**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**Таврійський національний університет**
**імені В.І. Вернадського**
**Навчально-науковий інститут муніципального управління**
**та міського господарства**
Кафедра Інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

# СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ЦИКЛІ ОЧИЩЕННЯ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Здобувача вищої освіти
Синицького Максима Сергійовича
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»)

_____
(підпис)

Науковий керівник:
д.т.н., професор Селюков О.В.

_____
(підпис)

Національна шкала_____
Кількість балів_____
Оцінка: ECTS

Київ – 2026

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра Інженерних систем та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
_____Наталія ОМЕЦИНСЬКА
«____» _____2025_року

**ЗАВДАННЯ**
**НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Синицького Максима Сергійовича

1. Тема роботи: Система автоматичного керування режимами теплообміну в технологічному циклі очищення мастильних матеріалів

керівник роботи: _д.т.н., професор Олександр Селюков

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від «7 » листопада 2025 № 138/1-ОД

2. Строк подання студентом роботи: 22.05.2026

3. Вихідні дані до роботи: температура реакційної суміші (масляного дистиляту та реагентів) на виході з апарата, масові витрати води та сірчаної кислоти, рівні рідини в ємностях та тиск у магістралях.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати технологічний процес очищення масляного дистиляту як об'єкт керування та обґрунтувати вибір оптимального апаратного рішення (сульфуратора); Провести аналіз та розрахунок математичної моделі статичного і динамічного режимів роботи об'єкта теплообміну; Обґрунтувати доцільність застосування середовищ MATLAB та Simulink для синтезу й налаштування оптимальної системи автоматичного керування; Провести аналіз умов охорони праці, освітленості робочого місця та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час експлуатації системи.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Розділ 1 | професор Олександр СЄЛЮКОВ | | |
| Розділ 2 | професор Олександр СЄЛЮКОВ | | |
| Розділ 3 | професор Олександр СЄЛЮКОВ | | |
| Розділ 4 | професор Олександр СЄЛЮКОВ | | |

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| *№ з/п* | *Назва етапів бакалаврської роботи* | *Термін виконання етапів роботи* | *Заключний документ етапу* |
|---|---|---|---|
| 1 | Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника | до 31.10.2025 | Затвердження переліку тем бакалаврських робіт |
| 2 | Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи | до 14.12.2025 | Список літературних джерел, план роботи |
| 3 | Визначення об’єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження | до 25.01.2026 | Текст вступу |
| 4 | Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури: | 26.01.2026-17.05.2026 | Текст розділів |
| | 4.1 I розділ | 26.01.2026-6.03.2026 | Текст розділу |
| | 4.2 II розділ | 9.03.2026-27.03.2026 | Текст розділу |
| | 4.3 III розділ | 30.03.2026-17.04.2026 | Текст розділу |
| | 4.4 IV розділ | 20.04.2026-8.05.2026 | |
| 5 | Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення | 11.05.2026-15.05.2026 | Роздатковий матеріал, презентація |
| 6 | Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків | 11.05.2026-15.05.2026 | Список літературних джерел |
| 7 | Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи | 18.05.2026-22.05.2026 | Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту |
| 8 | Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи | 25.05.2026-29.05.2026 | Бакалаврська робота |
| 9 | Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі | 1.06.2026-5.06.2026 | Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт |
| 10 | Захист бакалаврської роботи | 10.06.2026-28.06.2026 | Рішення Екзаменаційної комісії про захист |

ЗМІСТ

ВСТУП……07
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ МАСЛЯНОГО ДИСТИЛЯТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛЮМБІТ НАТРІЮ……...10
1.1. Процес очищення масляного дистиляту як об’єкт керування ……..10
1.2. Опис технологічної схеми процесу очищення масляного дистиляту ……..12
1.3. Порівняльний аналіз існуючих схем автоматизації апаратів тепломасообміну ……...18
Висновки до розділу 1 ……..24
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК І ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ MATLAB ТА ЙОГО РОЗШИРЕННЯ SIMULINK……26
2.1. Постановка задачі, структурно-параметричний аналіз та моделювання статичного режиму об'єкта керування ……26
2.2. Розроблення схеми автоматизації технологічного процесу ……..29
2.3. Налаштування регулятора керування теплообміном за допомогою інтерактивного середовища SISOTool ……37
2.4. Моделювання системи керування у середовищі Simulink ……40
Висновки до розділу 2 ……43
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИСТКИ МАСЛЯНОГО ДИСТИЛЯТУ……45
3.1. Розрахунок оптимального програмного керування ……..45
3.2. Проектування оптимального лінійно-квадратичного регулятора ……...50
Висновки до розділу 3 ……53
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ……55
4.1. Безпека та охорона праці в надзвичайних ситуаціях на установці очищення мастильних матеріалів ……..55
4.2. Основні завдання з охорони праці та електробезпека під час експлуатації систем автоматизації ……57
4.3. Організація інструктажів з охорони праці для персоналу систем автоматизації ……59
Висновки до розділу 4 ……..61
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК……..63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……65

# АНОТАЦІЯ

Синицький М. С. Система автоматичного керування режимами теплообміну в технологічному циклі очищення мастильних матеріалів. – Рукопис. Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено технологічний процес очищення масляних дистилятів як об’єкт автоматичного керування та обґрунтовано вибір сульфуратора як оптимального апаратного рішення. Розроблено математичні моделі статичного і динамічного режимів теплообміну, на основі яких побудовано структурно-параметричні схеми та статичні характеристики об'єкта. Запропоновано комплексну апаратно-програмну архітектуру системи автоматизації, що включає контури дистанційного керування, аварійного захисту електродвигунів та технологічних блокувань. Виконано параметричний синтез ПІД-регулятора в інтерактивному середовищі SISOTool, розроблено імітаційну модель контуру керування в Simulink та спроектовано оптимальний лінійно-квадратичний регулятор для стабілізації температурних режимів. Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи на нафтопереробних підприємствах для підвищення безпеки в надзвичайних ситуаціях, мінімізації енерговитрат та забезпечення стабільно високої якості очищених мастильних матеріалів.

Об’єкт дослідження – процес теплообміну в технологічному циклі очищення масляних дистилятів. Предмет дослідження – методи, алгоритми та технічні рішення для створення системи автоматичного керування режимами теплообміну в реакторі-сульфураторі. Мета роботи – розробка надійної та ефективної системи автоматичного керування режимами теплообміну в технологічному циклі очищення мастильних матеріалів для мінімізації енерговитрат та стабілізації якості вихідного продукту. Методи дослідження – системний аналіз, математичне моделювання, теорія автоматичного керування, імітаційне комп'ютерне моделювання, методи оптимального керування. Ключові слова: автоматична система керування, теплообмін, очищення мастильних матеріалів, масляний дистилят, сульфуратор, ПІД-регулятор, лінійно-квадратичний регулятор, Simulink.

# ABSTRACT

Synytsky M. S. System of automatic control of heat exchange modes in the technological cycle of cleaning lubricants. – Manuscript. Qualification bachelor's thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadsky Tavrichesky National University, Kyiv, 2026.

In the bachelor's qualification work, the technological process of oil distillate purification as an object of automatic control was investigated and the choice of a sulfurator as an optimal hardware solution was substantiated. Mathematical models of static and dynamic heat transfer modes were developed, on the basis of which structural and parametric diagrams and static characteristics of the object were constructed.

A comprehensive hardware and software architecture of the automation system is proposed, including circuits for remote control, emergency protection of electric motors and technological interlocks. A parametric synthesis of a PID controller in the interactive SISOTool environment is performed, a simulation model of the control loop is developed in Simulink, and an optimal linear-quadratic controller is designed to stabilize temperature conditions. The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the developed system at oil refineries to increase safety in emergency situations, minimize energy consumption and ensure consistently high quality of refined lubricants.

The object of the study is the heat exchange process in the technological cycle of oil distillate purification. The subject of the study is methods, algorithms and technical solutions for creating a system for automatic control of heat exchange modes in a sulfurizing reactor. The purpose of the work is to develop a reliable and effective system for automatic control of heat exchange modes in the technological cycle of lubricant purification to minimize energy consumption and stabilize the quality of the initial product. Research methods – system analysis, mathematical modeling, automatic control theory, computer simulation modeling, optimal control methods. Keywords: automatic control system, heat transfer, lubricant purification, oil distillate, sulfurizer, PID controller, linear-quadratic controller, Simulink.

# ВСТУП

Впровадження сучасних засобів автоматизації у виробничі процеси виступає одним із визначальних векторів науково-технічного прогресу промислового комплексу нашої держави. На сьогоднішній день новітні автоматизовані системи управління та технічні засоби автоматики є невіддільною складовою практично всіх сфер людської діяльності, що дозволяє суттєво підвищити продуктивність праці, енергоефективність та якість кінцевого продукту. Автоматизація як багатогранна галузь науки і техніки об'єднує теоретичні засади проектування систем керування та широкий спектр апаратних і програмних засобів для їх практичної реалізації. Під цим поняттям традиційно розуміють цілеспрямовану сукупність організаційних та інженерно-технічних рішень, головним завданням яких є мінімізація або ж повне усунення безпосередньої фізичної участі людини-оператора з контуру управління технологічним процесом.

У нафтопереробній галузі та сфері обслуговування промислового обладнання одним із надзвичайно важливих етапів є процес очищення мастильних матеріалів від небажаних домішок, асфальто-смолистих речовин, продуктів зносу та окислення. Цей технологічний цикл являє собою складний фізико-хімічний процес, ефективність якого критично залежить від підтримання оптимальних термодинамічних параметрів. Саме режими теплообміну відіграють ключову роль у забезпеченні необхідної кінематичної в'язкості сировини, швидкості протікання масообмінних реакцій та якості розділення фаз у відстійниках. Відхилення температурних показників від жорстких нормативних значень неминуче призводить до погіршення експлуатаційних характеристик очищеного продукту або ж до невиправданих перевитрат енергоносіїв.

Окрім первинного виробництва, технології глибокого очищення активно застосовуються в процесах регенерації відпрацьованих олив. Зокрема, це стосується відновлення моторних мастил з високим ступенем деградації, які містять складні комплексоутворюючі присадки, а також сильно окислених трансформаторних та інших спеціалізованих промислових рідин. У таких багатокомпонентних системах підтримання стабільного теплового балансу набуває ще більшої ваги. Нагрівання та охолодження робочих середовищ вимагає

прецизійного контролю, оскільки термічний вплив безпосередньо визначає розчинність домішок та інтенсивність процесів коагуляції забруднюючих речовин з утворенням важкого осаду [1].

З огляду на високу чутливість технологічного циклу до температурних коливань, традиційне ручне управління процесами нагрівання та охолодження є вкрай неефективним і не відповідає сучасним вимогам виробництва. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка надійної та ефективної системи автоматичного керування режимами теплообміну в технологічному циклі очищення мастильних матеріалів. Вирішення цього комплексного завдання передбачає проектування сучасної функціональної схеми автоматизації, виконання математичного моделювання об'єкта як складної теплодинамічної системи, а також створення алгоритмів управління, що гарантуватимуть стабільність процесу очищення, мінімізацію енерговитрат та стабільно високу якість вихідного продукту.

# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор.

ПІ – пропорційно-інтегральний регулятор.

ТП – технологічний процес.

ТОК – технологічний об’єкт керування.

ОК – об’єкт керування

АСУТП - автоматизована система управління технологічним процесом

S– витрати;

c– теплоємність ;

θ – температура;

$k$ – коефіцієнти масообміну;

$F$– поверхня масообміну;

V– об’єм;

$\rho$ – густина;

$q$ – питома теплота, що виділяється при екзотермічній реакції;

$R$ – універсальна газова складова;

$A$– константа швидкості реакції;

E– енергія активації.

# РОЗДІЛ 1АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ МАСЛЯНОГО ДИСТИЛЯТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛЮМБІТ НАТРІЮ

## 1.1. Процес очищення масляного дистиляту як об’єкт керування

Сучасна технологія підготовки та глибокого очищення масляних фракцій базується на складних масообмінних процесах, зокрема на рідинній екстракції із застосуванням спеціальних селективних розчинників. Даний технологічний етап виступає надзвичайно складним об'єктом керування, оскільки якість розділення фаз безпосередньо залежить від підтримання оптимальних термодинамічних параметрів. Згідно з передовими методиками, процес екстракції інтенсифікується шляхом введення до складу сировини, самого розчинника або їхньої суміші специфічних поверхнево-активних речовин (ПАР) — алкілімідазолінів у строго дозованій концентрації від 0,0002 до 0,002% за масою. У ролі таких каталізуючих добавок найчастіше виступають дихлориди або комплексні суміші імідазолінів з аміноамідами, що містять вуглеводневі радикали різної довжини: від 7-9 до 10-16, 17-20 та більше атомів вуглецю. Крім того, ефективним є застосування оксиетилованих алкілімідазолінів, синтезованих на основі кубових залишків, що утворюються під час виробництва фракцій синтетичних жирних кислот (від С20 і вище). Документальне підтвердження ефективності таких композицій наведено у відповідній патентній літературі (опис містить 1 сторінку формули винаходу та 1 таблицю).

Описана технологічна концепція належить до сфери виробництва та регенерації високоякісних нафтових масел. Вона знаходить своє широке практичне застосування в нафтопереробній промисловості, зокрема на установках селективного очищення мастильних матеріалів із використанням таких потужних екстрагентів, як N-метилпіролідон та фурфурол. Варто зазначити, що розчинна здатність та селективність цих реагентів є вкрай чутливими до коливань температури, що робить систему автоматичного керування режимами теплообміну критично важливою ланкою для забезпечення стабільності всього циклу очищення.

Аналіз існуючих промислових рішень показує наявність низки традиційних способів очищення масляних дистилятів селективними розчинниками. Їхнє головне завдання полягає у максимально повному вилученні з базової сировини багатовенцевих (поліциклічних) ароматичних вуглеводнів, важких смол та асфальто-смолистих комплексів. Традиційно для цих цілей в апаратах тепломасообміну застосовують фенол, фурфурол або N-метилпіролідон.

Однак, відомий метод очищення із застосуванням виключно N-метилпіролідону та певного проміжного розчинника «b» відзначається суттєвими експлуатаційними недоліками. Серед головних проблем цієї технології слід виділити занижений відсоток виходу цільової очищеної фракції (рафінату), а також недостатньо високий індекс в'язкості кінцевого продукту, що не завжди відповідає сучасним стандартам якості мастильних матеріалів.

Найбільш наближеним до розглядаємої вдосконаленої технології (найближчим аналогом за технічною суттю) є метод екстракційного очищення масляних фракцій фенолом у присутності кремнійорганічної поверхнево-активної речовини — поліметилсилоксану марки ПМС-200. Дозування цієї добавки становить від 0,002 до 0,02% від маси вихідної сировини. Завдяки модифікації міжфазного натягу, цей спосіб дозволяє підвищити вихід рафінату максимум на 3,6%. Проте якісні показники продукту, зокрема індекс в'язкості, при цьому залишаються практично незмінними.

Головним недоліком згаданого способу-аналога є обмежений та недостатній ступінь впливу застосованої добавки ПМС-200 на селективність базового розчинника щодо поліциклічних ароматичних структур, смол та асфальтенів. Це призводить до того, що підприємство отримує лише незначний приріст кількісного виходу продукції без реального покращення її фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей. До того ж, процес вимагає значних енергозатрат на підтримання температурного режиму екстракції.

Інноваційний підхід, що розглядається в рамках даного дослідження, спрямований на комплексне вирішення існуючої проблеми: одночасне максимізування виходу рафінату, суттєве підвищення його індексу в'язкості та глибоке зниження залишкового вмісту азотистих сполук, забарвлених

ароматичних вуглеводнів, смол і важких асфальто-смолистих компонентів. Головним технічним результатом є різке посилення ефективності дії ПАР на селективні властивості розчинника, що досягається за умови жорсткої стабілізації теплового балансу в екстракційній колоні.

Критично значущими індикаторами якості перебігу процесу є повнота вилучення технічно небажаних компонентів. Саме забарвлені ароматичні вуглеводні, нестабільні смоли та асфальто-смолисті комплекси є тими цільовими забруднювачами, видалення яких забезпечує високу якість очищеної оливи.

Відмінною рисою та ключовою перевагою модернізованої технології є введення в систему (до сировини або розчинника) спеціалізованих ПАР класу алкілімідазолінів у мікродозах (0,0002-0,002% мас.). Як такі високоефективні агенти застосовуються: імідостан марки ЕУ-17 (N,N'-біс(2-гідроксиетил)-2-алкіл-імідазолін дихлорид), пеназолін 7-9 (композиція імідазолінів з амінокислотами та алкільним радикалом С7-С9), пеназолін 10-16 (композиція з аміноамідами та радикалом С10-С16), пеназолін 17-20 (суміш з радикалом С17-С20), пеназолін К (композиція для важких фракцій з радикалом С20+), а також спеціальні інгібітори серії ІКБ. Максимальне розкриття потенціалу цих реагентів та запобігання їхній термічній деструкції неможливе без впровадження надійної системи автоматичного керування режимами теплообміну в технологічному циклі.

### 1.2. Опис технологічної схеми процесу очищення масляного дистиляту

Згідно з розробленим технологічним алгоритмом, процес селективного очищення дистилятних та залишкових масляних фракцій реалізується у спеціалізованому реакторному апараті, який обладнано механічним перемішуючим пристроєм. Критичною умовою успішного перебігу масообміну є суворе підтримання температурного режиму в реакторі на рівні, що гарантовано не перевищує критичну точку розчинення сировинної бази у використовуваному екстрагенті. Саме тому система автоматичного керування теплообміном відіграє тут ключову роль. Безпосередньо перед початком фази екстракції до вихідної сировини, розчинника або їхньої бінарної суміші

дозовано вводяться специфічні поверхнево-активні речовини (алкілімідазоліни). Їхня масова частка становить від 0,0002 до 0,002% відносно обсягу сировини. Після завершення активної фази змішування утворена емульсія відстоюється, екстрактна частина відокремлюється від цільового рафінату, після чого розчинник піддається регенерації та повертається у технологічний цикл. Якісні показники отриманого рафінату жорстко контролюються за індексом кінематичної в'язкості, а також за залишковим вмістом азотистих сполук, важкої ароматики та асфальто-смолистих комплексів.

Варто зазначити, що масляні напівпродукти (дистилятні та залишкові фракції), які отримують у процесі вакуумної перегонки мазуту, характеризуються значною варіативністю хімічного складу та фізичних властивостей, що безпосередньо залежить від природи вихідної нафти. Окрім різноманітних класів вуглеводнів, до складу нерущених масляних фракцій входить значна кількість кисне- та сірковмісних сполук. Серед них переважають смоли, асфальтени, нафтенові кислоти та різноманітні сірчисті похідні (особливо при переробці високосірчистих нафт). Сутність процесу глибокого очищення полягає саме у вилученні абсолютної більшості цих небажаних домішок, що дозволяє надати фракціям необхідних експлуатаційних характеристик товарних мастил [2].

Вихідні масляні фракції розглядаються виключно як напівпродукти, оскільки присутні в них баластні компоненти (тверді парафіни, поліциклічні ароматичні вуглеводні без бічних ланцюгів або з короткими радикалами) негативно впливають на стабільність та в'язкісно-температурні властивості готового продукту. Для їх нейтралізації та видалення в сучасній нафтохімії застосовується цілий арсенал методів: обробка сірчаною кислотою або концентрованими лугами, контактне очищення природними відбілюючими землями чи синтетичними адсорбентами, а також рідинна екстракція селективними розчинниками.

Сірчанокислотне очищення історично є одним із перших промислових методів підготовки мастил [4], проте завдяки своїй надійності та ефективності

воно не втратило актуальності й дотепер. Під час контакту сировини з концентрованою сірчаною кислотою відбувається складний комплекс реакцій. Певна частина асфальто-смолистих речовин піддається реакції сульфування з утворенням сульфокислот, інша частина інтенсивно ущільнюється (полімеризується), а деякі компоненти розчиняються в реагенті без хімічних змін. Нафтенові кислоти також частково сульфуруються та переходять у розчин. Крім того, активну взаємодію з реагентом демонструють і сірчисті сполуки нафти.

Ароматичні вуглеводні реагують із міцною сірчаною кислотою порівняно повільно, проте піддаються частковому сульфуванню та подальшому розчиненню. Ступінь їхньої хімічної стійкості прямо пропорційний кількості та довжині бічних вуглеводневих ланцюгів у молекулі. Водночас парафінові та нафтенові вуглеводні демонструють високу резистентність до дії кислоти, тоді як ненасичені олефіни вступають з нею в реакцію надзвичайно швидко. Усі розчинені компоненти (асфальто-смолисті речовини, продукти сульфування, нафтенові кислоти) разом із надлишком незреагованої сірчаної кислоти утворюють в'язкий побічний продукт — кислий гудрон. Після етапу гравітаційного відстоювання він чітко відокремлюється від очищеного масляного шару.

Питомі витрати сірчаної кислоти варіюються залежно від цільового призначення продукту. Для індустріальних мастил нафтено-ароматичної основи вони становлять близько 3-5%, для високоякісних спеціальних олив (трансформаторних, турбінних) — від 7 до 10%, а для залишкових фракцій цей показник може сягати 15-20%. Якщо технологія вимагає повної відсутності ароматичних вуглеводнів у готовому продукті, застосовується глибока обробка олеумом (димлячою сірчаною кислотою). Сама процедура кислотного очищення традиційно реалізується у футерованих свинцем циліндричних апаратах-мішалках. Внаслідок такої обробки дещо знижується густина дистиляту та його схильність до коксоутворення, проте індекс в'язкості зростає відносно незначно [3].

Наступним обов'язковим етапом є лужне очищення, мета якого полягає у нейтралізації залишків сірчаної кислоти, кислих продуктів реакції та природних нафтенових кислот. Цей процес здійснюється за допомогою водного розчину лугу. В результаті хімічної взаємодії утворюються натрієві солі та специфічні мила, які формують так званий лужний відхід. Ті залишкові мікродози солей і лугів, що залишаються в масляній фазі після зливу відпрацьованого розчину, остаточно вимиваються збезсоленою водою. Для глибокого зневоднення очищеної оливи її продувають підігрітим повітрям при температурі 60-90 °С, що знову ж таки вимагає чіткого керування режимами теплообміну. Варто додати, що лужне очищення може застосовуватися і як самостійний процес, наприклад, для нейтралізації кислих компонентів у легких нафтових дистилятах.

Для забезпечення безперебійного та високоефективного функціонування всього цього багатостадійного виробництва критично необхідною є наявність безперервного потоку достовірної інформації щодо стану основних технологічних параметрів. З метою вирішення цього комплексного завдання впроваджується автоматизована система керування (АСК). Її головна функція полягає у прецизійному контролі та регулюванні температурних режимів теплообміну, рівнів рідин у ємностях та витрат матеріальних потоків, що беруть безпосередню участь у реакціях (зокрема, у високотемпературних процесах сульфування та розділення фаз). Спеціально розроблена математична модель реактора-сульфуратора дозволяє прогнозувати поведінку системи, на основі чого синтезуються оптимальні алгоритми керування для головної технологічної стадії очищення дистиляту. Окрім забезпечення технологічних показників, розроблена АСК гарантує своєчасне виявлення перехідних режимів та запобігає виникненню аварійних ситуацій шляхом превентивного переведення обладнання у безпечний стан.

Функціональна схема автоматизації процесу представлена нижче на рисунку 1.1.

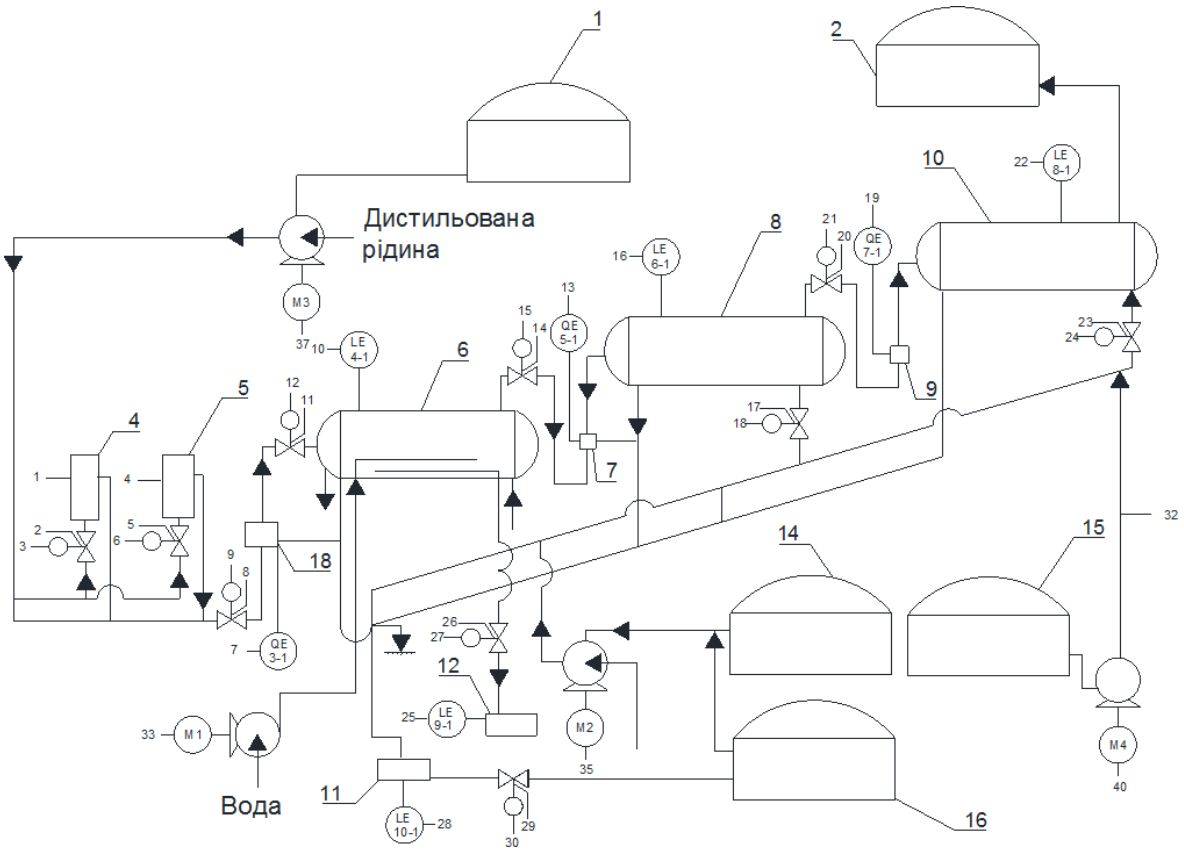



Рис. 1.1. Функціональна схема автоматичної системи керування технологічним процесом очищення масляної фракції із застосуванням плюмбіту натрію

Для того щоб забезпечити максимально ефективну та безпечну експлуатацію промислової установки очищення масляних дистилятів, зокрема при використанні методу хімічної обробки плюмбітом натрію, до сучасних засобів автоматизації висувається низка надзвичайно жорстких експлуатаційних та метрологічних вимог. Головною метою впровадження автоматизованої системи керування є реалізація комплексної автоматизації всіх ключових апаратних вузлів цього складного технологічного процесу, з особливим акцентом на контури теплообміну. До першочергових завдань такої системи належить організація безперервного та високоточного моніторингу. Це передбачає не лише поточне вимірювання, але й обов'язкову архівацію та реєстрацію абсолютно всіх критично важливих теплотехнічних і гідродинамічних параметрів на кожному етапі технологічного циклу очищення мастильних матеріалів. Крім того, невіддільною складовою надійної роботи є розробка та впровадження дубльованих контурів технологічної сигналізації

спільно з розгалуженою системою апаратних і програмних блокувань. Саме такий комплексний підхід гарантує максимальне зниження ймовірності виникнення будь-яких аварійних чи нештатних ситуацій, тим самим забезпечуючи всебічний захист експлуатаційного персоналу та дороговартісного обладнання.

Безпосередньо сам комплекс технічних засобів автоматизації відіграє вирішальну та фундаментальну роль у загальному успіху модернізації виробництва. Від того, наскільки коректно підібрані прилади і якою є їхня швидкодія, прямо пропорційно залежить як загальна енергоефективність підприємства, так і фінальні показники якості вихідної продукції. З метою практичної реалізації розробленої функціональної схеми автоматизації було ретельно сформовано відповідну номенклатуру засобів контролю та керування, які позначаються згідно із загальноприйнятими міжнародними стандартами літерного маркування. Базовий рівень збору інформації формують первинні перетворювачі. Зокрема, для точного вимірювання об'ємної або масової витрати технологічних рідин, очищеної води та стисненого повітря передбачено використання первинних перетворювачів витрати, або витратомірів, що маркуються як FE (Flow Element). У свою чергу, для безперервного та прецизійного контролю за режимами теплообміну, які є критичними для даного дослідження, застосовуються первинні перетворювачі температури, тобто термоперетворювачі, позначені індексом TE (Temperature Element). Окрім цього, інструментальна схема включає високоточні вимірювачі та перетворювачі тиску робочих середовищ, що ідентифікуються абревіатурою PT (Pressure Transmitter).

Зібрана первинна інформація з датчиків потребує подальшої обробки та передачі, для чого в контур управління інтегровані проміжні вимірювальні перетворювачі, відомі як трансмітери. Вони виконують функцію стандартизації сигналів та їхньої безпечної дистанційної передачі на верхній рівень системи управління. Такі пристрої мають відповідні позначення: FT, LT та TT (Flow, Level, Temperature Transmitter), що відповідають за передачу даних про витрату потоків, рівень рідкої фази в апаратах та температурні показники теплоносіїв

відповідно. На основі цих стандартизованих сигналів функціонують пристрої автоматичного керування, що безпосередньо здійснюють обчислення та регулювання ключових технологічних параметрів. До них належать регулятори рівня в технологічних ємностях та ПІД-регулятори температури теплоносіїв, які на функціональних схемах маркуються як LIC та TIC (Level або Temperature Indicator Controller).

Незважаючи на високий рівень автоматизації, функціональна схема обов'язково передбачає наявність блоків для резервного ручного або дистанційного керування виконавчими механізмами безпосередньо з пульта оператора-технолога. Такі пристрої ручного керування позначаються абревіатурою HIC (Hand Indicator Controller). Для візуалізації перебігу процесу на головному щиті розташовуються вторинні прилади PIAS (Pressure Indicator Alarm Switch), функціонал яких охоплює не лише індикацію та безперервну реєстрацію поточних значень контрольованих параметрів, але й автоматичну сигналізацію у разі досягнення ними верхніх або нижніх критичних меж. Локальне візуальне оповіщення експлуатаційного персоналу здійснюється за допомогою елементів світлової сигналізації, тобто спеціальних сигнальних ламп HL (High Light). Силова частина системи автоматики, що безпосередньо відповідає за комутацію електричних кіл, побудована на базі електромагнітних пускачів та реле, що мають стандартне маркування КМ (контактор магнітний). Нарешті, для фізичної взаємодії оперативного персоналу з технологічним обладнанням у виробничому цеху передбачені кнопкові пости керування SB (Switch Button), які дозволяють здійснювати локальний чи дистанційний пуск і зупинку електродвигунів потужних насосних агрегатів та мішалок. Для гарантування безпеки під час регламентних робіт застосовуються пакетні вимикачі та ключі керування SA (Switch Actuator), призначені для повного і надійного відключення електроприводів від трифазної живильної мережі.

### 1.3. Порівняльний аналіз існуючих схем автоматизації апаратів тепломасообміну

Інтенсифікація фізико-хімічних реакцій під час обробки нафтопродуктів

здійснюється за допомогою спеціалізованих перемішуючих пристроїв — мішалок. Процес перемішування є одним із найпоширеніших технологічних етапів у хімічній, нафтопереробній, фармацевтичній та багатьох інших суміжних галузях промисловості. Для реалізації цього завдання застосовуються механізми найрізноманітніших конструкцій, видів та типів, які монтуються у спеціальних ємностях, що класифікуються як апарати з мішалками. Сутність даного процесу полягає у примусовому підведенні до закритої термодинамічної системи зовнішньої механічної енергії. У контексті нафтопереробки термін «перемішування» передбачає не лише механічне об'єднання об'ємів різних реагентів для отримання гомогенної суміші (стабільних розчинів, стійких емульсій чи суспензій). Фундаментальною метою механічного перемішування є створення однорідного за фізико-хімічним складом середовища, суттєве прискорення процесів масообміну між фазами та, що є критично важливим для нашого дослідження, багатократне посилення процесів теплообміну всередині апарату. Без постійного оновлення примежового шару рідини ефективне нагрівання чи охолодження в'язких масляних дистилятів стає практично неможливим.

При проектуванні систем автоматичного керування надзвичайно велику роль відіграє технологічна ефективність обраної мішалки. Цей показник безпосередньо визначається кількістю витраченої механічної енергії, необхідної для досягнення заданого теплового та гомогенізуючого ефекту. При порівнянні кількох альтернативних конструкцій більш ефективною вважається та, яка здатна забезпечити необхідний температурний градієнт та рівномірність суміші за умови мінімальних енерговитрат. Для точного розрахунку цієї ефективності інженери використовують спеціальні математичні моделі та критеріальні рівняння, що пов'язують споживану потужність електроприводу з коефіцієнтами масовіддачі та тепловіддачі. На сьогоднішній день існує величезна кількість конструктивних різновидів мішалок, що значно перевищує номенклатуру будь-якого іншого типового хімічного обладнання. Така різноманітність пояснюється тим, що гідродинаміка потоків і, відповідно, ефективність теплообміну залежать не лише від форми самої лопаті, але й від

геометричних пропорцій, об'єму та типу резервуара, в якому вона змонтована.

За швидкісними характеристиками промислові змішувачі найчастіше поділяють на високошвидкісні та тихохідні агрегати. До категорії високошвидкісних належать пропелерні (гвинтові) та різноманітні турбінні мішалки, а також специфічні конструкції на зразок дискових чи фрезерних пристроїв. Залежно від кута нахилу лопатей та способу монтажу, вони здатні генерувати інтенсивний радіальний або осьовий потік рідини, що сприяє швидкому вирівнюванню температур по всьому об'єму. До групи тихохідних апаратів відносять якірні, рамні та стрічкові мішалки. Їхньою особливістю є створення переважно тангенціального (кругового) потоку, при якому масив рідини обертається навколо центральної осі реактора. Крім того, існують мішалки спеціального призначення, які генерують високі напруження зсуву (наприклад, роторно-пульсаційні апарати), вібраційні пристрої та мішалки зі скребками. Останні є особливо ефективними для керування теплообміном, оскільки скребки постійно знімають в'язкий шар рідини з внутрішньої поверхні теплообмінної сорочки, запобігаючи локальному перегріву мастила. Сучасна довідкова література вказує на відсутність єдиного універсального критерію для вибору ідеального змішувача, тому інженери часто спираються на емпіричні дані та накопичений досвід експлуатації аналогічних промислових установок.

Ключовим параметром, що диктує вибір конкретного типу мішалки та стратегії керування температурним режимом, є динамічна в'язкість оброблюваного середовища. У технологічній практиці склалося обґрунтоване правило: для інтенсифікації теплообміну в рідинах з низькою в'язкістю найдоцільніше застосовувати високошвидкісні мішалки, тоді як для високов'язких нафтопродуктів (якими є масляні дистиляти та гудрони) необхідно використовувати виключно тихохідні пристрої з розвиненою поверхнею лопатей, що охоплюють весь робочий об'єм апарату. Для проведення комплексу реакцій у процесі очищення масляного дистиляту можуть використовуватися різні типи реакторів, які відрізняються своїми контурами регулювання та підходами до стабілізації теплового балансу.

Розглянемо найбільш типові з них.

Першим варіантом є реактор нейтралізації.

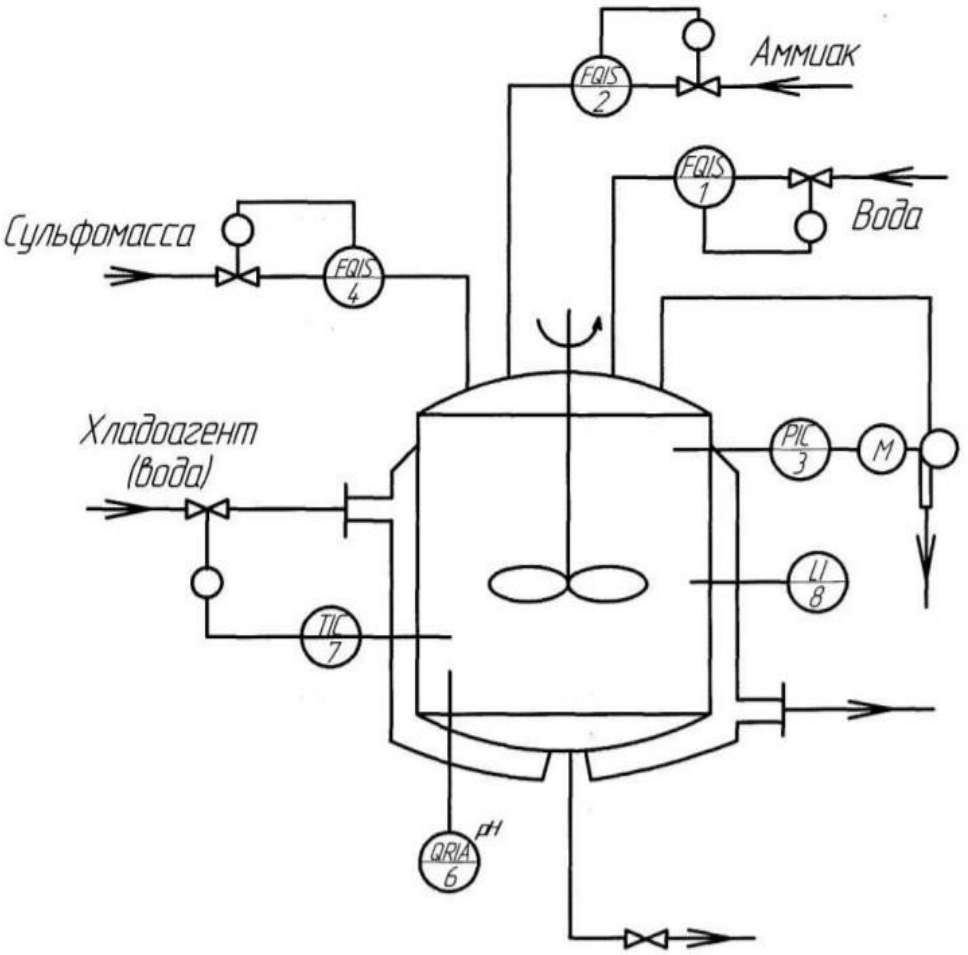



Рис. 1.2 Принципова схема автоматизації апарата нейтралізації

Процес нейтралізації залишкової сірчаної кислоти, наприклад, за допомогою аміаку або лужних розчинів, є яскраво вираженою екзотермічною реакцією, що супроводжується миттєвим виділенням значної кількості теплової енергії. У промислових концентраторах цей процес вимагає жорсткого температурного контролю. Якщо до реактора безперервно подається кислота та нейтралізуючий агент, температура суміші може стрімко зростати. Для запобігання закипанню та термічній деструкції вуглеводнів до системи дозовано вводиться певна кількість води або спеціального холодоагенту. Випаровування цієї рідини поглинає надлишкове тепло реакції, стабілізуючи температуру в апараті на безпечному рівні (наприклад, близько 110 °C). Утворені в результаті реакції солі (наприклад, сульфати) кристалізуються, після чого суспензія подається на центрифугування для розділення фаз.

Автоматизація такого об'єкта фокусується на синхронізації витрат реагентів та прецизійному відведенні теплоти реакції.

Другим варіантом виступає класичний ємнісний апарат з теплообмінною сорочкою.

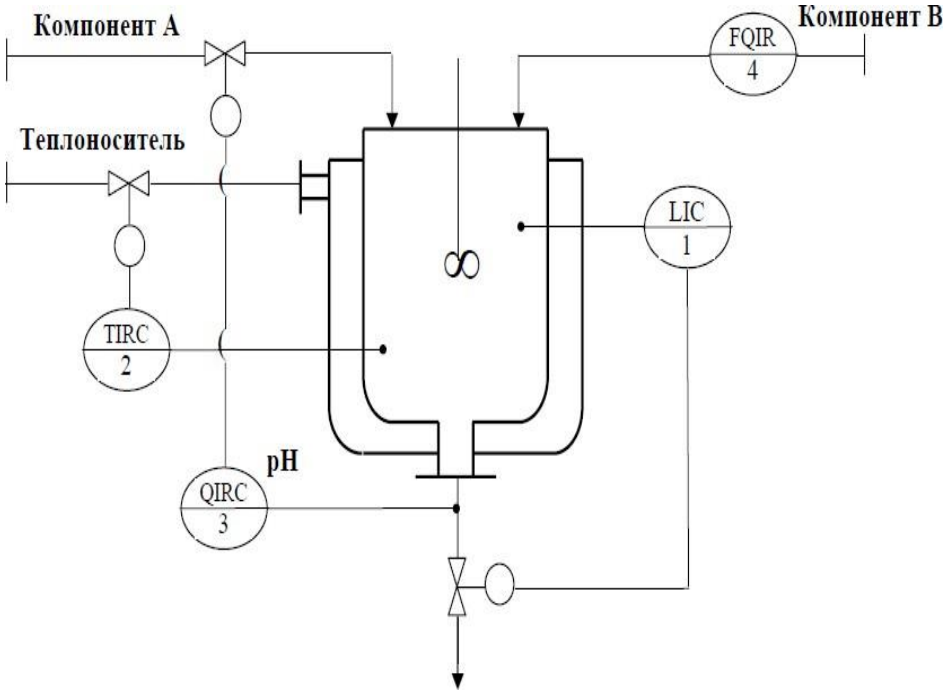



Рис. 1.3 Функціональна схема ємнісного реактора з механічним перемішуванням та тепловим контуром

У такому ємнісному апараті безперервної або періодичної дії, оснащеному потужною мішалкою та зовнішньою теплообмінною рубашкою, відбувається процес глибокого змішування двох або більше компонентів (наприклад, сировини та селективного розчинника). Оскільки кінетика розчинення смолистих речовин вимагає підтримання стабільно високої температури, у сорочку апарату безперервно подається гарячий теплоносій (водяна пара або термоолива). АСК у цьому випадку регулює витрату теплоносія залежно від показників термодатчиків, занурених у масу продукту. Готова, термічно стабілізована суміш безперервно відбирається з нижньої частини апарату для подальшого фазового розділення.

Третім, найбільш технологічно досконалим варіантом є використання спеціалізованого сульфуратора.

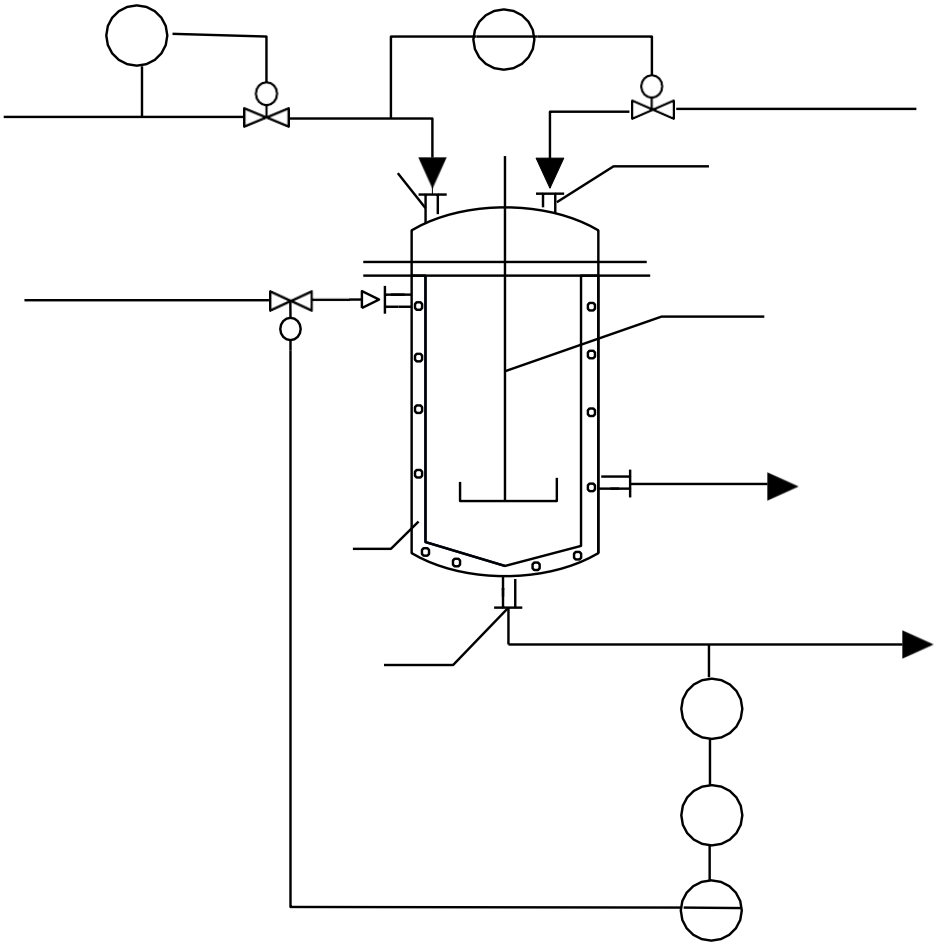


Рис. 1.4 Схема автоматизації тепломасообмінних процесів у сульфураторі

Промисловий сульфуратор безперервної дії являє собою складний герметичний апарат, конструкція якого оптимізована для проведення агресивних хімічних реакцій (зокрема, обробки нафтопродуктів концентрованою сірчаною кислотою). Апарат складається з міцного циліндричного корпусу, який обладнано тихохідною якірною мішалкою. Цей тип мішалки ідеально підходить для роботи з в'язкими середовищами, оскільки її контури повторюють форму стінок реактора, що запобігає налипанню густого кислого гудрону та критично покращує коефіцієнт теплопередачі. Для забезпечення заданого температурного режиму сульфуратор оснащений комбінованою системою теплообміну, що включає зовнішню сорочку та внутрішній змійовик, куди автоматично подається нагрівна пара або охолоджуюча вода (залежно від поточної стадії процесу).

Система автоматики сульфуратора включає складні контури регулювання. На вході встановлені регулятори витрати (FRC та FFC), які підтримують строге

співвідношення подачі масляного дистиляту, сірчаної кислоти та води. Ключовим вузлом є контур регулювання теплообміну (QRC, QE, QT), який аналізує температуру реакційної маси і за допомогою виконавчих механізмів керує подачею теплоносія у змійовик, компенсуючи теплові коливання під час екзотермічної реакції сульфування. Також апарат обладнано надійними датчиками рівня рідини, що блокують роботу пристроїв у разі переповнення ємності або відсутності в ній сировини.

Проаналізувавши представлені варіанти, можна дійти висновку, що найоптимальнішим апаратним рішенням для розробки системи автоматичного керування режимами теплообміну є застосування сульфуратора з якірним перемішувальним пристроєм та розвиненою поверхнею теплообміну (сорочка та змійовик). Саме така конфігурація дозволяє забезпечити максимально швидкий та безпечний перебіг реакції, гарантує відсутність локальних зон перегріву завдяки ефективному перемішуванню в'язкого середовища та дозволяє отримати на виході ідеально гомогенізовану суміш із заданими температурними параметрами.

**Висновки до розділу 1**

У першому розділі було проведено ґрунтовний аналіз процесу очищення масляного дистиляту як об’єкта керування та розглянуто існуючі технологічні й апаратні рішення для його автоматизації. Процес селективного очищення масляних дистилятів із застосуванням поверхнево-активних речовин (алкілімідазолінів) та спеціальних розчинників є надзвичайно складним масообмінним об'єктом. Якість розділення фаз, вихід рафінату та ефективність видалення небажаних домішок критично залежать від суворого підтримання оптимальних термодинамічних параметрів. Розчинна здатність екстрагентів вкрай чутлива до коливань температури, що робить автоматичне керування теплообміном ключовою умовою стабільності всього циклу.

Багатостадійна технологічна схема, яка включає етапи кислотного та лужного очищення, вимагає безперервного потоку достовірної інформації про стан процесу. Впровадження автоматизованої системи керування (АСК) є

життєво необхідним для прецизійного регулювання температурних режимів теплообміну, рівнів рідин у ємностях та витрат матеріальних потоків.

Для забезпечення надійної роботи та безпеки персоналу обґрунтовано використання сучасних засобів автоматизації. До розробленої функціональної схеми включено первинні перетворювачі витрати (FE), температури (TE) і тиску (PT), проміжні вимірювальні перетворювачі, а також пристрої автоматичного керування — регулятори рівня (LIC) та температури (TIC).

На основі порівняльного аналізу існуючих схем тепломасообмінних апаратів, таких як реактор нейтралізації, звичайний ємнісний апарат та сульфуратор, було визначено найефективніше рішення. Найоптимальнішим для розробки системи автоматичного керування режимами теплообміну є застосування сульфуратора безперервної дії з тихохідною якірною мішалкою та комбінованою системою теплообміну, що складається із зовнішньої сорочки та внутрішнього змійовика. Саме така конфігурація запобігає локальним перегрівам, забезпечує ідеальну гомогенізацію та гарантує швидкий і безпечний перебіг екзотермічних реакцій.

# РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК І ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ MATLAB ТА ЙОГО РОЗШИРЕННЯ SIMULINK

## 2.1. Постановка задачі, структурно-параметричний аналіз та моделювання статичного режиму об'єкта керування

У технологічному процесі очищення масляних дистилятів однією з ключових хімічних речовин виступає сірчана кислота. За своїми фізико-хімічними властивостями вона являє собою важку, безбарвну та надзвичайно в'язкую (жирну) рідину, що відзначається високим ступенем гігроскопічності. Процес абсорбції вологи цією кислотою супроводжується миттєвим виділенням колосальної кількості теплової енергії. Саме через таку високу екзотермічність у лабораторній та промисловій практиці суворо забороняється додавати воду безпосередньо до концентрованої сірчаної кислоти, оскільки це неминуче призведе до локального закипання та небезпечного розбризкування агресивної речовини. Для безпечного розведення необхідно діяти навпаки — обережно, невеликими порціями вводити сульфатну кислоту у водне середовище за умови інтенсивного перемішування. Крім того, концентрована сірчана кислота проявляє потужні дегідратуючі властивості, обвуглюючи органічні сполуки шляхом відщеплення від них елементів води, внаслідок чого утворюються відповідні гідрати сульфатної кислоти. У розбавлених водних розчинах ця кислота виступає як сильний електроліт і піддається практично повній дисоціації, що описується наступним іонним рівнянням:

$$H_2SO_4 + H_2O \ni\in H_3O + HSO_4.$$

Головною метою даного етапу дослідження є розробка адекватної математичної моделі тепломасообмінних процесів у сульфураторі для подальшого синтезу високоефективної автоматичної системи керування. За результатами детального аналізу специфіки процесу сульфування, а також фізичних властивостей вхідних і вихідних матеріальних потоків, було встановлено, що забезпечення високої якості очищення масляного дистиляту вимагає жорсткої стабілізації термодинамічного балансу. Безпосередньо до реактора-сульфуратора безперервно надходять два основні реагенти: вода та

сірчана кислота. Вони вступають у взаємодію в робочому об'ємі апарата, після чого утворена багатокомпонентна суміш виводиться з системи як готовий напівпродукт для подальшого відстоювання. Оскільки реакція супроводжується тепловиділенням, складання математичної моделі базується на фундаментальних законах збереження: загальна маса та теплова енергія речовин, що надходять у технологічний об’єкт керування (ТОК), завжди дорівнює сумарній масі та енергії речовин, що виходять з нього, з урахуванням тієї частки, що акумулювалася безпосередньо всередині апарата.

Для формалізації моделі було проведено дослідження структурно-параметричної схеми об’єкта. Вхідні збурення та параметри, що характеризують стан потоків на вході до сульфуратора, включають масову витрату води ($S_в$, кг/с) та сірчаної кислоти ($S_к$, кг/с), питомі теплоємності цих компонентів ($c_в$ та $c_к$, Дж/(кг·К)), а також їхні початкові температури перед змішуванням ($\theta_в$ та $\theta_к$, К). Відповідно, вихідними параметрами, що характеризують результат процесу, є сумарна масова витрата готової суміші ($S_с$, кг/с), її усереднена теплоємність ($c_с$, Дж/(кг·К)) та фактична температура суміші на виході з апарата ($\theta_{рк}$, К). Усі ці змінні графічно відображені на структурній схемі тепломасообміну, наведеній нижче.

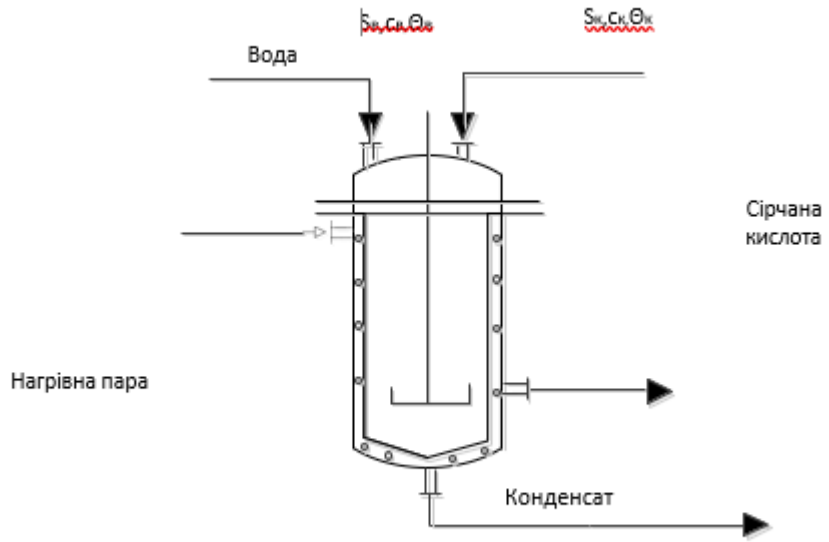



Рис. 2.1. Структурно-параметрична схема реактора-сульфуратора як об'єкта керування теплообміном

Оскільки дослідження сфокусоване на керуванні режимами теплообміну, основним регульованим параметром є саме температура вихідної суміші ($\theta_{рк}$). Для її стабілізації на заданому технологічному рівні в якості керуючого впливу обрано витрату теплоносія (нагрівної пари або охолоджуючої води, залежно від стадії), що подається у теплообмінний контур апарата. Рівняння матеріального та теплового балансів формуються на основі класичного твердження про те, що загальна кількість енергії та речовини, що вноситься в об'єкт, врівноважується їхніми витратами та накопиченням. Спираючись на це правило, було розроблено математичний опис статичного режиму роботи об'єкта. У стані термодинамічної рівноваги тепловий баланс сульфуратора враховує ентальпію вхідних потоків, теплопередачу через стінки апарата, тепловий ефект хімічної реакції за законом Арреніуса та енергію, що виноситься з готовим продуктом. Цей стан описується наступною системою алгебраїчних рівнянь:

$$S_в c_в \theta_в + S_к c_к \theta_к + kF\,(\theta_т - \theta_{рк}) + S_c A_e^{-E/RT} - S_c c_c \theta_{рк} = 0$$

$$S_т(c_т \theta_т - c_к \theta_к) - kF\,(\theta_т - \theta_{рк}) = 0$$

На основі розв'язку наведеної системи рівнянь здійснюється побудова статичних характеристик об'єкта, які візуалізують залежність вихідної температури від різних вхідних факторів у сталому режимі роботи. Головною для налаштування регуляторів є статична характеристика по каналу керування, що описується функціональною залежністю $\theta_{рк} = f(S_т)$. Вона демонструє, як зміна витрати теплоносія впливає на температуру продукту, і наведена на наступному графіку.

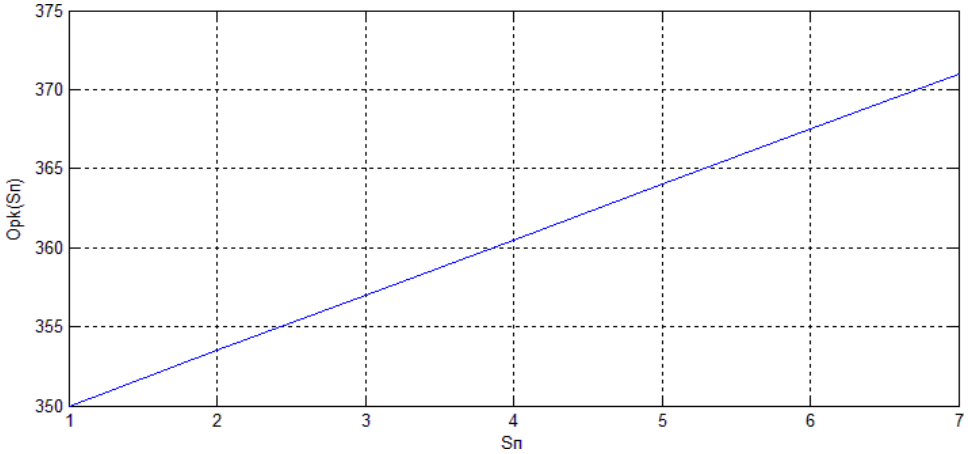



Рис. 2.2 Графік статичної характеристики об'єкта за основним каналом керування

Водночас для налаштування систем компенсації збурень необхідно розуміти реакцію об'єкта на зовнішні неконтрольовані впливи. Такою характеристикою є залежність температури суміші від коливань температури самого теплоносія у живильній магістралі, що описується функцією $\theta_{рк} = f(\theta_т)$. Цей зв'язок відображає чутливість термодинамічної системи до зовнішніх збурень і проілюстрований на відповідному рисунку.

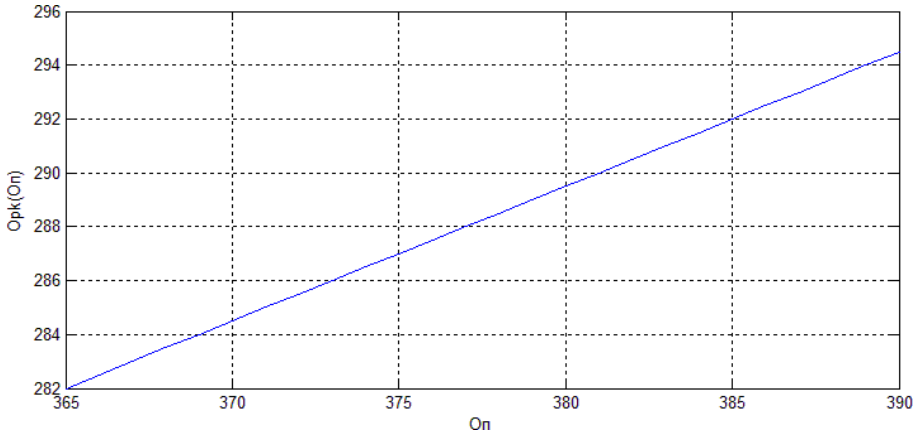



Рис. 2.3 Графік статичної характеристики об'єкта за каналом збурення

## 2.2. Розроблення схеми автоматизації технологічного процесу

### 2.2.1. Постановка задачі з розробки схеми для дистанційного керування та аварійного захисту електродвигунів

Безперебійне функціонування переважної більшості сучасних промислових установок критично залежить від надійної роботи електродвигунів. Для гарантування їхньої довговічності та безпеки експлуатації застосовуються комплексні системи, що інтегрують у собі як електричні, так і механічні контури захисту. На нафтопереробних підприємствах робота насосного обладнання вимагає безперервного моніторингу з боку технічного персоналу та жорсткої синхронізації з алгоритмом перебігу певного технологічного процесу. З огляду на це, проектування багаторівневої системи аварійного захисту та мережі технологічних блокувань для установки очищення масляних дистилятів за допомогою плюмбіту натрію виступає фундаментальною складовою загального проекту автоматизації, що потребує

особливої уваги під час обв'язки електроприводів. Класичний алгоритм пуску передбачає, що при натисканні пускової кнопки спрацьовує магнітний пускач, його нормально відкритий блок-контакт замикається і шунтує кнопку, забезпечуючи подальше саможивлення котушки пускача. Одночасно із цим відбувається замикання трьох силових контактів, які подають напругу на статор електродвигуна, та спрацювання сигнальних контактів для індикації стану механізму. При цьому нормально закритий контакт, що відповідає за сигналізацію вимкненого стану, розмикається. Комплексний захист електроприводу обов'язково включає теплове реле для превентивного відключення живлення у разі неприпустимого перегріву обмоток, а також плавкі запобіжники або автоматичні вимикачі для захисту від струмів короткого замикання.

Розроблювана система автоматичного керування електродвигунами для технологічного циклу очищення масляного дистиляту плюмбітом натрію повинна задовольняти низку жорстких функціональних вимог. Насамперед, вона має забезпечувати миттєве автоматичне відключення аварійного двигуна від трифазної мережі живлення з одночасним формуванням керуючих сигналів для технологічного блокування суміжних електроприводів. Разом із цим система повинна ініціювати безумовне закриття відповідних регулюючих клапанів, щоб миттєво припинити подачу сировини в аварійний контур до моменту повного відновлення працездатності насоса та стабілізації робочого тиску в магістралі. Лише за виконання цих умов можливе подальше продовження безпечного постачання сировини та нормальний перебіг процесу очищення. Під час апаратного проектування схеми аварійного захисту необхідно чітко визначити конфігурацію підключення плати комутації базових захистів (КБЗ) до мікропроцесорного контролера типу ІТМ-11. Технічна специфікація вказує, що плата серії КБЗ 17-К01 оснащена виходами у вигляді твердотільних реле, що робить можливим пряму комутацію дискретних керуючих сигналів постійного струму напругою 24 В. Водночас вітчизняний виробник «МІКРОЛ» пропонує модифікації щитів КБЗ, які дозволяють комутувати дискретні сигнали безпосередньо на котушки контакторів змінною

напругою 220 В. Крім того, існує третій варіант виконання плати, де дискретний сигнал подається безпосередньо на керуючий електрод силового тиристора, що забезпечує безконтактну і надзвичайно швидку комутацію навантаження.

### 2.2.2. Опис роботи системи аварійного захисту електромоторів технологічного процесу

Принцип дії розробленої системи дистанційного керування електродвигунами базується на класичній релейно-контакторній логіці з інтегрованими контурами аварійного захисту. Усі керуючі ланцюги за замовчуванням побудовані таким чином, щоб гарантувати максимальну безпеку у разі обриву ліній зв'язку (принцип відсутності напруги як аварійного стану). У промисловій практиці під час експлуатації відцентрових насосів нерідко виникають нештатні ситуації, пов'язані з потраплянням твердих сторонніх домішок у зазор між внутрішньою поверхнею корпусу насоса (равликом) та лопатями робочого колеса. Це призводить до миттєвого заклинювання крильчатки. У такій ситуації першим повинен спрацювати механічний захист приводу: відбувається зрізання запобіжної шпонки, що з'єднує вал електродвигуна з валом насоса. Внаслідок цього механічного розриву електродвигун різко втрачає корисне навантаження на валу, що призводить до неконтрольованого зростання частоти його обертання та зміни споживаного струму. Саме в цей момент повинна миттєво зреагувати електрична схема захисту, забезпечивши автоматичне знеструмлення двигуна при фактичній зупинці перекачування рідини.

Алгоритм відпрацювання аварії виглядає наступним чином: при фіксації заклинювання або холостого ходу відцентрового насоса відбувається замикання контакту КМ-10, що створює замкнений електричний контур для живлення котушки електромагнітного реле КМ10. Спрацювання цього реле викликає миттєву зміну стану всієї групи його контактів. Зокрема, контакт КМ10-1 стає на самоблокування, а на панелі оператора загоряється червона сигнальна лампа HL21, яка візуально інформує персонал про спрацювання контуру аварійного

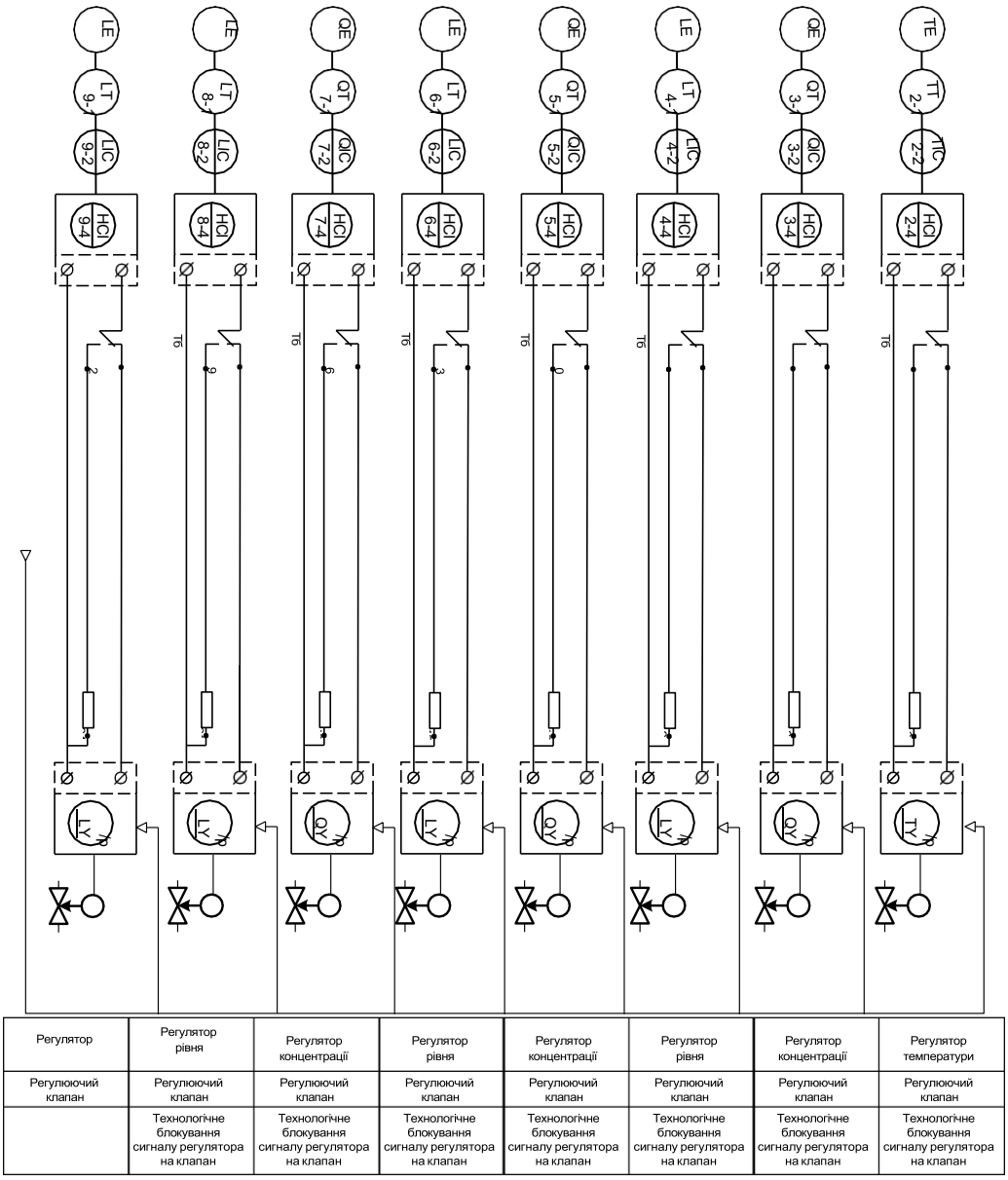
захисту. Одночасно з цим другий, нормально закритий контакт аварійного реле КМ10-2 розмикається, чим фізично розриває коло живлення котушки магнітного пускача МП4. У результаті силові контакти пускача відпадають, і електродвигун М4 гарантовано відключається від мережі. Після проведення ремонтних робіт та усунення механічного засмічення насоса, повторний запуск двигуна М4 здійснюється оператором вручну за допомогою пускової кнопки SB8. Враховуючи той факт, що після зупинки насос не здатен миттєво створити номінальний робочий тиск у трубопроводі, оператор змушений утримувати кнопку SB8 у натиснутому стані до того моменту, поки на пульті не згасне червона лампа HL18 (сигналізація низького тиску). Тільки після її згасання, що свідчить про вихід насоса на робочий режим, кнопку SB8 можна відпустити — подальше живлення магнітного пускача МП4 буде надійно забезпечуватися через його власні блок-контакти МП4-1 та МП4-2.

### 2.2.3. Постановка задачі та опис роботи схеми технологічних блокувань

Система технологічних блокувань є критично важливим надбудовним елементом, який активується у випадку аварійної зупинки будь-якого з відцентрових насосів. Якщо апаратура фіксує аварію і формує відповідний дискретний сигнал, автоматика повинна не лише зупинити двигун, але й перехопити керування регулюючими органами. Це означає, що вихідний сигнал з ПІД-регулятора ігнорується, а виконавчий механізм отримує пряму команду на повне перекриття прохідного перерізу трубопроводу, щоб уникнути виливу сировини чи порушення теплового балансу. Матриця блокувань охоплює кілька типових сценаріїв. Наприклад, у разі падіння або повної відсутності тиску в нагнітальному трубопроводі після насоса М1, система повинна негайно знеструмити його електродвигун та закрити відповідні клапани на позиціях 3-6. Аналогічний алгоритм діє і для інших агрегатів: відсутність тиску на викиді насоса М2 ініціює зупинку його приводу та закриття арматури на позиціях 9-6; падіння напору після насоса М3 призводить до його відключення та перекриття клапанів 4-6; а втрата робочого тиску в магістралі насоса М4 вимагає

знеструмлення однойменного двигуна і примусового закриття клапанів на позиціях 8-6.

Розглянемо більш детально механізм спрацювання такої блокувальної схеми. Ініціатором процесу виступає первинний прилад контролю (наприклад, електроконтактний манометр на позиції 13-2), контакти якого замикаються при падінні тиску рідини нижче критичної позначки. Це призводить до подачі керуючої напруги (24 В постійного струму) на котушку проміжного реле КМ5. Після його спрацювання замикається контакт КМ5-1, що вмикає попереджувальну світлову сигналізацію HL12 і паралельно подає потенціал на котушку наступного реле КМ6. Коли реле КМ6 втягує свій якір, його контакт КМ6-1 (в колі 220 В) стає на самоутримання, а лампа HL13 продовжує світитися, фіксуючи подію падіння тиску та перехід системи в режим блокування. У цей же час розмикається контакт КМ6-2 у силовій схемі управління, безповоротно зупиняючи аварійний електродвигун. Найцікавішим є процес відключення самого регулятора від виконавчого механізму (клапана): нормально закритий контакт КМ6-4 розмикає лінію зв'язку між контролером та клапаном, а нормально відкритий контакт КМ6-3 замикається. Цей маневр дозволяє перемкнути струмовий вихід регулятора на спеціальний еквівалентний резистор навантаження (баластний опір). Таке технічне рішення запобігає обриву струмової петлі та накопиченню інтегральної помилки в обчислювачі регулятора, завдяки чому його налаштування не збиваються, і він продовжує коректно формувати сигнал неузгодженості для майбутнього безударного переходу в автоматичний режим. Візуалізація цього процесу наведена на рисунку нижче.




| Регулятор | Регулятор рівня | Регулятор концентрації | Регулятор рівня | Регулятор концентрації | Регулятор рівня | Регулятор концентрації | Регулятор температури |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Регулюючий клапан | Регулюючий клапан | Регулюючий клапан | Регулюючий клапан | Регулюючий клапан | Регулюючий клапан | Регулюючий клапан | Регулюючий клапан |
| | Технологічне блокування сигналу регулятора на клапан | Технологічне блокування сигналу регулятора на клапан | Технологічне блокування сигналу регулятора на клапан | Технологічне блокування сигналу регулятора на клапан | Технологічне блокування сигналу регулятора на клапан | Технологічне блокування сигналу регулятора на клапан | Технологічне блокування сигналу регулятора на клапан |

Рис. 2.4 Структурно-функціональна схема блокування керуючого сигналу та перемикання регулюючого клапана

Для забезпечення фізичної реалізації описаних вище алгоритмів дистанційного керування, аварійного захисту та системи технологічних блокувань розроблено відповідну схему монтажно-комутаційних з'єднань (наведена нижче на рисунку 2.5). Вона детально описує топологію підключення всіх елементів управління до уніфікованих клемних збірок.

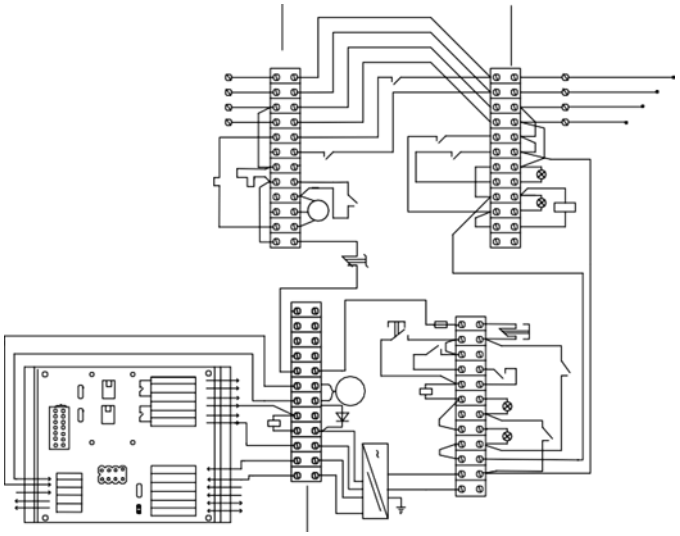


Рис. 2.5 Схема монтажно-комутаційних з'єднань системи автоматики та технологічних блокувань

### 2.2.4. Монтажно-комутаційна реалізація системи керування та захисту

Архітектура вторинної комутації побудована на базі стандартизованих клемних колодок серії LTA 12-6.0, кожна з яких виконує свою логічну функцію в загальній системі. Так, на першій клемній колодці (X1) організовано розподіл силового живлення: перші чотири клеми (з 1 по 4) жорстко зарезервовані для підведення трьох фаз промислової мережі та нульового провідника робочого заземлення. На цю ж колодку виведені ланцюги керування індикацією та релейним захистом. Зокрема, до клем 5 та 10 приєднано виводи котушки електромагнітного реле КМ10-1, яке відповідає за фіксацію аварійного стану, тоді як контакти 6 та 8 слугують для підключення реле КМ4-1. Для забезпечення візуального контролю стану системи до клем 7 і 8 підведена лінія живлення сигнальної лампи HL19, а до клем 9 та 10 — лампи HL18, яка інформує про стан тиску в магістралі. Також на клемах 9 та 11 цієї колодки розташовані точки підключення нормально відкритого блок-контакту магнітного пускача МП4. Додаткові перемички організовані між клемами 4 і 1 (для контакту МП4-4) та 6 і 2 (для контакту МП4-6).

Наступна клемна колодка (X2) виконує функцію комутації нульових провідників керуючих кіл (клеми 1, 2, 3 та 4 об'єднані спільною шиною). Окрім цього, на ній зібрані ланцюги живлення виконавчих механізмів: до клем 5 і 11 підключено загальний вимикач FP8, а клеми 7 та 8 призначені для включення в

коло автоматичного вимикача FP8-1. Безпосереднє підключення силових обмоток електродвигуна здійснюється через клеми 9, 10 та 11, тоді як керування його магнітним пускачем (контакт МП4-4) виведено на клеми 8 і 9 цієї ж збірки.

Організація постів місцевого та дистанційного керування зосереджена на клемній колодці X3. Сюди виведені лінії зв'язку від пультової апаратури: кнопка зупинки або оперативного втручання SB7 комутується через клеми 1 і 2, а пускова кнопка SB8 заведена на контакти 2 та 5. Для забезпечення надійного самопідхоплення магнітних пускачів на цій колодці широко використовуються їхні нормально відкриті контакти: контакт МП4-2 дублюється на парах клем 2-9 та 3-4, загальний блок-контакт МП4 виведений на клеми 5 і 6, а контакт МП4-3 підключений до клем 7 і 11. На цій же колодці організовано зв'язок з релейною логікою (реле КМ4-1 на клемах 4 і 5) та системою сигналізації (лампа HL18 на клемах 6-7, лампа HL19 на клемах 8-9). Крім того, на клеми 8 і 1 виведено плавкий запобіжник FU4, а на клеми 8 і 12 — ключ управління SA2.

Остання клемна колодка (X4) відповідає за підключення слабкострумових кіл постійного струму та спеціалізованої апаратури. Клеми з 1 по 4 призначені для розведення полюсів («+» та «-») стабілізованих блоків живлення серії BPS 24-2K. Ці ж клеми (1, 2, 3, 5, 6, 7) використовуються для інтеграції в систему комутаційної плати КВЗ-17К-01. До клем 4 і 5 приєднана котушка проміжного реле КМ9, паралельно якій для захисту від електрорушійної сили самоіндукції підключено розрядний діод VD9. Нарешті, клеми 6 та 7 зарезервовані для підключення зовнішнього первинного пристрою контролю з технологічної позиції 15-1. Наявність такої деталізованої системи монтажно-комутаційних з'єднань є абсолютно необхідною умовою для коректного безпомилкового підключення всіх засобів автоматизації до загальної схеми управління підприємством, гарантуючи її надійну та прогнозовану роботу в умовах реального виробництва.

### 2.3 Налаштування регулятора керування теплообміном за допомогою інтерактивного середовища SISOTool

Для ефективного вирішення комплексної інженерної проблеми синтезу корегуючого пристрою, яким у нашому випадку виступає промисловий регулятор температури, а також для точного налаштування попереднього фільтра (пристрою прямого зв'язку), у даній роботі використовується спеціалізоване інтерактивне програмне середовище SISOTool. Цей потужний інструментарій, що входить до базового складу пакета прикладних програм MATLAB, слугує для науково обґрунтованого вибору структурного типу та точних налаштувальних параметрів керуючого пристрою [5]. Такий вибір базується на жорстких технологічних вимогах до якості функціонування проектованої системи автоматичного керування режимами теплообміну, що висуваються як до динамічних перехідних, так і до сталих (усталених) режимів роботи реактора. Цілеспрямований синтез у цьому середовищі передбачає, що дослідником уже попередньо отримані та верифіковані адекватні математичні моделі всіх елементів незмінної частини проектованої системи керування, а також остаточно обрано допустимий закон управління, який детермінує загальну структурну схему температурного контуру.

На початковому етапі комп'ютерного моделювання необхідно математично формалізувати динамічні властивості об'єкта керування. Для цього в командному вікні програмного комплексу MATLAB задається передавальна функція нашого технологічного об'єкта тепломасообміну. Відповідно до попередньо розрахованої математичної моделі, ініціалізація масиву чисельника (`num`) та масиву знаменника (`den`) здійснюється шляхом введення відповідних векторів коефіцієнтів за допомогою команд `num = [3.63]` та `den = [28400 404.709 1]`. Після цього формується безпосередньо сама передавальна функція об'єкта шляхом виклику стандартної команди `Wp = tf(num, den)`. Для забезпечення коректного академічного відображення змінної комплексного перетворення Лапласа застосовується додатковий оператор `Wp.variable = 'p'`. У результаті виконання цієї послідовності команд програмне середовище генерує та виводить на екран безперервну передавальну функцію теплового процесу в

наступному аналітичному вигляді:

$$W(p) = \frac{3.63}{28400p^2 + 404.709p + 1}$$

Після успішної ініціалізації математичної моделі теплового об'єкта, безпосередній перехід до процедури налаштування здійснюється шляхом виклику інтерактивного середовища за допомогою команди `sisotool(Wp)`. Внаслідок цього на екрані відкривається спеціалізоване вікно графічного редактора Control System Designer, у якому дослідник має змогу візуально визначити та обрати необхідну архітектуру системи керування теплообміном. Цей етап є критично важливим, оскільки саме тут формується базова топологія прямих та зворотних зв'язків контуру регулювання температури суміші. Графічний інтерфейс вікна вибору архітектури та конфігурації системи представлений нижче на рисунку 2.6.

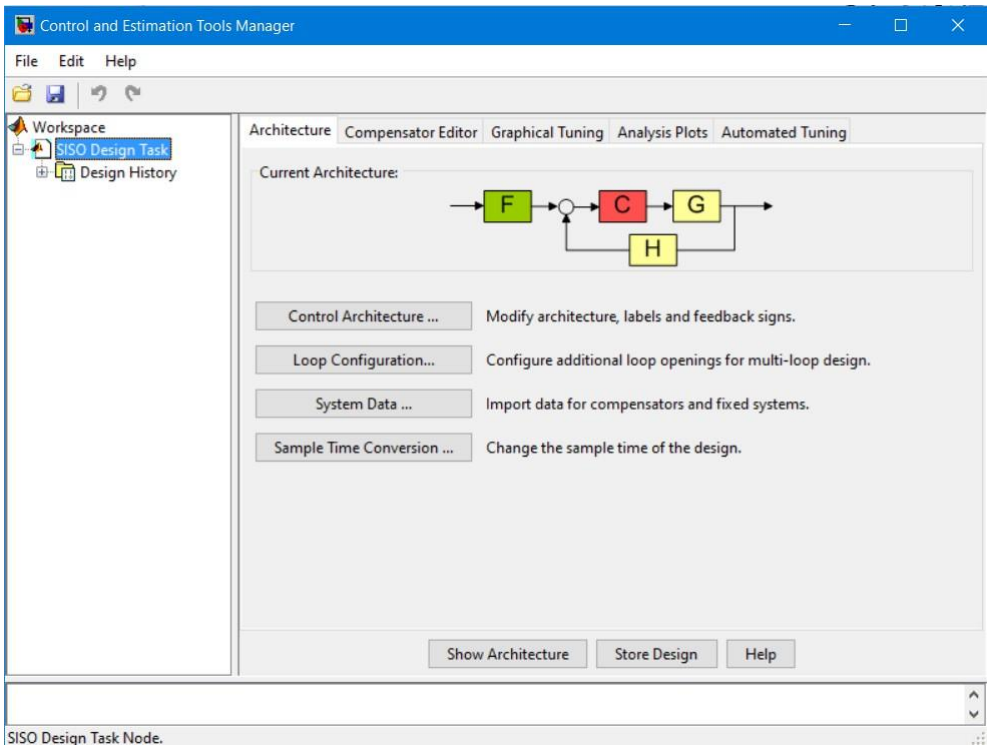



Рис. 2.6. Вікно редактора архітектури системи керування в середовищі SISOTool

Наступним, найбільш відповідальним кроком є безпосередній ітеративний підбір оптимальних значень для налаштувань температурного регулятора. Використовуючи інтерактивні графічні можливості середовища SISOTool, здійснюється плавна зміна коефіцієнта підсилення, а також постійних часу інтегрування та диференціювання. Головною метою цих математичних маніпуляцій є досягнення бажаних запасів стійкості по амплітуді та фазі, що гарантуватиме відсутність небезпечних температурних автоколивань у сульфураторі під час екзотермічної реакції. Інтерфейс панелі налаштування параметрів регулятора детально проілюстрований на рисунку 2.7.

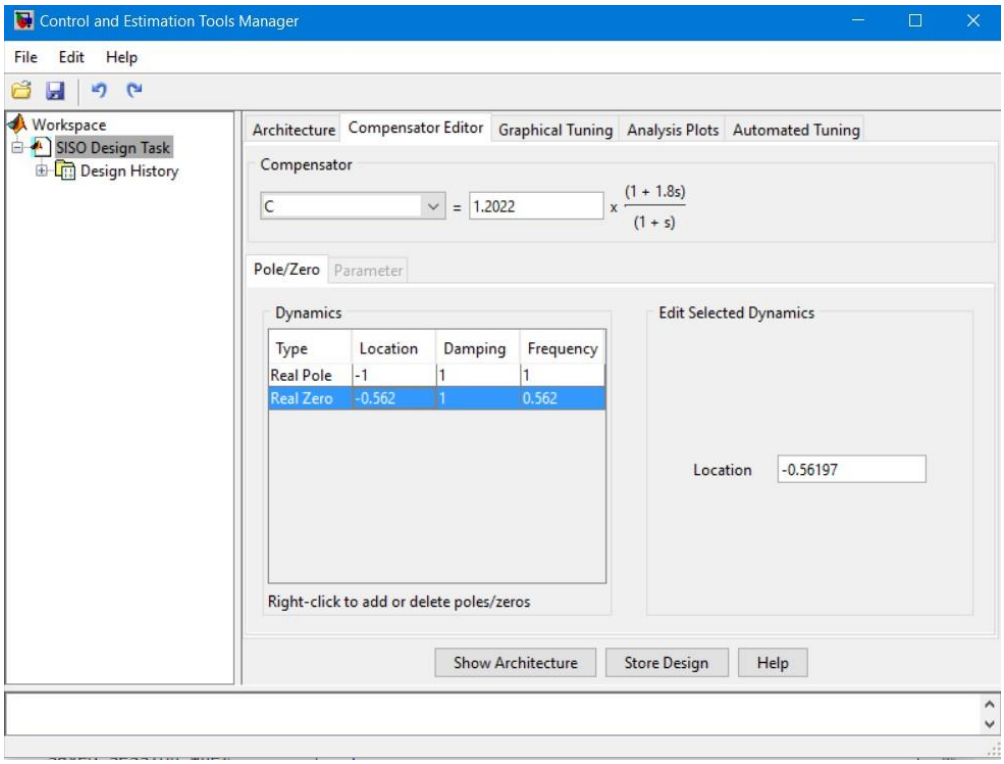



Рис. 2.7 Інтерфейс панелі параметричного налаштування регулятора теплообміну

Кінцевим критерієм правильності проведеного синтезу та ефективності підібраних параметрів ПІД-регулятора є комплексний аналіз поведінки замкненої системи в часовій області. Для цього в середовищі моделювання генерується реакція налаштованої автоматичної системи керування на одиничний ступінчастий тестовий вплив (функція Хевісайда). Отримана крива перехідного процесу дозволяє наочно оцінити такі ключові показники якості регулювання температури, як час входження в зону допустимої похибки,

величина динамічного перерегулювання та статична похибка в усталеному режимі. Графік перехідної функції синтезованої системи керування тепловим режимом зображений на рисунку 2.8.

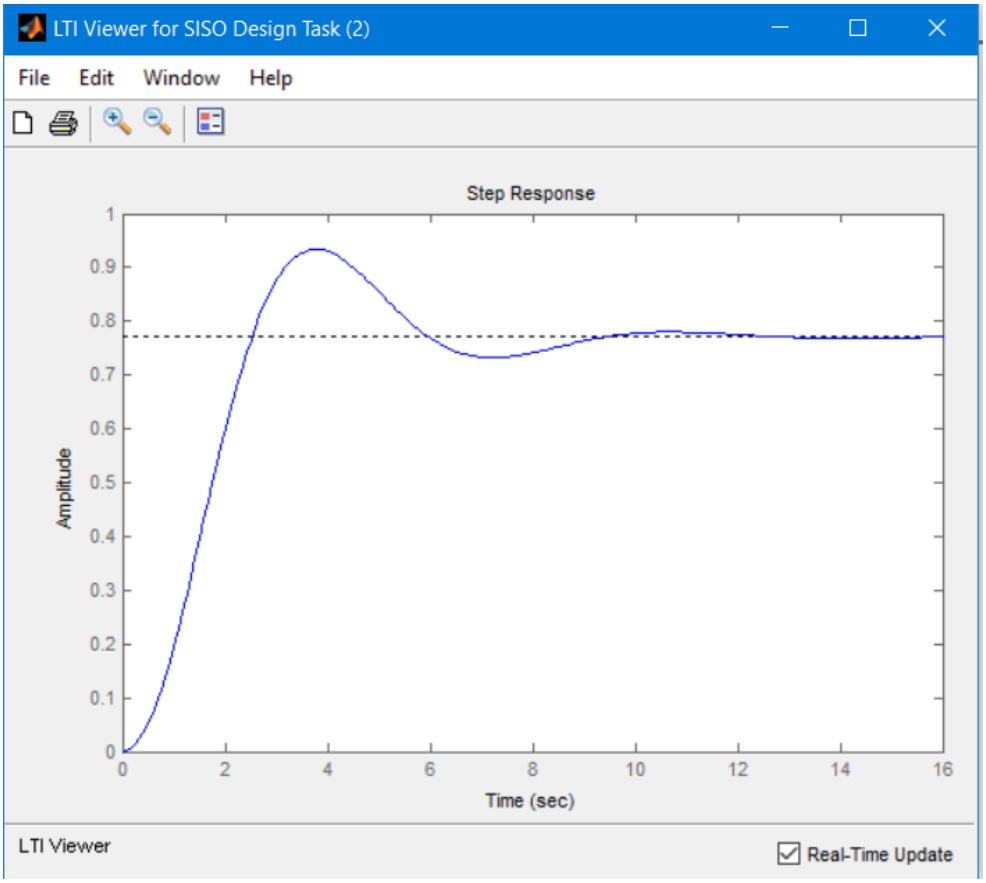



Рис. 2.8 Графік реакції налаштованої замкненої системи керування на одиничний ступінчастий тестовий сигнал

### 2.4. Моделювання системи керування у середовищі Simulink

Програмне середовище Simulink виступає потужною та невід'ємною складовою базового математичного комплексу MATLAB, забезпечуючи передовий інструментарій для глибокого структурного та візуально-графічного моделювання широкого спектра динамічних систем. У контексті даного дослідження цей інструмент використовується для імітаційного моделювання теплових режимів реактора очищення мастильних матеріалів. Як безперервні, так і дискретні технологічні процеси (зокрема, екзотермічні реакції сульфування та процеси теплопередачі) легко піддаються формалізації у цьому

середовищі. Об'єкт керування та всі допоміжні елементи контуру регулювання представлені у вигляді великого бібліотечного набору уніфікованих, логічно завершених функціональних блоків. Взаємодія між цими модулями реалізується шляхом встановлення інформаційних зв'язків за класичним принципом "вхід-вихід", що під час візуальної побудови імітаційної моделі на екрані ПК відображається у вигляді спрямованих ліній або стрілок, які символізують потоки даних, керуючих сигналів або енергетичних середовищ.

З метою практичного дослідження динаміки процесу нагрівання та охолодження масляного дистиляту, на базі вбудованих бібліотек Simulink було розроблено та синтезовано комплексну імітаційну схему замкненої автоматичної системи керування. Головним керуючим елементом у цій схемі виступає пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор, налаштований на підтримання стабільного теплового балансу. Створена візуальна модель дозволяє імітувати реальні умови експлуатації сульфуратора, враховуючи як внутрішні тепловиділення під час хімічної взаємодії, так і зовнішні керуючі впливи від подачі теплоносія у змійовик. Графічне представлення розробленої структурної моделі теплового контуру наведено на рисунку 2.9.

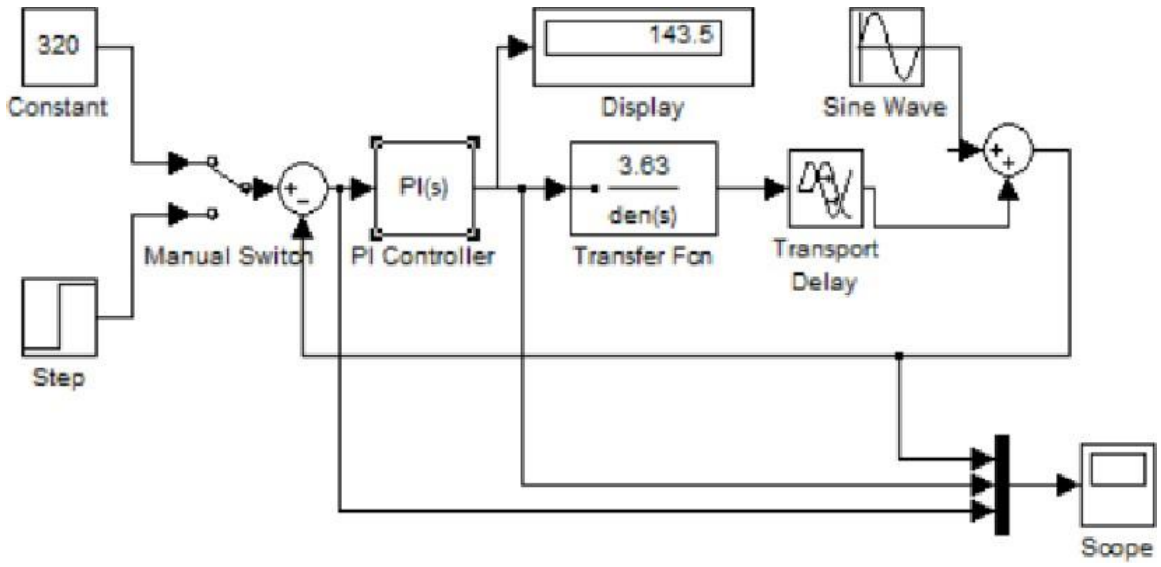



Рис. 2.9. Імітаційна структурна модель замкненої системи керування температурним режимом на базі ПІД-регулятора

Після завершення етапу структурного синтезу системи, для проведення повноцінного обчислювального експерименту необхідно було виконати параметричну ініціалізацію всіх блоків. Шляхом введення раніше розрахованих математичних параметрів безпосередньо для об'єкта керування (інертність теплообмінника, коефіцієнти масообміну), задатчика еталонної температури та самого ПІД-регулятора, математична модель була підготовлена до симуляції. Запуск процесу імітаційного моделювання дозволив отримати низку важливих часових залежностей, які характеризують якість підтримання термодинамічних параметрів очищення. Зокрема, було досліджено здатність системи компенсувати зовнішні температурні коливання та раптові зміни витрати сировини, що наочно демонструє рисунок 2.10.

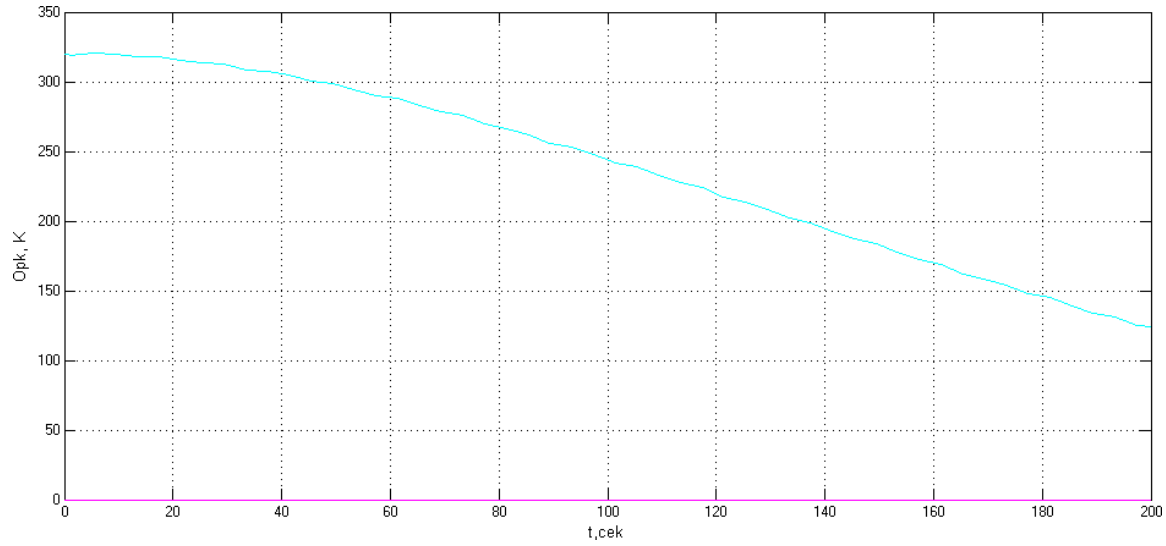
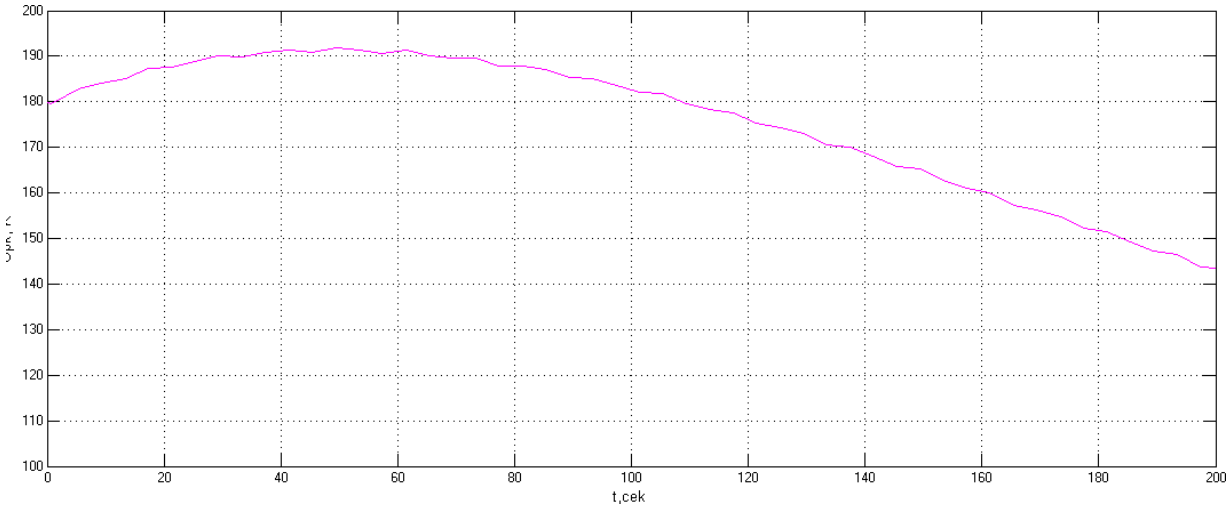



Рис. 2.10. Графік реакції синтезованої системи автоматичного керування теплообміном на дію зовнішнього неконтрольованого збурення

Для комплексної оцінки ефективності відпрацювання керуючих впливів було згенеровано криву перехідного процесу. Вона відображає динаміку зміни температури в сульфураторі від моменту подачі стартового сигналу до виходу на заданий стаціонарний технологічний режим. Форма цієї кривої підтверджує правильність обраних налаштувань ПІД-регулятора, які мінімізують динамічне закидання температури (перерегулювання) та забезпечують плавний і безпечний вихід на робочу точку. Відповідна перехідна функція

температурного контуру представлена на рисунку 2.11. Крім того, ключовим індикатором точності роботи автоматики є динаміка зміни сигналу неузгодженості (помилки керування) з плином часу. Аналіз цього графіка, наведеного на рисунку 2.12, засвідчує, що статична похибка регулювання




температури масляного дистиляту стрімко наближається до нуля, що повністю задовольняє жорсткі технологічні вимоги до процесу глибокого очищення.

Рис. 2.11 Перехідна характеристика контуру управління ПІД-регулятора при відпрацюванні заданого температурного режиму

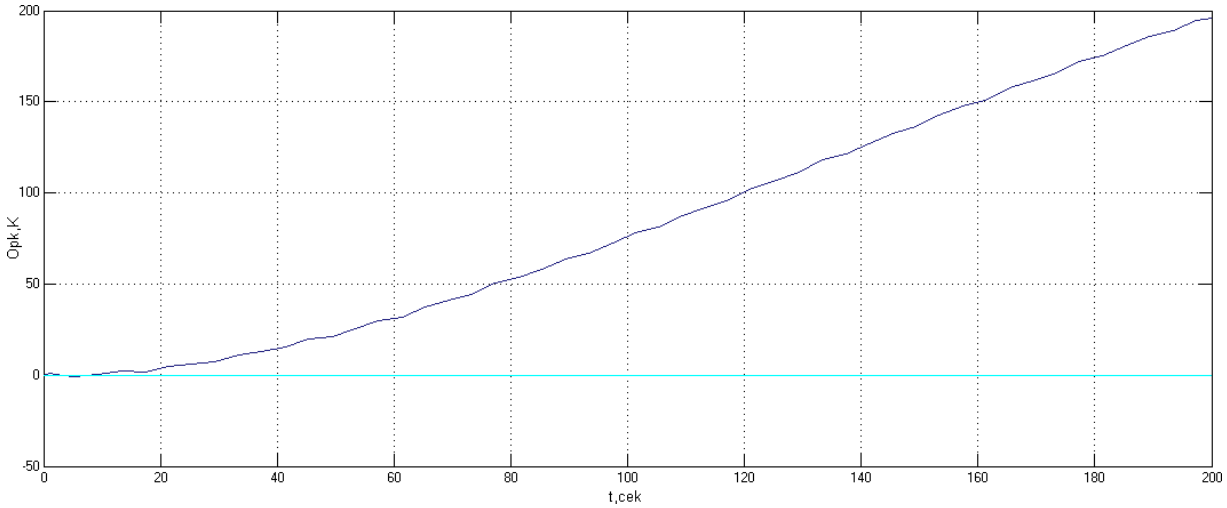



Рис. 2.12 Графік зміни величини динамічної помилки керування (сигналу неузгодженості) у часі

**Висновки до розділу 2**

У другому розділі було проведено математичне моделювання об'єкта та розроблено схеми автоматизації і захисту технологічного процесу. Було розроблено математичну модель тепломасообмінних процесів у сульфураторі

на основі фундаментальних рівнянь матеріального та теплового балансів. Побудовані статичні характеристики дозволили візуалізувати залежність вихідної температури від різних вхідних факторів, зокрема від витрати та температури теплоносія по основному каналу керування та каналу збурення.

Окрім цього, спроектовано систему дистанційного керування електродвигунами відцентрових насосів, яка забезпечує миттєве автоматичне відключення живлення у разі виникнення аварійних ситуацій, таких як заклинювання крильчатки. Впроваджена система технологічних блокувань гарантує повне перекриття регулюючих клапанів при відсутності або падінні тиску в трубопроводі, що дозволяє уникнути небезпечного виливу сировини чи порушення теплового балансу. Для фізичної реалізації цих алгоритмів розроблено детальну схему монтажно-комутаційних з'єднань на базі стандартизованих клемних колодок.

За допомогою інтерактивного програмного середовища SISOTool у MATLAB було проведено ітеративний підбір параметрів для промислового ПІД-регулятора температури. Такий підхід забезпечив досягнення бажаних запасів стійкості системи та гарантував відсутність небезпечних температурних автоколивань під час перебігу екзотермічної реакції сульфування.

На фінальному етапі в середовищі Simulink було розроблено комплексну структурну модель замкненої системи керування тепловим режимом. Аналіз отриманих графіків перехідних процесів та динаміки помилки керування підтвердив ефективність обраних налаштувань: система мінімізує динамічне перерегулювання та стрімко зводить статичну похибку до нуля, повністю задовольняючи жорсткі технологічні вимоги до процесу глибокого очищення.

# РОЗДІЛ 3 СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИСТКИ МАСЛЯНОГО ДИСТИЛЯТУ

## 3.1 Розрахунок оптимального програмного керування

Вирішення комплексної задачі стабілізації температурного режиму в реакторі-сульфураторі під час очищення масляних дистилятів вимагає застосування передових методів теорії автоматичного керування. Для мінімізації енергетичних витрат на нагрівання та охолодження, а також для забезпечення найвищої якості перехідних процесів, було здійснено розрахунок оптимального програмного керування з використанням потужного математичного інструментарію інтегрованого програмного пакета MATLAB. На початковому етапі синтезу автоматичної системи в командному вікні середовища здійснюється ініціалізація базових параметрів, зокрема задається початкове значення матриці коефіцієнтів ланки зворотного зв'язку за допомогою команди K = [-1 1; -1 1];.

Після визначення початкових умов формується комплексна імітаційна модель в інтерактивному середовищі Simulink. Ця блок-схема відображає архітектуру замкненого контуру регулювання теплообміну і дозволяє наочно дослідити динаміку об'єкта під дією розрахованих керуючих впливів. Розроблена візуальна структурна схема системи керування представлена на рисунку 3.1.

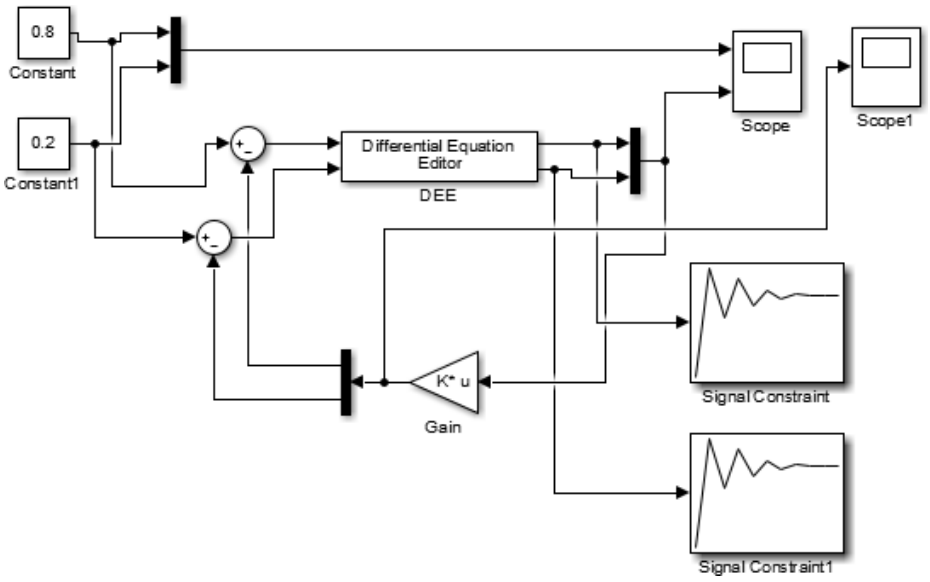



Рис. 3.1. Структурно-імітаційна модель оптимальної системи керування в

середовищі Simulink

Для забезпечення максимальної адекватності математичної моделі реальним фізико-хімічним процесам екстракції, детальне налаштування моделі об'єкта виконується на базі спеціалізованого редактора диференціальних рівнянь (Differential Equation Editor, DEE). Щоб активувати цей програмний інструмент і задати систему нелінійних рівнянь теплового балансу, в командному рядку MATLAB вводиться директива dee. У діалоговому вікні редактора, що відкривається після цього, здійснюється точна конфігурація динамічних залежностей та інерційних параметрів об'єкта, як це детально проілюстровано на рисунку 3.2.

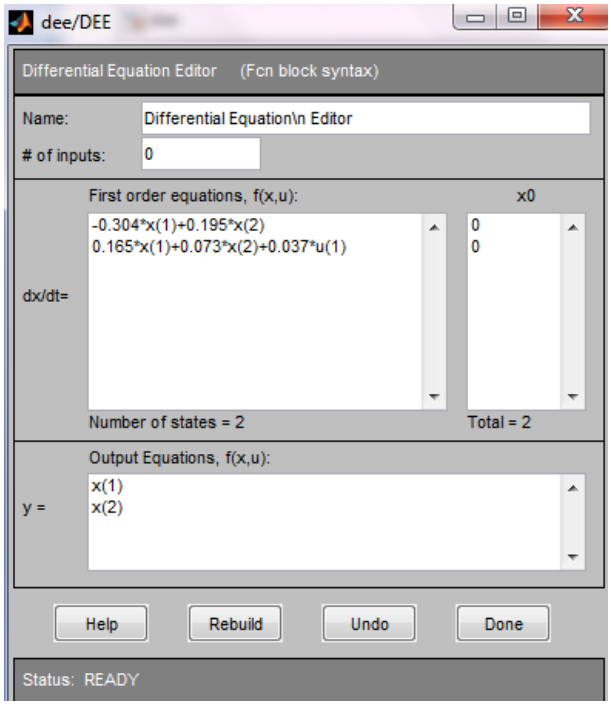



Рис. 3.2. Інтерфейс конфігурації параметрів об'єкта у редакторі диференціальних рівнянь DEE

Синтез повноцінної системи автоматичного регулювання в імітаційному середовищі вимагає залучення широкого спектра функціональних блоків з базових бібліотек. Зокрема, для ініціалізації технологічного завдання та формування еталонних сигналів температури застосовуються блоки констант Constant та Constant1, які імпортуються з розділу Simulink Sources. Операції алгебраїчного додавання сигналів неузгодженості та формування помилки

керування реалізуються за допомогою суматорів з бібліотеки Math Operations. З цього ж розділу до схеми додається ланка матричного зворотного зв'язку. Для маршрутизації інформаційних потоків, розгалуження та об'єднання сигналів від віртуальних датчиків і регуляторів використовуються комутаційні компоненти з бібліотеки Signal Routing. Водночас ключовим елементом для виконання процедури параметричної оптимізації є блок обмеження сигналів Signal Constraint, інтегрований з пакета Simulink Response Optimization. Процес введення та фіксації параметрів, що підлягають автоматичному налаштуванню під час оптимізації температурного режиму, наведено на рисунку 3.3.

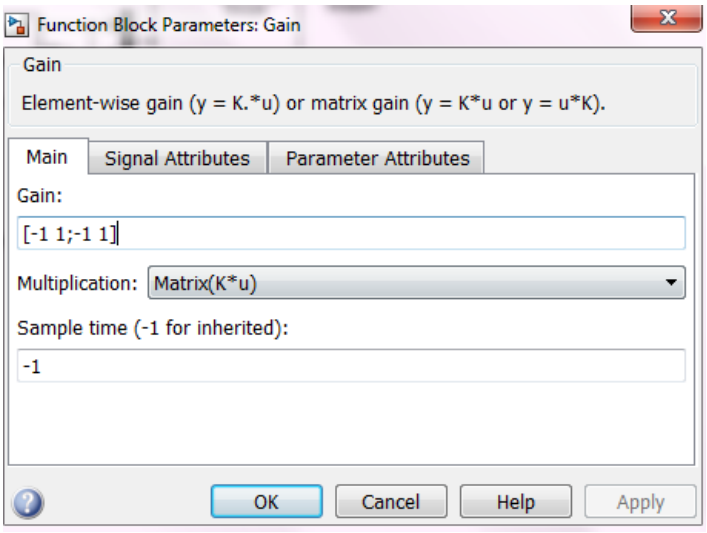



Рис. 3.3. Вікно визначення оптимізаційних параметрів та обмежень керуючого сигналу

Безпосереднім результатом роботи оптимізаційного алгоритму є генерація оптимальних траєкторій керування витратою теплоносія. Оцінка якості відпрацювання заданих температурних режимів здійснюється шляхом аналізу отриманих осцилограм, які відображають як еталонне завдання, так і реальні перехідні процеси в тепловій системі сульфуратора. Відповідні графічні залежності показані на рисунку 3.4.

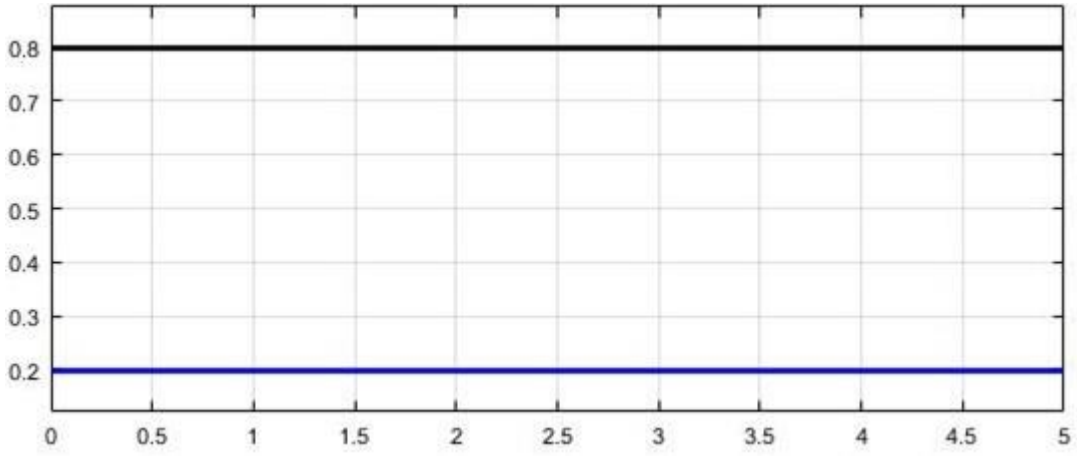



Рис. 3.4. Динаміка перехідних процесів та відпрацювання температурного завдання в оптимізованій системі

Окрім параметричної оптимізації структурної схеми, класичний розрахунок оптимального програмного керування базується на принципі максимуму і передбачає інтегрування основної системи в прямому часі та відповідної спряженої системи у зворотному часі. Графічне відображення еволюції змінних спряженої системи у зворотному часі наведено на рисунку 3.5. Програмна реалізація цього складного математичного алгоритму здійснюється за допомогою спеціально розробленого скрипта. Повний лістинг програми розрахунку оптимального керування має такий вигляд:

Matlab

```
A=[a11 a12 a13 a14; a21 a22]
B=[0;b]
TAU=0.001; N=5000; q=1; r=1;
x1(1)=tgs0; x2(1)=tp0;
for i=1:N-1
    x1(i+1)=(a11*x1(i)+a12*x2(i))*TAU+x1(i);
    x2(i+1)=(a21*x1(i)+a22*x2(i)+b*Fp)*TAU+x2(i);
end
t=1:N;
plot(t,x1,'m')
hold on;
plot(t,x2)
grid;
X=[x1;x2];
Lam1(N)=X(1,N);
Lam2(N)=X(2,N);
for i=N:-1:2
        Lam1(i-1)=Lam1(i)-TAU*(-q*X(1,i)-a11*Lam1(i)-a21*Lam2(i));
    Lam2(i-1)=Lam2(i)-TAU*(-a21*Lam1(i)-a22*Lam2(i));
end
figure;
plot(t,Lam1,'m')
hold on;
plot(t,Lam2)
grid;
LAM=[Lam1;Lam2];
for i=1:N
```

```
    Uopt(i)=-r^(-1)*b*LAM(2,i);
end
figure;
plot(t,Uopt,'m')
grid;
```

В основу наведеного вище розрахункового алгоритму покладено суворий матричний опис простору станів досліджуваного об'єкта теплообміну. Для даного реактора матриця динаміки системи A та вектор керування B набувають наступних визначених числових значень:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 36.378 & -10440 \\ 10150 & 36.378 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0{,}037 \end{bmatrix}$$

Оптимізаційні вагові коефіцієнти для фазових координат та витрат на керування задаються як q = 1 та r = 1 відповідно, а крок дискретизації за часом становить TAU = 0.001. Різницеві рівняння для ітераційного обчислення векторів спряженого стану Lam1 та Lam2 на кожному кроці інтегрування s мають такий аналітичний вигляд:

$$Lam1_{s-1} = Lam1_s - TAU[-q(X_0)_s - a_{11}Lam1_s - a_{21}Lam2_s]$$
$$Lam2_{s-1} = Lam2_s - TAU[-a_{21}Lam2_s - a_{22}Lam2_s]$$

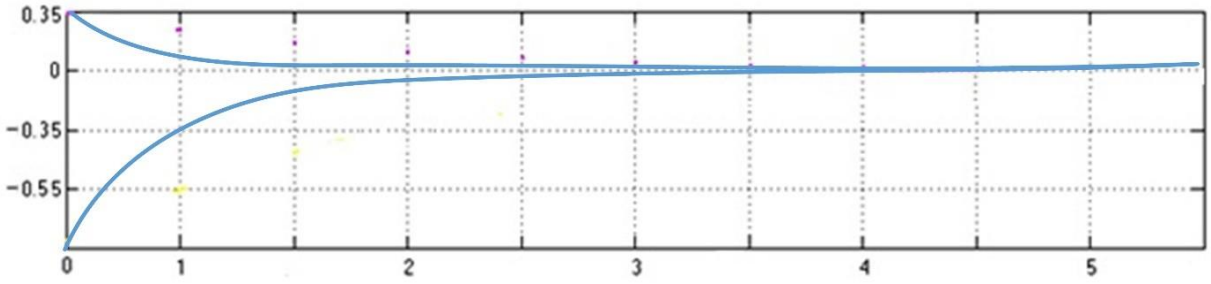



Рис. 3.5. Графік інтегрування спряженої системи рівнянь у зворотному часі

Базуючись на знайдених значеннях спряжених змінних, система автоматично синтезує фінальний вектор оптимального керуючого впливу, який гарантує переведення реактора-сульфуратора в заданий тепловий стан із мінімальними енергетичними витратами. Математично цей закон керування описується таким співвідношенням:

$$U_s = -r^{-1} \cdot b(Lam_1)_s$$

Графічні результати розрахунку кінцевого вектора оптимального керування, який у вигляді керуючого сигналу подається на виконавчі механізми системи подачі теплоносія, детально проілюстровано на рисунку 3.6.

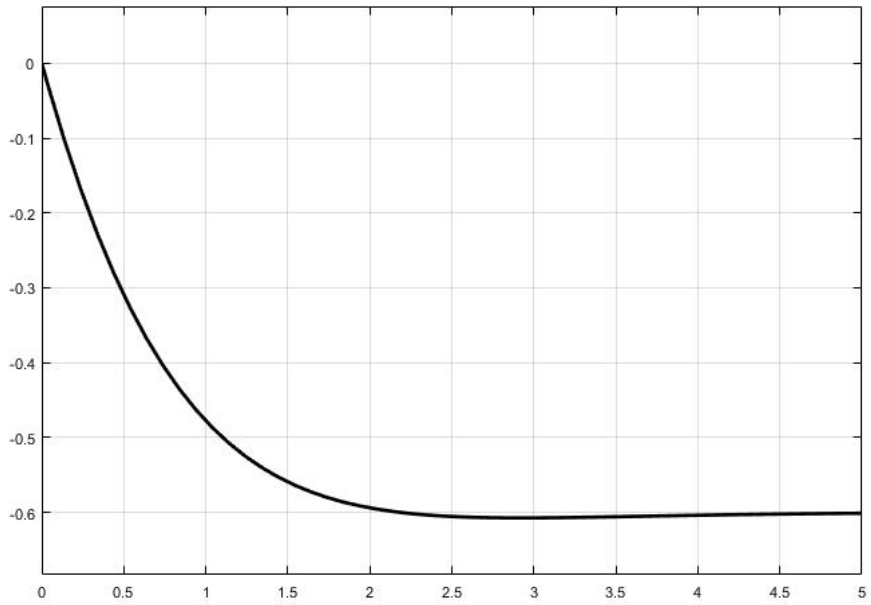



Рис. 3.6. Еволюція вектора оптимального керуючого впливу в часі

### 3.2. Проектування оптимального лінійно-квадратичного регулятора

Наступним надзвичайно важливим етапом оптимізації системи автоматичного керування режимами теплообміну є проектування оптимального лінійно-квадратичного регулятора (ЛКР). На рисунку 3.7 детально представлена структурно-алгоритмічна схема замкненого контуру керування температурою реакційної суміші (масляного дистиляту та реагентів) на виході з реактора-сульфуратора. Безпосередній розрахунок параметрів оптимального керування зі зворотним зв’язком та інтегрально-квадратичним критерієм якості був реалізований за допомогою вбудованих функцій математичного пакета MATLAB. Відповідно до класичної теорії автоматичного управління, оптимальний лінійний регулятор формує керуючий вплив на об'єкт за наступним пропорційним законом:

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

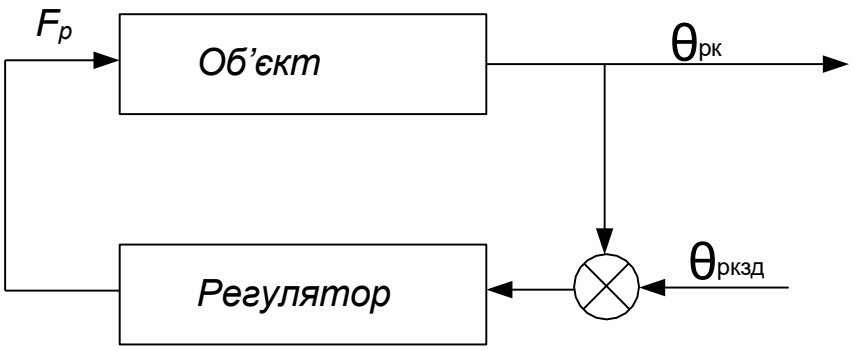



Рис. 3.7 Структурно-алгоритмічна схема контуру оптимального керування температурним режимом

Наведені вище аналітичні залежності дозволяють розрахувати лінійний оптимальний регулятор із відповідним матричним коефіцієнтом підсилення K. Головною функцією цього багатовимірного регулятора є мінімізація заданого функціоналу (критерію якості) на всіх можливих траєкторіях руху динамічної системи в просторі станів. Вводячи більш загальний квадратичний критерій якості, який комплексно враховує як енергетичні витрати на керування тепловим режимом (нагрівну пару чи охолоджуючу воду), так і точність підтримання заданої температури (взаємозв'язки між вектором керування та вектором стану), можна отримати такий вираз:

$$J = \frac{1}{2} \cdot X(tf)^T S_f X(tf) + \frac{1}{2} \int_0^{tf} (X^T Q X + U^T RU) dt$$

Базуючись на мінімізації наведеного вище функціоналу, математично доводиться, що закон функціонування оптимального регулятора повністю визначається виразом для матричного коефіцієнта підсилення:

$$K = R^{-1} B^T P$$

Проте варто обов'язково відмітити низку складнощів, що неминуче виникають під час практичної реалізації алгоритмів оптимального керування на реальних нафтопереробних підприємствах. Дуже часто інженерам не вдається

отримати абсолютно точні характеристики об'єкта для ідеальної оптимізації процесу теплообміну. Це здебільшого зумовлено тим, що на етапі побудови вихідної математичної моделі використовуються наближені або апроксимуючі передавальні функції. Вони цілком адекватно враховують основні домінуючі фізичні зв’язки, але завжди дещо відрізняються від реальної термодинамічної поведінки промислової установки. У реальних умовах експлуатації похибка таких алгоритмів оптимізації має тенденцію до поступового зростання (особливо на тривалих часових інтервалах безперервної роботи реактора), що може призвести до системної нестійкості. Саме явище нестійкості алгоритмів оптимізації безпосередньо пов’язане з жорсткими умовами обчислювальної реалізації матричного диференціального рівняння Ріккаті, розв’язок якого в процесі накопичення машинної похибки може втрачати свою фундаментальну властивість симетричності.

Під час проведення серії обчислювальних експериментів та порівняння результатів, отриманих для системи оптимального керування зі зворотним зв’язком, було виявлено важливу закономірність. З'ясувалося, що спроба застосування додаткового інтегрального критерію якості для пошуку оптимального керуючого впливу в замкненій системі насправді відчутно погіршує загальну якість регулювання. Це проявляється у значному збільшенні динамічного перерегулювання системи (небажані раптові стрибки температури сировини), що є вкрай негативним ефектом для процесу сульфування, де локальний перегрів є технологічно неприпустимим. З огляду на ці фактори, було прийнято обґрунтоване інженерне рішення: інтегральну складову в закон управління вводити не потрібно. Для подальшого синтезу було остаточно обрано виключно квадратичний критерій якості.

Розроблена на цій базі оптимальна система керування зі зворотним зв'язком була успішно змодельована в програмному середовищі MATLAB. Динаміка обчислення параметрів регулятора добре ілюструється графіком зміни коефіцієнтів матричного рівняння Ріккаті, який детально зображено на рисунку 3.8.

На фінальному етапі комп'ютерного моделювання були також отримані та проаналізовані порівняльні графіки зміни вектора стану термодинамічної системи в часі при застосуванні класичного оптимального лінійного регулятора та його модифікації з інтегральною складовою, що повністю підтвердило правильність обраного підходу.

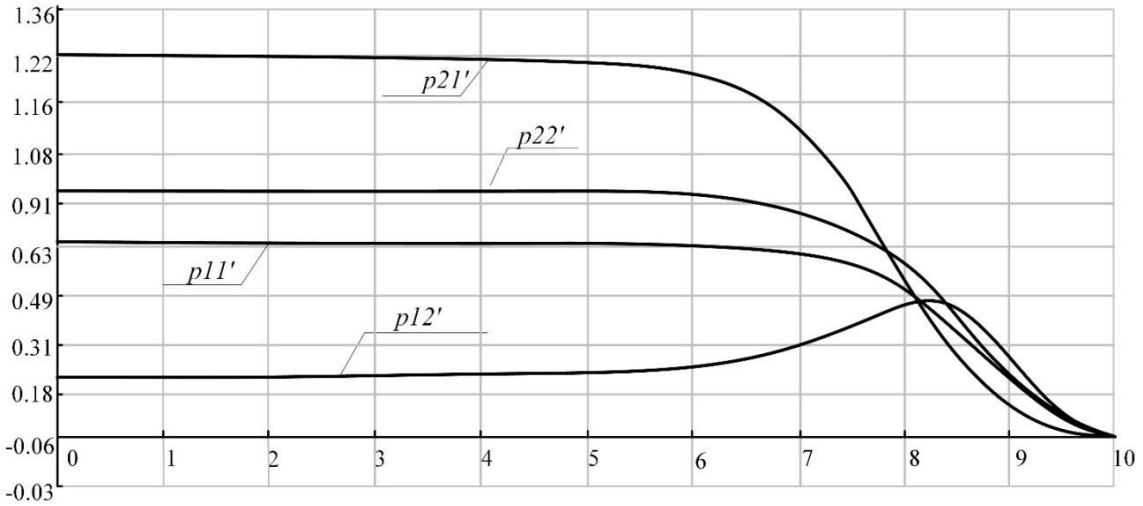



Рис. 3.8. Динаміка зміни коефіцієнтів матричного рівняння Ріккаті в процесі оптимізації

**Висновки до розділу 3**

У третьому розділі було успішно вирішено комплексну задачу стабілізації температурного режиму в реакторі-сульфураторі шляхом розрахунку та проектування оптимальної системи автоматичного керування. З метою мінімізації енергетичних витрат на процеси нагрівання та охолодження сировини було здійснено розрахунок оптимального програмного керування з використанням інструментарію інтегрованого математичного пакета MATLAB та його середовища імітаційного моделювання Simulink. За допомогою спеціалізованого редактора диференціальних рівнянь (DEE) та інтегрування систем у прямому й зворотному часі було синтезовано фінальний вектор оптимального керуючого впливу, який переводить реактор у заданий тепловий стан із мінімальними енерговитратами.

Наступним етапом стало проектування оптимального лінійно-квадратичного регулятора (ЛКР) для замкненого контуру керування

температурою масляного дистиляту. Розрахунок матричного коефіцієнта підсилення дозволив мінімізувати квадратичний критерій якості, який комплексно враховує як витрати теплоносія (енергії) на керування тепловим режимом, так і точність підтримання заданої температури суміші.

Під час проведення серії обчислювальних експериментів було виявлено важливу закономірність: застосування додаткового інтегрального критерію якості для пошуку оптимального керування в системі зі зворотним зв'язком значно погіршує процес. Зокрема, це призводить до збільшення динамічного перерегулювання та раптових стрибків температури, що є технологічно неприпустимим для екзотермічного процесу сульфування, де локальний перегрів є небезпечним. На основі цього було прийнято обґрунтоване інженерне рішення відмовитися від інтегральної складової та використовувати для оптимізації виключно квадратичний критерій.

Розроблена оптимальна система керування була успішно змодельована в програмному середовищі MATLAB. Аналіз динаміки зміни коефіцієнтів матричного рівняння Ріккаті та векторів стану системи повністю підтвердив високу ефективність та правильність обраного підходу до стабілізації теплообмінних процесів на виробництві.

# 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

## 4.1. Безпека та охорона праці в надзвичайних ситуаціях на установці очищення мастильних матеріалів

У процесі експлуатації автоматизованої системи керування режимами теплообміну під час очищення мастильних матеріалів існує постійна потенційна небезпека виникнення різноманітних надзвичайних та аварійних ситуацій. Специфіка даного технологічного циклу полягає у використанні високоагресивних хімічних реагентів, зокрема концентрованої сірчаної кислоти, аміаку або лужних розчинів, наявності легкозаймистих нафтопродуктів у вигляді масляних дистилятів, а також у безперервному протіканні інтенсивних екзотермічних масообмінних реакцій в умовах підвищених температур. Відповідно, надзвичайною ситуацією на даному виробництві вважається будь-яке неконтрольоване відхилення технологічних або термодинамічних параметрів від норми, що може призвести до розгерметизації теплообмінного обладнання, викиду токсичних речовин, виникнення пожежі, вибуху парогазових сумішей або термічного чи хімічного ураження експлуатаційного персоналу. Однією з найбільш критичних аварійних ситуацій є порушення теплового балансу в реакторі-сульфураторі, що може виникнути внаслідок відмови системи автоматичного регулювання подачі охолоджуючої води, заклинювання якірної мішалки або раптового падіння тиску в магістралях. Оскільки реакція кислотного сульфування нафтопродуктів супроводжується стрімким і значним виділенням тепла, втрата контролю над контуром тепловідведення здатна спровокувати локальне закипання реакційної суміші, різке підвищення внутрішнього тиску та подальшу механічну руйнацію апарата. У разі виникнення такої ситуації розроблена система технологічних блокувань повинна миттєво припинити подачу сировини та сірчаної кислоти шляхом примусового закриття відповідних регулюючих клапанів, а також максимально відкрити лінію аварійної подачі холодоагенту в сорочку або змійовик. Якщо автоматика з будь-яких причин не спрацювала, оператор зобов'язаний негайно виконати ці перемикання в дистанційному або ручному режимі з головного пульта

керування, після чого сповістити керівництво цеху та підготувати персонал до можливої екстреної евакуації.

Не менш серйозну загрозу для життя і здоров'я працівників становить розгерметизація трубопроводів, фланцевих з'єднань, ущільнень відцентрових насосів або запірної арматури, що неминуче призводить до виливу гарячого масляного дистиляту, в'язкого кислого гудрону або концентрованої сірчаної кислоти у виробниче приміщення. У випадку візуального виявлення або апаратного фіксування витоку агресивних рідин необхідно негайно зупинити роботу насосних агрегатів, повністю знеструмити пошкоджену технологічну ділянку та надійно ізолювати небезпечну зону від доступу сторонніх осіб. Ліквідація наслідків розливу сірчаної кислоти та токсичних відходів повинна виконуватися спеціально навченим персоналом виключно у повному комплекті засобів індивідуального захисту, до яких належать кислотостійкі костюми, гумові чоботи, захисні рукавиці та промислові протигази. Для нейтралізації пролитої концентрованої кислоти категорично забороняється використовувати чисту воду через високий ризик бурхливої екзотермічної реакції та небезпечного розбризкування; натомість місце розливу засипають сухим піском, товченою крейдою або обробляють слабкими лужними розчинами з подальшим ретельним механічним збиранням та утилізацією утворених безпечних відходів.

Зважаючи на те, що базові масляні дистиляти та рафінати класифікуються як горючі нафтопродукти, скупчення їхніх летких парів у повітрі робочої зони створює надзвичайно високий ризик виникнення масштабної пожежі або об'ємного вибуху газоповітряної суміші. У разі загоряння технологічного обладнання, силових електричних кабелів або самих мастильних матеріалів працівники повинні миттєво знеструмити всю установку за допомогою головних пакетних вимикачів, активувати ручні сповіщувачі пожежно-рятувальної служби та розпочати гасіння наявними первинними засобами. Для ліквідації полум'я на даному типі хімічного виробництва суворо забороняється застосовувати воду або звичайні хімічні пінні вогнегасники на незнеструмлених електроустановках та розгерметизованих кислотних

магістралях. Гасіння здійснюється виключно за допомогою потужних вуглекислотних і порошкових вогнегасників або щільного азбестового полотна, яке надійно перекриває доступ кисню до осередку займання.

Окремим сценарієм надзвичайної ситуації є раптове повне знеструмлення промислового майданчика внаслідок аварій на зовнішніх електромережах. За таких умов архітектура системи автоматичного керування передбачає, що всі пневматичні та електричні виконавчі механізми, зокрема регулюючі клапани на лініях подачі сировини та теплоносіїв, під дією зворотних пружин автоматично переходять у безпечний заздалегідь визначений стан, що унеможливлює мимовільний розвиток екзотермічних хімічних реакцій без електроживлення системи охолодження. У випадку, якщо під час будь-якої з описаних аварій хтось із експлуатаційного персоналу отримав механічні травми, хімічні або термічні опіки, чи зазнав інтоксикації токсичними парами нафтопродуктів, необхідно першочергово вивести або винести постраждалого із зони ураження на свіже повітря. Далі слід швидко звільнити людину від забрудненого агресивними речовинами одягу, рясно промити уражені ділянки шкіри слабким струменем проточної води, за винятком випадків потрапляння на шкіру чистої концентрованої сірчаної кислоти, яку спочатку необхідно обережно зняти сухою тканиною або тампоном, щоб уникнути термічного опіку від реакції гідратації. Після цього слід негайно викликати бригаду екстреної медичної допомоги, забезпечивши постраждалому повний спокій до прибуття лікарів.

### 4.2. Основні завдання з охорони праці та електробезпека під час експлуатації систем автоматизації

Оскільки управління температурними режимами здійснюється за допомогою складної мікропроцесорної техніки, датчиків та потужних електроприводів насосів, ключовим завданням охорони праці виступає електробезпека. Електробезпека являє собою комплексну систему організаційних заходів та технічних засобів, що направлені на надійний захист обслуговуючого персоналу від шкідливої та небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля та статичної електрики. На

кожному підприємстві наказом адміністрації з числа інженерно-технічних працівників електрослужби повинна бути призначена особа, що відповідає за загальний стан всього електрогосподарства. Наказ про призначення такої особи видається виключно після перевірки знань правил та інструкцій з безпеки та присвоєння їй відповідної кваліфікаційної групи. Для обслуговування устаткування з робочою напругою до 1 кВ вимагається IV група з електробезпеки, тоді як для роботи з електроустановками напругою понад 1 кВ необхідна V група. Відповідальність за правильну експлуатацію систем живлення засобів автоматизації у виробничих цехах разом з головним енергетиком несуть також особи, відповідальні за електрогосподарство конкретних підрозділів, призначені з числа інженерно-технічного електротехнічного персоналу. При відсутності таких працівників у підрозділі вся відповідальність повністю покладається на особу, відповідальну за електрогосподарство головного підприємства.

Безпосередню експлуатацію, налаштування ПІД-регуляторів та обслуговування силових шаф повинен здійснювати спеціально підготовлений електротехнічний персонал, який класифікується на адміністративно-технічний, оперативний, ремонтний та оперативно-ремонтний. Безпечне проведення робіт у діючому електроустаткуванні забезпечується повним, суворим та точним виконанням низки організаційних заходів, серед яких першочерговим є затвердження переліку робіт, що виконуються за нарядами, розпорядженнями або в порядку поточної експлуатації. Окрім цього, обов'язковим є призначення осіб, відповідальних за безпечне проведення робіт, документальне оформлення завдань, підготовка робочих місць із зняттям напруги, здійснення допуску бригади до роботи, забезпечення постійного нагляду під час виконання монтажу чи ремонту, а також правильне оформлення переведення на інше місце роботи, перерв та повного закінчення робіт. Відповідальність за безпеку під час втручання в електричні схеми розподіляється між працівником, який видає наряд, працівником, який дає дозвіл на підготовку робочого місця, допускачем, керівником робіт, наглядачем та самими членами ремонтної бригади.

До роботи з обслуговування системи автоматизації допускаються

виключно особи, які пройшли спеціальну медичну комісію, пройшли професійне навчання, мають відповідний диплом, вміють вільно читати принципові електричні схеми та розуміють логіку роботи контурів керування теплообміном. Під час виконання обов'язків робітники повинні бути одягнені в чистий діелектричний спецодяг, забезпечені ізольованим інструментом та не відволікатися на сторонні справи. Для оперативного реагування на травми на технологічному об'єкті обов'язково повинна знаходитися укомплектована медична аптечка, а на всіх розподільчих щитах та шафах автоматики, що знаходяться під напругою, мають бути розміщені яскраві застережливі знаки та таблички. Персонал зобов'язаний досконало володіти навичками надання долікарської допомоги при ураженні електричним струмом. Аналіз причин електротравматизму показує, що найчастіше вони виникають через порушення правил електробезпеки та недосконаліть захисних заходів, причому всі причини можна класифікувати на технічні, організаційно-технічні, суто організаційні та організаційно-соціальні фактори.

### 4.3. Організація інструктажів з охорони праці для персоналу систем автоматизації

Належна підготовка операторів та інженерів автоматизації, які обслуговують систему температурного контролю, здійснюється шляхом проведення регулярних інструктажів з питань охорони праці, які за характером і часом проведення поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий. Вступний інструктаж є обов'язковим для всіх без винятку працівників, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їхньої профільної освіти чи стажу, а також для відряджених осіб з інших організацій і студентів-практикантів. Цей вид навчання проводиться спеціалістом служби охорони праці підприємства. Первинний інструктаж здійснюється безпосередньо на робочому місці оператора до початку виконання ним своїх функціональних обов'язків і стосується новоприйнятих співробітників, осіб, переведених з інших цехів, або працівників, яким доручено виконання нової для них роботи з налаштування теплових

регуляторів.

Повторний інструктаж має на меті закріплення знань і проводиться на робочому місці з періодичністю не рідше одного разу на три місяці для робіт з підвищеною небезпекою та одного разу на шість місяців для решти видів діяльності. Позаплановий інструктаж організовується при введенні в дію нових нормативних актів, при зміні технологічного процесу очищення мастил, заміні або модернізації апаратної частини системи керування, а також у випадках грубого порушення працівниками вимог безпеки, що могли призвести до аварій чи пожеж. Крім того, такий інструктаж є обов'язковим при перерві в роботі виконавця понад тридцять календарних днів для робіт з підвищеною небезпекою та понад шістдесят днів для звичайних робіт. Цільовий інструктаж застосовується виключно при виконанні нетипових разових завдань, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій чи стихійного лиха, а також при виконанні складних ремонтних робіт у шафах автоматики, на які оформлюється спеціальний наряд-допуск.

Первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі проводить безпосередній керівник робіт, наприклад, начальник дільниці автоматизації або майстер. Кожен інструктаж обов'язково завершується перевіркою засвоєних теоретичних знань шляхом усного опитування або за допомогою комп'ютерних тестів, а також практичною перевіркою навичок безпечних методів праці. Якщо працівник демонструє незадовільні результати під час перевірки знань після цільового інструктажу, він категорично не допускається до виконання робіт, причому повторна перевірка в цьому випадку не дозволяється. Особи, які суміщають кілька професій на виробництві, зобов'язані проходити навчання з питань охорони праці як за своєю основною посадою, так і за професією за сумісництвом. Усі проведені інструктажі в обов'язковому порядку фіксуються в спеціальному журналі реєстрації з проставленням власноручних підписів особи, яку інструктували, та керівника, який проводив навчання. Для запобігання фальсифікаціям сторінки журналу повинні бути пронумеровані, надійно прошнуровані та скріплені офіційною печаткою підприємства. Певні категорії інженерно-технічних працівників, чия діяльність не пов'язана з безпосереднім

обслуговуванням діючого технологічного обладнання, можуть звільнятися від проходження первинного, повторного та позапланового інструктажів на підставі спеціального переліку, затвердженого керівником за погодженням із державним інспектором з охорони праці.

**Висновки до розділу 4**

У четвертому розділі було проведено детальний аналіз питань охорони праці та безпеки життєдіяльності в умовах надзвичайних ситуацій під час експлуатації установки очищення мастильних матеріалів. Встановлено, що специфіка технологічного процесу, яка передбачає використання концентрованої сірчаної кислоти, легкозаймистих нафтопродуктів та інтенсивних екзотермічних реакцій, вимагає бездоганної роботи систем автоматичного захисту. Розроблена автоматизована система ефективно мінімізує ризики виникнення пожеж, вибухів чи хімічного ураження персоналу завдяки впровадженню надійних технологічних блокувань, які здатні миттєво переводити виконавчі механізми (зокрема регулюючі клапани) у безпечний стан у разі знеструмлення, порушення теплового балансу або розгерметизації магістралей.

Окрім апаратно-програмних засобів захисту, критично важливою складовою безпеки є суворе дотримання організаційно-технічних заходів, з особливим акцентом на електробезпеку. Експлуатація та обслуговування мікропроцесорних комплексів, датчиків і силових шаф управління вимагає залучення виключно кваліфікованого електротехнічного персоналу, що має відповідні групи допуску та чітко дотримується процедур оформлення нарядів-допусків. Належна теоретична і практична підготовка працівників забезпечується шляхом організації чіткої системи інструктажів — вступного, первинного, повторного, позапланового та цільового. Такий підхід гарантує беззаперечну готовність оперативного та ремонтного персоналу до правильних, швидких і безпечних дій як під час ведення штатного технологічного режиму, так і на етапі ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Таким чином, комплексне поєднання інноваційних інженерно-технічних рішень автоматизації теплообмінних процесів із жорсткими нормативно-організаційними заходами охорони праці створює надійне підґрунтя для безпечного функціонування промислового об'єкта, гарантує збереження здоров'я та життя працівників, а також запобігає виникненню масштабних техногенних аварій на нафтопереробних підприємствах.

# ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У бакалаврській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання, яке полягає у розробці надійної та ефективної системи автоматичного керування режимами теплообміну в технологічному циклі очищення мастильних матеріалів. Аналіз показав, що ефективність цього складного фізико-хімічного процесу критично залежить від підтримання оптимальних термодинамічних параметрів, оскільки відхилення температурних показників призводить до погіршення якості очищеного продукту та невиправданих перевитрат енергоносіїв.

На основі проведеного аналізу процесу очищення масляного дистиляту за допомогою плюмбіту натрію як об'єкта керування було обґрунтовано вибір оптимального апаратного рішення. Порівняння існуючих схем автоматизації тепломасообмінних апаратів довело, що найбільш доцільним є використання сульфуратора безперервної дії з тихохідною якірною мішалкою та комбінованою системою теплообміну, що забезпечує швидкий та безпечний перебіг інтенсивних екзотермічних реакцій без локальних перегрівів.

Для синтезу системи керування було проведено розрахунок та дослідження математичної моделі статичного і динамічного режимів роботи об'єкта теплообміну. Складені на основі фундаментальних законів збереження маси та енергії рівняння матеріального та теплового балансів дозволили побудувати статичні характеристики. Ці характеристики наочно продемонстрували залежність вихідної температури суміші від витрати та температури теплоносія по основному каналу керування та каналу збурення, що стало надійним підґрунтям для подальшого налаштування регуляторів.

З використанням програмних середовищ MATLAB та Simulink було успішно спроектовано комплексну систему контролю технологічного процесу. За допомогою інтерактивного середовища SISOTool було здійснено ітеративний підбір параметрів ПІД-регулятора, а імітаційне моделювання підтвердило його здатність мінімізувати динамічне перерегулювання та зводити статичну похибку до нуля. Крім того, розроблено оптимальне програмне

керування та синтезовано лінійно-квадратичний регулятор, який мінімізує енергетичні витрати на керування тепловим режимом і забезпечує точність підтримання заданої температури. Разом із цим розроблено надійну апаратну систему дистанційного керування, аварійного захисту електродвигунів відцентрових насосів та технологічних блокувань арматури.

У розділі охорони праці проаналізовано умови безпеки під час експлуатації установки в умовах потенційних надзвичайних ситуацій. Доведено, що впровадження розробленої автоматизованої системи з її надійними технологічними блокуваннями ефективно мінімізує ризики виникнення пожеж, вибухів парогазових сумішей або хімічного ураження персоналу такими агресивними реагентами, як концентрована сірчана кислота. Суворе дотримання вимог електробезпеки та регулярне проведення цільових інструктажів гарантують високий рівень безпеки на виробництві.

У підсумку, комплексне вирішення поставленого завдання автоматизації дозволяє створити надійну систему управління теплообміном. Її практичне впровадження гарантуватиме стабільність процесу очищення мастильних матеріалів, мінімізацію енерговитрат та стабільно високу якість вихідного продукту.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація технологічних процесів у нафтопереробці / [Бойко В.І., Свириденко В.Г., Ткачук О.М.]: Підручник. — Київ: 2018. — 342 с.
2. Теорія автоматичного керування: лінійні системи / [Попович М.Г., Ковальчук О.В.]: Навчальний посібник. — Львів: 2015. — 288 с.
3. Моделювання тепломасообмінних процесів у хімічній технології / [Григоренко І.В., Мельник О.С.]: Монографія. — Харків: 2019. — 215 с.
4. Технологія очищення та регенерації мастильних матеріалів / [Коваленко В.М., Петровський О.А., Левченко Д.І.]: Підручник. — Дніпро: 2020. — 410 с.
5. Системи автоматичного керування тепловими об'єктами / [Жученко А.І., Осадна Н.В.]: Навчальний посібник. — Київ: 2017. — 305 с.
6. Основи теплопередачі та теплообмінні апарати / [Кузьменко О.В., Романюк Р.Я.]: Підручник. — Одеса: 2016. — 275 с.
7. Автоматизація хіміко-технологічних систем / [Лисенко В.П., Наконечний А.Й.]: Підручник. — Київ: 2021. — 390 с.
8. Mathematical modeling of heat exchangers in oil refining / [Müller H., Schmidt K.]: Monograph. — Berlin: 2018. — 240 p.
9. Advanced Control of Chemical Processes / [Smith J.A., Johnson R.T.]: Textbook. — London: 2019. — 412 p.
10. Оптимальне керування в системах теплообміну / [Сидоренко М.П., Ткаченко В.В.]: Збірник наукових праць. — Вінниця: 2020. — 151 с.
11. Імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink / [Кравченко О.О., Морозов Д.С.]: Навчальний посібник. — Харків: 2018. — 256 с.
12. Сучасні методи очищення нафтопродуктів / [Гавриленко В.І., Марчук О.П.]: Підручник. — Львів: 2017. — 320 с.
13. Проектування систем керування технологічними процесами / [Степанов О.М., Козак В.І.]: Посібник. — Київ: 2019. — 280 с.
14. Control of Exothermic Reactions in Continuous Stirred Tank Reactors / [Dubois P., Laurent M.]: Journal of Chemical Engineering. — Paris: 2020. — 125 p.
15. Промислові контролери та їх застосування в АСУТП / [Іванов С.М.,

Петренко А.В.]: Навчальний посібник. — Запоріжжя: 2016. — 198 с.
16. Теплообмінні апарати нафтопереробних заводів / [Шевченко О.О., Борисов В.В.]: Довідник. — Київ: 2015. — 315 с.
17. Динаміка теплових процесів у реакторах з мішалкою / [Лисенко О.М., Тарасов В.К.]: Монографія. — Суми: 2018. — 128 с.
18. Process Dynamics and Control / [Seborg D.E., Edgar T.F.]: Textbook. — Amsterdam: 2016. — 510 p.
19. Оптимізація ПІД-регуляторів за допомогою SISOTool MATLAB / [Коваль Т.І., Савченко О.В.]: Навчально-методичний посібник.— Вінниця: 2021— 145 с.
20. Хімічна технологія переробки нафти та газу / [Руденко В.М., Захаров О.І.]: Підручник. — Харків: 2017. — 450 с.
21. Automation of Heat Exchange Processes in Viscous Fluids / [Andersson L., Bergström N.]: Proceedings of EuroChem Control. — Stockholm: 2019. — 185 p.
22. Охорона праці на підприємствах нафтохімічної промисловості / [Гончарук В.П., Левченко О.С.]: Підручник. — Київ: 2020. — 290 с.
23. Електробезпека при експлуатації систем автоматизації / [Макаров В.О., Денисенко Т.М.]: Навчальний посібник. — Харків: 2018. — 185 с.
24. Теорія і практика рідинної екстракції мастильних матеріалів / [Павленко В.І., Романенко Ю.О.]: Монографія. — Дніпро: 2019. — 210 с.
25. Nonlinear Control Systems in Chemical Engineering / [Rossi A., Bianchi G.]: Monograph. — Milan: 2017. — 310 p.
26. Технічні засоби автоматизації: датчики та виконавчі механізми / [Мельник А.О., Карпенко В.С.]: Підручник. — Львів: 2021. — 330 с.
27. Оптимальне лінійно-квадратичне керування тепловими об'єктами / [Гришко О.В., Поліщук С.В.]: Збірник наукових праць НТУУ «КПІ». — Київ: 2019. — 172 с.
28. Modeling and Simulation of Thermal Systems in Simulink / [Olsen K., Jensen P.]: Tutorial Guide. — Copenhagen: 2020. — 175 p.
29. Регенерація відпрацьованих мінеральних мастил / [Данилов О.М., Соколов В.В.]: Практичний посібник. — Одеса: 2016. — 195 с.

30. Проектування автоматизованих систем керування з використанням MATLAB / [Ткаченко О.М., Ковальчук І.В.]: Навчальний посібник. — Київ: 2018. — 240 с.

31. Безпека життєдіяльності та цивільний захист на хімічно небезпечних об'єктах / [Шевчук О.В., Бондаренко М.І.]: Підручник. — Харків: 2019.— 310 с.

32. Сучасні екстрагенти для очищення масляних дистилятів / [Гриценко В.М., Литвиненко О.П.]: Монографія. — Полтава: 2020. — 140 с.

33. Industrial Control Systems: Design and Implementation / [Weber J., Fischer T.]: Textbook. — Munich: 2018. — 420 p.

34. Тепломасообмін у дисперсних середовищах і гетерогенних системах / [Бойченко С.В., Яковлєв В.О.]: Монографія. — Київ: 2017. — 260 с.

35. Системи технологічних блокувань та протиаварійного захисту / [Коломієць О.С., Тарасенко В.В.]: Навчальний посібник. — Дніпро: 2021. — 180 с.

36. Thermal Stability of Lubricating Oils during Sulfuric Acid Refining / [Nowak M., Kowalski P.]: Journal of Applied Petrochemistry. — Warsaw: 2019. — 163 p.

37. Розробка ПІД-регуляторів для екзотермічних хімічних реакторів / [Ткач В.І., Скляр О.В.]: Збірник матеріалів конференції. — Тернопіль: 2018. — 119 с.

38. Енергоефективне керування режимами нагрівання в'язких рідин / [Мартиненко В.О., Гусєв О.Ю.]: Монографія. — Харків: 2020. — 205 с.

39. Fundamentals of Heat and Mass Transfer in Chemical Reactors / [García L., Martínez A.]: Textbook. — Madrid: 2017. — 380 p.

40. Вступ до теорії оптимального керування / [Кіндратюк О.В., Зайцев М.М.]: Навчальний посібник. — Львів: 2016. — 220 с.

41. Дослідження динаміки сульфуратора безперервної дії / [Олійник В.В., Коваль М.М.]: Науковий вісник. — Івано-Франківськ: 2021. — 152 с.

42. Process Control and Instrumentation in Oil Refineries / [Van der Berg H., De Vries S.]: Handbook. — Amsterdam: 2018. — 560 p.

43. Математичне моделювання гідродинаміки та теплообміну в апаратах з мішалками / [Прокопенко О.В., Савченко Д.І.]: Монографія. — Київ: 2019. — 230 с.

44. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами / [Лисенко

В.П., Осадчий В.В.]: Підручник. — Запоріжжя: 2020. — 315 с.

45. Синтез лінійно-квадратичного регулятора для теплових об'єктів у середовищі MATLAB / [Сидорчук О.М., Павленко О.В.]: Навчальний посібник. — Житомир: 2018. — 184 с.

46. Safety Strategies for Exothermic Reactions in Chemical Plants / [Klein R., Bauer M.]: Chemical Safety Journal. — Frankfurt: 2021. — 135 p.

47. Технологічні вимірювання та прилади в нафтопереробці / [Руденко О.С., Гордієнко В.М.]: Навчальний посібник. — Одеса: 2017. — 290 с.

48. Моделювання систем керування: лабораторний практикум / [Колосов А.І., Мороз В.В.]: Посібник. — Харків: 2019. — 150 с.

49. Automation of Lubricant Oil Blending and Purification / [Davies C., Evans T.]: European Journal of Automation. — London: 2016. — 224 p.

50. Основи промислової екології та охорони праці в нафтохімії / [Терещенко В.О., Ковальчук Н.І.]: Підручник. — Київ: 2022. — 340 с.