, y_out_hist_all(3,:), 'b-.', 'LineWidth', 2);
xlabel('Ітерація'); ylabel('y_{CO2, out}');
title('Зміна концентрації CO2 на виході для різних q'); grid on;
legend(legends);

```

Додаток В

Лістинг програми для розв'язання задачі статичної оптимізації методом послідовного квадратичного програмування

```
y_in = 0.183;
y_target = 0.01;
G = 1;
m = 2.2;
N = 20;

Gmdea_min = 0.5;
Gmdea_max = 15.0;
y_out_min = 0.005;
y_out_max = y_in;

q = 100;
r = 0.1;

J = @(x) (q/2)*(x(2) - y_target)^2 + (r/2)*(x(1))^2;

x0 = [(Gmdea_min + Gmdea_max)/2, 0.1];

lb = [Gmdea_min, y_out_min];
ub = [Gmdea_max, y_out_max];

nonlcon = @(x) deal([], x(2) - y_in / sum((x(1)/(m*G)).^(0:N)));

Gmdea_hist = [];
y_out_hist = [];
J_hist = [];
options = optimoptions('fmincon', ...
    'Display','iter', ...
    'Algorithm','sqp', ...
    'OutputFcn', @(x,optimValues,state) saveHistory(x, optimValues, state));
[x_opt, fval] = fmincon(J, x0, [], [], [], [], lb, ub, nonlcon, options);

fprintf('\nОптимальна витрата MDEA (Gmdea): %.4f\n', x_opt(1));
fprintf('Оптимальна концентрація CO2 (y_out): %.6f\n', x_opt(2));
fprintf('Мінімальне значення критерію J: %.6f\n', fval);
```

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						95
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

iters = 1:length(J_hist);

figure;
plot(iters, J_hist, 'b.', 'MarkerSize', 12);
xlabel('Ітерація'); ylabel('J');
title('Зміна критерію оптимальності J'); grid on;

figure;
plot(iters, Gmdea_hist, 'r.', 'MarkerSize', 12);
xlabel('Ітерація'); ylabel('G_{MDEA}');
title('Зміна витрати MDEA'); grid on;

figure;
plot(iters, y_out_hist, 'g.', 'MarkerSize', 12);
xlabel('Ітерація'); ylabel('y_{CO2, out}');
title('Зміна концентрації CO2 на виході'); grid on;

```

					ДПЛА 11.02.00.000ПЗ	Арк.
						96
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		