

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

**ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИЗАЦІЇ, ПРОМИСЛОВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА**  
**ЕКОЛОГІЇ**  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

**Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації**  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 666.1.022.1

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Віталій ЦАПАР  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025р

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»**

**з напрямку підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та**  
**робототехніка**

на тему: Автоматизація процесу отримання хлориду калію

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛК-41мп  
(шифр групи)

Войтенко Денис Сергійович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Керівник доц. к.т.н. Ситніков О.В.  
( посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що в цьому дипломному  
проекті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань  
Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ - 2025 року

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

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та робототехніки**  
(повна назва)

**Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації**  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Напрямок підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Віталій ЦАПАР  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
Войтенко Денис Сергійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу отримання хлориду калію

керівник проекту \_\_\_\_\_  
доц., к.т.н. Ситніков О.В.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025р. №4744-с.

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження процес отримання хлориду калію

4. Вихідні дані: Схема автоматизації; система керування яка має забезпечувати перерегулювання не більше 20%, час перехідного процесу не більше заданим регламентом меж; параметри які підлягають керуванню: рівень сильвініту, співвідношення витрат сильвініту і води разом з невідсіяним сильвінітому, рівень розчину сильвініту, концентрація сильвініту

5. Перелік завдань, що потребують розробки: Дослідити процес отримання хлориду калію; розробка математичної моделі змішувача як технологічного об'єкту керування; спроектувати та дослідити систему керування змішувача; розробка стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного(ілюстративного) матеріалу Графічні зображення об'єкту керування; схема процесу отримання хлориду калію; перехідні характеристики об'єкту; зображення розробленої систем керування; SCADA система.

7. Консультанти розділів дисертації\*

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

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проекту | Термін виконання етапів проекту | Примітка |
|-------|-------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1     | Ознайомлення з теоретичним матеріалом     |                                 |          |
| 2     | Створення математичної моделі об'єкта     |                                 |          |
| 3     | Синтез системи керування                  |                                 |          |
| 4     | Статична оптимізація                      |                                 |          |
| 5     | Проектування схеми автоматизації          |                                 |          |
| 6     | Створення стартап проекту                 |                                 |          |
|       |                                           |                                 |          |
|       |                                           |                                 |          |

Студент \_\_\_\_\_

Денис ВОЙТЕНКО  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

Олексій СИТНИКОВ  
(ініціали, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація записку об'ємом 63 сторінок, 22 рисунків, 17 таблиць, 1 креслення і 19 літературних джерел.

Основною метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю хіміко технологічної схеми отримання хлориду калію, для забезпечення найменшого втручання людини в роботу схеми, також збільшення ефективності використання сировини та енергії та підвищення якості продукції.

У дипломному проєкті розроблено схему автоматизації з технологічною сигналізацією та схему дистанційного керування електродвигунами.

Одним з основних апаратів, що забезпечує якість вихідного продукту та впливає на економічні показники, виступає змішувач, для якого розроблена математична модель статичного та динамічного режимів роботи й побудовані відповідні графічні характеристики за каналами керування та збурення.

Проведено синтез системи керування для оптимального керування зі зворотнім зв'язком з квадратичним критерієм якості, проведено проектування оптимального лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою та проведено порівняння результатів отриманих для оптимального керування зі зворотнім зв'язком. В дисертації представлено керування за мінімальним часом обмежені на керування.

Для технологічного процесу розроблено SCADA керування, схема автоматизації розроблена із врахуванням вимог сучасного виробництва та із використанням сучасних засобів автоматизації.

Розроблено стартап проєкту, що дозволив виявити економічну доцільність прийнятих технічних рішень.

Ключові слова: хлорид, калій, змішувач, об'єкт керування, схема автоматизації, математична модель, статична характеристика, передавальна функція, перехідна характеристика, канал керування, статична оптимізація, критерій оптимальності, регулятор.

## ABSTRACT

Master's thesis note with a volume of 63 pages, 22 figures, 17 tables, 1 drawing and 19 literary sources.

The main purpose of the thesis is to develop an automatic control system for the chemical and technological scheme for obtaining potassium chloride, to ensure the least human intervention in the operation of the scheme, as well as to increase the efficiency of raw materials and energy use and improve product quality.

The diploma project developed an automation scheme with technological signaling and a scheme for remote control of electric motors.

One of the main devices that ensures the quality of the output product and affects economic indicators is the mixer, for which a mathematical model of static and dynamic operating modes has been developed and the corresponding graphic characteristics have been constructed for the control and disturbance channels.

A control system for optimal feedback control with a quadratic quality criterion was synthesized, an optimal linear-quadratic controller with an integral component was designed, and the results obtained for optimal feedback control were compared. The dissertation presents control by minimum time constraints on control.

SCADA control was developed for the technological process, the automation scheme was developed taking into account the requirements of modern production and using modern automation tools.

A startup project was developed, which allowed to identify the economic feasibility of the adopted technical solutions.

Keywords: chloride, potassium, mixer, control object, automation scheme, mathematical model, static characteristic, transfer function, transient characteristic, control channel, static optimization, optimality criterion, regulator.

## **ЗМІСТ**

|                                                                                                                              |                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ХЛОРИДУ КАЛІЮ З СИЛЬВІНІТУ ТА АНАЛІЗ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ОБ'ЄКТА.....</b>       | <b>7</b>                               |
| 1.1.    АНАЛІЗ ХЛОРИДУ КАЛІЮ ТА ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ.....                                                                       | 7                                      |
| 1.2.    АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ТА ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ХЛОРИДУ КАЛІЮ.....                                                   | 9                                      |
| 1.3.    ПОСТАНОВКА ЗАДАВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ. ....                                                                               | 12                                     |
| <b>2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ .....</b>                                                                    | <b>13</b>                              |
| 2.1.    СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА СХЕМА ЗМІШУВАЧА ..Помилка! Закладку не визначено.                                            |                                        |
| 2.2.    СТАТИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ Помилка! Закладку не визначено.                                            |                                        |
| 2.3.    ВИВЕДЕННЯ ПЕРЕДАТНОЇ ФУНКЦІЇ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ..... Помилка! Закладку не визначено.                                  |                                        |
| 2.4.    ВИБІР КРИТЕРІЮ ОПТИМАЛЬНОСТІ... Помилка! Закладку не визначено.                                                      |                                        |
| <b>3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....</b>                                                                                      | <b>ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКУ НЕ ВИЗНАЧЕНО.</b> |
| 3.1.    РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ З КВАДРАТИЧНИМ КРИТЕРІЄМ ЯКОСТІ.. ....                       | Помилка! Закладку не визначено.        |
| 3.2.    ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЛІНІЙНО-КВАДРАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА З ІНТЕГРАЛЬНОЮ СКЛАДОВОЮ. Помилка! Закладку не визначено. |                                        |
| 3.3.    ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ОТРИМАНИХ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ .....                              | Помилка! Закладку не визначено.        |
| 3.4.    КЕРУВАННЯ ЗА МІНІМАЛЬНИМ ЧАСОМ ОБМЕЖЕНІ НА КЕРУВАННЯ. Помилка! Закладку не визначено.                                |                                        |
| <b>4. РОЗРОБКА СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....</b>                                                                                  | <b>26</b>                              |

|      |                                                  |                                 |
|------|--------------------------------------------------|---------------------------------|
| 4.1. | РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ..... | ПОМИЛКА!                        |
|      | ЗАКЛАДКУ НЕ ВИЗНАЧЕНО.                           |                                 |
| 4.2. | РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ.....                      | ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКУ НЕ ВИЗНАЧЕНО. |
| 5.   | РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....                   | 26                              |
| 5.1  | Поняття стартап-проєкту.....                     | 26                              |
| 5.2  | Опис ідеї проєкту.....                           | 26                              |
| 5.3  | Технологічний аудит проєкту.....                 | 26                              |
| 5.4  | Аналіз ринкових можливостей запуску проєкту..... | 26                              |
| 5.5  | Розробка ринкової стратегії проєкту.....         | 26                              |
| 5.6  | Розробка маркетингової стратегії проєкту.....    | 26                              |
|      | СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....              | 88                              |

## Вступ

Хімічна промисловість займає одне з ключових місць у структурі виробничої інфраструктури, оскільки становить науково-технічну та матеріальну базу економіки. Вона відіграє важливу роль у розвитку наукових досліджень, удосконаленні технологій та задоволенні повсякденних потреб населення. До її складу входять різноманітні виробництва, у яких домінують хімічні процеси переробки сировини, що дає можливість отримувати нові матеріали з визначеними властивостями [1].

Актуальність даного проекту полягає у дослідженні хіміко-технологічних процесів отримання хлориду калію. Ця сполука широко застосовується в аграрній сфері, медицині, харчовій, текстильній та інших галузях промисловості. Основна увага у роботі зосереджена на моделюванні динамічних характеристик змішувача для розроблення регулятора та проведення статичної оптимізації процесу. Головною метою розрахунків є зменшення витрат реагентів та підвищення точності управління технологічним процесом [2].

Магістерська дисертація присвячена дослідженню та вдосконаленню процесу отримання хлориду калію флотаційним методом. У роботі розглянуто особливості переробки калійних руд, описано технологічну схему виробництва та визначено фактори, що впливають на ефективність флотації. Запропоновано та обґрунтовано систему автоматизації технологічного процесу з використанням сучасних засобів вимірювання та програмованих логічних контролерів. Розроблена система дозволяє підвищити якість

продукції, зменшити витрати реагентів і забезпечити стабільність роботи обладнання.

# 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ХЛОРИДУ КАЛІЮ З СИЛЬВІНІТУ ТА АНАЛІЗ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ОБ'ЄКТА

## 1.1. Аналіз хлориду калію та процесу отримання

Хлорид калію (KCl) — це неорганічна кристалічна сіль, що широко застосовується у хімічній промисловості, медицині, металургії, а найбільше — в сільському господарстві як основа калійних добрив [1, 2]. Речовина добре розчиняється у воді, не має запаху, має солонуватий смак. Основними вимогами до промислового KCl є висока частка діючої речовини (не менше 95%) та мінімальний вміст домішок NaCl.

Таблиця 1.1. Основні фізико-хімічні властивості KCl.

| Показник                                                 | Значення     |
|----------------------------------------------------------|--------------|
| Формула                                                  | KCl          |
| Молярна маса                                             | 74,55 г/моль |
| Температура плавлення                                    | 770 °C       |
| Температура кипіння                                      | 1420 °C      |
| Розчинність у воді (25 °C) 34,2 г/100 г H <sub>2</sub> O |              |

Значення підвищеної чистоти продукту пов'язане з тим, що калій впливає на регуляцію водного балансу рослин, їхню посухостійкість та врожайність, тому якість KCl напряду визначає ефективність мінеральних добрив [1].

Головною сировиною для виробництва KCl є сильвініт — мінеральна порода, що складається з суміші хлоридів калію (KCl) та натрію (NaCl). Масова частка KCl у сильвініті зазвичай становить від 15 до 40%. Другим важливим компонентом є карналіт (KCl·MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O), з якого також можна отримувати

KCl, проте процес переробки карналіту є складнішим через наявність магнієвих солей.

Основні родовища сильвініту у світі зосереджені в Канаді, Німеччині, Білорусі, Китаї та США. В Україні поклади калійних солей історично розроблялися в Калуші та Стебнику [3].

Флотаційний метод ґрунтується на різній поверхневій активності частинок KCl та NaCl у водних розчинах. Після подрібнення та розчинення руди проводять селективну флотацію, у якій гранули KCl взаємодіють із флотоутворюючим реагентом і спливають разом із піною; частинки NaCl залишаються у розчині та видаляються разом із хвостами [2].

Для процесу використовують такі реагенти: флотоколектори (жирні аміни) — забезпечують прилипання частинок KCl до бульбашок повітря; регулятори середовища (NaOH) — підтримують необхідний pH; спінювачі (масла, спирти) — стабілізують піну.

Хімічна суть процесу не включає перетворення, а є фізико-хімічним розділенням компонентів [4].

Технологічна схема флотаційного отримання KCl (загальний опис)

Процес складається з таких етапів:

- Дроблення та подрібнення руди до зерна 0,2–1,2 мм.
- Приготування насиченого розчину, що запобігає розчиненню KCl і NaCl.
- Флотація у спеціальних флотаційних машинах.
- Згущення та фільтрація флотаційного концентрату.
- Сушіння KCl у барабанних або псевдорозріджених сушарках.
- Охолодження і пакування готового продукту.

Ключові параметри процесу: температура: 18–90 °C (залежно від схеми), концентрація ропи, подача повітря, дозування реагентів [4].

Ці параметри слід контролювати автоматично, оскільки їх коливання значно впливають на вихід та чистоту продукту.

## 1.2. Аналіз технологічної схеми та процесу отримання хлориду калію.

Розглянемо умовне підприємство ТОВ «КалійПром», основною діяльністю якого є переробка сильвінітової руди з метою отримання високоякісного хлориду калію, що використовується як мінеральне добриво. Проектна продуктивність підприємства становить 250 т/добу готового KCl з масовою часткою діючої речовини не менше 95% [5, 6].

Сировиною для виробництва є сильвініт із вмістом KCl 20–28% та NaCl 65–75%. Склад сировини значно впливає на режим флотації, що визначає необхідність автоматизації контролю концентрацій у розчинах та дозування реагентів.

Технологічний процес виробництва KCl включає такі основні операції: Дроблення та подрібнення руди. Сильвініт надходить у дробильно-сортувальне відділення, де подрібнюється до розміру частинок 0,2–1,2 мм [3]. Завдання етапу – отримати однорідний гранулометричний склад, який забезпечує максимальну ефективність флотації.

Приготування насиченої ропи (сольового розчину) Для запобігання розчиненню солей використовують насичений розчин KCl–NaCl. Температура ропи підтримується автоматично в межах 20–40 °C. Флотація.

Подрібнений сильвініт змішується зі збагачувальною ропою, флотаційними реагентами та подається у флотаційні машини [4].

У верхній піні концентрується KCl-концентрат,

У нижній пульпі — хвости, багаті на NaCl.

Згущення та фільтрація концентрату. Концентрат відокремлюється від рідини у згущувачах і фільтрах до вологості 4–8%.

Сушіння.

Волога у концентраті випаровується у барабанній сушарці при температурі 130–150 °C, забезпечуючи зниження вологості до <0,5%.

Охолодження, грануляція (за потреби) та пакування. Готовий продукт подається на склад, де фасується у мішки або транспортується насипом [6].

Таблиця 1.2. Основне технологічне обладнання

| Обладнання                         | Призначення                  | Основні параметри              |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Щоківі та валкові дробарки         | Дроблення руди               | Розмір зерна 0,5–1,5 мм        |
| Кульові млини                      | Додаткове подрібнення        | Тонкість 70–90% класу – 0,5 мм |
| Флотаційні машини механічного типу | Селективне збагачення КСІ    | Продуктивність 20–80 м³/год    |
| Згущувачі                          | Осадження твердої фази       | Вміст твердої фази 55–70%      |
| Центрифуги або вакуум-фільтри      | Відділення маточного розчину | Вологість 4–8%                 |
| Барабанні сушарки                  | Сушіння концентрату          | Температура агента 130–150 °С  |
| Конвеєри та транспортери           | Транспортування              | Продуктивність 20–150 т/год    |

Для забезпечення стабільної якості продукту необхідно постійно контролювати.

Таблиця 1.3. Контрольні параметри процесу

| Параметр         | Діапазон   | Значення для процесу         |
|------------------|------------|------------------------------|
| Температура ропи | 20–40 °С   | Впливає на розчинність солей |
| Гранулометричний | 0,2–1,2 мм | Забезпечує оптимальну        |



розчину; 9 – збірник оберненого розчину; 10 – згущувач шламу; 11 – сито для відділення хвостів (галіта) [7].

Коливання будь-якого з технологічних параметрів призводить до: зростання витрат реагентів, погіршення чистоти продукту, зменшення виходу  $KCl$ , збільшення відходів.

Це підтверджує необхідність автоматизації процесу [2, 6-7].

Технологічний процес отримання хлориду калію флотаційним методом характеризується значною кількістю параметрів, що впливають на ефективність розділення силвініту. Ручне регулювання цих параметрів неможливе з достатньою точністю, що обумовлює доцільність застосування автоматизованих систем керування [8]. Особливої уваги потребують ділянки приготування ропи, флотації та сушіння, де відхилення режимів найбільш істотно впливають на якість продукції.

### **1.3. Постановка завдання дослідження.**

Метою дисертації є до розробка системи автоматичного контролю процесу отримання хлориду калію. Це включає розробку математичної моделі об'єкту керування, синтез системи керування, створення схеми автоматизації та SCADA системи керування процесом.

Система автоматизації, що буде розроблена повинна забезпечити:

Основні задачі дослідження включають:

- математичну модель об'єкту керування;
- синтез систем керування різних типів;
- створення схеми автоматизації технологічного процесу;
- розробка SCADA системи керування;
- розробка стартап проекту.

## 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

Першочерговим кроком у автоматизації процесу отримання хлориду калію виступає виведення математичної моделі основного апарату технологічного процесу – змішувача. Процес моделювання включає дослідження структурно-параметричної схеми змішувача, побудова статичної характеристики об'єкту керування, отримання передатної функції об'єкту керування для подальшого синтезу в системі керування [9].

### 2.1. Структурно-параметрична схема змішувача

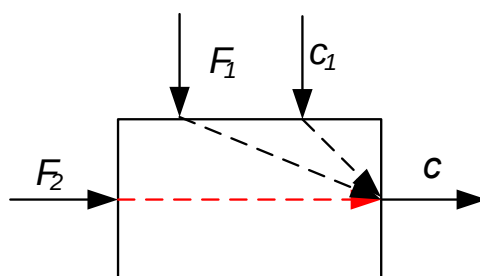


Рис. 2.1 Структурно-параметрична схема змішувача

На схемі наведені наступні параметри:

- $F_1$  – витрата подрібненого сильвініту;
- $c_1$  – концентрація подрібненого сильвініту;
- $F_2$  – витрата оборотного розчину;
- $c_2$  – концентрація оборотного розчину;
- $F$  – витрата розчину сильвініту;
- $c$  – концентрація розчину сильвініту;
- $V$  – об'єм розчину сильвініту в змішувачі-розчиннику.

Прийнято, що вихідним параметром (величиною, що підлягає керуванню) буде виступати концентрація розчину сильвініту на виході з змішувача [10].

Вхідним (дія керування) – витрата оборотного розчину  $F_2$ .

В роботі також присутнє збурення, в ролі якого виступає витрата подрібненого сильвініту на вході в апарат  $F_1$  та концентрація  $c_1$ .

## 2.2. Статична характеристика об'єкту керування

В процесі математичного моделювання було зроблено ряд певних припущень, що не впливають на зміни в процесі керування, але сам процес виведення математичної моделі буде спрощено [10]:

- витрата розчину сильвініту дорівнює загальній витраті розмолотого сильвініту та розчину;
- концентрація подрібненого сильвініту є константою;
- концентрація сильвініту в оборотному розчині є сталою величиною;

Таким чином, в результаті спрощення, об'єкт керування представляє собою об'єкт із зосередженими параметрами.

Матеріальний баланс:

$$F_1 \cdot c_1 + F_2 \cdot c_2 = (F_1 + F_2) \cdot c \quad (2.1)$$

Як було зазначено вище регульованою величиною буде виступати концентрація розчину сильвініту  $c$ , а відповідно керуючою дією витрата оборотного розчину  $F_2$  [9]. Також має місце збурення у вигляді витрати подрібненого сильвініту  $F_1$  та концентрація  $c_1$ .

Таблиця 2.1 Значення основних параметрів

| Назва                                | Позначення | Числове значення | Розмірність         |
|--------------------------------------|------------|------------------|---------------------|
| Витрата подрібненого сильвініту      | $F_1$      | 2,5              | м <sup>3</sup> /год |
| Витрата оборотного розчину           | $F_2$      | 1,5              | м <sup>3</sup> /год |
| Витрата розчину сильвініту           | $F$        | 4                | м <sup>3</sup> /год |
| Концентрація подрібненого сильвініту | $c_1$      | 0,6              | кг/ м <sup>3</sup>  |
| Концентрація оборотного розчину      | $c_2$      | 0,1              | кг/ м <sup>3</sup>  |

|                                                    |     |      |                    |
|----------------------------------------------------|-----|------|--------------------|
| Концентрація розчину<br>сильвініту                 | $c$ | 0,25 | кг/ м <sup>3</sup> |
| Об'єм розчину сильвініту в<br>змішувачі-розчиннику | $V$ | 2    | м <sup>3</sup>     |

$$F_1 \cdot c_1 + F_2 \cdot c_2 - (F_1 + F_2) \cdot c = 0 \quad (2.2)$$

$$c(F_2) = \frac{F_1 \cdot c_1 + F_2 \cdot c_2}{F_1 + F_2} \quad (2.3)$$

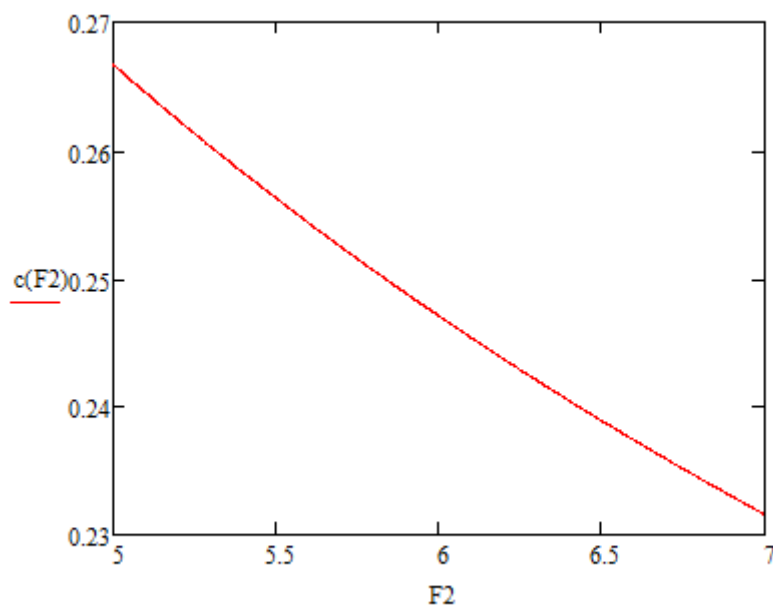


Рис. 2.2 Статична характеристика по каналу керування

### 2.3. Виведення передатної функції об'єкту керування

$$V \frac{dc}{dt} = F_1 \cdot c_1 + F_2 \cdot c_2 - (F_1 + F_2) \cdot c \quad (2.4)$$

Змінні, які необхідно лінеаризувати:  $F_1, F_2, c, c_1$ .

Значення змінних у їх відхиленнях від статичного режиму [10]:

$$F_1 = F_{10} + \Delta F_1,$$

$$F_2 = F_{20} + \Delta F_2,$$

$$c = c_0 + \Delta c,$$

$$c_1 = c_{10} + \Delta c_1.$$

Рівняння матеріального балансу прийме вигляд:

$$V \frac{d\Delta c}{dt} = F_{10}\Delta c_1 + c_{10}\Delta F_1 + c_{20}\Delta F_2 - (F_{10} + F_{20})\Delta c - c_0\Delta F_1 - c_0\Delta F_2 \quad (2.5)$$

Після зведення подібних рівняння буде представлено у відхиленнях, або  
інша назва – лінеаризоване.

$$V \frac{d\Delta c}{dt} + (F_{10} + F_{20})\Delta c = F_{10}\Delta c_1 + (c_{10} - c_0)\Delta F_1 + (c_{20} - c_0)\Delta F_2 \quad (2.6)$$

Змінні приводяться до безрозмірного виду з використанням певних  
позначень [9]:

- величина, що регулюється:

$$\varphi = \frac{\Delta c}{c_0}, \text{ тобто } \Delta c = c_0 \cdot \varphi;$$

- керувальна дія

$$\mu = \frac{\Delta F_2}{F_{20}}, \text{ тобто } \Delta F_2 = F_{20} \cdot \mu;$$

- дія збурення

$$\lambda_1 = \frac{\Delta F_1}{F_{10}}, \text{ тобто } \Delta F_1 = F_{10} \cdot \lambda_1;$$

$$\lambda_2 = \frac{\Delta c_1}{c_{10}}, \text{ тобто } \Delta c_1 = c_{10} \cdot \lambda_2.$$

Після підстановки:

$$V c_0 \frac{d\varphi}{dt} + (F_{10} + F_{20})c_0\varphi = F_{10}c_{10}\lambda_2 + (c_{10} - c_0)F_{10}\lambda_1 + (c_{20} - c_0)F_{20}\mu \quad (2.7)$$

В результаті проведеного перетворення за Лапласом аргументи  
набувають наступного вигляду [10]:

$$\varphi(t) \rightarrow \varphi(p),$$

$$\mu(t) \rightarrow \mu(p),$$

$$\lambda_1(t) \rightarrow \lambda_1(p),$$

$$\lambda_2(t) \rightarrow \lambda_2(p).$$

Динамічне рівняння представлено:

$$[Vc_0p + (F_{10} + F_{20})c_0] \cdot \varphi(p) = F_{10}c_{10}\lambda_2(p) + (c_{10} - c_0)F_{10}\lambda_1(p) + (c_{20} - c_0)F_{20}\mu(p) \quad (2.8)$$

Представлення рівняння в канонічній формі необхідно звести коефіцієнт при доданку  $\varphi$  до одиниці, тобто поділити ліво і право рівняння на множник  $(F_{10} + F_{20})c_0$ .

Вводимо позначення сталих часу та коефіцієнтів підсилення [10]

$$T = \frac{V}{F_{10} + F_{20}};$$

$$K1 = \frac{(c_{10} - c_0)F_{10}}{(F_{10} + F_{20})c_0};$$

$$K2 = \frac{F_{10}c_{10}}{(F_{10} + F_{20})c_0};$$

$$K\mu = \frac{(c_{10} - c_0)F_{20}}{(F_{10} + F_{20})c_0}.$$

отримаємо динамічне рівняння, що відповідає математичній моделі змішувача в канонічній формі [10]:

$$(Tp + 1)\varphi = K1\lambda_1 + K2\lambda_2 + K\mu \cdot \mu \quad (2.9)$$

представлення моделі в формі Коші:

$$T \frac{d\varphi}{dt} = -\varphi + K\mu \cdot \mu + K1\lambda_1 + K2\lambda_2 \quad (2.10)$$

Отримано, виходячи із значення параметрів, значення коефіцієнтів:

$$T = 0.5;$$

$$K\mu = -0.225;$$

$$K1 = 0.875;$$

$$K2 = 1.5.$$

Підставляємо отримані значення коефіцієнтів, до рівняння в безрозмірних змінних [9]

$$(0.5p + 1)\varphi = 0.875\lambda_1 + 1.5\lambda_2 - 0.225\mu \quad (2.11)$$

Розглянемо передатні функції за каналами

- за каналом збурення  $\lambda_2 \rightarrow \varphi$ :

$$W_{zb}(p) = \frac{\varphi(p)}{\lambda_2(p)} = \frac{1.5}{0.5p + 1} \quad (2.12)$$

- та керування  $\mu \rightarrow \varphi$ :

$$W_k(p) = \frac{\varphi(p)}{\mu(p)} = \frac{-0.225}{0.5p + 1} \quad (2.13)$$

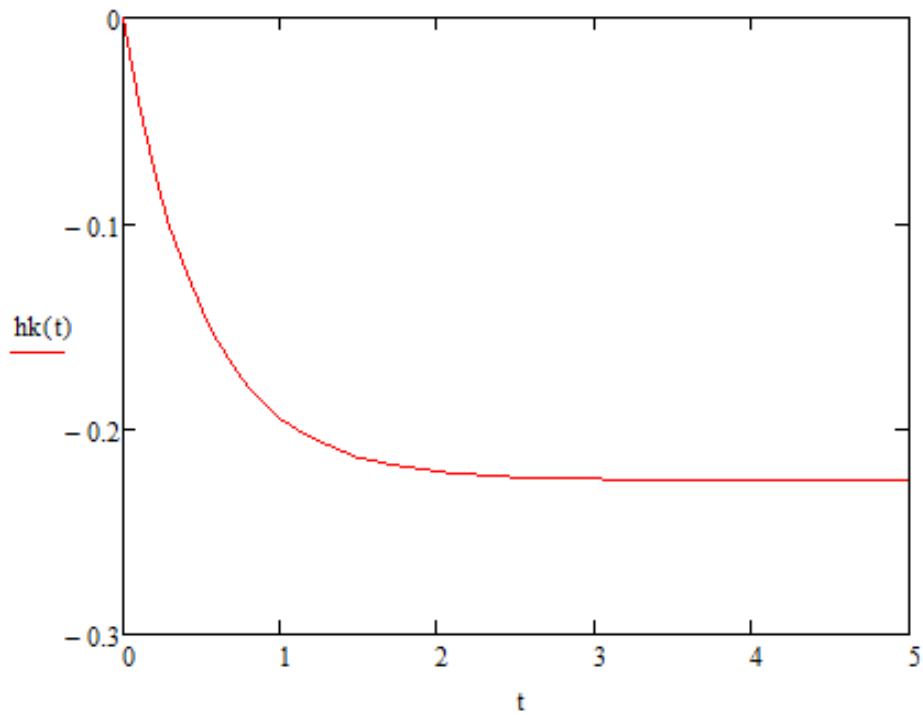


Рис. 2.3 Динамічна характеристика по каналу «керування вихід»

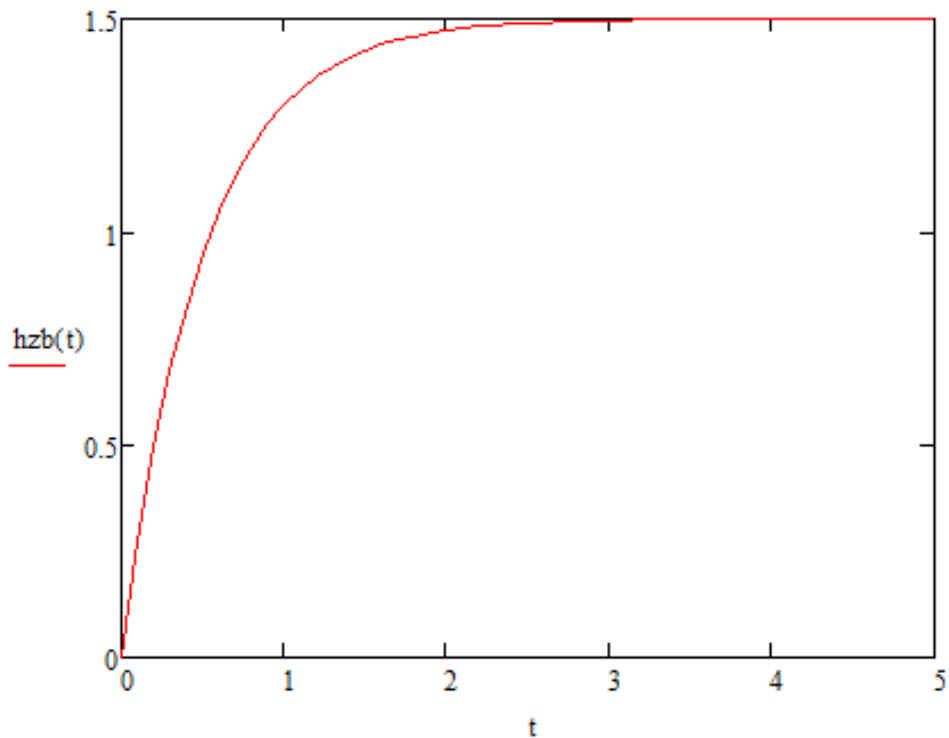


Рис. 2.4 Динамічна характеристика по каналу «збурення-вихід»

## 2.4. Вибір критерію оптимальності

Постановка задачі полягає у мінімізації витрати витрату розчину, що подається до змішувача та вивести значення концентрацію розчину сильвінту на задане значення. Для вирішення поставленої задачі будемо підтримувати температуру в апараті на відповідному рівні, що дасть можливість підтримувати задане значення концентрації вихідного продукту [11].

При розв'язанні поставленої задачі обираємо інтегральний критерій якості. Відповідно завданню в роботі необхідно підтримувати на певному рівні концентрацію. В критерій оптимальності включаємо температуру розчину.

$$I = 1/2 \int_0^{tf} [q (\Theta_q - \Theta_q^0)^2 + 1/2r \cdot G_k^2] dt \rightarrow \min .$$

Межі:

$$G_{k \min} \leq G_k \leq G_{k \max} .$$

$$X' = AX + BU$$

$$X1' = a_{11} * x1 + a_{12} * x2 + b_{11} * u1$$

$$X2' = a_{21} * x1 - a_{22} * x2 + b_{22} * u2$$

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} X_1^2 + R1 * u1^2 + R2 * u2^2$$

Проводимо виведення заданих умов оптимальності [11]

Функція Гамільтона набуває вигляду:

$$H = \frac{1}{2} * (X_1^2 + R1 * u1^2 + R2 * u2^2) + \lambda_1(a_{11} * x1 + a_{12} * x2 + b_{11} * u1) + \lambda_2(a_{21} * x1 - a_{22} * x2 + b_{22} * u2)$$

Умови оптимальності [11]:

$$\lambda' = - \frac{dH}{dx}$$

$$\lambda_1' = - \frac{dH}{dx1} = - (x1 - \lambda_1 a_{11} + \lambda_2 a_{21}) = - x1 + \lambda_1 a_{11} - \lambda_2 a_{21}$$

$$\lambda_2' = - \frac{dH}{dx2} = - (\lambda_1 a_{12} - \lambda_2 a_{22}) = - \lambda_1 a_{12} + \lambda_2 a_{22}$$

$$\frac{dH}{du1} = R1 * u1 + \lambda_1 b_{11} + \lambda_2 b_{22} = 0$$

$$\frac{dH}{du2} = R2 * u2 + \lambda_2 b_{22} = 0$$

$$\lambda_1(t_f) = 0;$$

$$\lambda_2(t_f) = 0;$$

$$u1 = - (\lambda_1 b_{11} + \lambda_2 b_{22}) / R1$$

$$u2 = - (\lambda_2 b_{22}) / R2$$

$$X1' = -a_{11} * x1 + a_{12} * x2 + b_{11} * u1$$

$$X1' = (x1, n+1 - x1, n) / t$$

$$X1 = x1, n$$

$$(x1, n+1 - x1, n) / t = -a_{11} * x1, n + a_{12} * x2, n + b_{11} * u1, n$$

$$X2' = a_{21} * x1 - a_{22} * x2 + b_{22} * u2$$

$$(x2, n+1 - x2, n) / t = a_{21} * x1, n - a_{22} * x2, n + b_{22} * u2, n$$

$$X1, n+1 = (-a_{11} * x1, n + a_{12} * x2, n + b_{11} * u1, n) t + x1, n$$

$$X2, n+1 = (a_{21} * x1, n - a_{22} * x2, n + b_{22} * u2, n) t + x2, n$$

$$\lambda_1' = - dH/dx1 = - (x1 - \lambda_1 a_{11} + \lambda_2 a_{21}) = - x1 + \lambda_1 a_{11} - \lambda_2 a_{21}$$

$$\lambda_2' = - dH/dx2 = - (\lambda_1 a_{12} - \lambda_2 a_{22}) = - \lambda_1 a_{12} + \lambda_2 a_{22}$$

$$\lambda_1' = (\lambda_1, n - \lambda_1, n-1) / t$$

$$(\lambda_{1,n} - \lambda_{1,n-1}) / t = -x_{1,n} + \lambda_{1,n} a_{11} - \lambda_{2,n} a_{21}$$

$$\lambda_{2,n} = (\lambda_{2,n} - \lambda_{2,n-1}) / t$$

$$(\lambda_{2,n} - \lambda_{2,n-1}) / t = -\lambda_{1,n} a_{12} + \lambda_{2,n} a_{22}$$

$$\lambda_{1,n-1} = \lambda_{1,n} - (-x_{1,n} + \lambda_{1,n} a_{11} - \lambda_{2,n} a_{21}) t$$

$$\lambda_{2,n-1} = \lambda_{2,n} - (-\lambda_{1,n} a_{12} + \lambda_{2,n} a_{22}) t$$

$$u_1 = -(\lambda_1 b_{11} + \lambda_2 b_{22}) / R_1$$

$$u_2 = -(\lambda_2 b_{22}) / R_2$$

$$u_{1,n} = -(\lambda_{1,n} b_{11} + \lambda_{2,n} b_{22}) / R_1$$

$$u_{2,n} = -(\lambda_{2,n} b_{22}) / R_2$$

В роботі проведено розрахунки оптимального програмного керування ,  
 проведено з використанням програмного середовища MatLab [11]

```
[x1,x2,t,N] = findx();
```

```
f1 = figure;
```

```
f2 = figure;
```

```
f3 = figure;
```

```
f4 = figure;
```

```
plot(t,x1)
```

```
title('Зміна x1');
```

```
grid on;
```

```
figure(f1)
```

```
plot(t,x2)
```

```
title('Зміна x2');
```

```
grid on;
```

```
figure(f2)
```

```
k= 1:1:1001;
```

```
plot(k,lam1)
```

```
title('Зміна λ1');
```

```
figure(f3)
```

```
plot(k,lam2)
```

```
title('Зміна λ2');
```

```
figure(f4)
[U_opt] = findUprav(N,lam2);
```

```
f5= figure;
```

```
plot(t,U_opt)
```

```
figure(f5)
```

### **function findx**

```
function [x1,x2,t,N] = findx()
```

```
x1 = [];
```

```
x2 = [];
```

```
x1(1) = 373;
```

```
x2(1) = 0.073;
```

```
N = 1000;
```

```
a11 = -0.018;
```

```
a12 = 0.0033;
```

```
a21 = 11.2517e-7;
```

```
a22 = -11.337e-7;
```

```
b1 = 4.704;
```

```
b2 = 582.7664;
```

```
TAU = 0.5;
```

```
t = 0:N-1;
```

```
for s = 1:N-1
```

```
    x1(s+1) = (a11*x1(s) + a12*x2(s) + b1*b2)*TAU + x1(s);
```

```
    x2(s+1) = (a21*x1(s) + a22*x2(s))*TAU+x2(s);
```

```
end
```

```
end
```

### **function findlambda**

```
function [lam1,lam2] = findlambda(x1,x2,N)
```

```
lam1(N) = x1(N);
```

```
lam2(N) = x2(N);
```

```
q = 1;
```

```

a11 = -0.018;
a12 = 0.0033;
a21 = 11.2517e-7;
a22 = -11.337e-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 findUprav
function [U_opt] = findUprav(N,lam2)
r = 1;
b1 = 4.704;
for i = 1:N
    U_opt(i) = -(r^-1)*b1*lam2(i); End

```

Графіки зміни витрати в змішувачі, оптимальне керування та умови оптимальності представлені нижче

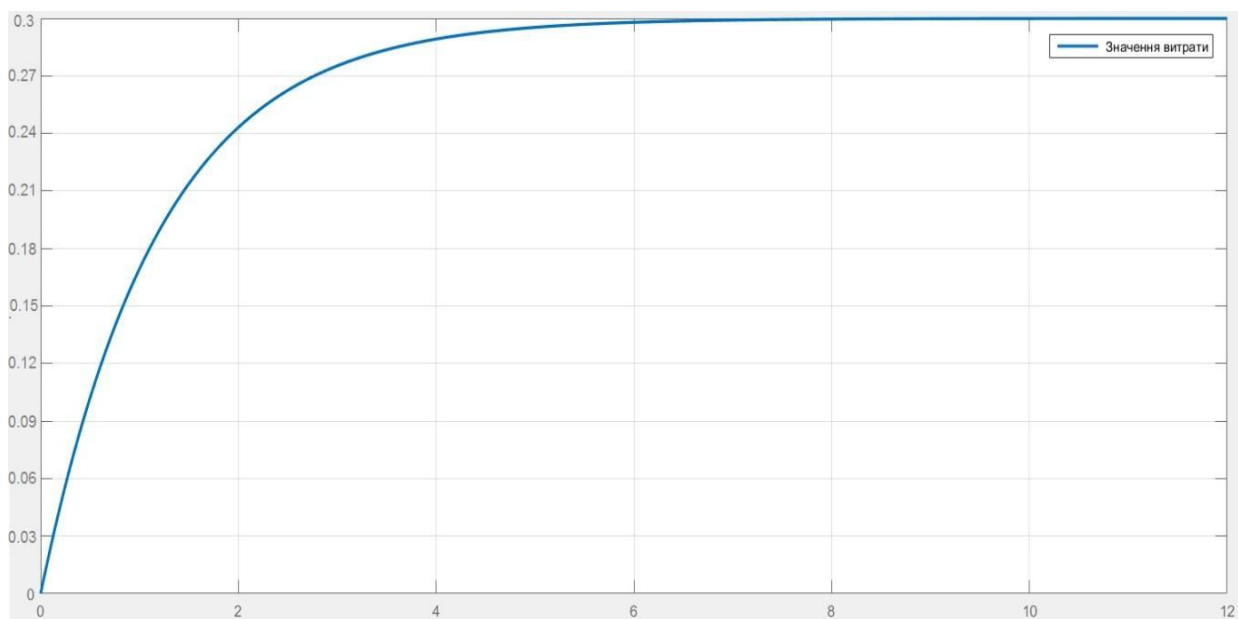


Рис. 2.5 Зміна витрати

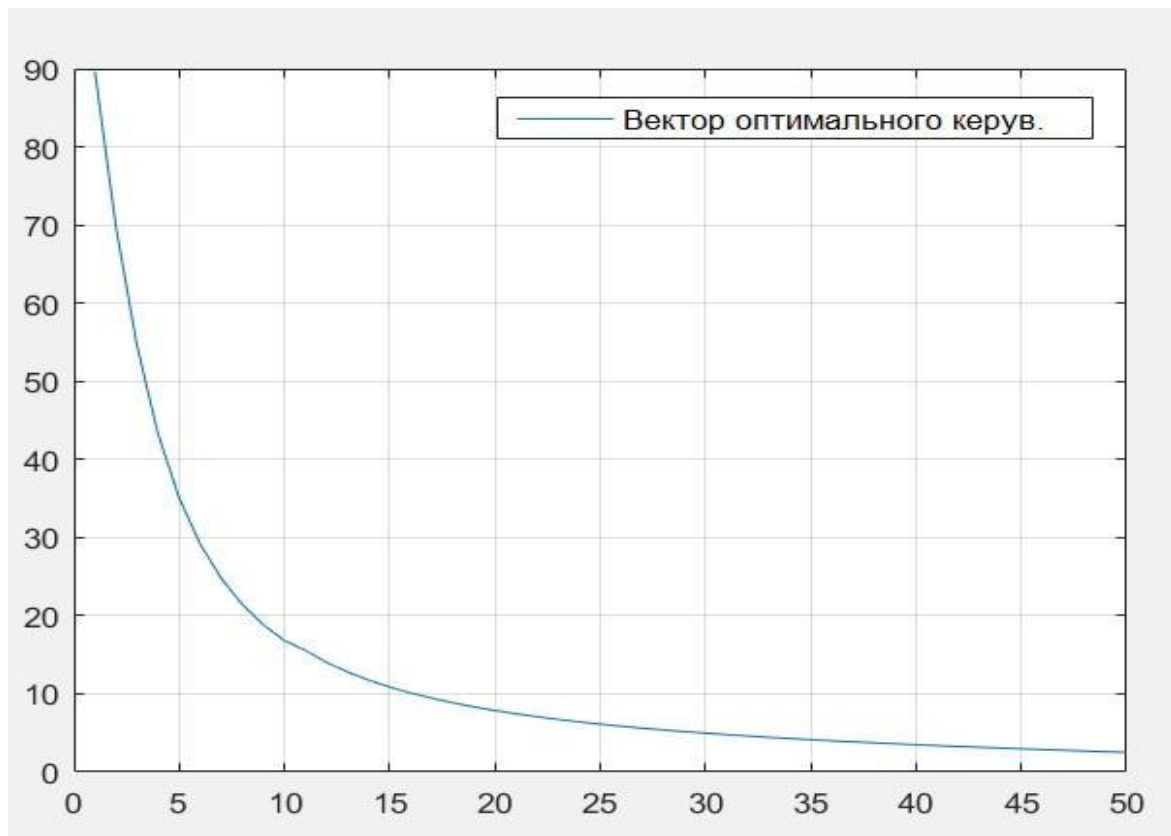


Рис. 2.6 Вектор оптимального керування

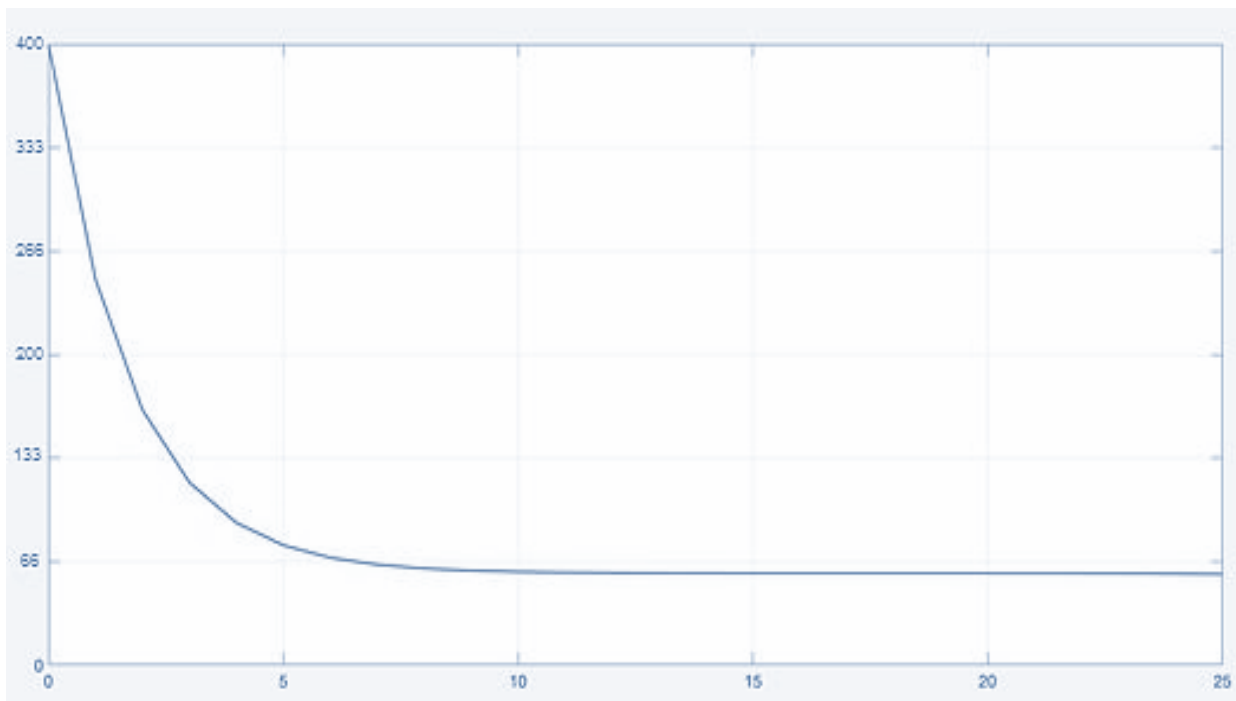


Рис. 2.7 Зміна  $\lambda_1$

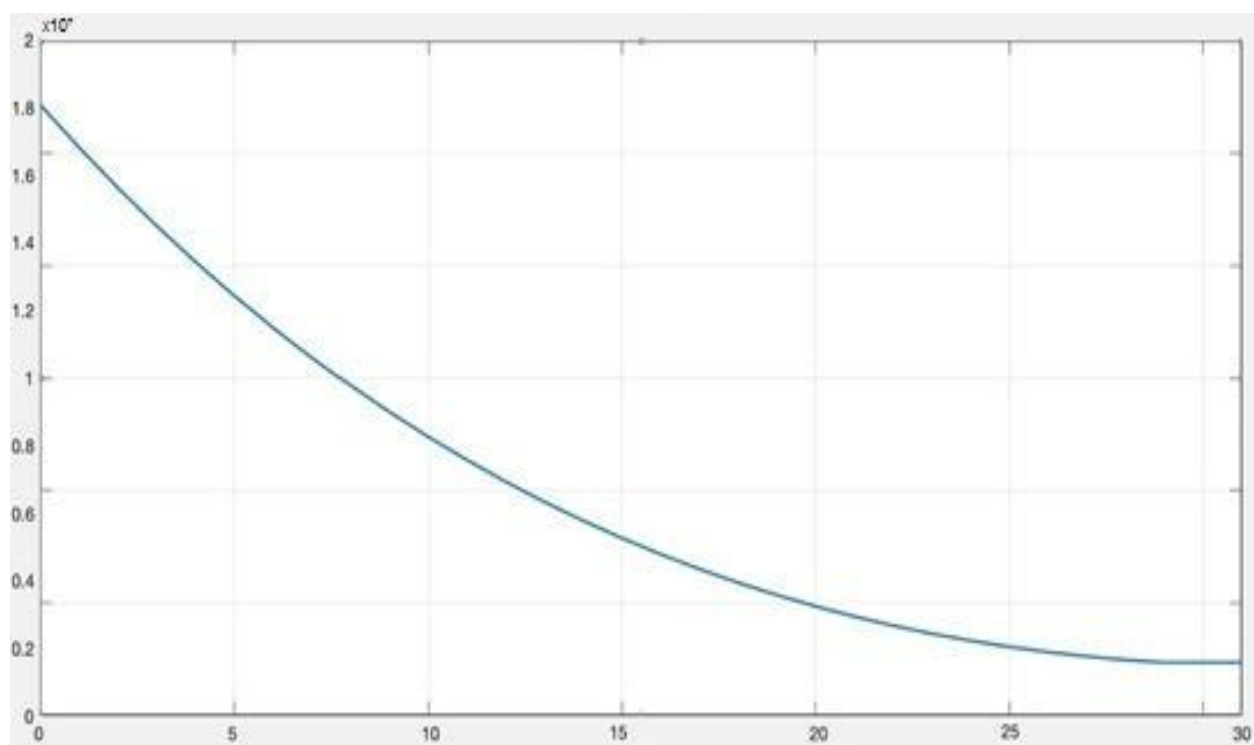


Рис. 2.8 Зміна  $\lambda_2$

### 3. Синтез системи керування

#### 3.1. Розрахунок оптимального керування зі зворотнім зв'язком з квадратичним критерієм якості.

Класичний оптимальний лінійний регулятор представлено наступним чином [12]:

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

де

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

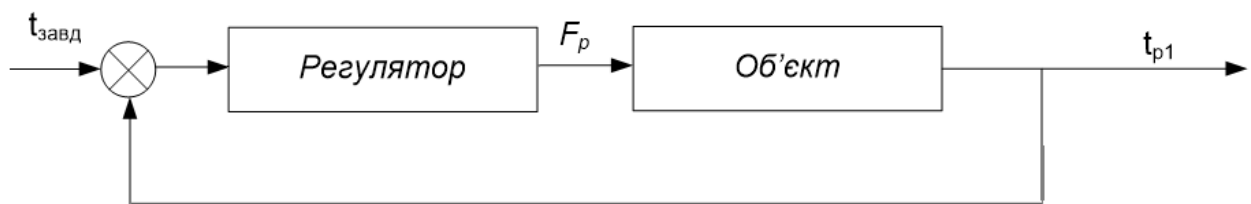


Рис.3.1 Структурна схема контуру керування

Отримані залежності, описують лінійний оптимальний регулятор із матричним коефіцієнтом підсилення  $K$ . Такий регулятор забезпечує мінімізацію критерію вздовж траєкторій системи за таких умов [12]:

1. Матричний коефіцієнт підсилення  $K$  може бути визначеним за межами контуру керування, виходячи з того, що він не є залежним від  $X$  та  $U$ ; визначення  $K$  відбувається за рахунок вирішення рівняння Ріккати у зворотному часі.

2. Якщо матриці  $A$ ,  $B$ ,  $R$ ,  $Q$  є постійними при  $t \rightarrow \infty$ , матриця  $P$  буде прямувати до усталеного значення, яке отримують після вирішення нелінійне алгебраїчне матричне рівняння:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

Що у свій момент свою відповідає за сталість матричного коефіцієнту підсилення регулятора  $K$  [12].

3. Зміст критерію якості полягає у наступному: квадратичне зваження кінцевого стану дає змогу забезпечити бажану якість керування, натомість квадратичне зваження керуючої дії обґрунтовано по іншому, як приклад низької вартості ресурсів [12]. У деяких випадках квадратичне зваження

представляє межі величини керуючих дій та дає можливість створити оптимальний закон зворотного зв'язку в аналітичній формі. Водночас надто великі значення вагової матриці  $R$  може спричинити відхилення кінцевого стану системи від заданого, тоді як занадто малі – призводить до надмірно великих значень  $U$  [13]. Основним обмеженням виступає вимоги додатної визначеності матриці  $R$  і неможливість явно задати обмеження на змінні  $X, U$ .

#### 4. Розглянемо більш ширший критерій якості

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

Були враховані взаємозв'язки між керуваннями та станом, однак відповідно оптимальний регулятор продовжує визначається формулою із використанням коефіцієнту підсилення:

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

До оптимального лінійно квадратичного регулятора висувається ряд вимог:

1. матриці  $A, B$  мають бути абсолютно керовані;
2. по відношенню до  $0$ , нерівності повинні бути істинні  $R > 0, Q - NR^{-1}N^T \geq 0$ ;
3. дві матриці  $[Q - NR^{-1}N^T, A - BR^{-1}N^T]$  не можуть мати спостережувані моди із відповідними значеннями на дійсній осі.

Зазначимо, що під час практичної реалізації алгоритмів оптимального керування не завжди вдається отримати точно оптимальні характеристики оптимізації [13]. Це зумовлено тим, що при створенні вихідної математичної моделі керованого процесу зазвичай застосовують наближені або апроксимовані моделі, які враховують лише основні домінуючі зв'язки, але все ж відрізняються від реальних умов. У практичних ситуаціях похибка алгоритмів оптимізації може збільшуватися, як приклад якщо працювати із великими часовими інтервалами, що призводить до втрати їх стійкості. Нестійкість таких алгоритмів пов'язана з умовами реалізації рівняння Ріккати, розв'язок якого втрачає властивість симетричності [13].

Комп'ютерна реалізація оптимального лінійно-квадратичного регулятора [14]:

```
disp('Matrix A:')
A= -0.018; 0.0033; 11.2517; -11.337] % Input matrix A
disp('Matrix B:')
B = [4.704; 582.7664] % Input matrix B
% Quality criterion parameters:
disp('Matrix Q:')
Q = eye(2) % Unit matrix formation
disp('Matrix R:')
R = 1 % Input matrix R
disp('Matrix N:')
N = [] % Input matrix N
disp('Vector of initial conditions X0:')
x0 = [373 0.073]' % Initial conditions vector assignment
disp('Vector of setpoint deviations Xd:')
xd = [386 0.073]' % Deviation setpoint vector assignment
disp('Vector of setpoint deviations of control Ud:')
ud = 0.7 % Deviation setpoint control values
disp('Observation time tf:')
tf = 6 % Assignment observation time
disp('Step length dt:')
dt = 0.01 % Step length task
disp('Number of steps n:')
n = tf/dt
[K P E] = lqr(A,B,Q,R,N); % Controller synthesis
disp('Feedback matrix K:'); K
disp('Solution of Riccati equation P:'); P
disp('Eigenvalues of closed-loop system E:'); E
% Determination of the dimension of the problem
```

```

SA = size(A); SA = SA(1); SB = size(B); SB = SB(2);
% Formation of vectors x u
x = zeros(SA,n); u = zeros(SB,n-1);
% Formation of the initial state
x(:,1) = x0;
% Finding the optimal control u and state variables 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
% State variable dynamics subplot
f1 = figure;
f2 = figure;
plot(0:dt:tf-dt,x(1,:)), grid % x(1,:)
title('Dynamics of state variable motion');
xlabel('Time, t');
ylabel('State variables, X(t)');
figure(f1)
% Construction of the control vector
plot(dt:dt:tf-dt,u), grid
title('Dynamics of control change'); xlabel('Time,t'); ylabel('Control, U(t)');
legend('u')
figure(f2)

```

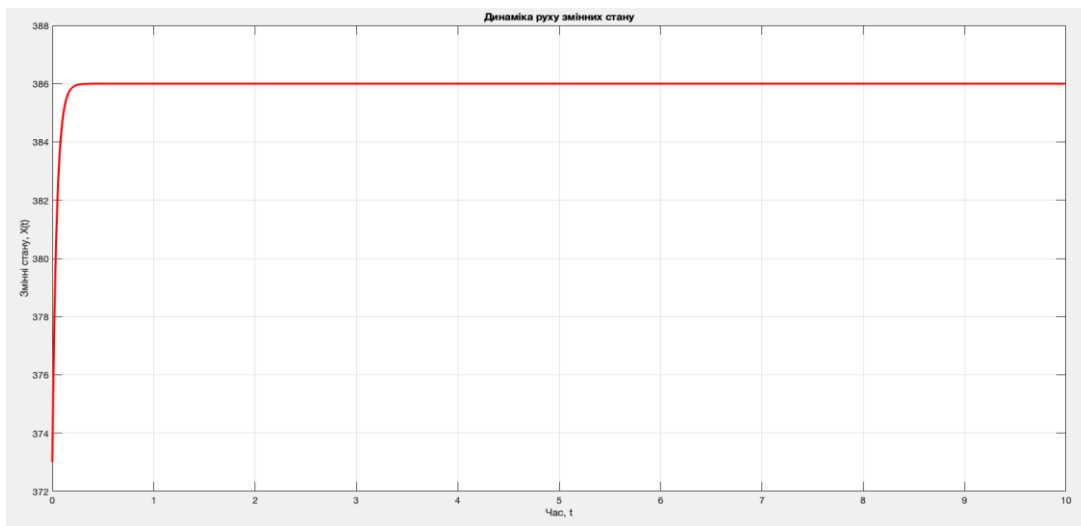


Рис.3.2 Динаміка руху змінних стану з ЛКР

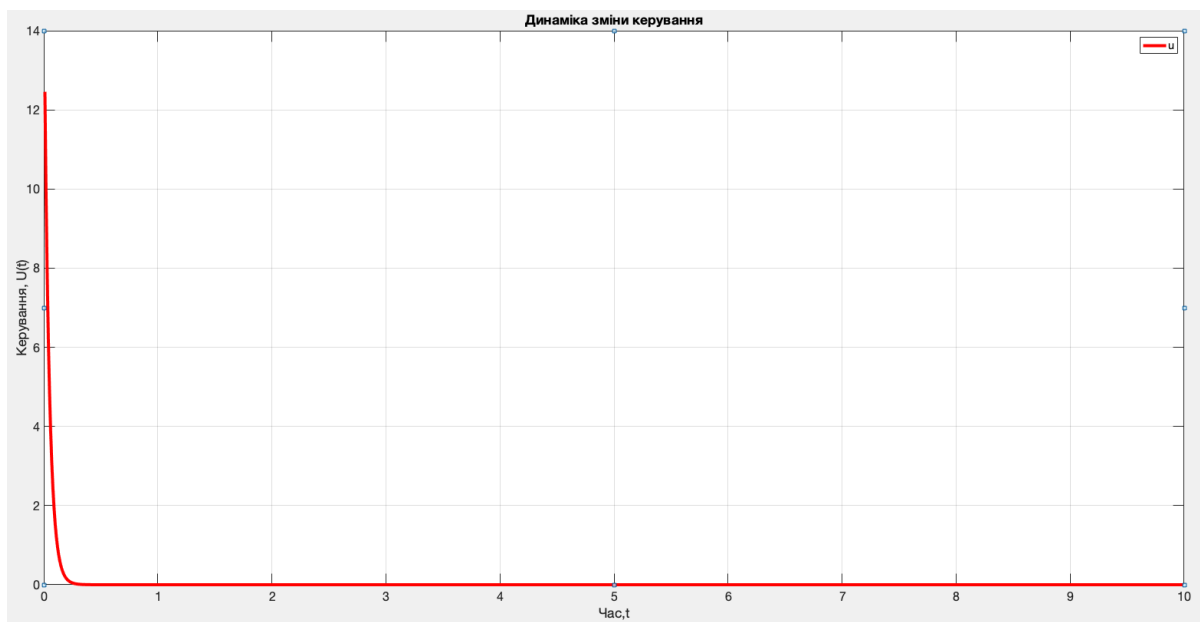


Рис.3.3 Динаміка руху змінних керування з ЛКР

### 3.2. Проектування оптимального лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою

В дисертації проведено розрахунок процесу оптимального керування зі зворотнім зв’язком з інтегральною складовою [13].

Результат синтезу оптимального квадратичного закону регулювання для лінійної системи, будуть мати розв’язки, що лінійними регуляторами. Дані регулятори дають змогу привести до нуля, з проходженням по таймінгу, вплив

на вихід об'єкту керування, при початкових умов, що не є нульовими або короткострокових імпульсних впливів. За умови стабільних чи погано зміненого вхідного впливу, то такі регулятори не будуть відповідати вимогам відповідно 0 відхилень керуючих величин від усталених значень. За для того, щоб вони відповідали поставленій задачі, закон керування повинен містити в собі пару складових, що відповідають умові залежності від вектору стану та від інтегралу вектору стану [13].

Необхідно постановку задачі синтезу сформулювати так, щоб у керуванні містилась інтегральна складова, що буде зменшувати похибки керування [14].

Розглянемо алгоритм розрахунку оптимального ЛК-регулятора з інтегральною складовою:

```
disp('Matrix A:')
A= [-0.018; 0.0033; 11.2517; -11.337] % Input matrix A
disp('Matrix B:')
B = [4.704; 582.7664] % Input matrix B
% Quality criterion parameters:
disp('Matrix Q:')
Q = eye(2) % Unit matrix formation
disp('Matrix R:')
R = 1 % Input matrix R
disp('Matrix N:')
N = [] % Input matrix N
disp('Vector of initial conditions X0:')
x0 = [373 0.073]' % Initial conditions vector assignment
disp('Vector of setpoint deviations Xd:')
xd = [386 0.073]' % Set setpoint vector
disp('Vector of setpoint deviations Ud:')
ud = 0.7 % Set control value deviations
disp('Observation time tf:')
```

```

tf = 6 % Observation time setting
disp('Step length dt:')
dt = 0.01 % Step length setting
disp('Number of steps n:')
n = tf/dt
disp('Matrix A1:')
A1 = [zeros(2) eye(2); zeros(2) A] % Formation of matrix A1
disp('Matrix B1:')
B1 = [zeros(2,1); B] % Formation of matrix B1
disp('Matrix Q1:')
Q1 = [Q zeros(2); zeros(2) zeros(2)] % Formation of matrix Q1
[K P E] = lqr(A1,B1,Q1,R,N); % Controller synthesis
disp('Feedback matrix:'); K
disp('Solution of the Riccati equation:'); P
disp('Eigenvalues of the closed-loop system:'); E
% Determination of the dimension of the problem
SA = size(A); SA = SA(1); SB = size(B); SB = SB(2); SK = size(K); SK =
SK(2);
% Formation of vectors x, u and v
x = zeros(SA,n); u = zeros(SB,n-1); v = zeros(SA,n);
% Formation of the initial state
x(:,1) = x0;
% Separation of the proportional and integral parts of the matrix K
for i=SK/2:SK,
K2(i) = K(i);
end
for i=1:SK/2,
K1(i) = K(i);
K2(1) = [];
end

```

```

% Finding the optimal control u and state variables x
for i=1:n-1,
v(:,i) = v(:,i)+K1*x(:,i)*dt;
u(:,i) = ud-K2*(x(:,i)-xd)+v(i);
x(:,i+1) = (A*(x(:,i)-xd)+B*(u(:,i)-ud))*dt+x(:,i);
end

% Building the dynamics of the state variables
f1 = figure ;
f2 = figure ;
plot(0:dt:tf-dt,x(1,:)), grid
title('Dynamics of the motion of state variables');
xlabel('Time, t');
ylabel('State variables, X(t)');
figure(f1)

% Construction of the control vector
plot(dt:dt:tf-dt,u), grid
title('Dynamics of control change'); xlabel('Time,t');
ylabel('Control, U(t)'); legend('u')
figure(f2)

```

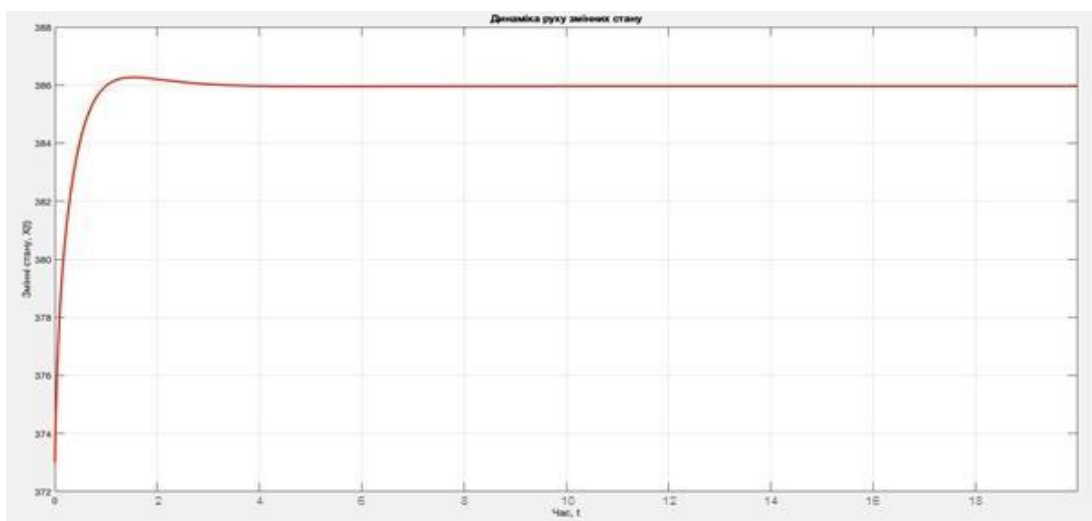


Рис.3.4 Динаміка руху змінних стану з ЛКР з інтегральною складовою

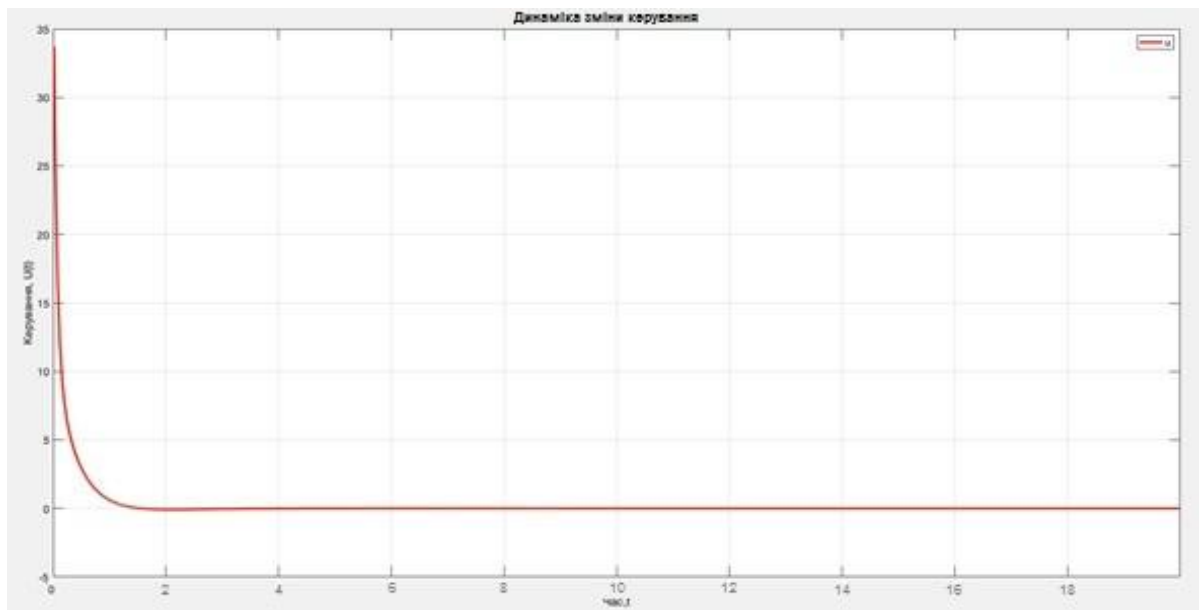


Рис.3.5 Динаміка руху змінних керування з лінійно-квадратичним регулятором з інтегральною складовою

### 3.3.Порівняння результатів отриманих для оптимального керування зі зворотнім зв'язком

Проведемо порівняльний аналіз отриманих результатів

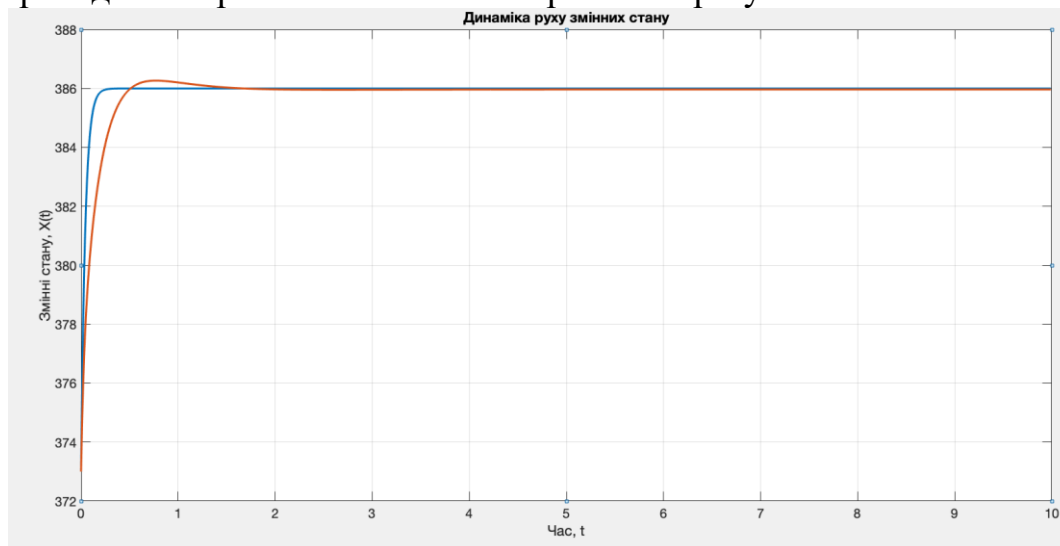


Рис.3.6 Графіки зміни змінних стану

З порівняльного рисунку 3.6. випливає, що використання ЛК-регулятора з інтегральною складовою при розрахунку оптимального керування для системи зі зворотнім зв'язком призводить до збільшення якості керування технологічним процесом [15].

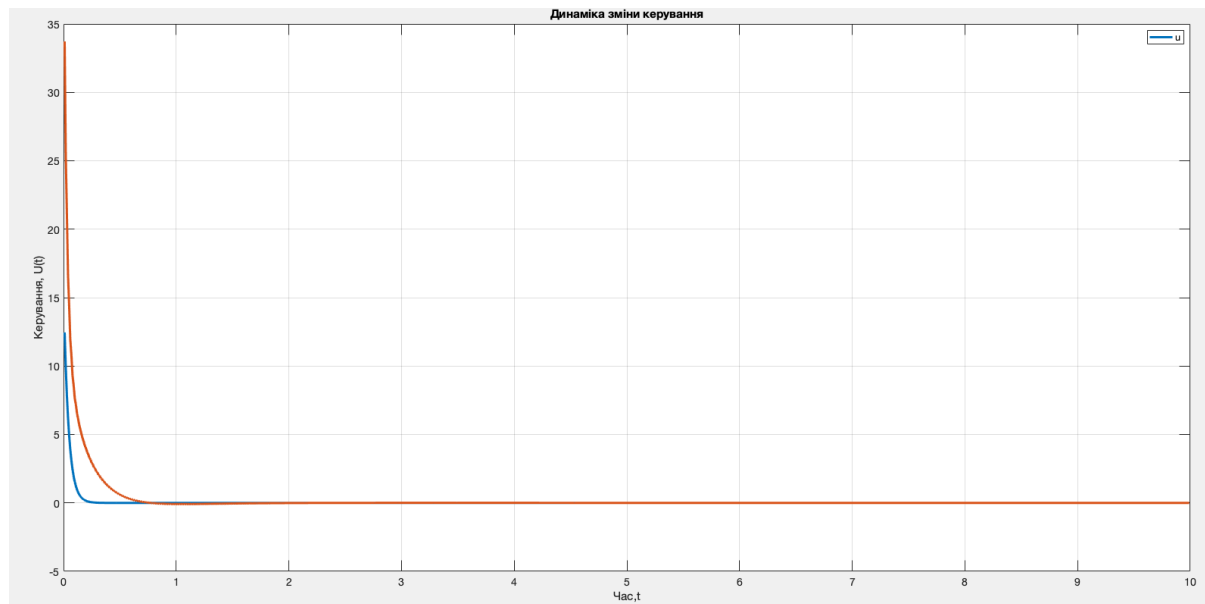


Рис.3.7 Графіки зміни керувань

Розв'яжемо алгебраїчні рівняння Ріккати з використанням класичних методів, що представлені у М – файлі:

```
A = [-0.018; 0.0033; 11.2517; -11.337] ; % Input matrix A
```

```
B = [4.704; 582.7664]'; % Input matrix B
```

```
Q = eye(2); % Input matrix Q
```

```
N = 10;
```

```
R = 1;
```

```
t = 0.015;
```

```
[X] = func(A,B,Q,N,R,t);
```

```
function [X] = func(A,B,Q,N,R,t)
```

```
X(N) = {zeros(2)};
```

```
for i=N:-1:2
```

```
    X{i-1} = X{i} - t.*(-X{i}.*A - (A.')*X{i} + X{i}.*B.*(R^-1).*(B.')*X{i} - Q);
```

```
end
```

```
end
```

P =

1.6378 -1.4909 0.0041  
 -1.4909 1.3573 -0.0037  
 0.0041 -0.0037 0.0000

L =

-9.0805  
 -0.0251  
 -0.0450

G =

-381.5753 349.515 0.0321

### 3.4. Керування за мінімальним часом обмежені на керування

При розрахунку керування за мінімальним часом необхідно виступає використання теореми про  $N$  інтервалів переключення [15], та обрахувати час переключення.

Представимо критерій оптимальності:

$$I = \frac{1}{2} S_{11} [\Theta_{\text{ч}}(t_f) - \Theta_{\text{чзад}}]^2 + \frac{1}{2} S_{22} [G_{\text{п}}(t_f) - G_{\text{пзад}}]^2 + t_f$$

Вводимо на керування  $F_p$ :

$$F_{p.min} \leq F_p \leq F_{p.max}$$

$$F_{p.max} - F_p \geq 0$$

$$F_p - F_{p.min} \geq 0$$

Представимо критерій оптимальності із врахуванням обмежень:

$$I = \frac{1}{2} S_{11} [\Theta_{\text{ч}}(t_f) - \Theta_{\text{чзад}}]^2 + \frac{1}{2} S_{22} [G_{\text{п}}(t_f) - G_{\text{пзад}}]^2 + t_f + \\ + \int [q(F_{p.max} - F_p)(F_p - F_{p.min})H(g_1 g_2)] dt$$

Функція Гамільтона набуватиме вигляду [13]:

$$H = q(F_{p.max} - F_p)(F_p - F_{p.min})H(g_1 g_2) + \lambda_1(a_{11}\Theta_{\text{ч}} + a_{12}G_{\text{п}} + bF_p) + \\ + \lambda_2(a_{11}\Theta_{\text{ч}} + a_{12}G_{\text{п}})$$

Розпишемо відповідні умови оптимальності:

$$\lambda'_1 = -\frac{\partial H}{\partial t_{p1}} = -\lambda_1 a_{11} - \lambda_2 a_{21}$$

$$\lambda'_2 = -\frac{\partial H}{\partial t_{B1}} = -\lambda_1 a_{12} - \lambda_2 a_{22}$$

$$\frac{\partial H}{\partial F_p} = -2qF_p H(g_1 g_2) + qF_{p.max} F_p H(g_1 g_2) + qF_{p.min} F_p H(g_1 g_2) + \lambda_1 b$$

$$\lambda_1(t_f) = S_{11}(\Theta ч(t_f) - \Theta чзад)$$

$$\lambda_2(t_f) = S_{22}(Gп(t_f) - Gпзад)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t_f} = 1 + S_{11}(\Theta ч(t_f) - \Theta чзад)\Theta ч'(t_f) + S_{22}(Gп(t_f) - Gпзад)Gп'(t_f) + \\ + q(F_{p.max} - F_p)(F_p - F_{p.min})H(g_1 g_2) = 0 \end{aligned}$$

Розраховуємо час переключення  $\tau_s$  та представимо графічно лінії переключення.

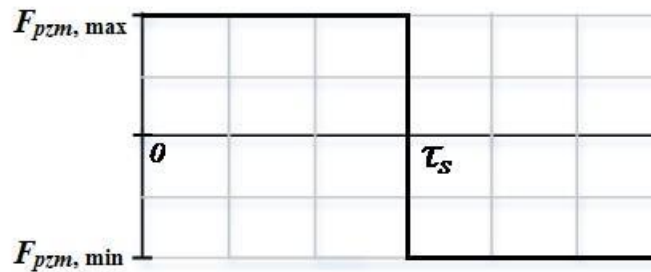


Рис.3.8 Лінії переключення

Час переключення обчислюється:

$$\tau_s = -\frac{\lambda_2(t_f)}{\lambda_1(t_f)} = -\frac{S_{22}(Gп(t_f) - Gпзад)}{S_{11}(\Theta ч(t_f) - \Theta чзад)}.$$

Лінія переключення керування:

$$\zeta(\tau) = \int_0^r e^{-A(\tau-p)} b \operatorname{sign}[\lambda^T(t_f) e^{Apb}] dt$$

В даному випадку  $[\lambda^T(t_f) e^{Apb}] = 0$  - це точка переключення.

Розрахуємо для знаходження часу та лінії переключення Отриманий результат представимо графічно [15].

$$S_{11} = 0.0001$$

$$S_{22} = 0.0001$$

$$Q = 1$$

$$N = 60$$

В результаті проведених обрахунків, час переключення відповідає 30.

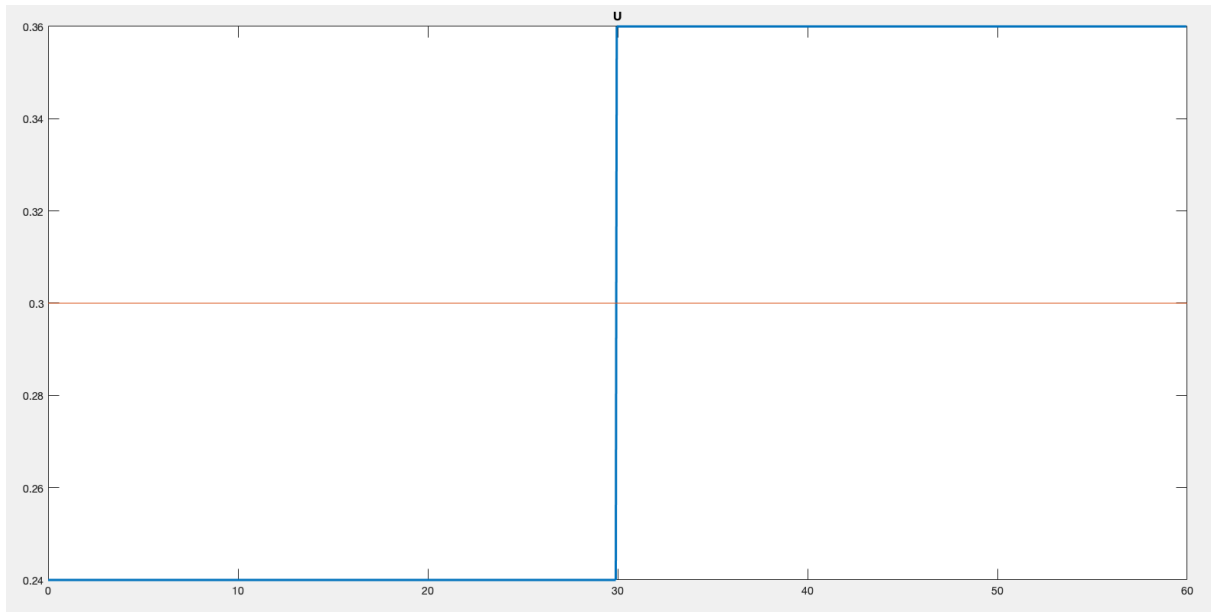


Рис.3.9 Лнії переключення

Після проходження 30сек система виходить на усталений рівень, значить переключення не треба коригувати [15].

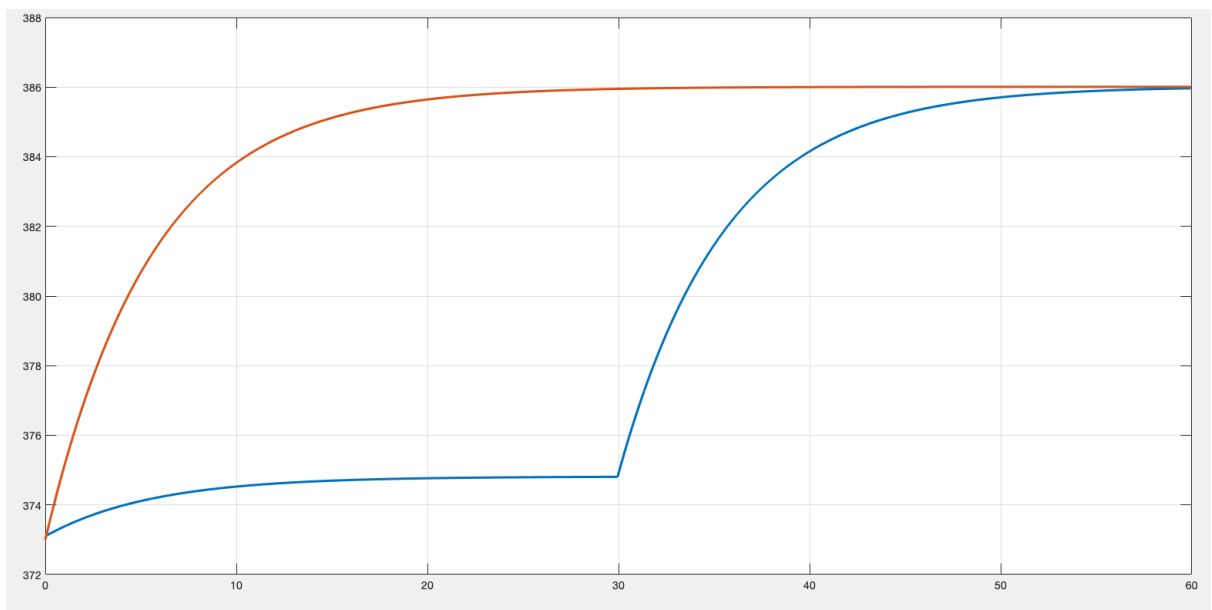


Рис.3.10 Зміна змінних стану до та після переключення

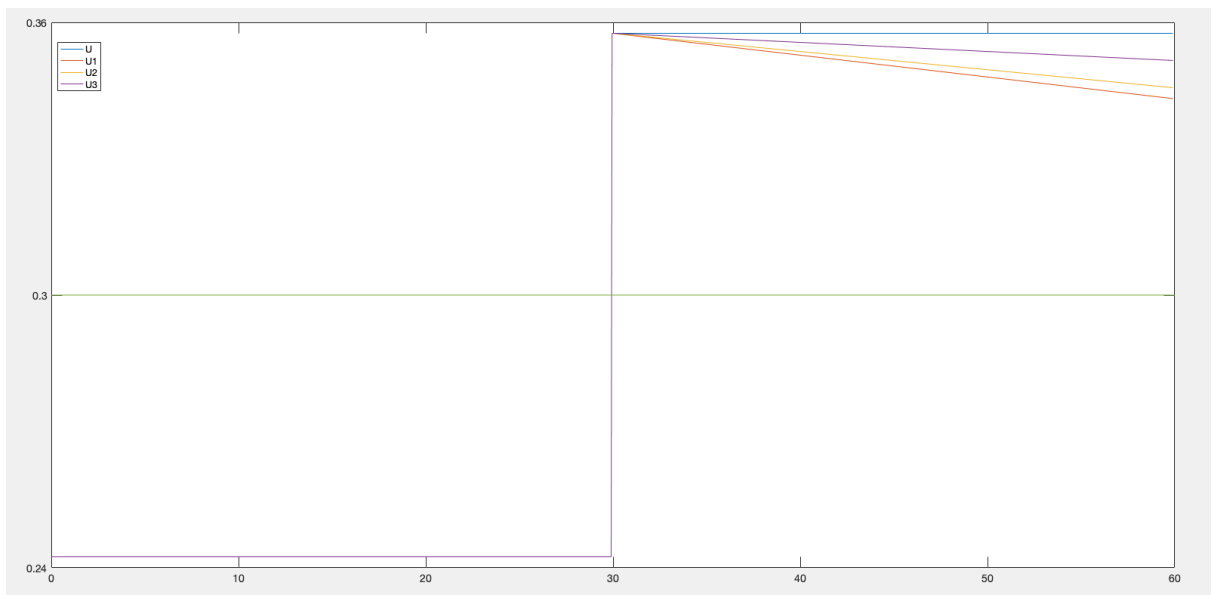


Рис.3.11 Зміна керування витратою

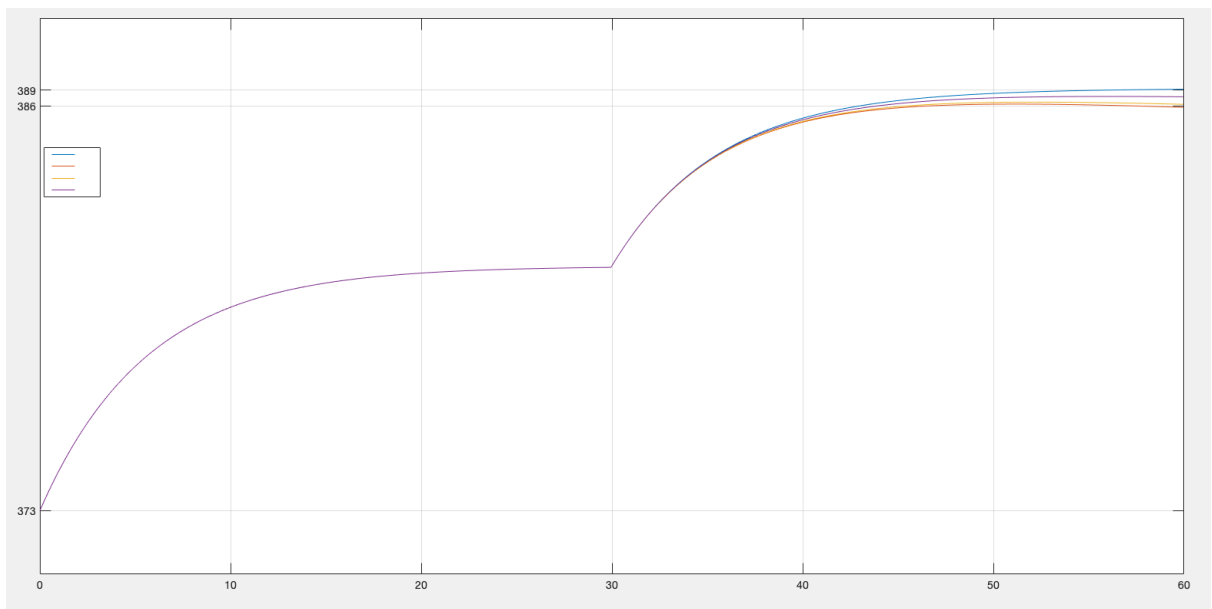


Рис.3.12 Зміни температури при етапах керування

## 4. РОЗРОБКА СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 4.1. Розробка функціональної схеми автоматизації

Об'єкт автоматизації та контрольовані параметри

Об'єктом автоматизації є флотаційна дільниця виробництва хлориду калію, що включає [15]:

- Відділення підготовки пульпи (помел + приготування пульпи)
- Дозування реагентів-збирачів і піноутворювачів
- Грубу флотацію
- Перечищення концентрату
- Довилучення сильвіну з хвостів
- Згущення та зневоднення концентрату
- Сушіння готового продукту

Таблиця 4.1. Основні параметри процесу, що потребують автоматичного контролю

| Параметр                        | Засіб вимірювання                     | Регулюючий вплив                 |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Густина пульпи                  | датчик DensFlow /<br>Coriolis         | витрата води, швидкість<br>млина |
| Рівень у флотаційних<br>камерах | ультразвукові рівнеміри               | заслінки/клапани скиду<br>пульпи |
| Повітряна подача                | витратомір + VFD<br>компресора        | частотний привід                 |
| Дозування збирачів              | масовий витратомір +<br>насос-дозатор | частота насоса-дозатора          |
| Температура                     | термопари                             | підігрів/охолодження             |

| Параметр                                | Засіб вимірювання | Регулюючий вплив                  |
|-----------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Швидкість мішалки<br>флотаційної машини | датчик обертів    | частотний перетворювач<br>мішалки |

До основних технологічних параметрів, що підлягають автоматизації, належать:

| Дільниця              | Контрольований параметр                                  | Датчик / засіб контролю                                   |
|-----------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Приготування<br>ропи  | Температура, густина, рівень                             | Термоперетворювач, ареометр з<br>перетворювачем, рівнемір |
| Флотаційні<br>машини  | Витрата повітря, рівень<br>пульпи, подача реагентів      | Витратомір, ультразвуковий<br>рівнемір, дозатор реагентів |
| Згущувач              | Рівень пульпи, густина<br>суспензії                      | Гідростатичний рівнемір,<br>радіометричний густиномір     |
| Сушильна<br>установка | Температура агента сушіння,<br>швидкість подачі продукту | Термопара, ваговий дозатор                                |
| Складування           | Вологість концентрату                                    | Вологомір інфрачервоного типу                             |

Система автоматичного контролю повинна забезпечувати точність вимірювання та стійкість регуляції, оскільки навіть незначні відхилення можуть спричинити втрати КСІ у хвостах або перевитрати реагентів [15].

Загальні принципи побудови системи автоматизації.

Автоматизація процесу отримання КСІ спрямована на забезпечення стабільності технологічних режимів флотації, зменшення втрат сільвіну з хвостами, оптимізацію витрат реагентів, підвищення продуктивності обладнання

та поліпшення якості готового концентрату [16].

В умовах сучасного виробництва управління технологічним процесом здійснюється в режимі АСУТП (автоматизована система управління технологічним процесом), що включає [17]:

- Польові датчики та первинні перетворювачі
- Контролери PLC Siemens S7-1500
- Панельні оператори HMI Siemens KTP700/1200
- SCADA-систему WinCC Runtime Advanced / WinCC Professional
- Промислову мережу PROFINET / PROFIBUS DP
- Сервер архівації даних
- Автоматизоване робоче місце оператора (АРМ)

Таблиця 4.2. АСУТП працює за принципом ієрархічного керування:

| Рівень          | Опис                                                             |
|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| Верхній рівень  | SCADA, архівування, візуалізація, історія трендів, звітність     |
| Середній рівень | ПЛК S7-1500, логічне керування, регулювання                      |
| Нижній рівень   | Датчики, виконавчі механізми, частотні перетворювачі, вимірювачі |

Вибір технічних засобів автоматизації [17]

Для реалізації АСКТП застосовуються наступні технічні засоби:

- Датчики тиску та рівня — для контролю стану пульпи у флотаційних камерах.
- Електромагнітні або вихрові витратоміри — для вимірювання витрати ропи та повітря.
- Кондуктометри та рефрактометри — для контролю концентрації солей у

розчинах.

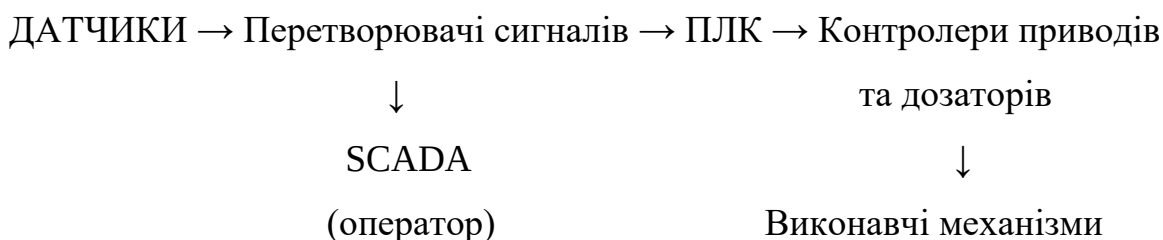
- Дозатори реагентів з електроприводом — для регульованої подачі флотаційних агентів.

Програмований логічний контролер (ПЛК) — ядро системи керування [18].

SCADA-система — для візуалізації, архівації та диспетчерського керування.

В якості комунікацій між обладнанням застосовують промислові протоколи (MODBUS, Profibus, Ethernet/IP).

Структурна схема автоматизованої системи



Оператор здійснює контроль і зміну режимів через панель або автоматизоване робоче місце (АРМ).

Функціональна схема автоматизації процесу флотації

Керування здійснюється відповідно до таких принципів:

- PID-регулювання подачі повітря для підтримання висоти піни.
- Автоматичне дозування реагентів за сигналом концентраційних датчиків.
- Стабілізація рівня пульпи у флотаційних камерах за допомогою регулюючих клапанів.
- Регулювання температури ропи у теплообмінниках:
- Датчики реєструють висоту піни та концентрацію KCl у піні.
- ПЛК порівнює параметри з заданими значеннями.

Якщо піна низька → збільшується подача повітря і, за потреби, реагенту.

Якщо у хвостах підвищується вміст KCl → зменшується витрата повітря або змінюється дозування реагенту [17].

Інформація передається на SCADA, де оператор може коригувати режими.

Вибір контролера та обґрунтування.

Для автоматизації обрано Siemens S7-1500, оскільки він забезпечує [18]:

- високу надійність у середовищі з пилом, вібраціями та підвищеною вологістю;
- підтримку промислових мереж PROFINET/PROFIBUS;
- просту інтеграцію з WinCC SCADA;
- широкі можливості для PID-регулювання, збору статистики та оптимізації процесу.

Модель контролера: S7-1513-1 PN

Дискретні модулі: SM DI 16×24VDC / SM DO 16×24VDC

Аналогові модулі: SM AI 8×4–20 мА / SM AO 8×4–20 мА

Виконавчі механізми та частотні приводи

Частотні приводи.

Siemens G120 для управління:

- мішалками флотаційних машин,
- насосами перекачування пульпи,
- компресорами повітря.

Клапани і регулюючі органи:

- Електропневматичні клапани SAMSON / FESTO
- Засувки з електроприводом AUMA

Таблиця 4.3. Розробка контурів автоматичного регулювання

| Контур регулювання | Регульована величина | Датчик   | Виконавчий орган   | Алгоритм |
|--------------------|----------------------|----------|--------------------|----------|
| Контур густини     | Густина пульпи       | DensFlow | Клапан подачі води | PID      |
| Контур рівня       | Рівень               | у УЗ-    | Шибер скиду        | PID      |

|                           |                      |            |                         |          |
|---------------------------|----------------------|------------|-------------------------|----------|
| Контур регулювання        | Регульована величина | Датчик     | Виконавчий орган        | Алгоритм |
|                           | флотаційній камері   | рівнемір   |                         |          |
| Контур дозування реагента | Витрата реагента     | Mass-flow  | Частота насоса-дозатора | PID      |
| Контур повітря            | Об'єм повітря        | Витратомір | Частотник компресора    | PI       |
| Контур сушіння            | Температура          | Термопара  | Пальник сушарки         | PID      |

Ці контури забезпечують стабільність піноутворення, якість концентрату та мінімізацію втрат KCl.

#### 4.2. Розробка SCADA-системи

На SCADA реалізовано WinCC [18]:

- Головний мнемосхематичний екран
- Підекранні вікна для:
- дозування реагентів,
- флотаційних камер,
- сушіння,
- транспортних систем
- Архіви трендів параметрів за добу / тиждень / місяць

Система звітності щодо витрат реагентів і продуктивності

Сигналізація та журнал тривог

Оператор взаємодіє з процесом через сенсорну панель Siemens KTP1200 або APM на SCADA-станції [17, 18].

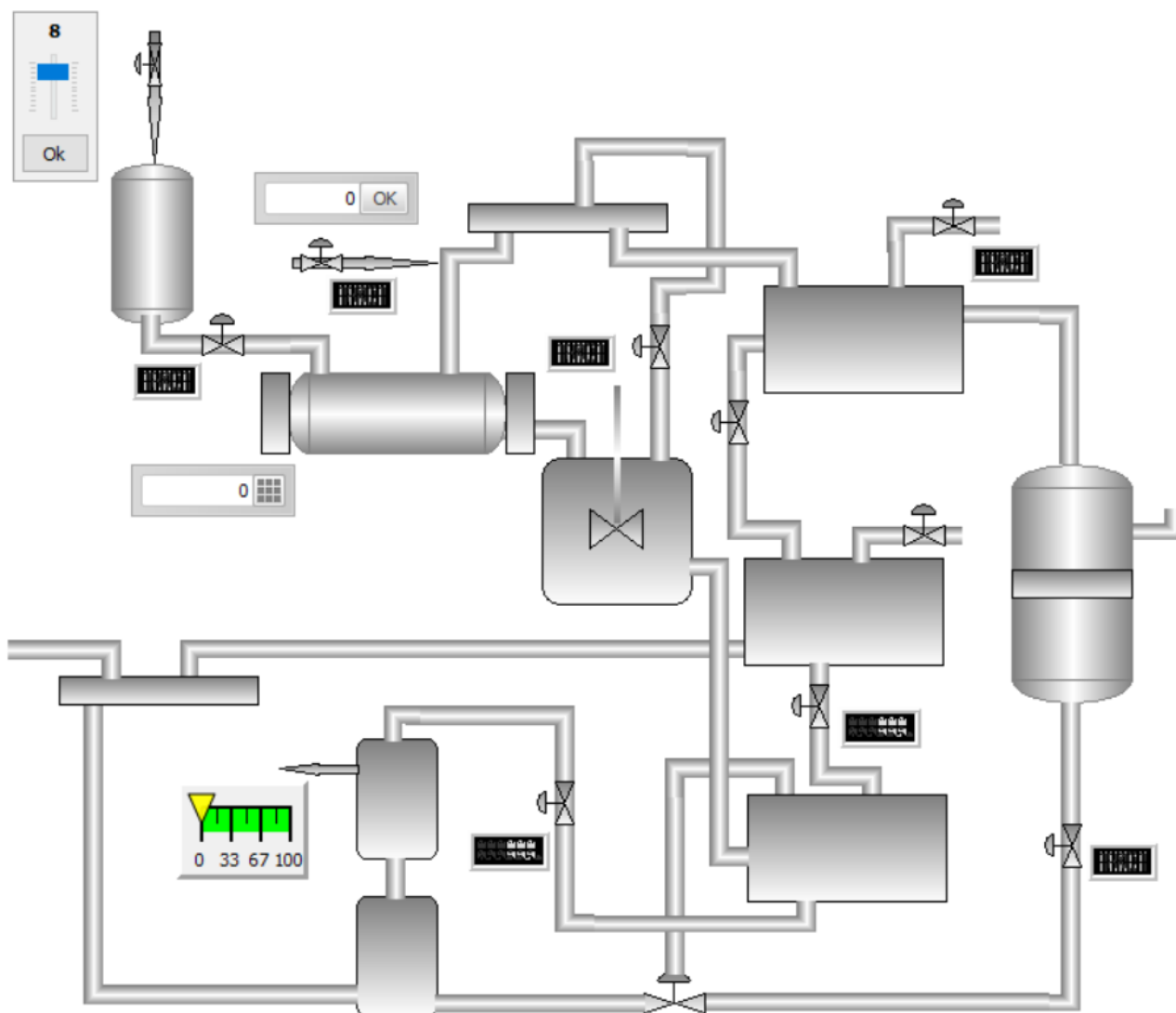


Рис.4.1 Приклад побудови SCADA - системи

Розроблена система автоматизації на базі Siemens S7-1500 та SCADA WinCC забезпечує:

- стабільну якість кінцевого продукту;
- зменшення втрат KCl на 8–12%;
- економію реагентів до 14%;
- скорочення енергоспоживання насосів і компресорів до 10–15%;
- можливість дистанційного контролю та оптимізації технології.

Це дозволяє підвищити економічну ефективність виробництва та його екологічну безпечність.

Режими сигналізації та захисту [16]

Система передбачає:

- Аварійну зупинку обладнання при перевищенні рівня пульпи.
- Сигналізацію при нестабільності піни або втраті тиску повітря.
- Блокування запуску сушильного барабана при відсутності тяги.
- Це гарантує безпеку виробничого процесу та знижує ризик аварій.

Додаткові нематеріальні вигоди [17]

Впровадження АСКТП забезпечує:

- підвищення стабільності якості готового продукту;
- зменшення числа позапланових зупинок обладнання;
- зниження навантаження на персонал;
- зменшення ризику аварійних ситуацій;
- покращення умов праці та безпеки.

Крім того, зменшення коливань технологічних режимів призводить до зниження споживання реагентів на 5–12%, що додатково скорочує експлуатаційні витрати.

## **5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ**

### **5.1 Поняття стартап-проєкту**

Стартапом називають нещодавно створені компанії, які були створені задля розробки унікального продукту чи надання послуги. Стартап-проєкти створюють, ґрунтуючись на інноваційних методах, продукти які мають на меті усунення недоліків конкурентних варіантів. Вони можуть займатися різними видами діяльності, такими як розробка і виробництво продуктів або послуг, надання послуг, торгівля тощо. Можуть бути спрямовані на різні цільові ринки, такі як споживачі, бізнеси, уряди тощо [19].

### **5.2 Опис ідеї проєкту**

Ідея стартапу полягає в тому, щоб автоматизувати виробництво хлориду калію за допомогою робототехніки, машинного навчання та штучного інтелекту для підвищення ефективності, зниження витрат, підвищення безпеки та покращення контролю якості [19].

Роботи будуть використовуватися для автоматизації трудомістких завдань, таких як дозування сировини, змішування компонентів та сортування готового продукту. Вони будуть працювати точно та безперервно, що призведе до підвищення ефективності виробництва та зменшення витрат [19].

Для виявлення відхилень від стандартів у процесі виробництва використовуватимуться системи контролю якості з машинним навчанням і штучним інтелектом. Вони будуть користуватися даними, отриманими від роботів, систем контролю виробництва та інших датчиків, для підвищення точності та ефективності контролю якості [19].

Перевагами такого проєкту будуть:

1. Підвищення ефективності виробництва та зниження витрат на оплату праці шляхом автоматизації трудомістких завдань. Це звільняє працівників для більш складних завдань, таких як контроль якості та управління виробництвом.

2. Зменшення витрат на електроенергію та інші ресурси. Наприклад, автоматичний контроль виробничого процесу дозволяє економити енергію, а використання сучасного обладнання знижує витрати на сировину.

3. Зниження ризику нещасних випадків, пов'язаних з людським фактором. Наприклад, за допомогою автоматичного керування системою можна уникнути помилок, які можуть призвести до вибуху чи пожежі.

4. Поліпшення контролю якості кінцевої продукції. Відхилення від стандартів можна вчасно виявити, що згодом запобігає випуску неякісної продукції.

### 5.3 Технологічний аудит проєкту

У таблиці 5.1 наведено результати проведення аудиту технологій, які можуть бути використані для реалізації даного проєкту [19].

Таблиця 5.1 – Технологічна реалізація проєкту

| № | Ідея проєкту                                               | Технології для реалізації     | Існування технології | Доступність технології |
|---|------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------|
| 1 | Автоматизація дозування сировини                           | Промислові роботи             | Технологія існує     | Технологія доступна    |
| 2 | Автоматизація розливу готового продукту                    |                               | Технологія існує     | Технологія доступна    |
| 3 | Автоматизація змішування компонентів                       |                               | Технологія існує     | Технологія доступна    |
| 4 | Контроль якості з машинним навчанням та штучним інтелектом | Системи машинного навчання та | Технологія існує     | Технологія доступна    |

|  |  |                       |  |  |
|--|--|-----------------------|--|--|
|  |  | штучного<br>інтелекту |  |  |
|--|--|-----------------------|--|--|

#### 5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску проєкту

У таблиці 5.2 наведено визначені потенційні групи клієнтів створеного стартапу [19].

Таблиця 5.2 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

| <b>Потреби, які формують ринок</b>  | <b>Цільові аудиторії проєкту</b>                                                                                         | <b>Різниця поведінки цільових груп споживачів</b>                                                                                                            | <b>Основні вимоги споживачів</b>                                                                                                                |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Підвищення ефективності виробництва | Підприємства, що виробляють хлориду кальцію та прагнуть підвищити ефективність, зменшити витрати, підвищити безпеку тощо | Виробники, які вже автоматизують виробництво, мають більш високі вимоги до якості та надійності обладнання, а також до доступності сервісного обслуговування | Якість та надійність обладнання та систем автоматизації, доступність сервісного обслуговування, точність та ефективність систем контролю якості |
| Зменшення витрат                    |                                                                                                                          | Виробники, які мають великі обсяги виробництва, мають більш високі вимоги до                                                                                 |                                                                                                                                                 |

|                                      |  |                                                                                                                                       |  |
|--------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                      |  | ефективності<br>автоматизації                                                                                                         |  |
| Підвищення<br>безпеки<br>виробництва |  | Виробники, які<br>працюють з<br>небезпечними<br>хімічними<br>речовинами, мають<br>більш високі<br>вимоги до безпеки<br>обладнання     |  |
| Покращення<br>контролю<br>якості     |  | Виробники, які<br>працюють на<br>експорт, мають<br>більш високі<br>вимоги до точності<br>та ефективності<br>систем контролю<br>якості |  |

У таблицях 5.3 та 5.4 наведено визначені фактори загроз та можливостей [19].

Таблиця 5.3 – Фактори загроз

| <b>Фактор</b>               | <b>Зміст загрози</b>                                                         | <b>Можлива реакції<br/>компанії</b>                                            |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Нестача досвіду в<br>галузі | Створює затримки у<br>розробці, помилки у<br>впровадженні та<br>експлуатації | Навчання команди,<br>залучення експертів з<br>досвідом у відповідній<br>галузі |

|                                                |                                                                                             |                                                                                      |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Невідповідність проекту нормативним документам | Створює небезпеку для життя, а також може призвести до штрафів та інших матеріальних витрат | Вивчення законодавчих та нормативних вимог, внесення змін до проекту за необхідності |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|

Таблиця 5.4 – Фактори можливостей

| Фактор                                 | Зміст можливості                                                                                      | Можлива реакції компанії                                                                    |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Зростання інтересу до сталого розвитку | Рішення, що використовуються у стартапі допомагають зменшити підприємствам споживання енергії та води | Продовження руху в тому ж напрямку, наприклад, використовувати відновлювані джерела енергії |

Далі буде проведено аналіз пропозицій: будуть визначені загальні риси конкуренції на ринку. Для цього складений ступеневий аналіз конкуренції на ринку (таблиця 5.5) [19].

Таблиця 5.5– Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| Особливості конкурентного середовища  | Суть проявлення даної характеристики                                                   | Кроки компанії для підтримки конкурентоспроможності |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Тип конкуренції:<br><i>олігополія</i> | На ринку діє відносно невелика кількість компаній, якій мають значні ресурси та досвід | Забезпечення високої якості продуктів та послуг     |

|                                                            |                                                                                                                                   |                                                                                |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| За рівнем конкурентної боротьби:<br><i>міжнаціональний</i> | Даний стартап може бути втілений на будь-якому підприємстві з відповідної галузі, тож може існувати в різних куточках світу       | Розробка ефективної маркетингової та рекламної кампанії                        |
| За галузевою ознакою:<br><i>внутрішньогалузева</i>         | Спеціалізація стосується лише одного сегменту ринку, а саме розробки рішень для автоматизації виробничого процесу хлориду кальцію | Розробка інноваційних продуктів і послуг, а бо ж робота з іншими виробництвами |
| Конкуренція за видами товарів:<br><i>між бажаннями</i>     | Оскільки автоматизація виробництва є не товаром                                                                                   | Дотримання гнучкості і адаптивності до потреб клієнтів                         |
| За характером конкурентних переваг:<br><i>цінова</i>       | Виникає необхідність змагатися з більш досвідченими компаніями за ціну своїх послуг                                               | Доступність цін для клієнтів, запровадження акцій                              |
| За інтенсивністю:<br><i>марочна</i>                        | Позитивні асоціації з брендом можуть створити попит на послуги, надійну клієнтську базу                                           | Інвестиції в рекламу, створення сильної брендової стратегії                    |

На основі проаналізованої інформації у таблицях 5.1 – 5.5 можна провести аналіз факторів конкурентоспроможності (таблиця 5.6).

Таблиця 6.6 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| <b>Фактор конкурентоспроможності</b>                                                                                                                           | <b>Фактори для порівняння з конкурентами</b>                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Використання новітніх технологій, що не тільки роблять виробництво більш ефективним, але й безпечним для довкілля, що відповідає деяким цілям сталого розвитку | Далеко не всі компанії конкурентів користуються сучасними технологіями, а деякі і взагалі – застарілими |

Проаналізувавши попередні таблиці, можна скласти SWOT-аналіз стартап-проекту (таблиця 5.7), що являє собою матрицю аналізу сильних та слабких сторін, а також загроз та можливостей [19].

Таблиця 5.7 – SWOT-аналіз стартап-проекту

|                                                                                                                |                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Сильні сторони:</b> використання новітніх технологій, гнучкість до потреб клієнта, доступна цінова політика | <b>Слабкі сторони:</b> відсутність сильного маркетингового відділу для конкурування з більш відомими компаніями та обмежені фінансові ресурси |
| <b>Можливості:</b> розвиток у напрямку цілей сталого розвитку, напрацювання постійної клієнтської бази         | <b>Загрози:</b> конкуренція з більш відомими компаніями в питаннях якості та ціни                                                             |

## 5.5 Розробка ринкової стратегії проекту

У таблиці 5.8 наведено базову стратегію конкурентної поведінки.

Таблиця 5.8 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

|                                                                                                           |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                   |                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Чи є проект<br/>«першопрохідцем»<br/>на ринку?</b>                                                     | <b>Чи буде<br/>компанія<br/>шукати нових<br/>споживачів,<br/>або забирати<br/>існуючих у<br/>конкурентів?</b>                      | <b>Чи буде<br/>компанія<br/>копіювати<br/>основні<br/>характеристики<br/>товару<br/>конкурента, і<br/>як?</b>                                                                                     | <b>Стратегія<br/>конкурентної<br/>поведінки</b> |
| Ні, існують<br>аналогічні проекти,<br>але деякі з них<br>можуть<br>поступатися<br>іноваційністю<br>рішень | Компанія буде<br>працювати над<br>задоволенням<br>потреб<br>існуючих<br>клієнтів та<br>напрацьовувати<br>власну<br>клієнтську базу | Враховуючи<br>кількість<br>технологій, що<br>наявні у наш час,<br>то копіювання<br>деяких ідей<br>важко уникнути,<br>але основна увага<br>буде приділятися<br>розробці нових<br>рішень і підходів | Диференціювання<br>продукту                     |

### 5.6 Розробка маркетингової стратегії проекту

У таблиці 5.9 наведено визначені ключові переваги концепції потенційного продукту [2].

Таблиця 5.9 – Визначення ключових переваг концепції потенційного продукту

|                     |                                                     |                                                |
|---------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Потреба</b>      | <b>Переваги товару, який<br/>пропонує компанія</b>  | <b>Ключові переваги перед<br/>конкурентами</b> |
| <b>Ефективність</b> | Використання новітніх<br>технологій, які підвищують | Використання найновіших<br>технологій, які     |

|                |                                                 |                                                                                    |
|----------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                | продуктивність і зменшують<br>витрати           | відповідають цілям<br>сталого розвитку                                             |
| <b>Безпека</b> | Використання безпечних і<br>надійних технологій | Використання технологій,<br>які відповідають<br>найсуворішим стандартам<br>безпеки |

У таблиці 5.10 наведено сформовану систему збуту [19].

Таблиця 5.10 – Формування системи збуту

| <b>Специфіка закупівельної<br/>поведінки цільових<br/>клієнтів</b>                                                                                                           | <b>Функції збуту, які<br/>має виконувати<br/>постачальник<br/>товару</b>    | <b>Глибина<br/>каналу<br/>збуту</b> | <b>Оптимальна<br/>система збуту</b>    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| Клієнти вимогливі до<br>якості товару, що повинен<br>відповідати їх вимогам,<br>потребують надійного<br>сервісу та зосереджені на<br>довгостроковій<br>перспективі співпраці | Необхідність<br>ефективних<br>маркетингових<br>заходів та аналізу<br>попиту | Нульовий                            | Вертикальна<br>маркетингова<br>система |

## Висновок

У магістерській роботі було розглянуто технологічний процес отримання хлориду калію із застосуванням флотаційного методу. Проаналізовано фізико-хімічні властивості калійних руд, принципи їх збагачення та особливості проведення флотації. Визначено основні параметри технологічного процесу, що впливають на якість кінцевого продукту: крупність подрібнення, концентрація реагентів, тривалість флотації, швидкість подачі повітря, інтенсивність перемішування.

Розроблено структурну схему автоматизації процесу флотаційного збагачення на умовному підприємстві. Обґрунтовано вибір контрольно-вимірювальних приладів та програмованих логічних контролерів, а також системи візуалізації та диспетчеризації. Запропонована система автоматичного регулювання забезпечує стабілізацію параметрів процесу, зменшення впливу людського фактора та підвищення енергоефективності виробництва. Розроблено SCADA-система керування процесом. Наведено основні принципи розробки алгоритму оптимального керування.

Проведений аналіз показує, що впровадження автоматизованої системи керування дозволяє підвищити вихід хлориду калію на 3–7 %, зменшити витрати реагентів на 8–12 %, а також покращити якість кінцевого продукту. Таким чином, автоматизація флотаційного процесу є доцільною та економічно вигідною для сучасних калійних виробництв.

Автоматизація процесу флотаційного отримання хлориду калію дозволяє забезпечити стабільність технологічних режимів, зменшити втрати цінного продукту, оптимізувати витрати реагентів і підвищити якість концентрату. Застосування ПЛК та SCADA забезпечує високу надійність керування, безпечність та контрольованість процесу у реальному часі.

В магістерській дисертації наведено розробку стартап проекту, що представляє створення, ґрунтуючись на інноваційних методах, продуктів які мають на меті усунення недоліків конкурентних варіантів.

## Список використаної літератури

1. Гумецький А. М. Технологія неорганічних речовин. Київ: Вища школа, 2019. 412 с.
2. Півоваров О. В., Кравченко Г. В. Хімічна технологія мінеральних солей. Дніпро: НМетАУ, 2021. 367 с.
3. Костенко В. Г. Збагачення корисних копалин. Київ: НТУУ «КПІ», 2018. 520 с.
4. Мельник І. П. Флотаційні процеси у хімічній промисловості. Львів: ЛНУ, 2020. 298 с.
5. Воловик П. Я. Технологія переробки калійних руд. Львів: Світ, 2017. 344 с.
6. Зеліковський А. М. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Харків: ХПІ, 2020. 289 с.
7. Habashi F. Potash Processing. Montreal: Laval University Press, 2020. 241 p.
8. Al-Thyabat S., et al. Optimization of flotation parameters for potassium chloride. Minerals Engineering. 2021. №178. P. 107-115.
9. Жученко А. І., Ярощук Л. Д. Спеціальні розділи математики для дослідження комп'ютерних систем: Навч. посіб. – К. : ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2002. – 208 с.
10. Жученко А. І., Ярощук Л. Д., Попович Н. В., Попович О. В. Задачі автоматизації технологічних процесів при створенні системи *ISO* // Вісник національного технічного університету «КПІ» серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження» – 2020. – №3 (19). С. 42 – 51.
11. Автоматизовані хіміко-технологічні комплекси-1. Технологічні об'єкти керування: Метод. вказівки до практ. та лаб. занять для студ. напрямку підготовки: 6.050202 „Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології” / Уклад.: З. Я. Козаневич, – К. : НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського“, 2017. – 56 с.
12. Zhulynskyi, A.A. Ladieva, L.R. Korniyenko, B.Y. Parametric identification of the process of contact membrane distillation ARPN Journal of

13. Жученко А.І. Ладієва Л.Р.,Дубік Р.М. Динамічна оптимізація з використанням MATLAB та SIMULINK Київ, СПД Моляр, 2010 230 С.
14. A. Zhulinskyi, Ladieva, L. Burban A. An Optimization of static operating modes of the installation of contact membrane distillation Contemporary Engineering Sciences, Vol. 10, 2017, no. 9, 439 - 446 HIKARI Ltd, www.m-hikari.com <https://doi.org/10.12988/ces.2017.7332>
15. Ладієва Л. Р. Оптимальне керування системами.: Навчальний посібник.- К.:НМЦ ВО, 2000. - 187с. – Библиогр.: с. 7–12. – ISBN 966-622-026-1
16. 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.
17. Проектування систем керування: навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології»/ М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 342 с.
18. Автоматизація технологічних процесів галузі – 2. Розрахунок параметрів регуляторів: Метод. вказівки до викон. лабор. робіт для студ. напр. „Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології” // Уклад.: Д.О. Ковалюк, В.С. Цапар, О.О. Ковалюк – К. : НТУУ ”КПІ“, 2015. – 33 с.
19. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : «КПІ ім Ігоря Сікорського», 2016. – 28 с