

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
«_____» _____ 20____

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Технічні та програмні засоби
автоматизації»

зі спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і назва)

на тему: Оптимальне керування в процесі виробництва азотної кислоти під
тиском 0,716 МПа

Виконав : студент 2 курсу, групи ЛК-42Мп
(шифр групи)

_____ Кагадій Максим Федорович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доцент, к.х.н., доцент Квітка Олександр Олександрович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант стартап-проєкту доц., к.е.н. Юдіна Наталія Володимирівна _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

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

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2025 року

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

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Кагадій Максим Федорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Оптимальне керування в процесі виробництва азотної
кислоти під тиском 0,716 МПа,

науковий керівник дисертації Квітка Олександр Олександрович, к.х.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 3 » 11 2025 р. №4744-с

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження технологічний процес виробництва азотної кислоти
під тиском 0,716 Мпа та процес газорідного розділення нітрозних газів у
сепараторі установки

4. Вихідні дані Технологічна схема виробництва азотної кислоти – за
літературними джерелами. Значення технологічних параметрів, які
підлягають контролю(з опису технологічного процесу): тиск повітря в
двохступінчастому турбокомпресорі 0.716 МПа, температура в підігрівачі
відхідних газів 150 °С, температура очищених газів в газовій турбіні 690-700
°С.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Провести аналіз технологічного процесу та визначити роль сепаратора в установці. Розробити математичну модель процесу газорідного розділення та виконати її лінеаризацію. Дослідити роботу системи керування, порівняти PI/PID-регулятори з оптимальним керуванням. Провести експертний аналіз можливих аварійних ситуацій і визначити найбільш критичний фактор.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 26 рисунків
Матеріали презентації до захисту магістерської дисертації

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|----------------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Стартап-проект | Юдіна Н.В. доц., к.е.н | | |
| | | | |
| | | | |

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|--|--|----------|
| 1 | Виробництво азотної кислоти | 22.10.2025 | |
| 2 | Математичне моделювання сепаратора | 1.11.2025 | |
| 3 | Синтез та дослідження системи керування сепаратора | 11.11.2025 | |
| 4 | Оптимальне керування процесом | 21.11.2025 | |
| 5 | Експертний аналіз можливих аварійних ситуацій та визначення критичних факторів | 25.11.2025 | |
| 6 | Стартап-проект | 3.12.2025 | |
| | | | |
| | | | |

Студент

Максим КАГАДІЙ

Науковий керівник дисертації

Олександр КВІТКА

РЕФЕРАТ

У магістерській дисертації досліджено процес виробництва азотної кислоти під тиском 0,716 МПА, зокрема роботу сепаратора, який використовується для поділу парогазової суміші. Робота містить 87 сторінок, 26 рисунків, 40 таблиць, список літератури з 17 джерел.

Метою дослідження є розроблення та аналіз системи автоматичного керування сепаратором, яка дозволяє стабілізувати параметри процесу, зменшити вплив збурень і підвищити ефективність роботи апарата.

У ході роботи проаналізовано технологічний процес виробництва азотної кислоти та роль сепаратора в ньому. Розглянуто можливі варіанти структурних схем автоматизації. Побудовано математичну модель сепаратора, отримано передавальні функції і проаналізовано динамічні властивості об'єкта.

На основі моделі були досліджені різні способи керування: класичні регулятори, оптимальне керування, а також керування за мінімальним часом. Проведено порівняння перехідних процесів та оцінено особливості роботи кожного методу. Також виконано аналіз можливих аварійних ситуацій та запропоновано заходи для підвищення безпеки процесу.

Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення роботи сепараторів у хімічній промисловості та для покращення стабільності виробництва азотної кислоти.

Ключові слова: сепаратор, азотна кислота, математична модель, оптимальне керування, перехідний процес, автоматизація.

ABSTRACT

The master's thesis examines the process of producing nitric acid under a pressure of 0.716 MPa, in particular the operation of the separator used to separate the steam-gas mixture. The thesis contains 87 pages, 26 figures, 40 tables, a list of references from 17 sources.

The aim of the study is to develop and analyze an automatic control system for the separator, which allows stabilizing the process parameters, reducing the impact of disturbances, and increasing the efficiency of the device.

The work analyzes the technological process of nitric acid production and the role of the separator in it. Possible options for structural automation schemes are considered. A mathematical model of the separator was constructed, transfer functions were obtained, and the dynamic properties of the object were analyzed.

Based on the model, various control methods were investigated: classical controllers, optimal control, and minimum time control. Transient processes were compared and the features of each method were evaluated. An analysis of possible emergency situations was also performed, and measures to improve process safety were proposed.

The results of the work can be used to improve the operation of separators in the chemical industry and to improve the stability of nitric acid production.

Keywords: separator, nitric acid, mathematical model, optimal control, transient process, automation.

Зміст

| | |
|--|----|
| Вступ | 7 |
| 1. ВИРОБНИЦТВО АЗОТНОЇ КИСЛОТИ | 8 |
| 1.1 Хіміко-фізичні властивості азотної кислоти | 8 |
| 1.2 Добування азотної кислоти природнім шляхом | 9 |
| 1.3 Отримання азотної кислоти промисловим шляхом..... | 10 |
| 1.4 Опис технологічного процесу виробництва азотної кислоти під тиском 0.716 МПа | 12 |
| 1.5 Постановка задач дослідження | 14 |
| 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕПАРАТОРА | 16 |
| 2.1 Визначення технологічного об'єкта керування і його опис | 16 |
| 2.2 Моделювання статичного режиму | 18 |
| 2.3 Моделювання динамічного режиму | 21 |
| 3. СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СЕПАРАТОРА | 24 |
| 4.1 Аналіз необхідності використання регулятора | 24 |
| 4.2 Налаштування PI та PID-регуляторів | 24 |
| 4. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ | 29 |
| 4.1 Виведення необхідних умов оптимальності | 29 |
| 4.2 Розрахунок оптимального програмного керування | 30 |
| 4.3 Розрахунок оптимального керування зі зворотнім зв'язком. Проектування оптимального лінійно-квадратичного регулятора | 36 |
| 5. ЕКСПЕРТНИЙ АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ФАКТОРІВ..... | 42 |
| 5.1 Загальний аналіз аварійних ситуацій (вступ) | 42 |
| 5.2 Застосування системи експертного оцінювання | 50 |
| 6. СТАРТАП-ПРОЕКТ | 65 |
| ВИСНОВКИ | 83 |
| ЛІТЕРАТУРА | 85 |

ВСТУП

Сучасні хімічні виробництва характеризуються складністю технологічних процесів та підвищеними вимогами до стабільності режимів роботи, енергоефективності та безпеки. У зв'язку з цим важливу роль відіграють автоматизовані системи керування, які забезпечують підтримання заданих параметрів процесу та зменшення впливу збурень.

Виробництво азотної кислоти є одним із ключових процесів хімічної промисловості. Процес отримання азотної кислоти під тиском належить до складних, багатопараметричних та інерційних об'єктів керування, для яких відхилення технологічних параметрів можуть призводити до зниження якості продукції та погіршення показників роботи установки.

Важливою стадією технологічного процесу є газорідинне розділення нітрозних газів у сепараторі. Ефективність роботи сепаратора впливає на стабільність подальших етапів процесу та загальні показники виробництва. Наявність змінних навантажень і динамічних збурень ускладнює застосування традиційних методів керування, що зумовлює необхідність їх удосконалення.

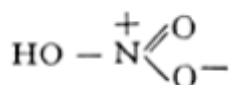
У практиці автоматизації широко застосовуються класичні ПІ- та ПІД-регулятори, проте вони не завжди забезпечують оптимальні режими роботи за умов зміни параметрів об'єкта. У зв'язку з цим актуальним є застосування методів оптимального керування, які дозволяють підвищити ефективність керування технологічними процесами.

Метою магістерської дисертації є підвищення ефективності керування процесом виробництва азотної кислоти під тиском 0,716 МПа шляхом застосування методів оптимального керування процесом газорідинного розділення нітрозних газів у сепараторі.

1 . ВИРОБНИЦТВО АЗОТНОЇ КИСЛОТИ

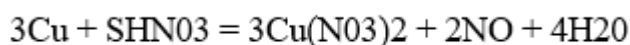
1.1 Хіміко-фізичні властивості азотної кислоти

Азотна кислота (HNO_3) є одним із ключових продуктів хімічної галузі. За нормальних умов це безбарвна, дуже їдка рідина з характерним різким запахом. Якщо пляшку відкрити на повітрі, вона помітно “димить”. [2] Структурна формула кислоти досить проста й добре відома:



Щільність безводної азотної кислоти 1522 кг / м^3 , $t_{\text{пл}} = 41,15 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{кип}} = 84 \text{ }^\circ\text{C}$. Завжди змішується з водою, утворюючи азеотропну суміш із 69% азотної кислоти при $t_{\text{кип}} = 121,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Відомі кристаллогідрати $\text{HNO}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ з $t_{\text{пл}} = 37,85 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\text{HNO}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$ з $t_{\text{пл}} = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Азотна кислота нестійка у відсутності води і, при звичайних температурах - розкладається на світлі з виділенням кисню ($4\text{HNO}_3 = 4\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$). Крім того, двоокис азоту, що виділився, набуває жовтого кольору, а при високих концентраціях NO_2 — червоного. [1]

Азотна кислота — є дуже сильним окислювачем, який здатен окислювати до сірчаної кислоти та фосфорної кислоти – сірку та фосфор відповідно. Тільки тантал, деякі платинові метали та золото не реагують з азотною кислотою. Якщо азотна кислота взаємодіє з кількома металами, виникають окиси азоту як результат реакції:



Дуже цікавим та важливим є те, що метали, наприклад: хром, залізо, та алюміній, легко розчиняються в розведеній азотній кислоті, але вони залишаються стійкими до концентрованої азотної кислоти, оскільки на їхній поверхні утворюється захисний оксидний шар. Завдяки цій функції можна

зберігати та транспортувати концентровану азотну кислоту в резервуарах із сталі.[1]

Царська горілка — це суміш концентрованої азотної та соляної кислоти (1:3), яка має здатність розчиняти золото та платину. Азотна кислота окислює органічні сполуки. У цьому процесі нітрогрупа NO_2^+ , залишок азотної кислоти, замінює водень у органічних сполуках. Солі, які містять азотну кислоту, називаються нітратами, а солі, які містять натрій, калій і сіль, також називають селітрами. [4]

Речовини-відновники як: етанол, скипидар та сірководень у контакті з концентрованою азотною кислотою призводять до вибуху, тому слід це враховувати при якомусь процесі. Зіткнення з горючими речовинами може призвести до пожежі, яка призводить до виділення отруйного діоксиду азоту, тому при гасінні пожежі необхідно використовувати протигаз. Не допускайте зіткнення азотної кислоти з карбідами, скипидаром, мурашиною кислотою, порошками металів пікринової та хлорнуватої кислот, а також горючими речовинами. Через азотну кислоту спалахує папір, олія, деревина та вугілля.[1]

Азотна кислота використовується для виготовлення азотовмісних добрив, вибухових речовин і органічних барвників, а також є окислювачем у багатьох хімічних процесах. Вона також використовується нітрозним способом для виготовлення сірчаної кислоти, а також використовується для виготовлення целюлозних лаків, кіноплівки та інших речовин.[1]

1.2 Добування азотної кислоти природнім шляхом

Азотова кислота може утворюватися природним шляхом або в наслідок хімічної реакції. Більшість азоту в природі перетворюється на аміак завдяки родючості органічних субстанцій. Потім у ґрунті нітрифікуючі бактерії окислюють аміак доазотової кислоти.[2] Остання реагує з карбонатами, наприклад, карбонатом кальцію, у ґрунті, формуючи нітрати. Коли азот перебуває у вільному стані в атмосфері, він невпинно виділяється. Вільний азот також вивільняється при спалюванні вугілля, торфу, деревини та органічних субстанцій.

Після цього у повітрі присутні бактерії, які руйнують нітрати та виділяють вільний азот, абиздобутизних кисень [1]

Денітрифікуючі бактерії діють, переміщуючи деякі нітрати (доступні для зелених рослин) у форму вільного азоту. Як наслідок, не весь азот, який міститься в загибломu рослині, повертається до ґрунту, а частина його поступово виділяється в вільному вигляді.[1]

Вічне скорочення мінеральних азотних сполук повинно було призвести до знищення життя на Землі, якби не існувало природних процесів, які могли компенсувати втрату азоту. По-перше, в атмосфері відбуваються електричні розряди, також відомі як грозові блискавки. У цьому процесі азот з'єднується з киснем у оксид, який легко розчиняється у воді, утворюючи азотну кислоту. [2]

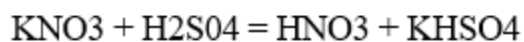
Якщо азотна кислота потрапляє в ґрунт, вона взаємодіє з речовинами натрію, кальцію та калію та утворює нітрати, які, безперечно, є життєво важливими для рослин. Таким чином, грози приносять неживий азот до рослин, а потім до людей та тварин.

Не менш значущим є те, що існує також метод, для відновлення у ґрунті азотистих сполук, а саме—застосування азотобактерій, здатних переробляти атмосферний азот. Деякі з цих бактерій осідають на коренях бобових рослин, спричиняючи утворення «бульбочок». Азотобактерії асимілюють атмосферний азот, а рослини переробляють його у білки та інші складні речовини. Таким чином, у природі існує безперервний азотний цикл.[1]

1.3 Отримання азотної кислоти промисловим шляхом

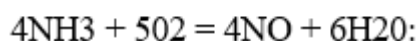
Другий метод добування азотної кислоти відбувається на заводах. Цікавим є те, що у середні віки цей процес вже був відомий. Так, у XIII столітті було доіслідженно та описано, як зробити азотну кислоту, нагрівавши нітрат калію з глиною, залізним купоросом і галуном. І.Р. Глаубер в середині XVII століття запропонував отримати азотну кислоту з нітрату калію з концентрованої сірчаної

кислоти шляхом помірного нагрівання (до 150 градусів Цельсія) за наступною формулою[1]:

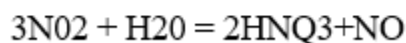


У виробництві до початку 1900-х років цей метод був використаний для заміни нітрату калію дешевшим природним чилійським нітратом, NaNO_3 . [4]

Каталітичне окислення аміаку киснем є основним методом виробництва азотної кислоти в наші дні. Основними етапами процесу можна назвати наступне: окислення(контактне) аміаку до окису азоту:



поглинання водою суміші під назвою «нітрозних газів» та окислення оксиду азоту до діоксиду:

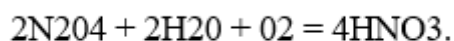


Через решітку каталізатора з повітрям пропускається суміш аміаку(10-12 відсотків), яка нагрівається до 750–900 ° С. Сплави платини є потрійними (93% Pt. 3% Rh. 4% Pd) або подвійними (90–95% Pt. 10–5% Rh). Крім того, використовується двостадійний каталізатор. Цей каталізатор складається з платининої сітки та неплатинового каталізатора, і він дозволяє знизити споживання платини на двадцять п'ятдесят до тридцяти відсотків. Інакше утворюється оксид азоту, якщо контакт повітряно-аміачної суміші з каталізатором перевищує 1 мілісекунду. [1]

Другий етап процесу може відбуватися змішаним способом, коли поглинання азотистого газу відбувається лише під тиском води або при атмосферному тиску. Також, слід відзначити вагомий факт, що ця фаза процесу також включає розчинення NO_2 воді, та окислення NO_2 . Одержують азотну кислоту з концентрацією від 45 до 49 відсотків або від 55 до 58 відсотків при

застосуванні тиску. Відгін цих розчинів може спричинити отримання азеотропної азотнокислотної суміші.[1]

Більш концентровану кислоту (до 100%) можна отримати прямим синтезом реакції N₂O₄ з киснем та водою, або за допомогою дистиляції розчинів азотної кислоти з концентрованої кислоти H₂SO₄ або:



1.4 Опис технологічного процесу виробництва азотної кислоти під тиском 0.716 МПа

Технологічна схема виробництва азотної кислоти наведена на рисунку 1.1. Атмосферне повітря проходить ретельне очищення у двоступінчастому фільтрі 1 (перший ступінь фільтра виконаний з, так званої, «тканина Петрянова», а друга - з «лавсанової тканини»). Повітря, очищене, стискають повітряним двоступінчастим компресором. Далі, у першому ступені 18 повітря стискають до 0,35 МПа, він нагрівається до 165-175°C внаслідок адіабатичного стискування. Після охолодження повітря прямує на другий ступінь стиснення 16 де його тиск зростає до 0,716 МПа. Конверсія аміаку протікає на платінародних сітках при температурі 870-900 °С, ступінь конверсії становить 96%. Нитрізні гази при 890-910 °С надходять у котел-утилізатор 15, розташований під контактним апаратом. У котлі відбувається випаровування деаерованої води, очищеної хімічним шляхом, що живить котел-утилізатор, внаслідок охолодження нітрозних газів до 170 °С; при цьому отримують пару тиском 1,5 М Па і температурою 230 °С, який видається споживачеві.[1] Після котла-утилізатора нітрозні гази проходять теплообмінник (на схемі не показаний) 11 пот пають в 13 окислювач. Він представляє собою так званий порожнистий апарат, у якого зверху встановлено фільтр зі скловолокна, який відповідає за уловлювання платинового каталізатора. Певною мірою окислення газів нітрозних виконується у котлі-утилізаторі (до 40%). В окислювачі 13 ступінь окиснення зростає до 85%. Гази нітрозні

нагріваються до 300-335°C, внаслідок реакції окиснення. В 12 підігрівачі повітря й використовується ця теплота.

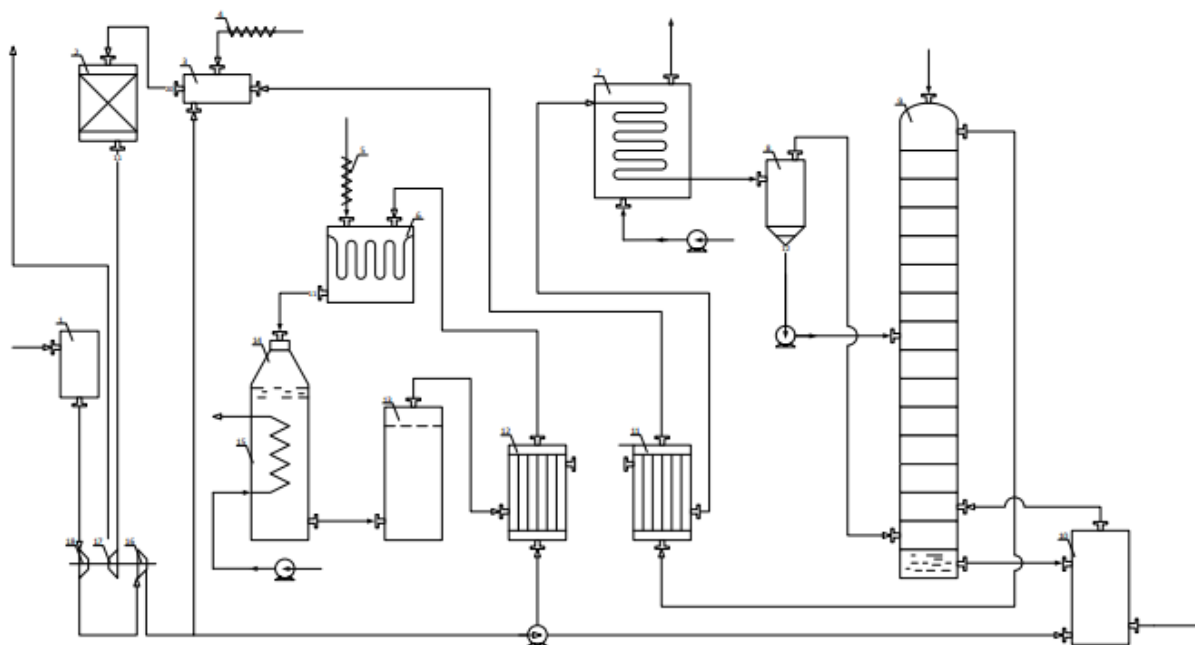


Рис. 1.1. Технологічна схема процесу виробництва азотної кислоти:

1- фільтр повітря, 2- реактор каталітичної очистки; 3- топковий пристрій; 4- підігрівач метану; 5-підігрівач аміаку; 6- змішувач аміаку і повітря з паралітовим фільтром; 7 – холодильник-конденсатор; 8 - сепаратор; 9 – абсорбційна колона; 10 - продувна колона; 11 – підігрівач відхідних газів; 12 - підігрівач повітря; 13 - посуд окислення нітрозних газів; 14 – контактний апарат; 15 - котел-утилізатор; 16, 18 - двохступінчастий турбокомпресор; 17- газова турбіна

Охолоджені нітрозні гази в 12 теплообміннику відправляються для подальшого охолодження теплообмінник 11, де відбуваються нагрівання вихлопних (хвостових) газів до 110-125 °С та зниження температури нітрозних газів до 150 °С. Далі гази нітрозні відправляються у холодильник-конденсатор 7, що охолоджується оборотною водою. При цьому утворюється слабка азотна кислота та конденсуються водяні пари. У 8 сепараторі гази нітрозні відокремлюють від азотної сконденсованої кислоти, за яким азотну кислоту правлять до абсорбційної колони 9 на 6-7 та річку, а нітрозні гази - під нижню тарілку абсорбційної колони.[1]

Ступінь абсорбції оксидів азоту сягає 99%. Вихідні з колони хвостові гази з вмістом оксидів азоту до 0,11% при температурі 35 °С проходять підігрівник 11, де нагріваються до 110-145 °С і надходять до топкового пристрою (камера спалювання) установки каталітичної очистки. Тут гази нагріваються до температури 390-450 °С спалюваним природним газом, попередньо підігрітим в 4 підігрівачі, і відправляються в реактор з двокульовим каталізатором 2, де першою кулею служить оксид алюмінію, з нанесеним на нього паладієм, іншою кулею – алюмінієвий оксид. Очищення здійснюється при 760 градусів за Цельсієм. Гази очищені прибувають у газову турбіну 17 за температури 690-700 °С. Енергія, що виробляється турбіною при використанні теплоти хвостових газів, застосовується для приводу турбокомпресора 18. Потім гази направляють у котел-утилізатор та економайзер (на схемі не показані) та викидаються в атмосферу.[1]

1.5 Постановка задач дослідження

Виробництво азотної кислоти під тиском 0,716 МПа є складним багатостадійним технологічним процесом, до якого висуваються високі вимоги щодо якості кінцевого продукту, енергоефективності та екологічної безпеки. Аналіз літературних джерел та технологічних рішень показує, що однією з ключових операцій у процесі виробництва є відділення слабкої азотної кислоти в сепараторі, від ефективності якого залежить ступінь поглинання оксидів азоту в абсорбційній колоні, а також кінцева концентрація кислоти.

Функціонування сепаратора супроводжується змінами термодинамічних параметрів, коливаннями складу газорідної суміші та впливом зовнішніх збурень. Це створює необхідність у застосуванні сучасних методів математичного моделювання та оптимального керування, що дозволяє забезпечити стабільну якість продукту та мінімізувати енергетичні витрати.

В роботі ставляться такі задачі дослідження:

1. Проаналізувати технологічний процес виробництва азотної кислоти під тиском 0,716 МПа та визначити ключові керовані параметри. Це включає опис технологічної схеми, визначення місця сепаратора у процесі, аналіз матеріальних

потоків та оцінку факторів, які впливають на ефективність процесу поглинання оксидів азоту.

2. Розробити математичну модель сепаратора для опису процесів розділення фаз. Модель повинна відображати статичний та динамічний режими роботи, залежність вихідної концентрації азотної кислоти від витрат і складу вхідних потоків.

3. Побудувати оптимальне програмне керування процесом. Необхідно обрати критерій оптимальності, сформулювати задачу оптимального керування в термінах задачі оптимізації та одержати керуючі впливи, які мінімізують заданий критерій.

4. Синтезувати оптимальний регулятор зі зворотним зв'язком. Передбачається синтез лінійно-квадратичного регулятора (LQR) та дослідження його впливу на систему з використанням математичного моделювання.

5. Проаналізувати вплив можливих аварійних ситуацій на процес виробництва азотної кислоти. Для цього застосовується метод експертної оцінки та визначається найбільш критичний фактор, що впливає на технологічну безпеку та стабільність процесу.

Результати виконання цих задач дозволять оцінити ефективність оптимального керування процесом, підвищити якість продукту та зменшити витрати енергоресурсів.

2.МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕПАРАТОРА

2.1 Визначення технологічного об'єкта керування і його опис.

У технологічній схемі виробництва азотної кислоти під тиском 0,716 МПа сепаратор виконує одну з ключових функцій — він забезпечує відокремлення рідкої фази азотної кислоти від нітрозного газу після конденсації. Саме на цій стадії формується слабка азотна кислота, яка надалі надходить в абсорбційну колону. Тому стабільність і ефективність роботи сепаратора безпосередньо впливають на глибину поглинання оксидів азоту, кінцеву концентрацію кислоти та загальну продуктивність установки.

Вибір сепаратора як об'єкта дослідження обґрунтовується тим, що цей апарат є чутливим до змін технологічних параметрів (витрати, температури та складу нітрозних газів), а відхилення в його роботі призводять до накопичення оксидів азоту у технологічному контурі, зростання втрат продукції та зниження ефективності абсорбції. Крім того, саме на цій ділянці можливі порушення режиму, пов'язані з нестабільністю фазового складу, що робить сепаратор критичним елементом системи автоматичного керування.

З огляду на це, математичне моделювання сепаратора є необхідним етапом для подальшого аналізу його динамічних властивостей і розроблення системи регулювання. Побудована модель дозволяє описати взаємозв'язки між параметрами газорідної суміші, оцінити вплив збурень та визначити керуючі дії, які забезпечують підтримання необхідних технологічних показників. Таким чином, цей розділ закладає основу для подальших досліджень: на його основі в розділі 3 виконується аналіз динаміки об'єкта та синтез класичних регуляторів, а результати моделювання використовуються у фінальному порівнянні різних підходів до керування.

Під час розробки математичної моделі процесу відділення в сепараторі розглядаються такі параметри:

1. Концентрація реагентів: концентрація азотної кислоти та нітрозних газів в вихідних продуктах;

2. Температура: температурні умови в апараті, що визначаються умовами процесу;
3. Час реакції: час необхідний для завершення відділення в сепараторі;
4. Ступінь відділення: відсоток відділення нітрозних газів;
5. Об'єм апарату: постійний об'єм сепаратора, який визначається умовами роботи апарату та його геометрією.

За допомогою цих параметрів можна створити математичну модель, яка враховує основні елементи процесу відділення в сепараторі з урахуванням припущень.

Вхідними параметрами для сепаратора є:

$G_{\text{пс}}$ – витрата парогазової суміші, кг/с;

$x_{\text{ак вх}}$ – концентрація азотної кислоти на вході, %;

$x_{\text{нг вх}}$ – концентрація нітрозних газів на вході, %;

Вихідними параметрами є:

$G_{\text{ак}}$ – витрата азотної кислоти, кг/с;

$x_{\text{ак}}$ – концентрація азотної кислоти на виході, %;

$G_{\text{нг}}$ – витрата нітрозних газів, кг/с;

$x_{\text{нг}}$ – концентрація нітрозних газів на виході, %;

На рис. 2.1 зображено структурно-параметричну схему сепаратора

Для сепаратора основним регульованим параметром є витрата парогазової суміші на вході $G_{\text{пс}}$. Керуючим впливом в даному випадку є концентрація азотної кислоти на виході $x_{\text{ак вих}}$, а збуренням відповідно концентрація азотної кислоти на вході $x_{\text{ак вх}}$.

Для подальшого аналізу та побудови математичної моделі необхідно формалізувати технологічний об'єкт керування та визначити основні вхідні і вихідні параметри сепаратора. При цьому сепаратор розглядається як динамічний об'єкт керування, робота якого визначається витратами та складом вхідної парогазової суміші. Зміна цих параметрів безпосередньо впливає на концентрацію азотної кислоти на виході апарата та ефективність подальших стадій процесу.

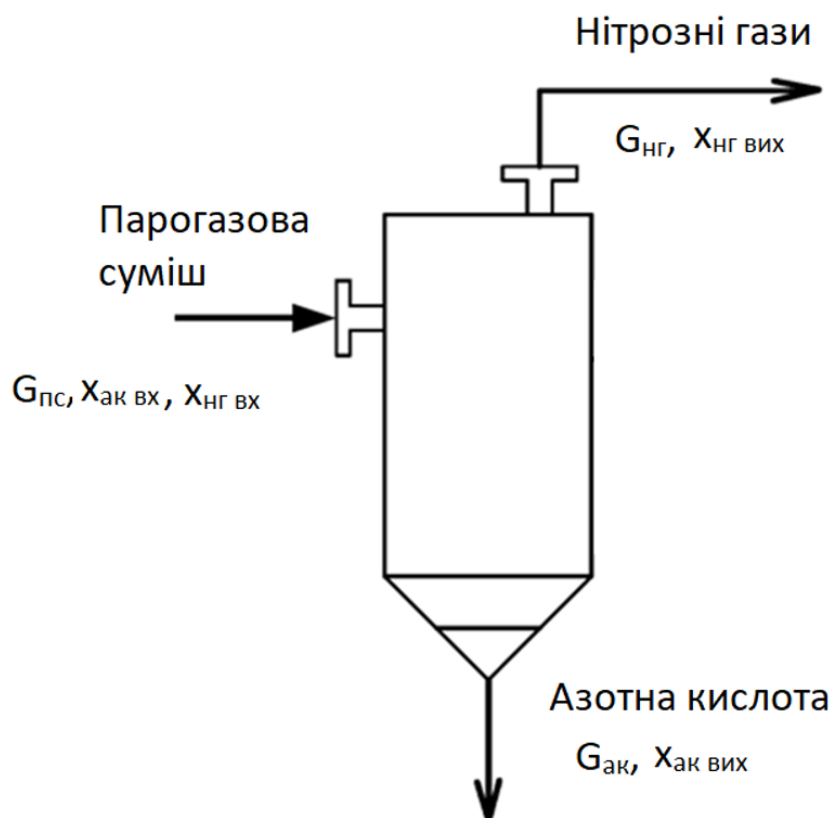


Рис. 2.1 – Схема сепаратора з параметрами вхідних та вихідних потоків

2.2. Моделювання статичного режиму

Автоматизація широко оперує статичними властивостями об'єктів керування. У режимі, що настав, усі вхідні та вихідні величини та параметри, які уособлюють сталість об'єкта із плином часу. Це, своєючергою, веде до визначення конкретного режиму функціонування. Статична властивість окреслює вихідний і завершальний стани динамічного режиму об'єкта.[3]

Таблиця 2.1 містить значення основних технологічних параметрів для статичного режиму процесу.

Для визначення статичних характеристик сепаратора запишемо рівняння матеріального балансу:

$$G_{пс} \cdot (x_{ак вх} + x_{нг вх}) = G_{ак} \cdot x_{ак вих} + G_{нг} \cdot x_{нг вих} \quad (2.1)$$

Таблиця 2.1. Основні параметри статичного режиму сепаратора

| № | Назва параметру | Позначення | Значення | Розмірність |
|---|--|---------------------|----------|-------------------|
| 1 | Витрата парогазової суміші | $G_{\text{пс}}$ | 100 | кг/с |
| 2 | Витрата азотної кислоти | $G_{\text{ак}}$ | 30 | кг/с |
| 3 | Витрата нітрозних газів | $G_{\text{нг}}$ | 70 | кг/с |
| 4 | Концентрація азотної кислоти на вході | $x_{\text{ак вх}}$ | 30 | % |
| 5 | Концентрація нітрозних газів на вході | $x_{\text{нг вх}}$ | 70 | % |
| 6 | Концентрація азотної кислоти на виході | $x_{\text{ак вих}}$ | 95 | % |
| 7 | Концентрація нітрозних газів на виході | $x_{\text{нг вих}}$ | 5 | % |
| 8 | Густина азотної кислоти | $\rho_{\text{ак}}$ | 1380 | кг/м ³ |
| 9 | Об'єм сепаратора | V | 12 | м ³ |

З рівняння (2.1) виведемо статичну характеристику для параметру концентрації азотної кислоти на виході $x_{\text{ак вих}}$:

$$x_{\text{ак вих}} = \frac{G_{\text{пс}} \cdot (x_{\text{ак вх}} + x_{\text{нг вх}}) - G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}}}{G_{\text{ак}}} \quad (2.2)$$

Підставимо значення з таблиці 2.1 в рівняння (2.2) та отримаємо статичну характеристику для каналу керування «витрата парогазової суміші – концентрація азотної кислоти на виході»:

$$x_{\text{ак вих}}(G_{\text{пс}}) = \frac{G_{\text{пс}} \cdot (0.3 + 0.7) - 70 \cdot 0.05}{30} = \frac{1}{30} \cdot G_{\text{пс}} - \frac{7}{60} \quad (2.3)$$

Також підставимо значення з таблиці 2.1 в рівняння (2.2) та отримаємо статичну характеристику для каналу збурення «концентрація азотної кислоти на вході – концентрація азотної кислоти на виході»:

$$x_{\text{ак вих}}(x_{\text{ак вх}}) = \frac{100 \cdot (x_{\text{ак вх}} + 0.7) - 70 \cdot 0.05}{30} = \frac{10}{3} \cdot x_{\text{ак вх}} + \frac{133}{60} \quad (2.4)$$

В результаті математичного моделювання статичного режиму (2.3) роботи сепаратора за каналом керування «витрата парогазової суміші – концентрація азотної кислоти на виході» було отримано графік (рис. 2.2).

В результаті математичного моделювання статичного режиму (2.4) роботи сепаратора за каналом збурення «концентрація азотної кислоти на вході – концентрація азотної кислоти на виході» ми отримали наступний графік (рис. 2.3).

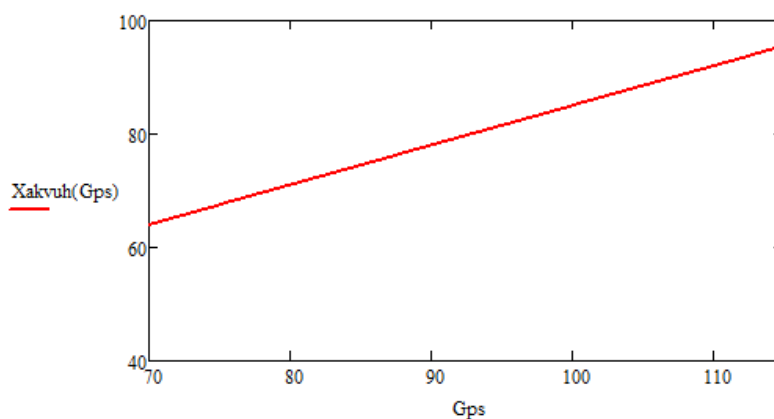


Рис. 2.2 – Статична характеристика сепаратора за каналом керування «витрата парогазової суміші – концентрація азотної кислоти на виході»

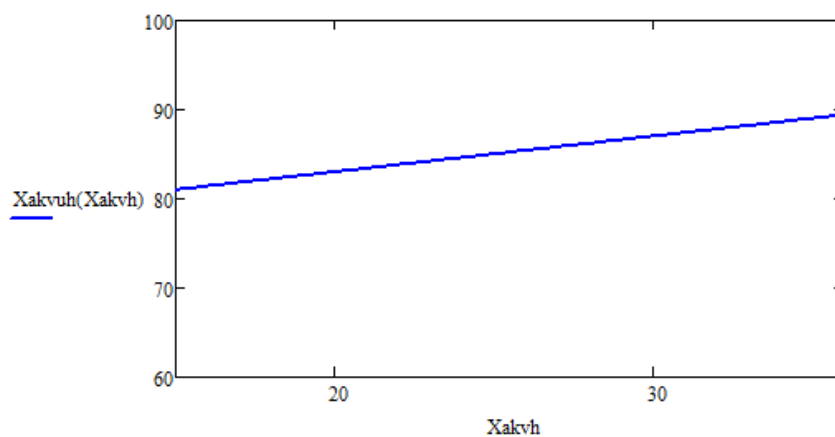


Рис. 2.3 – Статична характеристика сепаратора за каналом збурення «концентрація азотної кислоти на вході – концентрація азотної кислоти на виході»

2.3 Моделювання динамічного режиму

Після того, як ми розрахували статичну характеристику, нам потрібно приступити до динамічної характеристики, також до розрахунку. Це дозволить дослідити динамічні властивості об'єкта, а також зможе показати зміну досліджуваної величини з часом.[3]

Рівняння динаміки для сепаратора має вигляд:

$$G_{\text{ПС}} \cdot (x_{\text{ак вх}} + x_{\text{нг вх}}) - G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}} = V \cdot \rho_{\text{ак}} \frac{dx_{\text{ак вих}}}{dt} \quad (2.5)$$

Лінеаризуємо рівняння (2.5) за каналом керування:

$$\Delta G_{\text{ПС}} \cdot (x_{\text{ак вх}} + x_{\text{нг вх}}) - G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}} = V \cdot \rho_{\text{ак}} \frac{d\Delta x_{\text{ак вих}}}{dt} \quad (2.6)$$

$$\Delta G_{\text{ПС}} \cdot (x_{\text{ак вх}} + x_{\text{нг вх}}) = V \cdot \rho_{\text{ак}} \frac{d\Delta x_{\text{ак вих}}}{dt} + G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}} \quad (2.7)$$

$$\Delta G_{\text{ПС}} \cdot \frac{x_{\text{ак вх}} + x_{\text{нг вх}}}{G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}}} = \frac{V \cdot \rho_{\text{ак}}}{G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}}} \frac{d\Delta x_{\text{ак вих}}}{dt} + 1 \quad (2.8)$$

Зробимо заміну на коефіцієнти k_1 та T_1 :

$$k_1 = \frac{x_{\text{ак вх}} + x_{\text{нг вх}}}{G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}}} \quad T_1 = \frac{V \cdot \rho_{\text{ак}}}{G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}}} \quad (2.9)$$

Підставимо значення (2.9) в рівняння (2.8):

$$\Delta G_{\text{ПС}} \cdot k_1 = T_1 \frac{d\Delta x_{\text{ак вих}}}{dt} + 1 \quad (2.10)$$

Виконаємо перетворення рівняння (2.10) за Лапласом:

$$W_{kr}(p) = \frac{k_1}{T_1 \cdot p + 1} \quad (2.11)$$

$$k_1 = 96.5 \quad T_1 = 59.3$$

Підставимо значення k_1 та T_1 в рівняння (2.11) та остаточно отримаємо передатну функцію за каналом керування:

$$W_{kr}(p) = \frac{96.5}{59.3 \cdot p + 1} \quad (2.12)$$

Лінеаризуємо рівняння (2.5) за каналом збурення:

$$G_{\text{ПС}} \cdot (\Delta x_{\text{ак вх}} + x_{\text{нг вх}}) - G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}} = V \cdot \rho_{\text{ак}} \frac{d\Delta x_{\text{ак вих}}}{dt} \quad (2.13)$$

$$\Delta x_{\text{ак вх}} \cdot G_{\text{пс}} = V \cdot \rho_{\text{ак}} \frac{d\Delta x_{\text{ак вих}}}{dt} + G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}} - G_{\text{пс}} \cdot x_{\text{нг вх}} \quad (2.14)$$

$$\Delta x_{\text{ак вх}} \cdot \frac{G_{\text{пс}}}{G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}} - G_{\text{пс}} \cdot x_{\text{нг вх}}} = \frac{V \cdot \rho_{\text{ак}}}{G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}} - G_{\text{пс}} \cdot x_{\text{нг вх}}} \frac{d\Delta x_{\text{ак вих}}}{dt} + 1 \quad (2.15)$$

Зробимо заміну на коефіцієнти k_2 та T_2 :

$$k_2 = \frac{G_{\text{пс}}}{G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}} - G_{\text{пс}} \cdot x_{\text{нг вх}}} \quad T_2 = \frac{V \cdot \rho_{\text{ак}}}{G_{\text{нг}} \cdot x_{\text{нг вих}} - G_{\text{пс}} \cdot x_{\text{нг вх}}} \quad (2.16)$$

Підставимо значення (2.16) в рівняння (2.15):

$$\Delta x_{\text{ак вх}} \cdot k_2 = T_2 \frac{d\Delta x_{\text{ак вих}}}{dt} + 1 \quad (2.17)$$

Виконаємо перетворення рівняння (2.17) за Лапласом:

$$W_{zb}(p) = \frac{k_2}{T_2 \cdot p + 1} \quad (2.18)$$

$$k_2 = 85.3 \quad T_2 = 44.7$$

Підставимо значення k_2 та T_2 в рівняння (2.18) та остаточно отримаємо передатну функцію за каналом збурення:

$$W_{zb}(p) = \frac{85.3}{44.7 \cdot p + 1} \quad (2.19)$$

Побудуємо динамічну характеристику сепаратора за каналом керування (2.11):

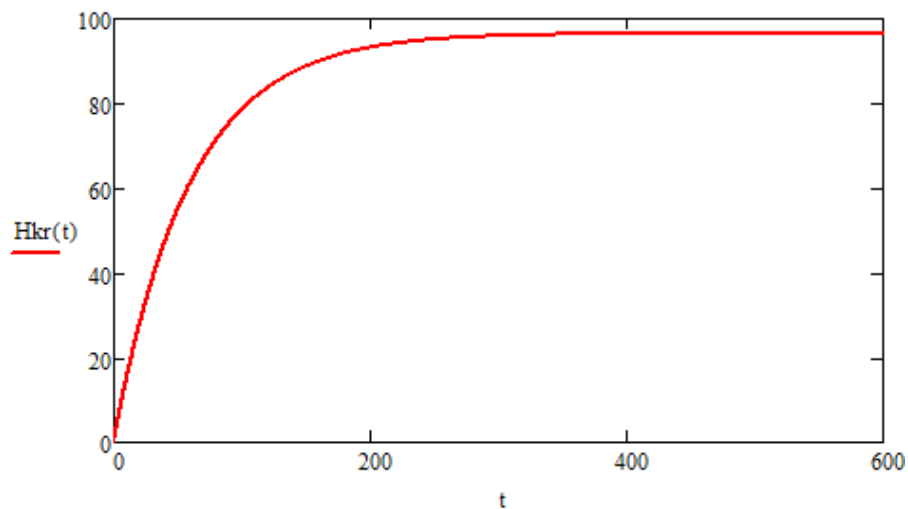


Рис. 2.4 – Динамічна характеристика сепаратора за каналом керування «витрата парогазової суміші – концентрація азотної кислоти на виході»

Побудуємо динамічну характеристику сепаратора за каналом збурення (2.17):

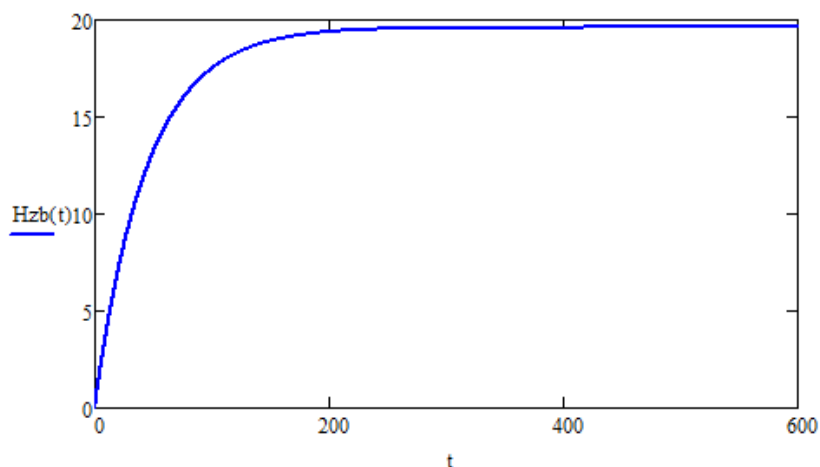


Рис. 2.5 – Динамічна характеристика сепаратора за каналом збурення «концентрація азотної кислоти на вході – концентрація азотної кислоти на виході»

Висновок: У розділі розроблено математичну модель сепаратора, що описує процеси розділення газорідної суміші. Модель отримана на основі рівняння матеріального балансу та дозволяє аналізувати статичні та динамічні властивості об'єкта керування. Отримані передавальні функції для каналів керування та збурення можуть бути використані для синтезу систем автоматичного керування та оцінки впливу технологічних параметрів на якість відділення азотної кислоти.

3 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СЕПАРАТОРА

3.1 Аналіз необхідності використання регулятора

Системи управління використовують регулювання, щоб гарантувати, що вони працюють стабільно та найкращим чином відповідно до визначених критеріїв. Крім того, вони зменшують вплив небажаних змін, що сприяє стабільності системи.

Передатна функція ПІ-регулятора:

$$W_{reg}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right); \quad (3.1)$$

звідки K_p – коефіцієнт регуляторного підсилення,
 T_i – час регуляторного ізодрому.

Передатна функція ПІД-регулятора:

$$W_{reg}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right); \quad (3.2)$$

звідки T_d – час регуляторного випередження;

3.2 Налаштування ПІ та ПІД-регуляторів

З метою синтезу системи керування буде застосоване програмне середовище Matlab та складові Simulink. Складемо схему системи керування зі зворотним зв'язком з ПІ та ПІД-регуляторами для передатної функції по каналу керування, результат на рис. 3.1

Налаштування ПІ-регулятора

Використовуємо модуль Tune в системи Simulink.

Налаштовуємо повзунки в вкладці Tune таким чином, щоб графік мав найменше перерегулювання та найменший час виходу на усталений режим, результат на рис. 3.2

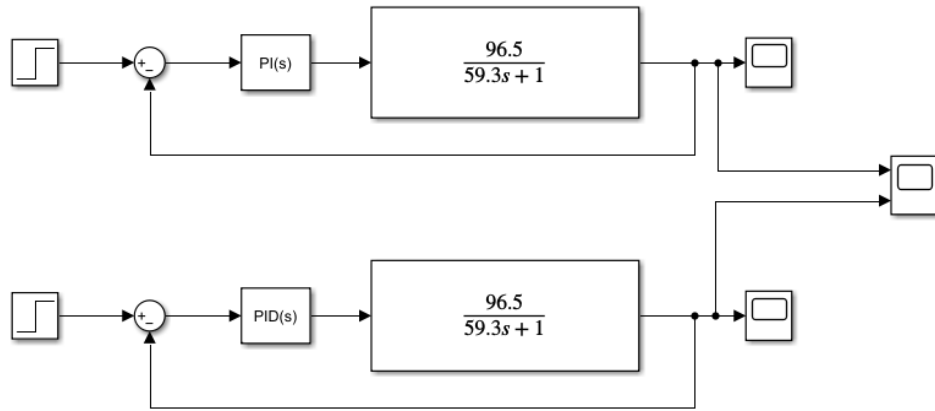


Рис. 3.1 – Схема системи керування з PI та PID-регуляторами

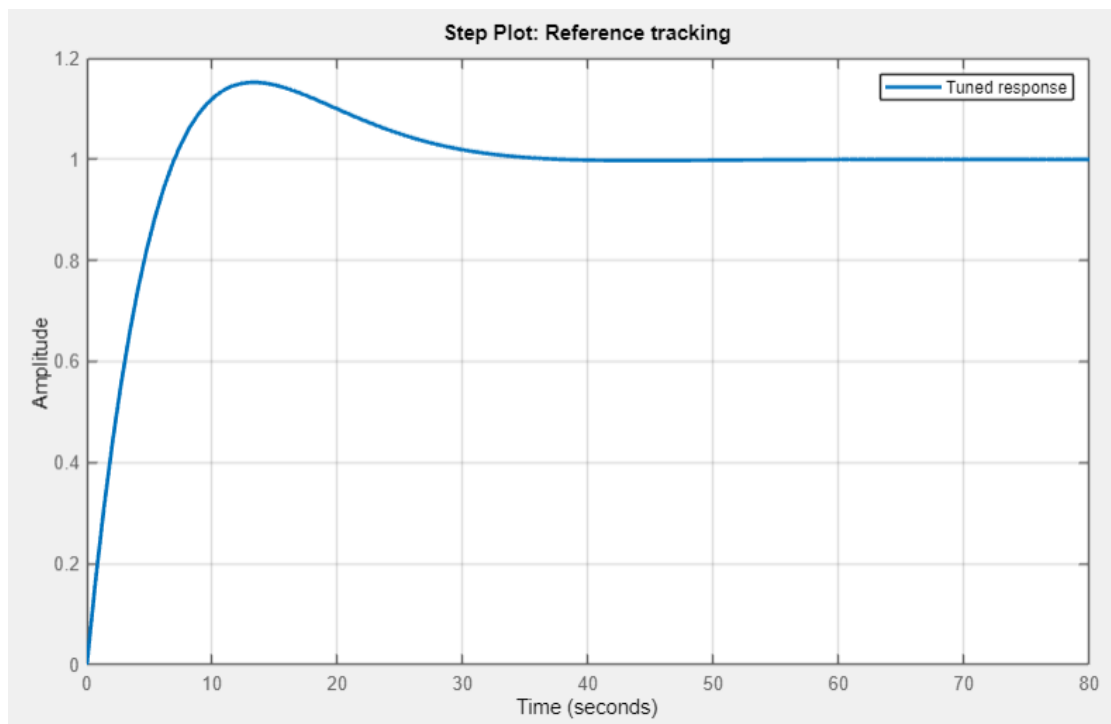


Рис. 3.2 – Графік налаштування PI-регулятора

Як результат, отримуємо параметри налаштування PI-регулятора

Proportional (P):

Integral (I):

Рис. 3.3 – Параметри налаштування PI-регулятора

Перехідна характеристика системи з налаштованим PI-регулятором буде виглядати наступним чином:

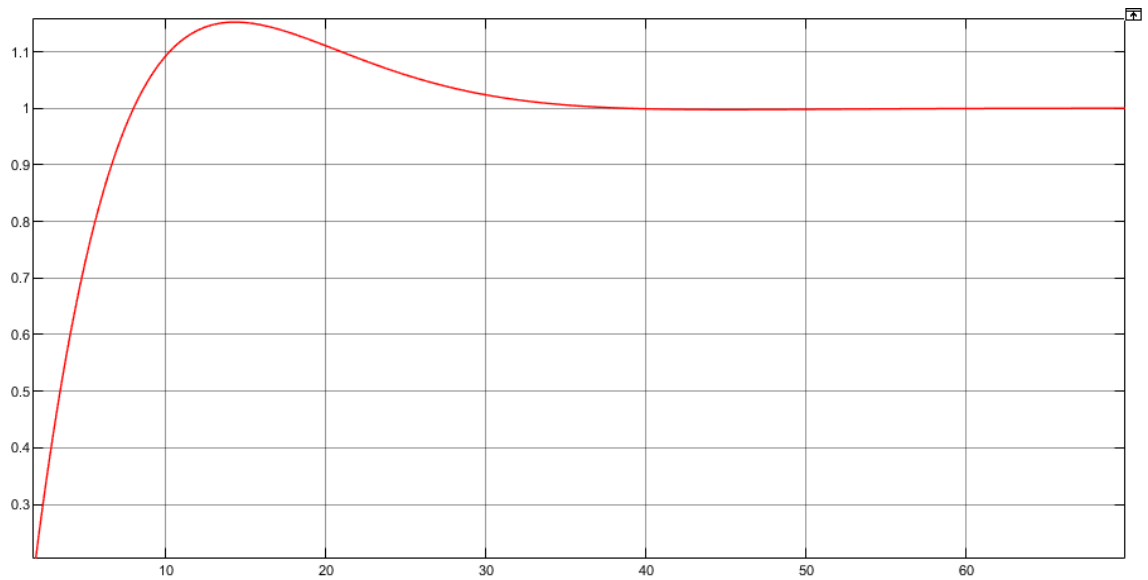


Рис. 3.4 – перехідна характеристика системи з PI-регулятором

Налаштування PID-регулятора

Використовуємо модуль Tune в системи Simulink.

Налаштовуємо повзунки в вкладці Tune так, щоб графік мав найменший час виходу на усталений режим і найменше перерегулювання:

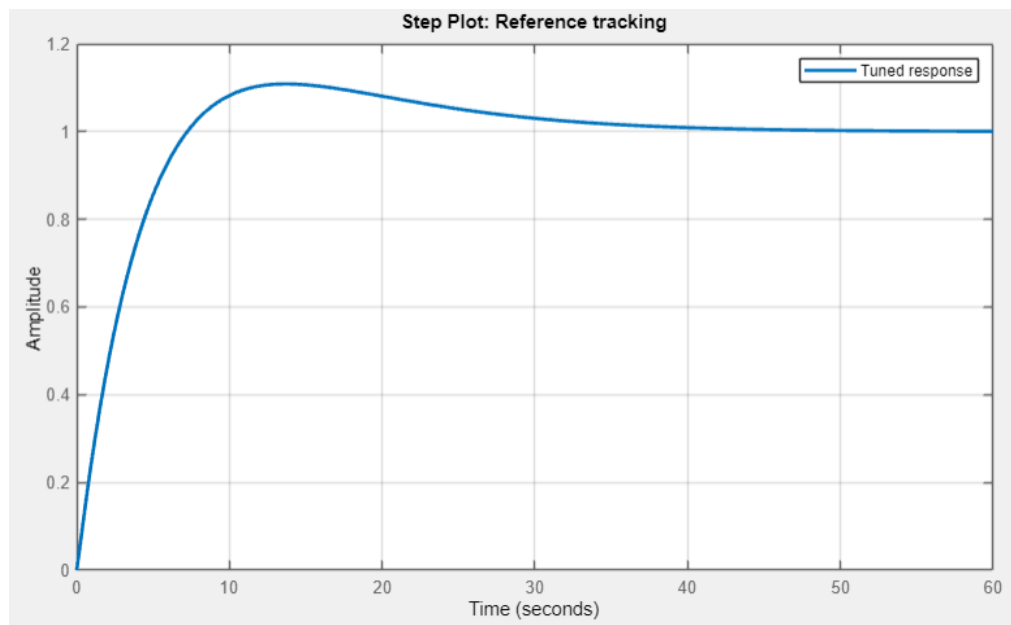


Рис. 3.5 – Графік налаштування PID-регулятора

Як результат, отримуємо параметри налаштування PID-регулятора

Proportional (P): 0.177850152603813
Integral (I): 0.0146823558100948
Derivative (D): -0.00518155803506164

Рис. 3.6 – Параметри налаштування PID-регулятора

Перехідна характеристика системи з налаштованим PID-регулятором буде виглядати наступним чином:

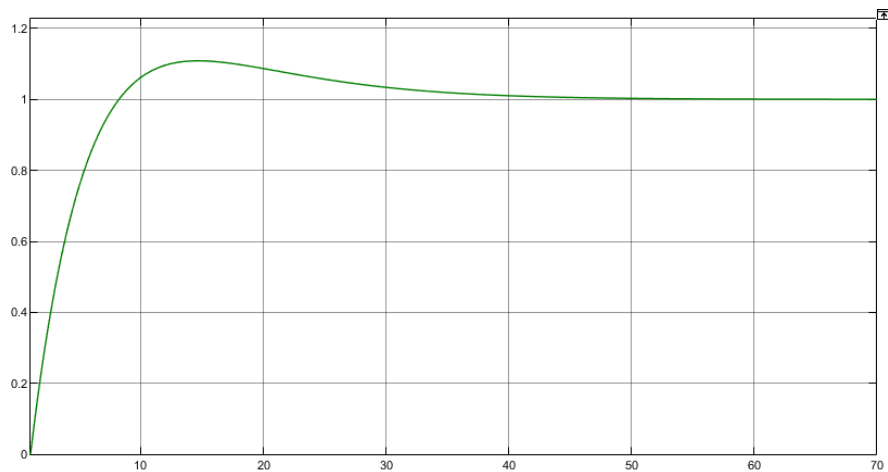


Рис. 3.7 – перехідна характеристика системи з PID-регулятором

Порівнюємо PI та PID-регулятори

Додаємо перехідні характеристики на один графік, щоб згодом проаналізувати його:

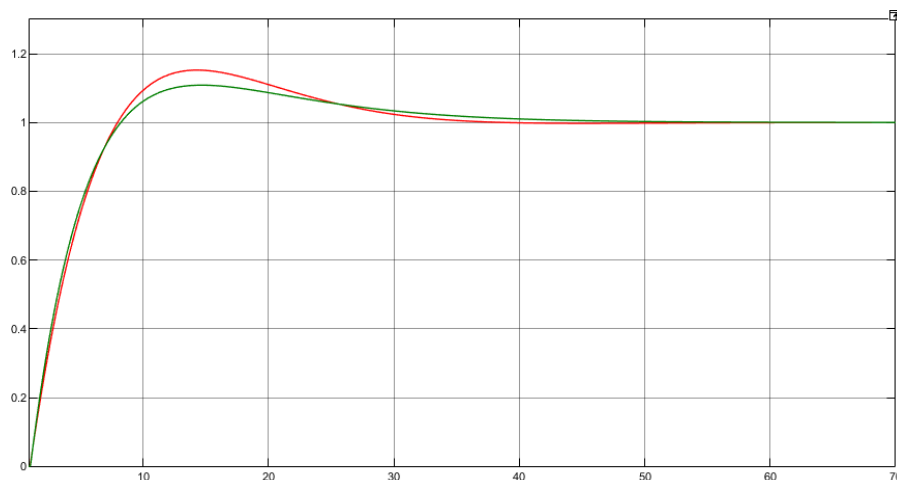


Рис. 3.8 – Перехідні характеристики обох регуляторів

Таблиця 3.1 – Показники якості перехідних характеристик

| Закон регулювання | PI | | PID | | |
|----------------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|
| Параметри регуляторів | K_p | T_i | K_p | T_i | T_d |
| | 0.15 | 0.01 | 0.1 | 0.0 | - |
| | 6 | 76 | 78 | 147 | 0.0052 |
| Час виходу на усталений режим, с | 67.541 | | 55.054 | | |
| Перерегулювання, % | 15.2 | | 10.9 | | |

Отже, було збудовано ПІ та ПІД-регулятори, застосовуючи програмне середовище Matlab Simulink, як можна бачити із перехідних характеристик на малюнку 3.8 та таблиці 3.1 з характеристиками якості, ПІД-регулятор демонструє себе дещо краще ніж ПІ-регулятор. Перерегулювання менше і час, який витрачається на вихід у режим усталення також менший, що свідчить про те, що ПІД-регулятор є більш стабільнішим та влучнішим для системи керування відділенням нітрозних газів від парогазової суміші у сепараторі.

Висновок: У цьому розділі проведено аналіз необхідності застосування класичних ПІ та ПІД-регуляторів для стабілізації роботи сепаратора в процесі виробництва азотної кислоти. На основі отриманих у попередніх розділах статичних і динамічних характеристик визначено структуру системи керування та виконано налаштування регуляторів відповідно до вимог до якості перехідного процесу.

У ході дослідження встановлено, що коректно підібрані параметри ПІ/PID-регулятора забезпечують прийнятний ступінь згладжування збурень, стабілізацію вихідної концентрації азотної кислоти та достатню швидкість реакції системи на зміну вхідних потоків. Отримані результати підтверджують можливість

використання класичних регуляторів у системі керування сепаратором для підтримання заданого технологічного режиму.

4. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

Вибір критерію оптимальності

Сучасні підходи до автоматизації передбачають використання методів оптимального керування, які дозволяють враховувати критерій якості в явному вигляді та забезпечувати найкращі перехідні процеси. [5]

У цьому розділі метод оптимального керування розглядається на прикладі теплообмінника, що входить до складу установки синтезу. Теплообмінник обрано як демонстраційний об'єкт, оскільки його математична модель є простішою, що дає змогу детально показати побудову рівнянь стану, виведення необхідних умов оптимальності та формування оптимального закону керування.

Отримані результати мають методичний характер: вони показують послідовність розв'язання задачі оптимального керування і можуть бути надалі використані для розроблення систем оптимального керування для інших апаратів хімічного виробництва, зокрема сепаратора.

Метою розділу є побудова оптимального програмного керування та оптимального регулятора зі зворотним зв'язком для теплообмінника, а також аналіз отриманих перехідних процесів.

Задача: мінімізувати витрату теплоагента та вивести значення температури синтез-газу на заданий рівень.

Для вирішення даної задачі оберемо інтегральний критерій якості. Необхідно підтримувати на певному рівні температуру синтез-газу на виході з теплообмінника. Тобто в критерій оптимальності включаємо температуру синтез-газу на виході з апарата:

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} [q(x_{\text{ак вих}} - x_{\text{ак вих}}^{\text{зд}})^2 + r \cdot G_{\text{пс}}^2] dt \rightarrow \min$$

4.1 Виведення необхідних умов оптимальності

$$a_{11} = 0 \quad a_{12} = \frac{-G_{\text{нг}}}{V \cdot \rho_{\text{ак}}} \quad b_1 = \frac{1}{V \cdot \rho_{\text{ак}}}$$

$$a21 = \frac{V \cdot \rho_{ак}}{G_{нг} \cdot x_{нг вих}} \quad a22 = \frac{x_{ак вх} + x_{нг вх}}{G_{нг} \cdot x_{нг вих}}$$

Функція Гамільтона матиме вигляд:

$$H = \frac{1}{2} (q \cdot (x_{ак вих} - x_{ак вих}^{зд})^2 + r \cdot G_{пс}^2) + \lambda_1 \cdot (a11 \cdot x_{нг вх} + a12 \cdot x_{ак вх} + b1 \cdot G_{пс}) + \lambda_2 \cdot (a21 \cdot x_{нг вх} + a22 \cdot x_{ак вх})$$

Запишемо умови оптимальності:

$$\begin{aligned} \lambda' &= -\frac{dH}{dx} \\ \lambda_1' &= -q(x_{ак вих} - x_{ак вих}^{зд}) - a11 \cdot \lambda_1 - a21 \cdot \lambda_2 \\ \lambda_2' &= -a12 \cdot \lambda_1 - a22 \cdot \lambda_2 \\ \frac{dH}{dG_{пс}} &= r \cdot G_{пс} + b1 \cdot \lambda_1 \\ \lambda_1(t_f) &= 0 \\ \lambda_2(t_f) &= 0 \end{aligned}$$

Оптимальне керування:

$$G_{пс} = -\frac{\lambda_1 b_1}{r}$$

4.2 Розрахунок оптимального програмного керування

Далі наведено розрахунок коефіцієнтів x_1, x_2 , λ_1 і λ_2 та керування G_w за допомогою програмного пакету Matlab:

Програмний код

```
[x1,x2,t,N] = findx();
f1 = figure;
f2 = figure;
f3 = figure;
f4 = figure;
plot(t,x1)
title('Изменение x1');
grid on;
figure(f1)
plot(t,x2)
title('Изменение x2');
grid on;
figure(f2)
k= 1:1:1001;
plot(k,lam1)
title('Изменение λ1');
figure(f3)
plot(k,lam2)
```

```

title('Изменение  $\lambda_2$ ');
figure(f4)
[U_opt] = findUprav(N,lam2);
f5= figure;
plot(t,U_opt)
figure(f5)

```

```

function [x1,x2,t,N] = findx()
x1 = [];
x2 = [];
x1(1) = 95;
x2(1) = 5;
N = 12000;
a11 = 0;
a12 = 96.5;
b12 = 90.824;
F1 = 15;
a21 = 59.3;
a22 = -44.7;
TAU = 0.5;
t = 0:N-1;
for s = 1:N-1
    x1(s+1) = -(a11*x1(s) + a12*x2(s) + b12*F1)*TAU + x1(s);
    x2(s+1) = (a21*x1(s) + a22*x2(s))*TAU+x2(s);
end
end

```

```

function [lam1,lam2] = findlam(x1,x2,N)
lam1(N) = x1(N);
lam2(N) = x2(N);
q = 1;
a11 = -5.051;
a11 = 0;
a21 = 59.3;
a22 = -44.7;
TAU = 0.5;
for s = N:-1:1
    lam1(s+1) = lam1(s) - TAU*(-q*x1(s) - a11*lam1(s) - a21*lam2(s));
    lam2(s+1) = lam2(s) - TAU*(-a12*lam1(s) - a22*lam2(s));
end
end

```

```

function [U_opt] = findUprav(N,lam2)
r = 1;
b12 = 90.824;
for i = 1:N
    U_opt(i) = -(r^-1)*b12*lam2(i);
end
end

```

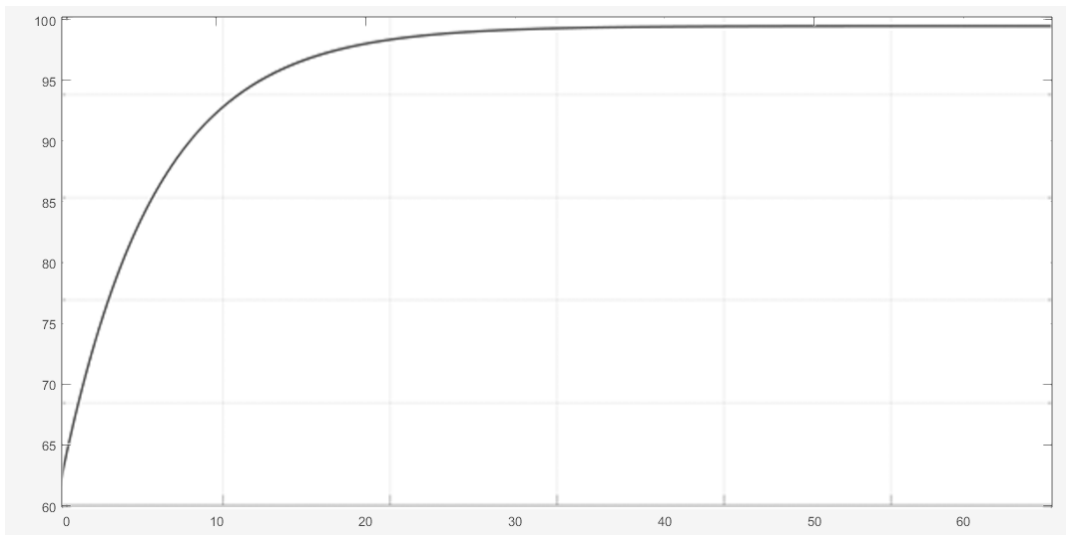


Рис. 4.1 – Графік зміни x_1

На рисунку 4.1 наведено зміну першої координати стану x_1 у часі при реалізації оптимальної траєкторії. Графік демонструє монотонне зростання значення змінної з початкового рівня до встановленого значення. Така поведінка є типовою для керованих систем першого порядку, де оптимальний закон керування спрямований на якнайшвидше, але водночас плавне наближення до бажаного режиму. Після приблизно 30–40 секунд система фактично досягає квазусталого стану, що свідчить про ефективність обраного критерію оптимальності та правильність побудованого керування.

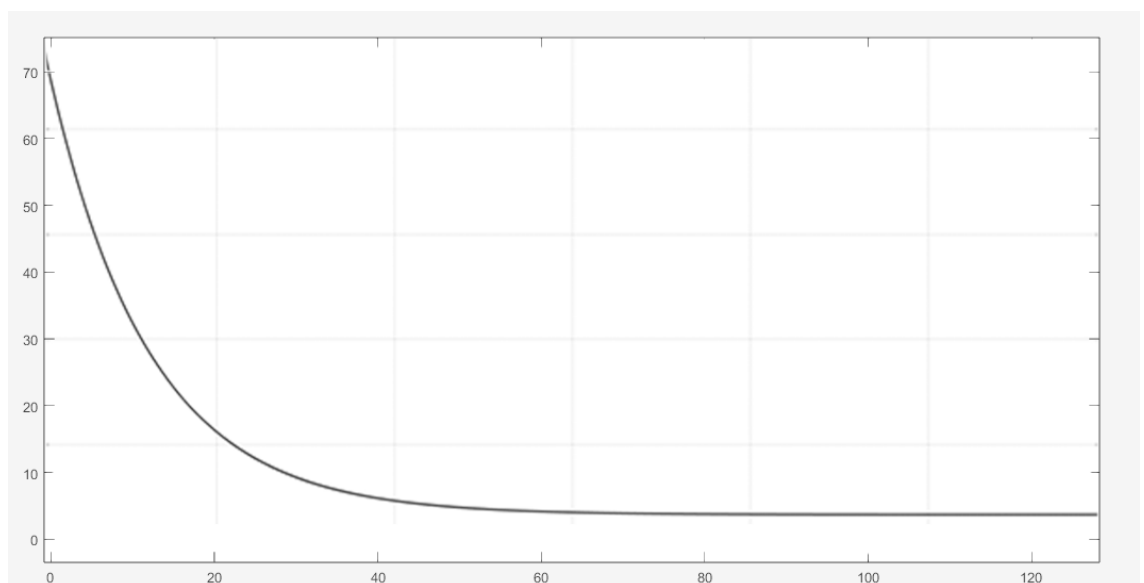


Рис. 4.2 – Графік зміни x_2

На рисунку 4.2 подано зміну другої координати стану x_2 . На відміну від попереднього графіка, тут спостерігається монотонне спадання значення змінної. Початкове значення є значно вищим за бажане, тому оптимальна стратегія передбачає його швидке зниження. Процес стабілізації відбувається швидше, ніж для x_1 , і приблизно до 20–25 секунд система переходить у область близьку до оптимальної. Подальша зміна є мінімальною, що відповідає поведінці добре демпфованої системи.

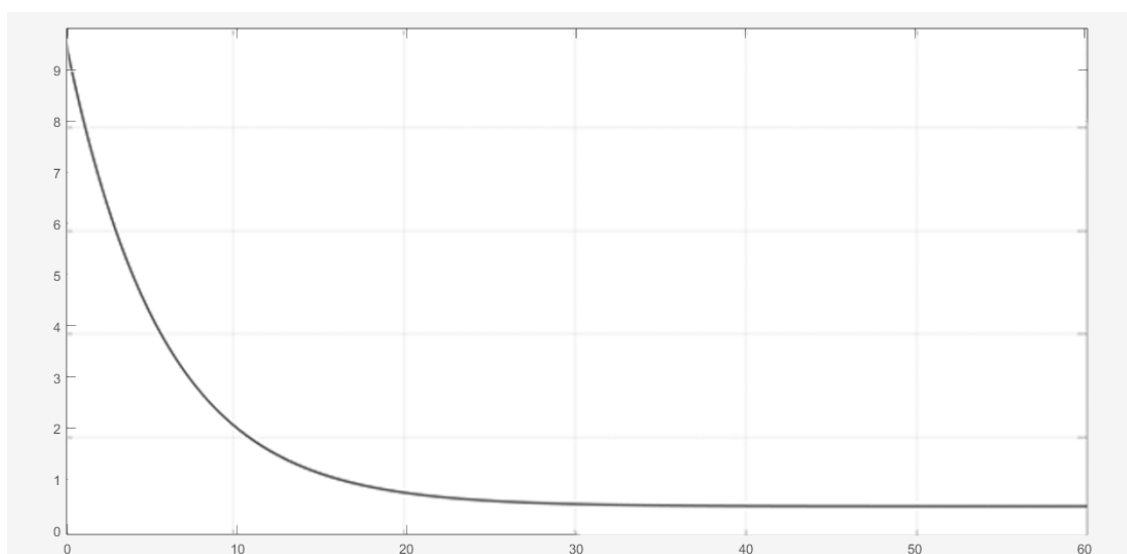


Рис. 4.3 - Графік зміни λ_1

На рисунку 4.3 наведено зміну спряженої змінної λ_1 , яка є частиною рівнянь Понтрягіна у задачі оптимального керування. Функція $\lambda_1(t)$ спадає від початкового максимального значення до нуля, що означає зменшення «вартості» відхилення стану системи в часі. Форма графіка є типовою для випадків, коли оптимальний режим наближається до усталеного значення й вплив початкових умов поступово зникає.

Графік спряженої змінної λ_2 (рис. 4.4) демонструє аналогічну трендову поведінку, однак із більш плавним спаданням. Це свідчить про різний ступінь впливу станів x_1 та x_2 на критерій оптимальності. Більш повільне зниження λ_2 означає, що друга координата вносить вагоміший внесок у цільову функцію протягом більш тривалого часу.

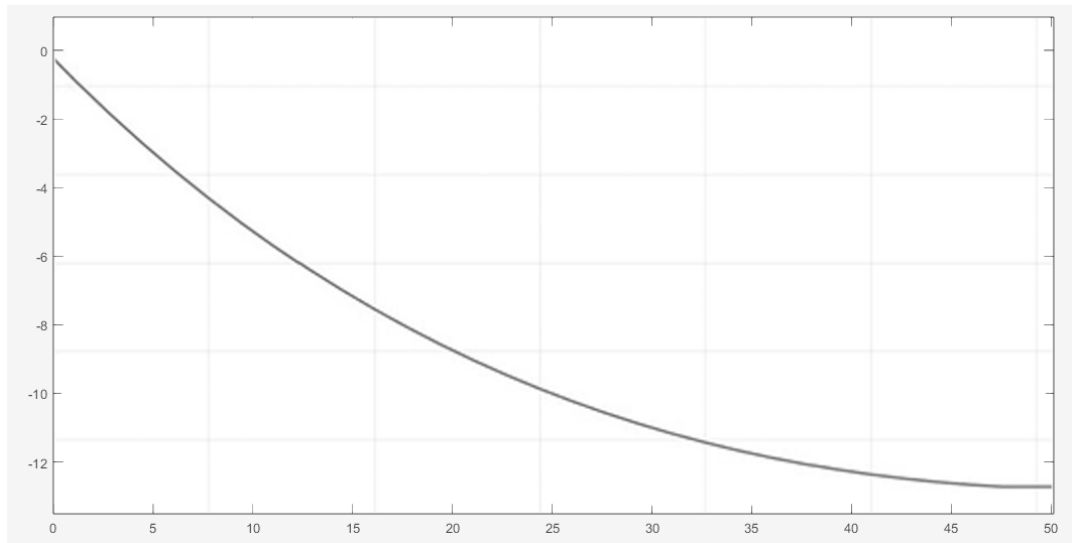


Рис. 4.4 - Графік зміни λ_2

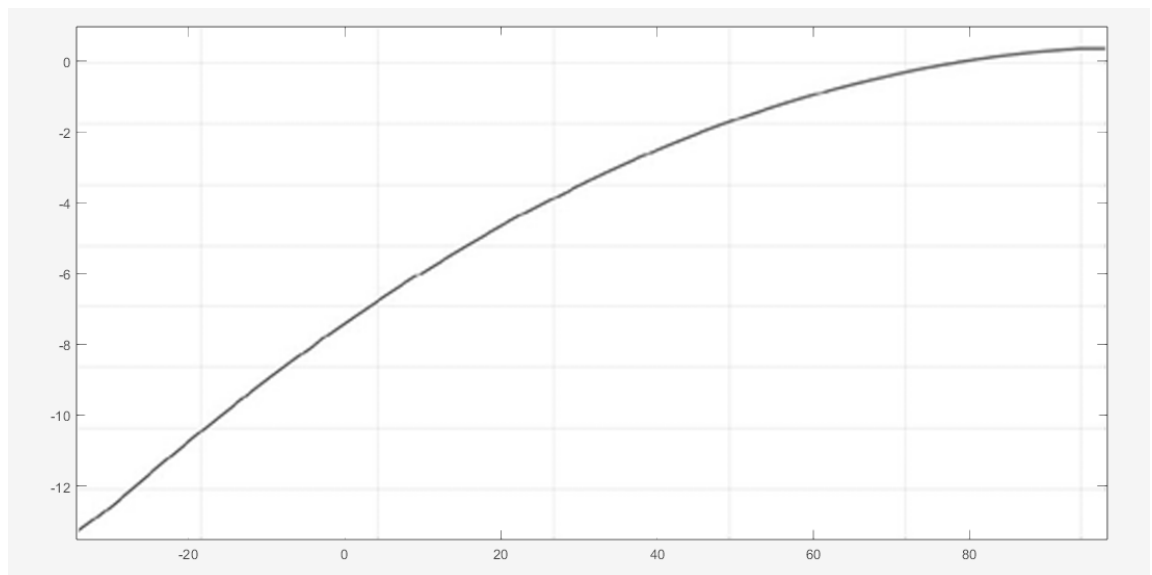


Рис. 4.5 - Графік зміни керування F_1

На рисунку 4.5 показано оптимальний закон керування $F_1(t)$, отриманий шляхом розв'язання рівнянь Понтрягіна. Графік має характерну форму: керуючий вплив спочатку є мінімальним, після чого плавно зростає. Це відповідає фізичній логіці процесу: система поступово вводиться у бажаний режим, уникаючи різких змін, які могли б погіршити якість керування або спричинити небажані перехідні процеси. Наприкінці інтервалу керування наближається до сталого значення, що відповідає встановленню оптимального режиму роботи апарата.

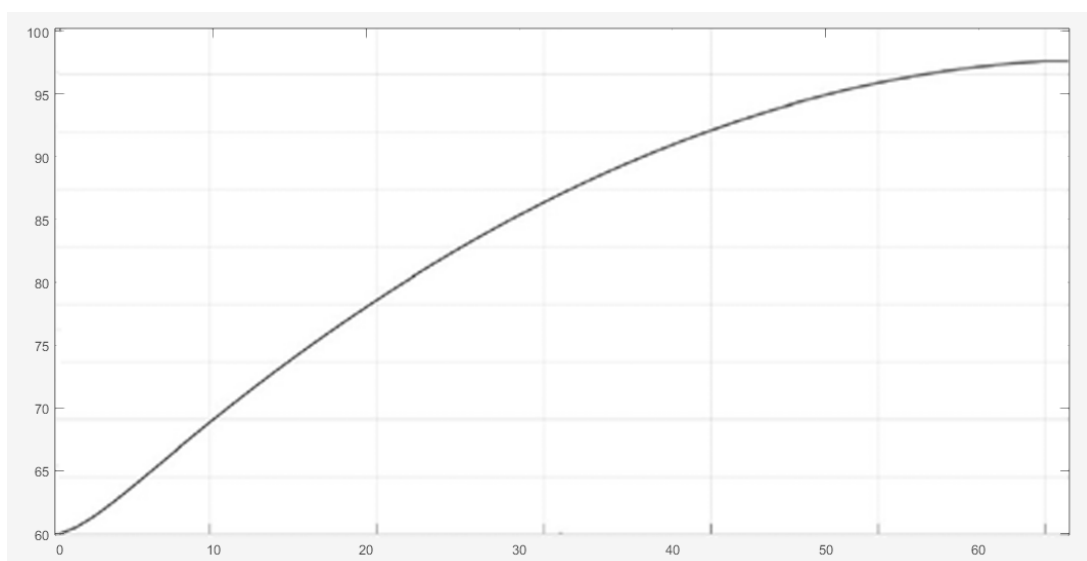


Рис. 4.6 - Графік зміни x_1 _орт

На рисунку 4.6 наведена вже оптимальна траєкторія зміни стану x_1 , що відрізняється від траєкторії без оптимізації (рис. 4.1). Оптимальна траєкторія забезпечує більш плавний вихід на бажане значення, зменшення перехідного часу та мінімізацію інтегральної квадратичної помилки. Графік підтверджує, що застосування оптимального керування дозволяє досягти кращих характеристик порівняно зі звичайним режимом.

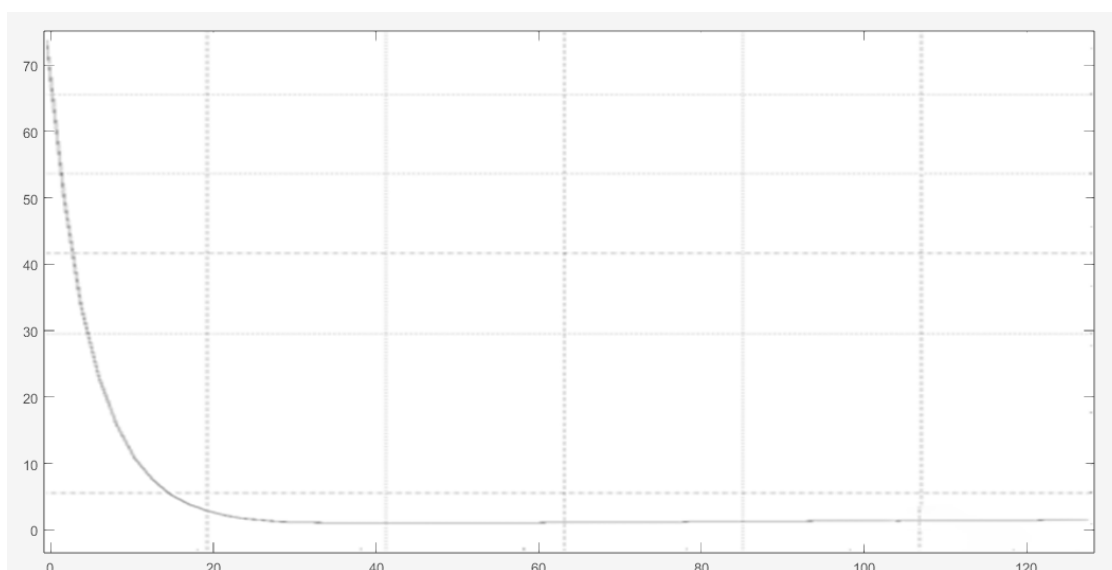


Рис. 4.7 - Графік зміни x_2 _орт 10 %.

Графік на рисунку 4.7 демонструє зміну оптимальної траєкторії другої координати стану x_2 . Оптимальне керування забезпечує швидке зниження значення змінної з 70+ до майже нульового рівня протягом перших 15–20 секунд. На відміну від не оптимізованої траєкторії (рис. 4.2), тут спостерігається: менше перерегулювання, швидший вихід на задану область та краща стабільність у подальшому режимі. Графік підтверджує правильність побудованого алгоритму та доцільність використання оптимального керування для такого типу динамічних систем.

4.3 Розрахунок оптимального керування зі зворотнім зв'язком. Проектування оптимального лінійно-квадратичного регулятора

На рис. 4.8 можна побачити структурну схему контуру керування температурою контактного газу на виході з холодильника.

Розрахунок оптимального керування зі зворотнім зв'язком з квадратичним критерієм якості виконано у *MatLab*.

Оптимальний лінійний регулятор:

$$U(t) = -K(t)X(t)$$

де

$$K(t) = -R^{-1}BP(t)$$

Отримані залежності, розраховують лінійний оптимальний регулятор з матричним коефіцієнтом підсилення K . Цей регулятор мінімізує критерій на траєкторіях системи при цьому:

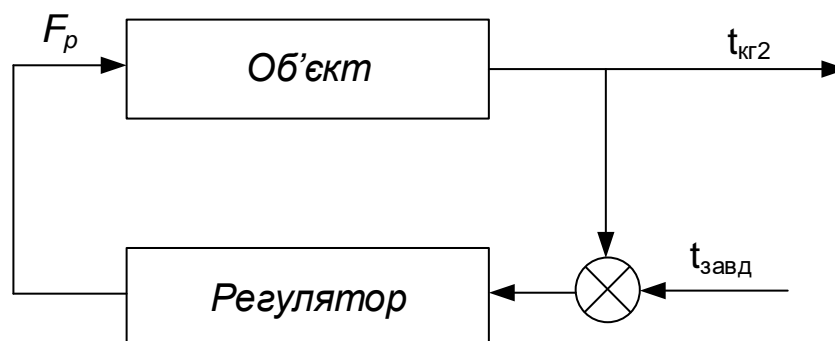


Рис.4.8. – Структурна схема контуру керування

1. Матричний коефіцієнт підсилення K може бути визначеним поза контуром керування, так як він не залежить ні від X , ні від U ; для визначення K необхідно розв'язати рівняння Ріккати в зворотному часі.
2. При постійних матрицях A , B , R , Q і при $t \rightarrow \infty$, P прямує до усталеного значення, яке можна знайти розв'язавши алгебраїчне нелінійне матричне рівняння:

$$\begin{aligned}\frac{dp_{11}}{dt} &= -p_{11} \cdot a_{11} - a_{11}^T \cdot p_{11} + p_{11} \cdot b_{11} \cdot R^{-1} \cdot b_{11}^T \cdot p_{11} - Q_{11} \\ \frac{dp_{12}}{dt} &= -p_{12} \cdot a_{12} - a_{12}^T \cdot p_{12} + p_{12} \cdot b_{11} \cdot R^{-1} \cdot b_{11}^T \cdot p_{12} - Q_{12} \\ \frac{dp_{21}}{dt} &= -p_{21} \cdot a_{21} - a_{21}^T \cdot p_{21} + p_{21} \cdot b_{12} \cdot R^{-1} \cdot b_{12}^T \cdot p_{21} - Q_{21} \\ \frac{dp_{22}}{dt} &= -p_{22} \cdot a_{22} - a_{22}^T \cdot p_{22} + p_{22} \cdot b_{12} \cdot R^{-1} \cdot b_{12}^T \cdot p_{22} - Q_{22}\end{aligned}$$

Це в свою чергу забезпечує сталість матричного коефіцієнту підсилення регулятора K .

3. Пояснимо смисл критерію якості. Зрозуміло, що квадратичне зваження кінцевого стану дозволяє досягнути бажаної якості керування, але квадратичне зваження керування не так обґрунтовано, особливо якщо вартість ресурсів не велика. В деяких випадках квадратичне зваження замінює собою явні обмеження на величину керуючих дій, та дозволяє отримати оптимальний закон зворотного зв'язку в аналітичному вигляді. Крім того, завдання занадто великих вагових матриць R викликає відхилення фактичного кінцевого стану від заданого, а занадто малих – призводить до дуже великих значень U . Основним обмеженням являються вимоги додатної визначеності R і неможливість завдання явних обмежень на X , U . [5]

4. Вводячи більш загальний критерій якості

$$J = 1/2 X(t_f)^T S_f X(t_f) + 1/2 \int_0^{t_f} (X^T Q X + U^T R U + 2 X^T N U) dt$$

в якому враховуються взаємозв'язки між керуваннями та станом, можна показати, що оптимальний регулятор визначається, як і раніше, виразом з коефіцієнтом підсилення:

$$K = R^{-1}(B^T P - N^T).$$

Вимоги, що до існування оптимального лінійно квадратичного регулятора:

1. пара матриць $[A, B]$ має бути повністю керована;
2. мають виконуватися нерівності $R > 0, Q - NR^{-1}N^T \geq 0$;
3. пара матриць $[Q - NR^{-1}N^T, A - BR^{-1}N^T]$ не може мати спостережувані моди з власними значеннями на дійсній осі.

Слід відмітити, що при практичній реалізації алгоритмів оптимального керування часто не представляється можливим отримати оптимальні точні характеристики оптимізації. Це, найчастіше, обумовлене тим, що при побудові вихідної математичної моделі процесу керування звичайно використовують наближені чи апроксимуючі моделі, що враховують основні домінуючі зв'язки і в той же час відрізняються від реальних. В реальних умовах похибка алгоритмів оптимізації може зростати (особливо на великих інтервалах часу), що приведе до нестійкості алгоритмів оптимізації. Явище нестійкості алгоритмів оптимізації пов'язане з умовами реалізації рівняння Ріккати, розв'язок якого губить властивість симетричності. [5]

Нижче наведений код *MatLab* для розрахунку оптимального лінійно-квадратичного регулятора:

```
clear all
disp('Матриця A:')
A= [11.3 96.5; 59.3 -44.7] % Введення матриці A
disp('Матриця B:')
B = [90.824;0] % Введення матриці B
% Параметри критерія якості:
disp('Матриця Q:')
Q = eye(2) % Формування одиничної матриці
disp('Матриця R:')
R = 1 % Введення матриці R
disp('Матриця N:')
N = [] % Введення матриці N
disp('Вектор початкових умов X0:')
x0 = [60 0.074]' % Завдання вектора початкових умов
disp('Вектор заданих значень відхилень Xd:')
xd = [95 0.074]' % Завдання вектора заданих значень відхилень
disp('Вектор заданих значень відхилень керування Ud:')
```

```

ud = 0.8 % Завдання відхилень значень керування
disp('Час спостереження tf:')
tf = 10 % Завдання часу спостереження
disp('Довжина кроку dt:')
dt = 0.01 % Завдання довжини кроку
disp('Кількість кроків n:')
n = tf/dt
[K P E] = lqr(A,B,Q,R,N); % Синтез регулятора
disp('Матриця зворотнього зв'язку K:'); K
disp('Розв'язок рівняння Ріккати P:'); P
disp('Власні значення замкненої системи E:'); E
% Визначення розмірності задачі

SA = size(A); SA = SA(1); SB = size(B); SB = SB(2);
% Формування векторів x u

x = zeros(SA,n); u = zeros(SB,n-1);
% Формування початкового стану

x(:,1) = x0;
% Знаходження оптимального керування u та змінних стану x

for i=1:n-1,
u(:,i) = ud-K*(x(:,i)-xd);
x(:,i+1) = (A*(x(:,i)-xd)+B*(u(:,i)- ud))*dt+x(:,i);
end
% Подова динаміки змінних стану

f1 = figure;
f2 = figure;
plot(0:dt:tf-dt,x(1,:)), grid % x(1,:)
title('Динаміка руху змінних стану');
xlabel('Час, t');
ylabel('Змінні стану, X(t)');
figure(f1)
% Побудова вектора керування

plot(dt:dt:tf-dt,u), grid
title('Динаміка зміни керування'); xlabel('Час,t'); ylabel('Керування, U(t)');
legend('u')
figure(f2)

```

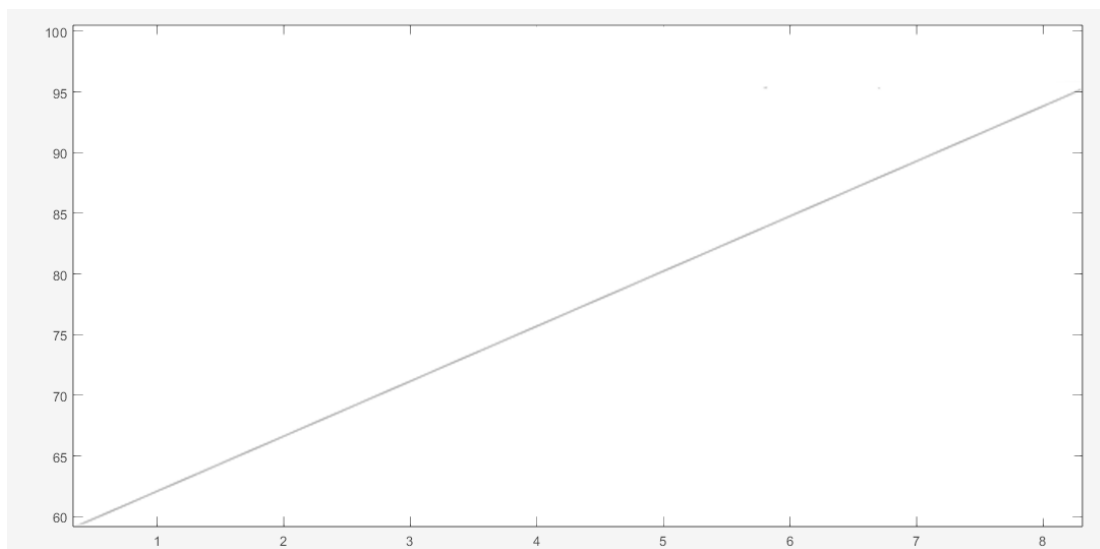


Рис.4.9 – Динаміка руху змінних стану з лінійно-квадратичним регулятором

На рисунку 4.9 подано зміну стану системи при роботі лінійно-квадратичного регулятора (LQR). Особливістю цього графіка є те, що траєкторія змінюється майже лінійно, без коливань і перерегулювання. Це означає, що LQR забезпечує добре збалансовану поведінку системи, де енергія керування та відхилення станів мінімізуються одночасно. Плавність зміни пояснюється тим, що регулятор обирає такий закон керування, який не допускає різких впливів, але водночас ефективно зменшує похибку. Завдяки цьому система демонструє стабільність і передбачувану динаміку в усьому діапазоні часу.

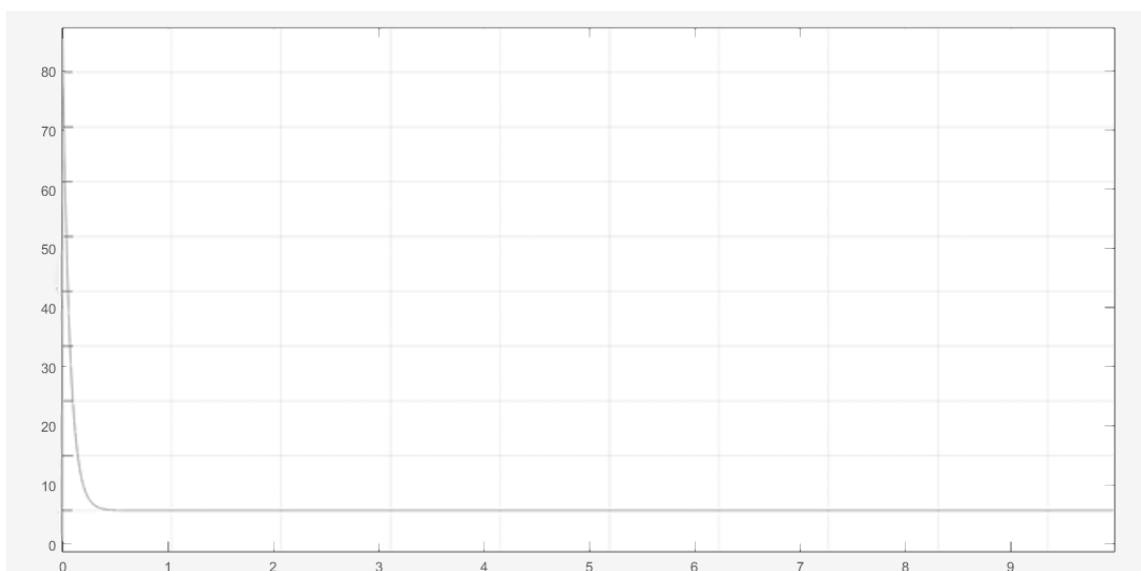


Рис.4.10 – Динаміка руху змінних керування з лінійно-квадратичним регулятором

Рисунок 4.10 ілюструє зміну керуючого впливу при застосуванні LQR-регулятора. Керуючий сигнал починається з великого значення, що типово для оптимального регулювання, яке прагне швидко компенсувати початкове відхилення станів. Уже в перші секунди значення керування різко зменшується, а далі стабілізується біля нуля. Така форма графіка свідчить про ефективне придушення динамічної помилки на початковому етапі та про мінімальну потребу у подальших керуючих діях. Це підтверджує, що LQR дозволяє зменшити енергетичні витрати на керування та забезпечує оптимальний режим функціонування системи.

Висновок: У розділі сформульовано задачу оптимального керування процесом виробництва азотної кислоти у рамках мінімізації інтегрального критерію якості. Виведено необхідні умови оптимальності та побудовано оптимальне програмне керування для підтримання концентрації азотної кислоти на заданому рівні.

Також синтезовано оптимальний регулятор зі зворотним зв'язком на основі лінійно-квадратичного критерію (LQR) та виконано комп'ютерне моделювання системи керування у середовищі Matlab.

Отримані результати показали, що використання оптимального керування дозволяє покращити показники якості перехідних процесів.

5. ЕКСПЕРТНИЙ АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ФАКТОРІВ.

5.1 Загальний аналіз аварійних ситуацій

У процесі виробництва азотної кислоти можливі різні відхилення та порушення технологічних режимів, які негативно впливають на стабільність роботи установки та якість кінцевого продукту. Тому важливо визначити, які саме фактори становлять найбільшу небезпеку та можуть призвести до аварійних ситуацій.

У цьому розділі проведено оцінку потенційно небезпечних факторів на основі експертних суджень. Для цього використано метод ранжування та подальшу перевірку узгодженості думок експертів. Отримані результати дають змогу визначити найбільш критичний фактор, на який необхідно звернути увагу під час подальшої експлуатації установки та розробки заходів підвищення її надійності.

На рис. 5.1 зображено структурно-параметричну схему виробництва слабкої азотної кислоти.

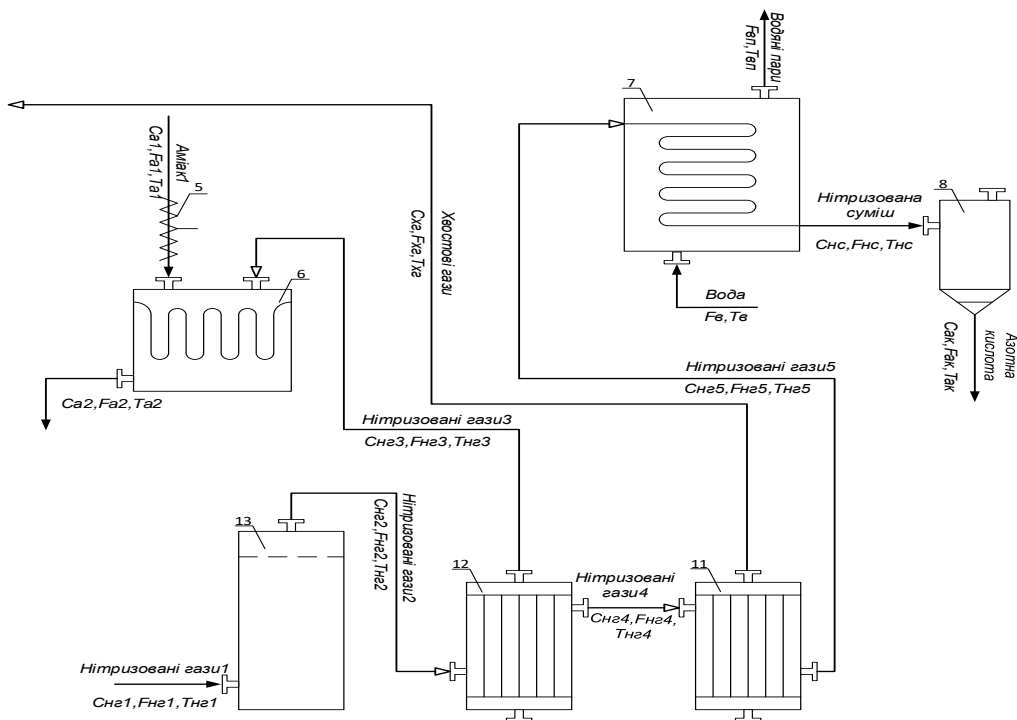


Рис. 5.1 – Структурно-параметрична схема відділення слабкої азотної КИСЛОТИ

У табл. 5.1 наведено назви та позначення технологічних змінних

Таблиця 5.1. Технологічні змінні структурно-параметричної схеми

| Назва потоку (апарату) | Ідентифікатор потоку (апарату) | Назва змінної | Ідентифікатор змінної |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------------------|
| Нітрозовані гази | Hr1 | Витрата | Fr1 |
| | | Концентрація | Cr1 |
| | | Температура | Tr1 |
| Нітрозовані гази | Hr2 | Витрата | Fr2 |
| | | Концентрація | Cr2 |
| | | Температура | Tr2 |
| Нітрозовані гази | Hr3 | Витрата | Fr3 |
| | | Концентрація | Cr3 |
| | | Температура | Tr3 |
| Аміак | A1 | Витрата | FA1 |
| | | Концентрація | CA1 |
| | | Температура | TA1 |

Продовження таблиці 5.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|-----|--------------|-----------|
| Аміак | А2 | Витрата | F_{a1} |
| | | Концентрація | C_{a1} |
| | | Температура | T_{a1} |
| Нітризовані гази | Нг4 | Витрата | $F_{нг4}$ |
| | | Концентрація | $C_{нг4}$ |
| | | Температура | $T_{нг4}$ |
| Хвостові гази | Хг | Витрата | $F_{хг}$ |
| | | Концентрація | $C_{хг}$ |
| | | Температура | $T_{хг}$ |
| Вода | В | Витрата | F_v |
| | | Температура | T_v |
| Нітризовані гази | Нг5 | Витрата | $F_{нг5}$ |
| | | Концентрація | $C_{нг5}$ |
| | | Температура | $T_{нг5}$ |

Продовження таблиці 5.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------|----|--------------|----------|
| Вода | ВП | Витрата | $F_{вп}$ |
| | | Температура | $T_{вп}$ |
| Нітризована суміш | НС | Витрата | $F_{нс}$ |
| | | Концентрація | $C_{нс}$ |
| | | Температура | $T_{нс}$ |
| Азотна кислота | АК | Витрата | $F_{ак}$ |
| | | Концентрація | $C_{ак}$ |
| | | Температура | $T_{ак}$ |

Таблиця 5.2 – Структура даних для аналізу технологічних змінних

| № п/п | Шифр елементу дислокації | Назва змінної | Іде нт. | О д. вим. | Припус тимі межі | Озна ка поруше ння | Наслідок порушення | | | Імо в. нас лідку, % |
|----------|--------------------------------|----------------|--------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------------|
| | | | | | | | Іде нт. | О д. вим. | Озна ка поруше ння | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | АК | Азотна кислота | $T_{ак}$ | ° С | 50 | < 50 | $T_{нс}$ | °С | 50 | 40 |
| | | | | | 100 | > 100 | | | | 50 |
| 2 | АК | Азотна кислота | $C_{а}$ к | % | 80 | < 80 | $C_{нс}$ | % | < 70 | 60 |
| 3 | АК | Азотна кислота | $F_{ак}$ | кг /с | 2,2 | < 2,2 | $F_{нс}$ | кг/ с | < 2,5 | 85 |
| | | | | | 3,1 | > 3,1 | | | > 3,5 | 70 |

Продовження таблиці 5.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|-----|-------------------|-----------|----|-----|-------|-----------|----|-------|----|
| 4 | НС | Нітризована суміш | $T_{нс}$ | ° | 90 | < 90 | $T_{нз5}$ | °C | 50 | 50 |
| | | | | С | 110 | >110 | | | | 60 |
| 5 | НС | Нітризована суміш | $C_{нс}$ | % | 70 | < 70 | $C_{нз5}$ | % | < 70 | 60 |
| 6 | НС | Нітризована суміш | $F_{нс}$ | кг | 2,5 | < 2,5 | $F_{нз5}$ | кг | < 3,5 | 85 |
| | | | | /с | 3,5 | > 3,5 | | /с | > 4,5 | 70 |
| 7 | НГ5 | Нітризовані гази | $C_{нз5}$ | % | 70 | < 70 | $C_{нз5}$ | % | < 70 | 60 |
| 8 | НГ5 | Нітризовані гази | $T_{нз5}$ | ° | 180 | < 180 | $T_{нз5}$ | °C | < 350 | 50 |
| | | | | С | 200 | > 200 | | | > 450 | 60 |
| 9 | НГ5 | Нітризовані гази | $F_{нз5}$ | кг | 3,5 | < 3,5 | $F_{нз5}$ | кг | < 4 | 50 |
| | | | | /с | 4,5 | >4,5 | | /с | > 5 | 70 |

Продовження таблиці 5.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|-----|------------------|---------------|----------|-----|-------|----------|----------|-------|----|
| 7 | НГ4 | Нітризовані гази | C_n 24 | % | 70 | < 70 | $C_{н2}$ | % | < 70 | 60 |
| 8 | НГ4 | Нітризовані гази | $T_{н2}$ 4 | ° С | 250 | < | $T_{н2}$ | °С | < | 50 |
| | | | | | 300 | > | | | 350 | 60 |
| 9 | НГ4 | Нітризовані гази | $F_{н2}$ 4 | кг /с | 4 | < 4 | $F_{н2}$ | кг /с | < 3,5 | 50 |
| | | | | | 5 | > 5 | | | > 4 | 70 |
| 7 | НГ2 | Нітризовані гази | C_n 22 | % | 70 | < 70 | $C_{н1}$ | % | < 65 | 50 |
| 8 | НГ2 | Нітризовані гази | $T_{н2}$ 2 | ° С | 350 | < 350 | $T_{н1}$ | °С | < | 50 |
| | | | | | 500 | > | | | 450 | 60 |
| 9 | НГ2 | Нітризовані гази | $F_{н2}$ 2 | кг /с | 4 | < 4 | $F_{н1}$ | кг /с | < 2,5 | 50 |
| | | | | | 5 | > 5 | | | > 3 | 70 |

Продовження таблиці 5.2

| | | | | | | | | | | |
|----|-----|------------------|----------------|----------|-----|----------|--|--|--|----|
| 10 | НГ1 | Нітризовані гази | C_n г/л | % | 65 | < 65 | | | | 60 |
| 11 | НГ1 | Нітризовані гази | T_{H_2} г | ° С | 450 | < 450 | | | | 70 |
| | | | | | 500 | > 500 | | | | 60 |
| 12 | НГ1 | Нітризовані гази | F_{H_2} г | кг /с | 2,5 | < 2,5 | | | | 50 |
| | | | | | 3 | > 3 | | | | 50 |

5.2 Застосування системи експертного оцінювання

Задачею дослідження для даної роботи є вплив аварійної ситуації у різних апаратах на процес виробництва азотної кислоти під тиском 0.716 МПа та визначення яка з ситуацій є найбільш критичною.

Проведемо визначення критеріїв компетентності експертів. У нас є 5 вигаданих експертів. Критеріями буде стаж роботи визначений в роках та рівень кваліфікації (розряд). Дані про експертів занесено в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3

| Номер експерта | Стаж роботи (років) | Розряд |
|----------------|---------------------|--------|
| Експерт 1 | 2 | 4 |
| Експерт 2 | 7 | 6 |
| Експерт 3 | 6 | 5 |
| Експерт 4 | 4 | 5 |
| Експерт 5 | 3 | 4 |

Тепер проведемо ранжування експертів. Для кожного з критеріїв (стаж і розряд) присвоїмо експертам ранги. Запишемо ранжування експертів в таблицю 5.4.

Таблиця 5.4.

| Номер експерта | Ранг за стажем | Ранг за розрядом | Сума рангів | Результуючий ранг |
|----------------|----------------|------------------|-------------|-------------------|
| Експерт 1 | 5 | 3 | 8 | 5 |
| Експерт 2 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Експерт 3 | 2 | 2 | 4 | 2 |
| Експерт 4 | 3 | 2 | 5 | 3 |
| Експерт 5 | 4 | 3 | 7 | 4 |

Виконаємо перехід до нормального виду матриці рангів в таблиці 5.5. враховуючи факт, що декілька факторів набули одного і того ж рангу.

Таблиця 5.5.

| Номер експерта | Ранг за стажем | Ранг за розрядом | Сума рангів | Результуючий ранг |
|----------------|----------------|------------------|-------------|-------------------|
| Експерт 1 | 5 | 4.5 | 9.5 | 5 |
| Експерт 2 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Експерт 3 | 2 | 2.5 | 4.5 | 2 |
| Експерт 4 | 3 | 2.5 | 5.5 | 3 |
| Експерт 5 | 4 | 4.5 | 8.5 | 4 |
| $P_{j,u}$ | - | 2+2 | - | - |

Розрахуємо середній ранг нормальної матриці ранжування експертів:

$$B = \frac{1}{2} * KR(NE - 1) = \frac{1}{2} * 2(5 - 1) = 4$$

Тепер обчислимо суми квадратів різниць між членами сумарного ранжування і членами ряду, який складено із середніх значень.

$$S_e = (9.5-4)^2 + (2-4)^2 + (4.5-4)^2 + (5.5-4)^2 + (8.5-4)^2 = 57$$

Розрахуємо величину P_j за формулою:

$$P_j = (2^3-2) + (2^3-2) = 12$$

Визначимо коефіцієнти конкордації ранжування експертів:

$$W_e = \frac{12 \cdot 57}{(2^2(5^3 - 5) - 2 \cdot 12)} = 1.5$$

Перевіримо статистичну значущість коефіцієнта конкордації за χ^2 — критерієм Пірсона. Розраховане значення визначимо за виразом:

$$\chi_e^2 = 2(5 - 1) * 1.5 = 12$$

При рівні значущості $\alpha = 0.05$ і ступені вільності $NU = NE - 1 = 4$. Табличне

$$\chi_e^2 > \chi_{e, tabl}^2$$

значення $\chi^2 = 11.1$. Отже виконується умова

Таким чином, можна вважати узгодженим ранжування експертів при $\alpha = 0.01$.

Розрахуємо «ваги» думок експертів. Для визначення ваги думки експерта

$$\delta_i = a + c \sum_{j=1}^{KR} y_{ij}.$$

скористаємося рівнянням:

Мінімальна сума рангів дорівнює 2, а максимальна сума рангів = 9.5.

Розрахуємо коефіцієнти a і b за допомогою системи:

$$1 = a + b * 9.5$$

$$2 = a + b * 2$$

Отже a і b дорівнюють

$$a = 34/15 = 2.266 \text{ і } b = -2/15 = -0.133$$

Запишемо в таблицю 5.6.

Таблиця 5.6

| Номер Експерта | Вага думки |
|----------------|------------|
| Експерт 1 | 1,76 |
| Експерт 2 | 1,265 |
| Експерт 3 | 1,43 |
| Експерт 4 | 1,495 |
| Експерт 5 | 1,695 |

Складемо перелік факторів ранжування, які показують найбільш критичну ситуацію. Проведемо ранжування факторів. Експерти проводять ранжування факторів, які показують яка з ситуацій є найбільш критичною для даного процесу. Занесемо ранжування факторів в таблицю 5.7

Таблиця 5.7.

| № експерта \ Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінни х труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообмінник у | Втрата ефективності конденсації у холодильнику- конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі |
|------------------------|------------------------|---|--|--|--|
| Експерт 1 | 1 | 4 | 3 | 4 | 2 |
| Експерт 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 1 |
| Експерт 3 | 5 | 2 | 1 | 4 | 3 |
| Експерт 4 | 5 | 3 | 2 | 4 | 1 |
| Експерт 5 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 |

Виконаємо перехід до нормального виду матриці рангів в таблиці 5.8. враховуючи факт, що декілька факторів набули одного і того ж рангу.

Таблиця 5.8.

| № експерта\ Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінни х труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообмінник у | Втрата ефективності конденсації у холодильнику- конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі |
|-----------------------|------------------------|---|--|--|--|
| Експерт 1 | 1 | 4,5 | 3 | 4,5 | 2 |
| Експерт 2 | 2 | 3,5 | 5 | 3,5 | 1 |
| Експерт 3 | 2 | 5 | 1 | 4 | 3 |
| Експерт 4 | 4 | 3 | 2 | 5 | 1 |
| Експерт 5 | 1 | 2,5 | 2,5 | 4 | 5 |
| Сума | 10 | 18,5 | 13,5 | 21 | 12 |

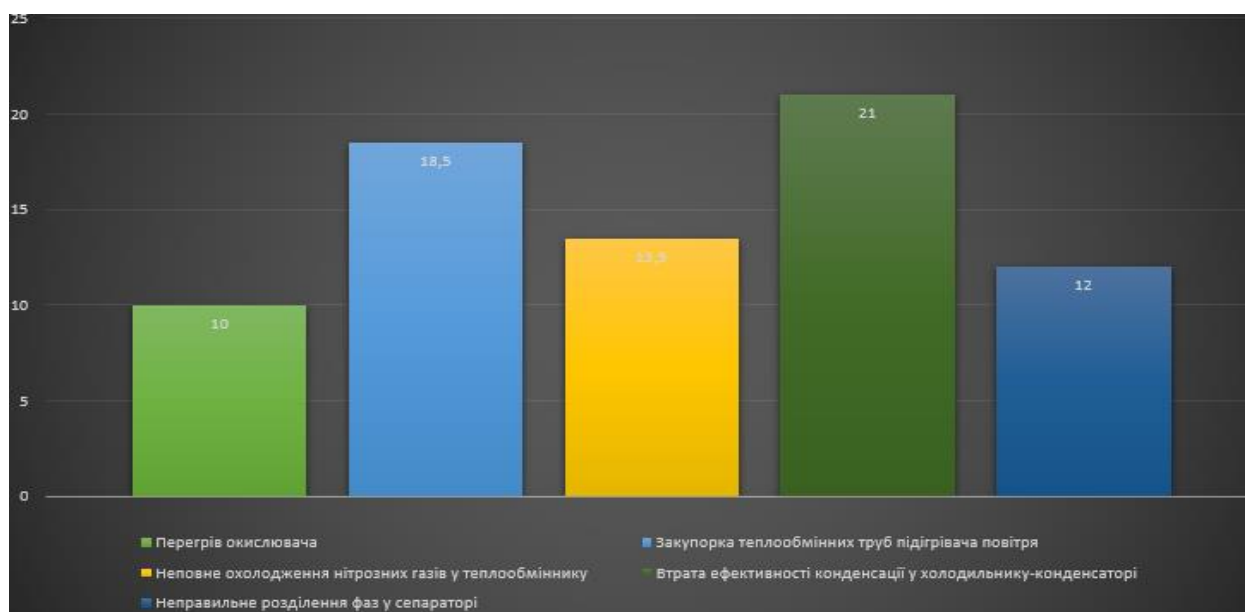


Рис. 5.2 - Зважені ранги факторів, що впливають на надійність роботи системи виробництва азотної кислоти

Тепер проведемо зважене ранжування факторів використовуючи ваги експертів. Запишемо зважені ранги в таблицю 5.9.

Таблиця 5.9.

| № експерта\ Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообмінник у | Втрата ефективності конденсації у холодильнику- конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі |
|-----------------------|------------------------|---|--|--|--|
| Експерт 1 | 1,76 | 7,92 | 5,28 | 7,92 | 3,52 |
| Експерт 2 | 2,53 | 4,4275 | 6,325 | 4,4275 | 1,265 |
| Експерт 3 | 2,86 | 7,15 | 1,43 | 5,72 | 4,29 |
| Експерт 4 | 5,98 | 4,485 | 2,99 | 7,475 | 1,495 |
| Експерт 5 | 1,695 | 4,2375 | 4,2375 | 6,78 | 8,475 |
| сума | 14,825 | 28,22 | 20,2625 | 32,3225 | 19,045 |

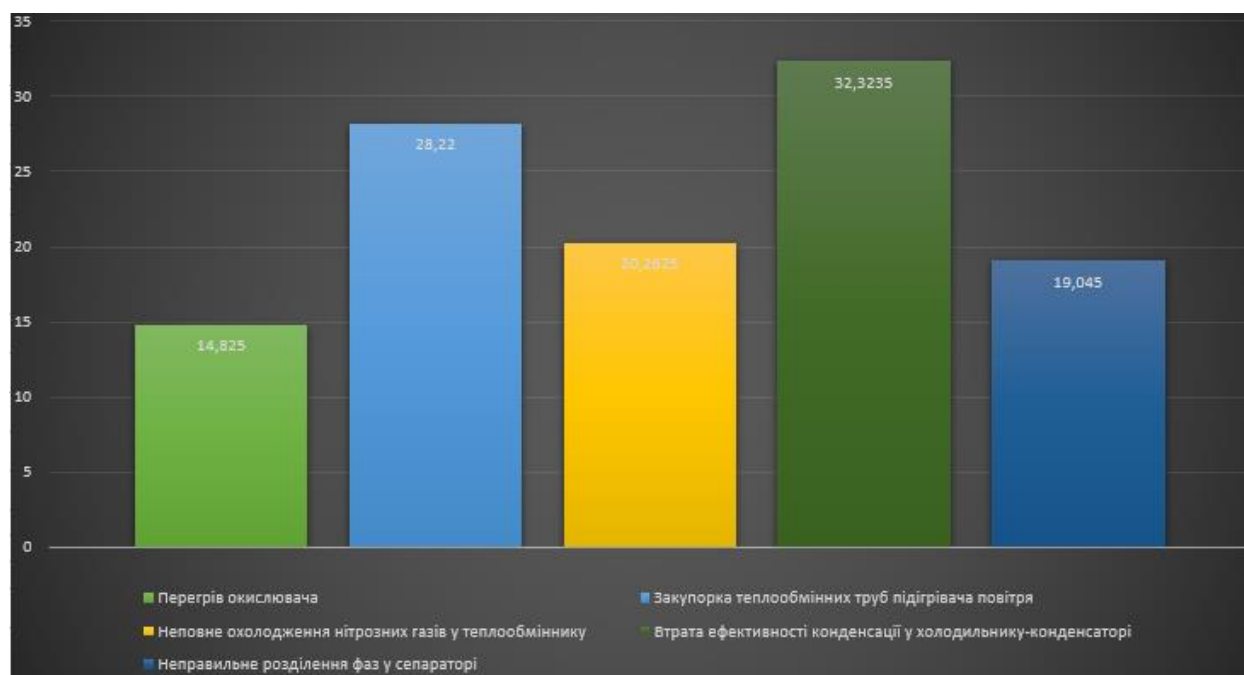


Рис.5.3 - Сумарні зважені ранги факторів ризику за результатами експертного оцінювання В таблиці 5.9. підсумована сума зважених рангів по всіх експертах.

Найбільш суттєвий фактор — це втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі.

Тепер проведемо оцінку узгодженості ранжування факторів за аналогічною формулою. Знайдемо значення S_f :

$$S_f = \left(14,82 - \frac{111}{5}\right)^2 + \left(28,22 - \frac{111}{5}\right)^2 + \left(20,26 - \frac{111}{5}\right)^2 + \left(32,32 - \frac{111}{5}\right)^2 + \left(19,05 - \frac{111}{5}\right)^2 = 206,808$$

Тепер розрахуємо W_f :

$$W_f = \frac{12 \cdot 206,804}{\left((5^2 \cdot (5^3 - 5) - 18) \cdot \left(\frac{1}{5}\right) \cdot 12321\right)} = 0,338$$

Розрахуємо значення критерію Пірсона за формулою:

$$\chi_e^2 = 5(5 - 1) * 0,338 = 6,76$$

При рівні значущості $\alpha = 0,01$ і ступені вільності $NU = NE - 1 = 4$. Табличне значення $\chi^2 = 6.6$. Отже виконується умова $\chi_f^2 > \chi_{f,tabl}^2$,

Проведемо оцінювання методом попарного ранжування. Подамо результат такого ранжування для кожного з експертів в таблицях 5.10-4.14

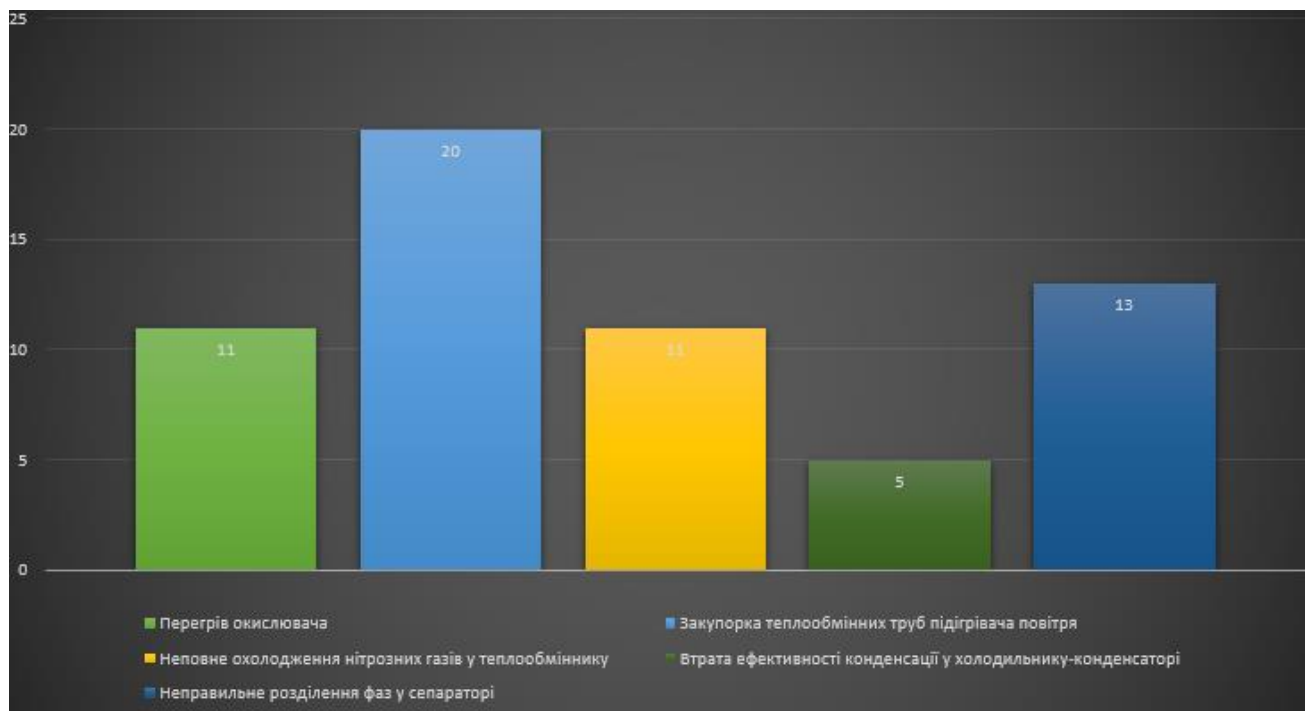


Рис.5.4 - Зважені ранги факторів з урахуванням компетентності кожного експерта

Врахуємо компетентність кожного експерта. Для цього перемножимо кожне значення таблиці на «вагу» думки відповідного експерта. Зсумуємо всі оцінки і сформуємо таблицю 5.15

| Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі |
|---|---------------------|--|--|---|---|
| Перегрів окислювача | - | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | 0 | - | 0 | 0 | 0 |
| Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | 0 | 1 | - | 1 | 0 |
| Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | 1 | 0 | 0 | - | 0 |
| Неправильне розділення фаз у сепараторі | 0 | 1 | 1 | 1 | - |

| Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі |
|---|---------------------|--|--|---|---|
| Перегрів окислювача | - | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | 0 | - | 1 | 1 | 0 |
| Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | 0 | 0 | - | 0 | 0 |
| Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | 0 | 0 | 1 | - | 0 |
| Неправильне розділення фаз у сепараторі | 1 | 1 | 1 | 1 | - |

| Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі |
|---|---------------------|--|--|---|---|
| Перегрів окислювача | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | 1 | - | 0 | 1 | 1 |
| Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | 1 | 1 | - | 1 | 1 |
| Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | 1 | 0 | 0 | - | 0 |
| Неправильне розділення фаз у сепараторі | 1 | 0 | 0 | 1 | - |

Експерт 4

Таблиця 5.13

| Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі |
|---|---------------------|--|--|---|---|
| Перегрів окислювача | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | 1 | - | 0 | 1 | 0 |
| Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | 1 | 1 | - | 1 | 0 |
| Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | 1 | 0 | 0 | - | 0 |
| Неправильне розділення фаз у сепараторі | 1 | 1 | 1 | 1 | - |

| Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі |
|---|---------------------|--|--|---|---|
| Перегрів окислювача | - | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | 0 | - | 1 | 1 | 1 |
| Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | 0 | 0 | - | 1 | 1 |
| Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | 0 | 0 | 0 | - | 1 |
| Неправильне розділення фаз у сепараторі | 0 | 0 | 0 | 0 | - |

Таблиця 5.15

| Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі | Сума |
|---|---------------------|--|--|---|---|------|
| Перегрів окислювача | - | 3 | 3 | 3 | 2 | 11 |
| Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | 2 | - | 2 | 4 | 2 | 10 |
| Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | 2 | 3 | - | 4 | 2 | 11 |
| Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | 3 | 0 | 1 | - | 1 | 5 |
| Неправильне розділення фаз у сепараторі | 3 | 3 | 3 | 4 | - | 13 |

Таблиця 5.16.

| Фактор | Перегрів окислювача | Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | Неправильне розділення фаз у сепараторі | Сума чисел у рядкові |
|---|---------------------|--|--|---|---|----------------------|
| Перегрів окислювача | 0,00 | 4,72 | 4,72 | 4,72 | 3,455 | 17,615 |
| Закупорка теплообмінних труб підігрівача повітря | 2,925 | 0,00 | 2,96 | 6,19 | 5,885 | 17,96 |
| Неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику | 2,925 | 4,685 | 0,00 | 6,19 | 6,38 | 20,18 |
| Втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі | 4,685 | 0,00 | 1,265 | 0,00 | 1,695 | 7,645 |
| Неправильне розділення фаз у сепараторі | 4,19 | 4,52 | 4,52 | 4,52 | 0,00 | 17,75 |

Найбільше значення має фактор неповне охолодження нітрозних газів у теплообміннику отже цей фактор можна вважати найбільш значимим.

Визначимо узгодженість ранжування використавши частину таблиці розташовану над головною діагоналлю.

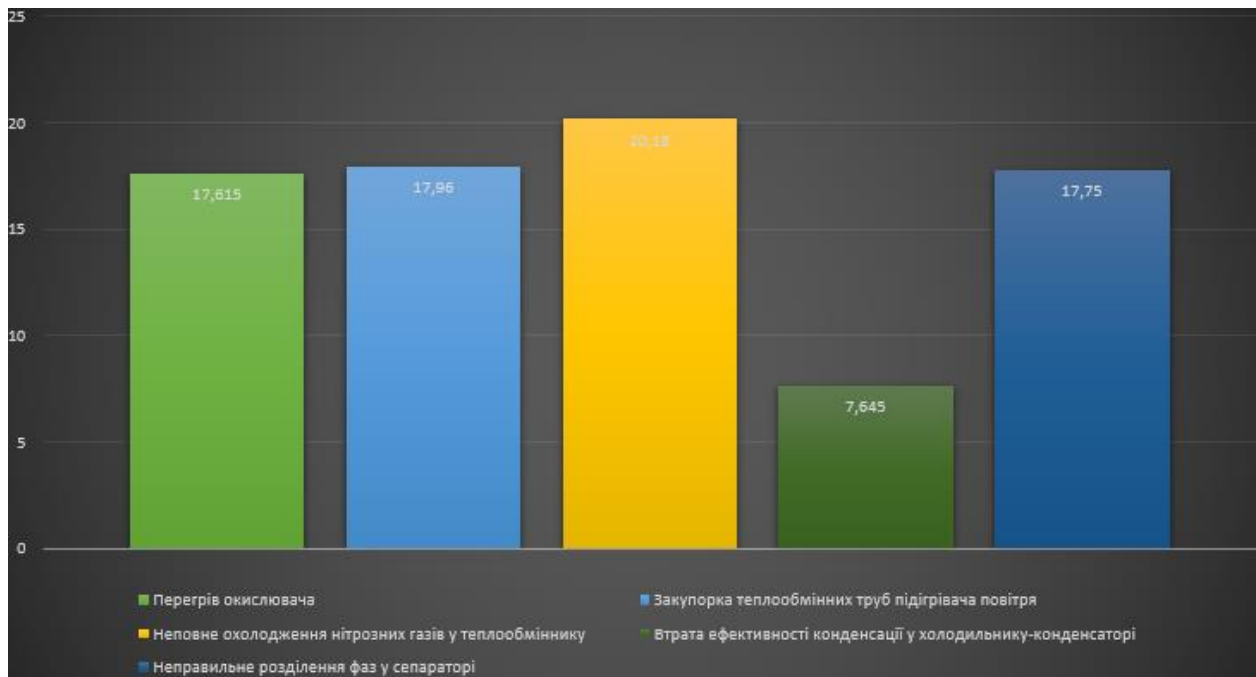


Рис.5.5 - Узагальнені зважені оцінки факторів ризику після врахування компетентності експертів

Знайдемо значення W :

$$W = \frac{\left(4 * \left[139,322 - 5 * 34,56 + \frac{5 * (5 - 1) * 5 * (5 - 1)}{4}\right]\right)}{(5 * (5 - 1) * 5 * (5 - 1))} = 0.6652$$

Тепер розрахуємо біноміальний коефіцієнт виду C :

$$C_5^2 = \frac{(5!)}{(2! (5 - 2)!)} = 10$$

Знайдемо Q :

$$Q = 139,322 - 5 * 34,56 + 10 * 10 = 66,522$$

Розрахуємо значення критерію Пірсона за формулою:

$$\chi_e^2 = \frac{4}{5 - 2} \left(66,522 - 0.5 * 10 * 10 * \left(\frac{5 - 3}{5 - 2}\right)\right) = 44.25$$

Кількість ступенів вільності:

$$NU = 10 * \left(\frac{(5(5 - 1))}{(5 - 2)^2}\right) = 22,2$$

При ступені вільності 22 та значенню $\alpha = 0.001$, табличне значення критерію Пірсона дорівнює 40,3, що задовольняє умову. Таким чином коефіцієнт узгодженості думок експертів вважається значущим.

Висновок: У розділі проведено аналіз можливих аварійних ситуацій у процесі виробництва азотної кислоти із використанням методу експертних оцінок та попарного порівняння факторів. Встановлено, що найбільш критичним фактором є втрата ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі, що призводить до погіршення процесу абсорбції та відхилення технологічних параметрів. Отримані результати можуть бути використані для підвищення безпеки технологічного процесу та вдосконалення системи аварійного моніторингу.

6. СТАРТАП-ПРОЄКТ

У межах магістерської дисертації за темою «Оптимальне керування процесом виробництва азотної кислоти під тиском 0,716 МПа» розроблено стартап-проект «NitroOpti APC». Суть проекту — створення програмно-апаратного рішення класу Advanced Process Control (APC) для агрегатів виробництва азотної кислоти під тиском, яке поєднує цифровий двійник, онлайн-ідентифікацію та оптимізаційні алгоритми керування.

Запропонований продукт орієнтований на підвищення стабільності технологічного режиму, зниження питомих витрат енергоносіїв і сировини, а також зменшення коливань концентрації HNO_3 та викидів NO_x . Рішення передбачає «м'яку» інтеграцію з існуючими системами DCS/SCADA без істотної заміни основного обладнання.

1) Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

На першому етапі формалізуємо ідею стартапу: що саме пропонується, де це може застосовуватись і які вигоди отримає користувач. Узагальнення подано у таблиці 1.

Таблиця 1 – Опис ідеї стартап-проекту

| Зміст ідеї | Напрямки застосування | Вигоди для користувача |
|--|---|--|
| APC-модуль оптимального керування агрегатом HNO_3 під тиском (0,716 МПа) з цифровим двійником | Виробництво азотної кислоти (середній тиск), діючі хімкомбінати | Стабілізація режимів, менше коливань якості, зниження витрат енергії та каталізатора |
| Сервіс впровадження та супроводу (пуско-налагодження, навчання персоналу) | Модернізація існуючих DCS/SCADA у хімпромі | Швидке впровадження без зупинки, підвищення кваліфікації персоналу |
| Модуль екологічної оптимізації (NO_x -констрейнти, звітність) | Підприємства з жорсткими екологічними вимогами/квотами | Зниження ризику штрафів, прозорість та керованість екологічних показників |

Отже, стартап має як продуктову складову (APC-рішення), так і сервісну (інжиніринг та підтримка). Це дозволяє комбінувати продаж ліцензії з доходами від послуг, що важливо на промислових B2B-ринках.

Далі порівнюємо потенційні техніко-економічні характеристики нашої ідеї з найближчими ринковими аналогами/підходами (типові DCS-контури, класичний MPC від інтеграторів, «ручна» оптимізація). Результат - таблиця 2.

Таблиця 2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| № п/п | Техніко-економічні характеристики ідеї | Мій проєкт | Конкурент 1 (класичний DCS) | Конкурент 2 (APC інтегратор) | Конкурент 3 (ручна оптимізація) | W | N | S |
|-------|---|------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|---|---|
| 1 | Зниження питомих витрат енергії, % | 8–12 | 1–3 | 5–8 | 0–2 | | | S |
| 2 | Стабільність концентрації HNO ₃ (зменшення σ), % | 20–30 | 5–10 | 15–25 | 5–10 | | | S |
| 3 | Гнучкість інтеграції з існуючим DCS | висока | висока | середня | висока | | N | |
| 4 | Вартість впровадження (CAPEX), відносно | середня | низька | висока | низька | N | | |
| 5 | Ефект на NO _x (екологічний модуль) | так | ні | частково | ні | | | S |

З таблиці 2 видно, що ключові сильні сторони — екологічні обмеження в оптимізації та краща стабілізація якості. Нейтральною залишається інтеграція (залежить від конкретного DCS), а ризик-зона — бюджет впровадження, якщо замовник очікує мінімального CAPEX.

2) Технологічний аудит ідеї проєкту

Технологічна здійсненність оцінюється через готовність ключових компонентів: математичної моделі процесу, каналів вимірювання, обчислювальної платформи, інтеграції з DCS/SCADA та компетенцій команди. Узагальнений аудит подано в таблиці 3.

Таблиця 3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

| № п/п | Критерій | Стан/оцінка | Коментар |
|-------|--|--------------------|--|
| 1 | Наявність вимірювань (тиск, температура, витрати, склад газів) | достатньо | базові датчики є на більшості агрегатів; можливе дооснащення аналізаторами NO _x |
| 2 | Математична модель та цифровий двійник | готовність середня | потрібна адаптація під конкретний агрегат; використовується ідентифікація параметрів |
| 3 | Алгоритми керування (MPC/оптимізація) | висока | застосовуються типові підходи APC з обмеженнями та прогнозом |
| 4 | Інтеграція з DCS/SCADA | висока | через OPC UA/Modbus/TCP та стандартні протоколи інтеграції |
| 5 | Кібербезпека та надійність | середня | потрібні політики доступу, |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | журналювання, резервування та тестування |
|--|--|--|--|

Висновок технологічного аудиту: проєкт є реалізовним на базі наявних промислових технологій, а найбільший обсяг робіт припадає на «прив'язку» цифрового двійника до конкретної лінії та на організацію промислової кібербезпеки.

3) Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Аналіз починаємо з попиту та загальних параметрів ринку. У контексті проєкту виділяємо три взаємопов'язані ринки: А — виробництво азотної кислоти та азотних добрив; В — ринок промислової автоматизації; С — сегмент Advanced Process Control. Попередня характеристика потенційного ринку узагальнена у таблиці 4.

Таблиця 4 – Попередня характеристика потенційного ринку
стартап-проєкту

| № п/п | Показники стану ринку | Характеристика |
|----------|--|--|
| 1 | Кількість головних гравців (інтегратори/постачальники APC) | 10+ глобальних та десятки регіональних |
| 2 | Загальний обсяг продажу (сегмент APC) | ~2,5–4,5 млрд USD/рік (2024–2030) |
| 3 | Динаміка ринку | зростає |
| 4 | Наявність обмежень для входу | високі: референси, допуск до промайданчиків, безпека, довіра |
| 5 | Вимоги до стандартизації та сертифікації | ІЕС 62443, ISO 9001; вимоги охорони праці та екології |
| 6 | Середня норма рентабельності в ніші | середня/висока для сервісних компаній |

Попереднє оцінювання показує привабливість входження в нішу APC: ринок зростає, а бар'єри входу формують захист від «випадкових» конкурентів і підтримують маржинальність.

Для ілюстрації потенціалу ринку А наведено оцінку динаміки світового ринку азотної кислоти. Далі аналогічно подано ринки В та С, що безпосередньо пов'язані з впровадженням цифрових рішень у промисловості.

Наведені графіки використовуються як орієнтир для обґрунтування ринкової місткості: навіть невелика частка сегмента АРС в хімічній промисловості дає достатній потенціал для масштабування стартапу.



Рисунок 6.1 – Динаміка світового ринку азотної кислоти

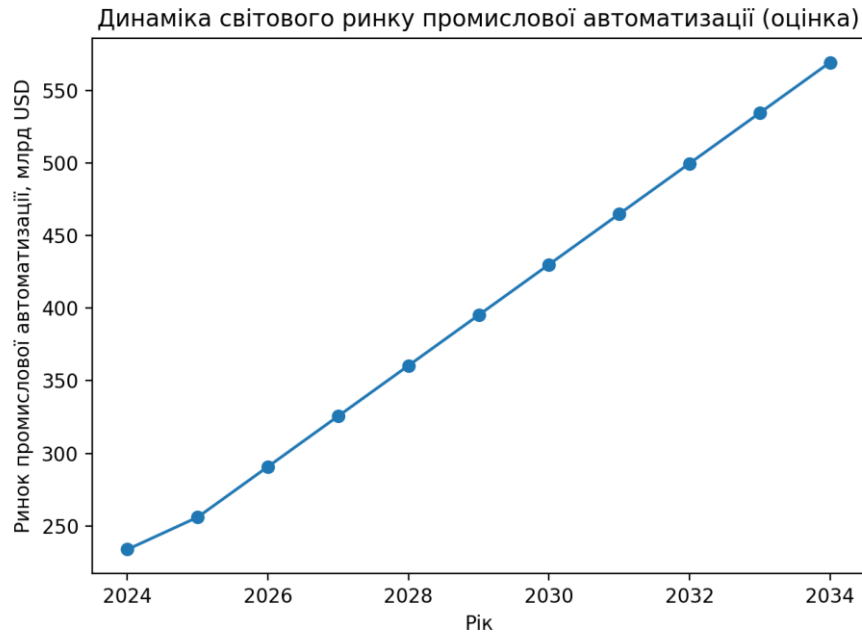


Рисунок 6.2 – Динаміка світового ринку промислової автоматизації

Наведені графіки використовуються як орієнтир для обґрунтування ринкової місткості: навіть невелика частка сегмента APC в хімічній промисловості дає достатній потенціал для масштабування стартапу.

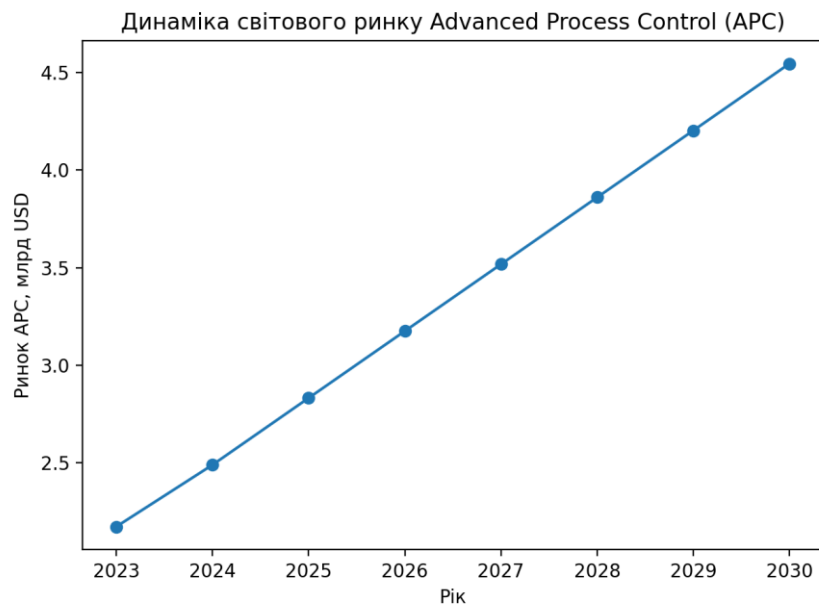


Рисунок 6.3 – Динаміка світового ринку Advanced Process Control (APC)

Наведені графіки використовуються як орієнтир для обґрунтування ринкової місткості: навіть невелика частка сегмента APC в хімічній промисловості дає достатній потенціал для масштабування стартапу.

Наступний крок — визначити потенційні групи клієнтів і сформувати їх ключові вимоги до продукту. Результати наведено у таблиці 5.

Таблиця 5 демонструє, що ключова цінність у B2B-сегменті — вимірюваний ефект (економія/стабільність) та зниження технологічних і екологічних ризиків, а не лише «функціональність» програмного продукту.

Таблиця 5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| № п/п | Потреба, що формує ринок | Цільова аудиторія (сегменти) | Відмінності у поведінці | Вимоги споживачів до товару |
|-------|---|---|--|--|
| 1 | Зниження собівартості HNO ₃ та стабілізація якості | Хімічні комбінати/виробники добрив (діючі агрегати) | Раціональний B2B-вибір, орієнтація на окупність, наявність техслужби | До продукту: енергоефект, стабільність, сумісність з DCS; До постачальника: референси, SLA, навчання |
| 2 | Зменшення екологічних ризиків (NO _x) | Підприємства з підвищеним екоконтролем, експортно-орієнтовані | Висока чутливість до регуляторних вимог та аудитів | До продукту: контроль NO _x , звітність; До постачальника: компетенції HSE, документація |
| 3 | Модернізація без зупинки виробництва | Підприємства зі старими системами керування | Прагнуть мінімізувати CAPEX та ризики простою | До продукту: поетапне впровадження, режим рекомендацій; До постачальника: інжиніринг, інтеграція |

Таблиця 6 – Фактори загроз

| № п/п | Фактор | Зміст загрози | Можлива реакція компанії |
|-------|--|--|--|
| 1 | Консерватизм промислових замовників | Тривалі цикли погодження, недовіра до «нових» постачальників | Пілотні проекти, референс-кейси, гарантії та SLA |
| 2 | Кіберризика та вимоги безпеки | Посилення вимог до доступу/мережі, ризик відмови у підключенні | Використання ІЕС 62443 практик, сегментація мережі, аудит |
| 3 | Коливання цін на енергоносії та сировину | Зміна економіки проекту та пріоритетів інвестицій | Модель ROI з кількома сценаріями, фокус на швидкій окупності |
| 4 | Конкуренція з боку великих інтеграторів | Пакетні рішення від глобальних компаній | Нішування під HNO ₃ , швидкість впровадження, гнучка ціна |

Після опису клієнтів аналізуємо маркетингове середовище: фактори загроз (табл. 6) та можливостей (табл. 7). Фактори наведені у порядку зменшення значущості.

Таблиця 7 – Фактори можливостей

| № п/п | Фактор | Зміст можливості | Можлива реакція компанії |
|-------|-------------------------------------|--|---|
| 1 | Зростання ринку APC та цифровізації | Підприємства активніше інвестують у керування аналітику | Партнерство з інтеграторами, продуктова лінійка модулів |
| 2 | Посилення екологічних вимог | Потреба у зниженні NO _x та прозорій звітності | Додатковий екологічний модуль, консалтинг HSE |
| 3 | Дефіцит досвідчених технологів | Попит на «розумні підказки» та автоматичні режими | Режим рекомендацій, навчання, дистанційна підтримка |

| | | | |
|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|
| 4 | Модернізація старих агрегатів | Перевага «soft upgrade» без зупинки | Поетапне впровадження та швидкі пілоти |
|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|

Фактори можливостей підсилюють доцільність виходу на ринок саме зараз: цифровізація та екологічні вимоги створюють платоспроможний попит на прикладні APC-рішення.

Далі узагальнюємо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 8), зокрема вплив постачальників, клієнтів та замінників на умови роботи.

Таблиця 8 – Загальні риси конкуренції на ринку

| Складові аналізу | Характеристика | Висновки для стартапу |
|-----------------------|--|---|
| Прямі конкуренти | Великі інтегратори (Siemens, Honeywell, Emerson партнери), локальні АСУТП-компанії | Конкуренція за довіру та референси; потрібна спеціалізація під HNO ₃ |
| Потенційні конкуренти | IT-компанії з IoT/AI, що заходять у промисловість | Бар'єр входу — доменні знання; важливо швидко накопичити кейси |
| Постачальники | Постачальники ПЛК/серверів/датчиків, ліцензій ПЗ | Знижувати залежність через стандарти (OPC UA), кілька вендорів |
| Клієнти | Великі заводи мають сильну позицію: тендери, довгі контракти | Потрібні прозорий ROI, сервіс, підтримка, поетапність |
| Товари-замінники | «Ручна» оптимізація, прості регулятори, енергоаудит без APC | Позиціонуватися як вимірюваний ефект + стабільність та екологія |

За результатами таблиці 8 робимо висновок: принципово можливо працювати на ринку, але успіх залежить від чіткої спеціалізації, доказової бази ефекту та правильного позиціонування серед інтеграторів.

Поглиблюємо аналіз конкуренції за моделлю 5 сил М. Портера (табл. 9), що дозволяє системно оцінити ризики та можливості.

Таблиця 9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| | | | | | |
|---------------|-------------|----------------|---------------|--------------|------------------|
| Складо | Прям | Потенці | Постач | Клієн | Товари-за |
|---------------|-------------|----------------|---------------|--------------|------------------|

| ві аналізу | і конкуренти в галузі | йні конкуренти | альники | ти | мінники |
|------------------|--|--------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Перелік/ фактори | інтегратори АСУТП, АРС-вендори | ПоТ/АІ-с тартапи, консалтинг | вендори DCS/PLC, датчики, хмара | хімкомбінати, виробники добрив | ручна оптимізація, базове керування |
| Висновки | боротьба висока у великих тендерах; ніші є | вхід складний через безпеку та домен | можуть диктувати умови через сумісність | диктують умови через тендери та SLA | обмежують, якщо ефект не доведено |

Отриманий висновок: конкурентоспроможність стартапу повинна спиратися на (1) вимірюваний економічний ефект, (2) сумісність та безпечну інтеграцію, (3) спеціалізацію під процес HNO_3 .

На основі таблиць 2, 5–9 формуємо перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 10), які будуть використані для порівняння з конкурентами.

Таблиця 10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Обґрунтування |
|-------|---|---|
| 1 | Економічний ефект (ROI) | Для B2B-клієнта ключове рішення — окупність інвестицій та зниження собівартості |
| 2 | Сумісність з DCS/SCADA та безпека інтеграції | Замовники не допускають рішень, що порушують політики доступу або вимагають зупинки |
| 3 | Стабільність якості продукту (концентрація HNO_3) | Впливає на подальші технологічні ланцюги та штрафи за відхилення |
| 4 | Екологічний ефект (NO_x) та звітність | Регуляторні вимоги |

| | | |
|---|---------------------------------------|---|
| | | посилюються; потрібні контроль та доказовість |
| 5 | Швидкість та поетапність впровадження | Мінімізація ризику і простою — вирішальний аргумент для заводів |

Вказані фактори будуть використані як «шкала» при оцінюванні конкурентної позиції стартапу та виборі стратегії виходу на ринок.

За визначеними факторами конкурентоспроможності виконуємо порівняльний аналіз сильних і слабких сторін (табл. 11). Оцінювання є експертним за шкалою $-3...+3$ відносно нашого рішення.

Таблиця 11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «NitroOpti APC»

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Бали 1–20 | Конкурент А (великий інтегратор) | Конкурент В (APC-вендор) | Конкурент С (локальний АСУТП) |
|-------|--------------------------------------|-----------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1 | Економічний ефект (ROI) | 18 | +1 | 0 | -1 |
| 2 | Сумісність та кібербезпека | 16 | +2 | +1 | -1 |
| 3 | Стабільність якості HNO ₃ | 17 | 0 | +1 | -1 |
| 4 | Екологічний модуль NO _x | 15 | 0 | +1 | -2 |
| 5 | Швидкість/поетапність впровадження | 14 | -1 | -1 | +1 |

З таблиці 11 випливає: наші сильні сторони — прикладна спеціалізація та ефект на якість/екологію; слабе місце — «масштабованість сервісу» та швидкість розгортання в умовах великих заводів (потребує партнерств і стандартизації впроваджень).

На основі факторів загроз/можливостей і сильних/слабких сторін складаємо SWOT-матрицю (табл. 12).

Таблиця 12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

| | |
|--|--|
| | |
|--|--|

| | |
|---|---|
| Сильні сторони | Слабкі сторони |
| <ul style="list-style-type: none"> • Спеціалізація під процес HNO₃ • Екологічні обмеження в оптимізації • Сумісність з DCS через стандарти • Вимірюваний ROI | <ul style="list-style-type: none"> • Потреба в референсах • Залежність від даних/датчиків • Високі вимоги кібербезпеки • Обмежені ресурси команди на масштабування |
| Можливості | Загрози |
| <ul style="list-style-type: none"> • Зростання ринку APC • Еко-регулювання (NO_x) • Попит на модернізацію старих агрегатів • Партнерства з інтеграторами | <ul style="list-style-type: none"> • Демпінг локальних гравців • Довгі тендерні цикли • Коливання курсу/вартості комплектуючих • Жорсткі вимоги до допусків на об'єкт |

SWOT показує доцільність стратегії «пілот → референс → масштабування через партнерів». Основні дії мають зменшувати ризик входу (довіра, кібербезпека) та підсилювати цінність (економія + екологія).

На основі SWOT формуємо альтернативи ринкової поведінки з урахуванням ресурсів і строків (табл. 13). Після аналізу обираємо найбільш реалістичну альтернативу.

Таблиця 13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

| № п/п | Альтернатива (комплекс заходів) | Ймовірність отримання ресурсів | Строки реалізації |
|----------|---|---|-------------------|
| 1 | Пілот на 1 підприємстві України/ЄС з фокусом на економію енергії та NO _x | середня/висока (через спільний інтерес) | 6–9 міс. |
| 2 | Партнерство з інтегратором (white-label) та масштабування на 3–5 заводів | висока (ресурси інтегратора) | 9–18 міс. |
| 3 | Самостійний вихід через тендери великих холдингів | низька (високі бар'єри) | 18–30 міс. |

Обрана альтернатива: №2 (партнерство з інтегратором), оскільки ймовірність отримання ресурсів вища, а строки виходу на ринок є прийнятними. Альтернатива №1 використовується як етап створення референсу для запуску партнерської моделі.

4) Розроблення ринкової стратегії проекту

У межах ринкової стратегії визначаємо цільові сегменти, базову стратегію розвитку, стратегію конкурентної поведінки та позиціонування. Спочатку — вибір цільових груп потенційних споживачів (табл. 14).

Таблиця 14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

| № п/п | Опис профілю цільової групи | Готовність сприйняти продукт | Орієнтовний попит | Інтенсивність конкуренції | Простота входу |
|-------|--|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------|
| 1 | Виробники азотної кислоти/добрив з агрегатами середнього тиску | висока (ефект вимірюваний) | високий (сотні агрегатів у світі) | висока | середня |
| 2 | Підприємства з екологічними обмеженнями (NO _x) | висока | середній | середня | середня |
| 3 | Інжинірингові компанії та інтегратори АСУТП (як канал) | висока | високий | висока | висока |

Цільові групи обрано: 1 та 3 (диференційований маркетинг) — прямі замовники + канал через інтеграторів. Це скорочує цикл продажів і підвищує довіру на промисловому ринку.

Далі формуємо базову стратегію розвитку (табл. 15).

Таблиця 15 – Визначення базової стратегії розвитку

| № п/п | Альтернатива розвитку проєкту | Стратегія охоплення ринку | Ключові конкурентоспроможні позиції | Базова стратегія розвитку |
|-------|--|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 1 | Вихід на ринок АРС для HNO ₃ через партнерів-інтеграторів | диференційований маркетинг | ROI + екологія + сумісність | інноваційне лідерство у ніші |

| | | | | |
|---|---|----------------------------|---|-------------|
| | орів | | | |
| 2 | Сервісна модель «оплата за ефект» для 1–2 заводів | концентрована не охоплення | швидка окупність, мінімум CAPEX клієнта | фокусування |

Основною обираємо стратегію інноваційного лідерства у вузькій ніші (APC для HNO_3), оскільки диференціація досягається доменною експертизою та екологічним модулем.

Визначаємо стратегію конкурентної поведінки (табл. 16).

Обрана поведінка — «інноваційний прорив»: швидко створити референс і закріпитись у спеціалізованій ніші, де великі гравці мають менш гнучкі та дорожчі рішення.

Фінал блоку ринкової стратегії — формування позиціонування (табл. 17), яке поєднує вимоги цільової аудиторії та наші ключові переваги.

Таблиця 16 – Визначення стратегії конкурентної поведінки

| № п/п | Чи є першопрохідцем? | Нових чи існуючих споживачів? | Чи копіювати конкурентів і що саме? | Стратегія |
|-------|--|-----------------------------------|--|----------------------------|
| 1 | частково (APC для HNO_3 з NO_x -модулем) | переважно існуючих (модернізація) | не копіювати; інтегрувати стандарти безпеки як у лідерів | інноваційний прорив у ніші |

Таблиця 17 – Визначення стратегії позиціонування

| № п/п | Вимоги цільової аудиторії | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентні позиції | Ключові асоціації (позиціонування) |
|-------|---|------------------------------|---|---|
| 1 | Окупність, стабільність режиму, безпечна інтеграція, екологія | інноваційне лідерство у ніші | ROI + NO_x -оптимізація + сумісність | «Оптимальне керування без зупинки»; «Екологія під контролем»; «APC, що розуміє HNO_3 » |

Таким чином, позиціонування робить акцент не на «ШІ», а на практичному результаті для технолога та керівника виробництва: стабільність, економія та відповідність екологічним вимогам.

5) Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Маркетингова програма деталізує продукт, ціну, збут і комунікації. Спочатку визначаємо ключові переваги концепції потенційного товару (табл. 18).

Таблиця 18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| № п/п | Потреба | Вигода, яку пропонує товар | Ключові переваги перед конкурентами |
|-------|--------------------------|--|---|
| 1 | Енергоефективність | Зниження питомих витрат енергії на тону HNO_3 | Оптимізація з урахуванням обмежень, адаптація під агрегат |
| 2 | Стабільність якості | Зменшення коливань концентрації/температури | Цифровий двійник + прогноз на горизонті керування |
| 3 | Екологічна відповідність | Зниження NO_x та контроль екопараметрів | NO_x -обмеження у цільовій функції, звітність |
| 4 | Надійність виробництва | Менше аварійних відхилень, попередження ризиків | Режим рекомендацій, діагностика датчиків/моделі |

Ключова логіка: продукт «продає» не алгоритм, а вигоду. Тому формулювання переваг прив'язуємо до показників виробництва, які замовник може перевірити до/після пілоту.

Наступний крок — опис трьох рівнів моделі товару (табл. 19), що дозволяє структурувати склад пропозиції та сервісу.

Таблиця 19 – Опис трьох рівнів моделі товару

| Рівні товару | Сутність та складові |
|---------------------------------|--|
| I. Товар за задумом | Оптимальне керування агрегатом HNO ₃ під тиском для мінімізації витрат і стабілізації якості при обмеженнях NO _x . |
| II. Товар у реальному виконанні | Програмний модуль «NitroOpti APC» (сервер/edge), інтеграція з DCS/SCADA через OPC UA, панель оператора, звіти KPI. |
| III. Товар із підкріпленням | Інжиніринг, пуско-налагодження, навчання, SLA підтримка, оновлення, аудит кібербезпеки, документація (HSE/QA). |

Такий підхід важливий для промислових ринків: часто рішення купують саме разом із сервісом та гарантією відповідальності постачальника.

Далі визначаємо межі встановлення ціни (табл. 20) з урахуванням цін замінників/аналогів та доходів цільової групи. Оцінювання здійснюється експертно.

Таблиця 20 – Визначення меж встановлення ціни

| п/п | Рівень цін на товари-замінники | Рівень цін на товари-аналогі | Рівень доходів цільової групи | Верхня та нижня межі ціни |
|------------|---|--|--|---|
| 1 | «Ручна» оптимізація/консалтинг: 10–30 тис. USD/проект | APC від інтеграторів: 150–400 тис. USD | Великі заводи: CAPEX-проекти 0,5–5 млн USD | 60–250 тис. USD (ліцензія+впровадження) |
| 2 | Базові регулятори: мінімальні витрати | Пакетні модулі DCS: 50–120 тис. USD | Середні підприємства: CAPEX 0,2–1 млн USD | 40–120 тис. USD (поетапно) |

Запропонований діапазон враховує, що клієнт оцінює інвестицію через окупність. Тому у комерційній пропозиції доцільно додавати калькулятор ROI та сценарії «пілот → масштабування».

Після ціни визначаємо оптимальну систему збуту (табл. 21): прямі продажі, партнерські канали, глибина каналу та функції постачальника.

Для стартапу найбільш реалістичний шлях — комбінована система: партнер-інтегратор забезпечує доступ до заводів, а команда стартапу — доменну експертизу та продуктову підтримку.

Останній елемент — концепція маркетингових комунікацій (табл. 22), що визначає канали, повідомлення та інструменти формування довіри.

Таблиця 21 – Формування системи збуту

| № п/п | Специфіка закупівельної поведінки клієнтів | Функції збуту постачальника | Глибина каналу збуту | Оптимальна система збуту |
|-------|---|---|----------------------|--|
| 1 | Тендери, технічні ради, вимога референсів | Техпрезентації, аудит, пілот, SLA | 1–2 рівні | Партнер-інтегратор + прямі продажі ключовим клієнтам |
| 2 | Швидкі рішення для модернізації (обмежений CAPEX) | Пакетні пропозиції, поетапне впровадження | 1 рівень | Прямі продажі через власну команду + локальні представники |

Таблиця 22 – Концепція маркетингових комунікацій

| № п/п | Специфіка поведінки клієнтів | Ключове повідомлення | Канали комунікацій | Інструменти |
|-------|---|--|--|--|
| 1 | Прагматичні B2B-рішення, орієнтація на кейси та цифри | «Економія + стабільність + NO _x під контролем за 6–9 місяців» | галузеві конференції, техвебінари, партнерські продажі | кейс-стаді, ROI-калькулятор, пілот |
| 2 | Високі вимоги безпеки та документації | «Безпечна інтеграція з DCS/SCADA, IEC-підхід» | закриті зустрічі, техкомітети, аудит | демо-стенд, техпаспорт, політики доступу |

Висновки

У розділі виконано маркетинговий аналіз стартап-проекту «NitroOpti APC» відповідно до методичних вказівок. Визначено зміст ідеї та її застосування, проведено первинне порівняння техніко-економічних характеристик із конкурентними підходами, виконано технологічний аудит.

Показано, що ринки А (азотна кислота), В (промислова автоматизація) та С (APC) мають позитивну динаміку, а ключовими драйверами попиту є енергоефективність, екологічні вимоги та цифровізація виробництв. Сформовано перелік цільових груп клієнтів, визначено фактори загроз і можливостей, виконано аналіз конкуренції за М. Портером, побудовано SWOT та обрано альтернативу виходу на ринок через партнерство з інтеграторами.

Розроблено складові ринкової стратегії та маркетингової програми (продукт, ціна, збут, комунікації). Практична цінність проекту полягає у можливості поетапного впровадження APC-модуля на діючих агрегатах азотної кислоти під тиском 0,716 МПа з отриманням вимірюваного економічного та екологічного ефекту.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації здійснено комплексне дослідження процесу виробництва азотної кислоти під тиском 0,716 МПа та розроблено оптимальну систему керування технологічним об'єктом на прикладі сепаратора. Метою роботи було підвищення ефективності процесу за рахунок математичного моделювання, оптимізації керуючих впливів та порівняння різних підходів до автоматичного регулювання.

В роботі проведено аналіз промислових способів отримання азотної кислоти, розглянуто сучасні технологічні рішення та визначено ключові елементи процесу. Встановлено, що якість відділення слабкої азотної кислоти та нітрозних газів у сепараторі суттєво впливає на кінцеву концентрацію продукту, ступінь абсорбції та енергетичні витрати процесу.

Таким чином в дисертації були вирішені такі задачі:

- Виконано аналіз технологічного процесу виробництва азотної кислоти під тиском 0,716 МПа та визначено основні керовані параметри сепаратора. Показано вплив витрати парогазової суміші та вхідної концентрації на якість відділення фаз та стабільність роботи установки.
- Розроблено математичну модель сепаратора, що описує статичний та динамічний режими процесу, отримані передавальні функції за каналами керування та збурення.
- Синтезовано оптимальне програмне керування з використанням інтегрального критерію якості. Побудовано оптимальну траєкторію зміни параметрів для досягнення заданого режиму при мінімальних витратах керуючого впливу.
- Спроектовано оптимальний регулятор зі зворотним зв'язком на основі лінійно-квадратичного підходу (LQR). Проведено чисельні розрахунки на основі рівняння Ріккати, визначено матрицю коефіцієнтів регулятора. Показано, що LQR-регулятор забезпечує менший час регулювання,

нижчий рівень перерегулювання та вищу стійкість до збурень у порівнянні з традиційними методами керування.

- Виконано експертний аналіз аварійних ситуацій у технологічному процесі. Встановлено, що найбільш критичним фактором є зниження ефективності конденсації у холодильнику-конденсаторі, що безпосередньо впливає на концентрацію азотної кислоти та роботу сепаратора.

Отримані результати підтверджують доцільність використання оптимального керування у виробництві азотної кислоти та демонструють його переваги у порівнянні з класичними алгоритмами регулювання. Розроблена математична модель може бути використана при проектуванні систем автоматизації, модернізації існуючих установок та для створення модулів цифрового двійника технологічного процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / М. В. Лукінюк; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с.
2. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 436 с. : іл. – Бібліогр.: с. 427-428. – 200 пр. – ISBN 978-966-622-247-6.
3. А. І. Жученко, Л. Р. Ладієва, М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський. Математичне моделювання процесів і систем. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 133с
4. Кутепов А.М. и др. Загальна хімічна технологія: Учеб. для вузів/ Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен. - 3-е изд., перераб. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. - 528 с.
5. Ладієва Л.Р. Динамічна оптимізація з використанням MATLAB та Simulink [Текст] / Л. Р. Ладієва, А. І. Жученко, Р. М. Дубік // навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології/ Л. Р. Ладієва– К.: НТУУ «КПІ», 2010 – 206 с. : іл. – Бібліогр.: с. 7–15. – ISBN 978-966- 2217-31-5.
6. Маркетинг стартап-проектів : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с.
7. Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

8. Semeniuk, S., Levytskyi, V., Fomina, O., Fedorchenko, K., Yudina, N., Ratynskiy, V., Shcherbatiuk, O., Bendiuh, V., & Zhurakivska, Y. (2024). Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(13 (129), 57–69.

9. Yudina N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // *Marketing and Management of innovations*. 3’2017, P. 245-256. DOI:10.21272/mmi.2017.3-23

10. Yudina, N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №23 (2022). PP. 77-82.

11. Yudina, N. Algorithm Of Marketing Decision Making. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №22 (2022). PP. 1-9.

12. Yudina, N. Future Study Implementation Into Marketing Activity Of Companies. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №19 (2021). PP. 1-9

13. Yudina, N., Pidlisna, O. Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №18 (2021). PP. 1-10.

14. Yudina, N., Instrumenty Zarządzania Przyszłością. Marketing Instytucji Naukowych I Badawczych, Vol. 38, Issue 4., 2020, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa. Poland, Warszawa, p. 1-19 ISSN 2353-8503 eISSN 2353-8414.

15. Yudina, N. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". №17(2020). P. 372-383.

16. Александров С.С., Козлов Е.П., Кузнецов Б.И. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.1 Теорія автоматичного керування. – Харків.: НТУ «ХП». 2009. – 490с.

17. Коржик М.В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab / Навч. посібн. для студентів вищих навч. закл. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 174 с.