

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

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Віталій Цапар

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

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

**зі спеціальності 174 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка**

(код і назва)

**на тему: Система автоматичного керування теплообмінним апаратом в процесі
алкілювання ізобутану з н-бутеном**

Виконав (-ла): студент (-ка) __2__ курсу, групи ЛК-42мп

(шифр групи)

Мойсеєнко Владислав Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник асис. Тріщ Віталій Русланович

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

Консультант _____

(назва розділу)

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

Рецензент _____

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

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

Студент _____

Київ – 2025 року

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

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віталій Цапар

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Мойсеєнко Владислав Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Система автоматичного керування теплообмінним апаратом в процесі алкілування ізобутану з н-бутеном _____ ,
науковий керівник дисертації Тріщ В.Р., асис. _____ ,

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

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

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження процес алкілування ізобутану н-бутеном та процес нагрівання _____ в
теплообміннику _____

4. Предмет дослідження методи ідентифікації теплообмінника та оптимізація системи керування температурою з використанням МРС і нечіткої логіки

5. Вихідні дані Система має забезпечувати перерегулювання не більше 30 %; параметри які підлягають керуванню: температура алклату на виході

6. Перелік завдань, які потрібно розробити Дослідити процес алкілування ізобутану н-бутеном та процес кипіння в теплообміннику; розробити математичну модель досліджуваного об'єкту; спроектувати та дослідити систему керування в теплообміннику

7. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____

8. Орієнтовний перелік публікацій _____

9. Консультанти розділів дисертації*

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

10. Дата видачі завдання 29.11.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз виробництва та процесу що досліджується	06.11.2025	
2	Аналіз структур систем автоматизації теплообмінника	13.11.2025	
3	Ідентифікація досліджуваного об'єкту	18.11.2025	
4	Дослідження типових систем керування та створення системи керування для досліджуваного процесу	25.11.2025	
5	Оптимальне керування	06.12.2025	
6	Створення тартап-проекту	19.12.2025	

Студент

Владислав, МОЙСЄЄНКО

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

Науковий керівник дисертації

Віталій, ТРІЩ

РЕФЕРАТ

В магістерській дисертації розглядається процес алкілування ізобутану н-бутеном. Дисертація складається з пояснювальної записки, яка складається з 98 сторінок і містить 47 рисунків, 21 таблиці, 10 літературних джерел і один додаток.

Метою дослідження є розробка системи, яка допоможе керувати процесом нагрівання в технологічному об'єкті теплообмінника в процесі алкілування ізобутану н-бутеном, щоб підвищити ефективність виробництва.

Предметом дослідження є математична модель теплообмінного апарата та алгоритмічне забезпечення системи автоматичного керування температурою, з програмною реалізацією.

Дослідження включало розробку схеми автоматизації теплообмінника, а також ідентифікацію моделі досліджуваного об'єкта.

На основі моделі, яка показує процес нагрівання в апараті, було спроектовано та досліджено систему керування даними процесом. Система використовує МРС-регулятор і нечітку логіку, щоб забезпечити швидкий вихід на усталене значення з можливістю перерегулювання. Крім того, модель була використана для оптимізації керування.

Крім того, було запропоновано ідею для початкового бізнесу щодо розробки розробку інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінника установки алкілування.

Для виконання роботи були використані такі концепції, як математичне моделювання, оптимізація та автоматичне керування. Дослідження може використовувати результати для проектування системи керування даними технологічним процесом, яка має на меті підвищити ефективність процесу.

Ключові слова: теплообмінник, алкілат, кип'ятіння, оптимізація керування, схема автоматизації, модель, система керування.

ABSTRACT

The master's thesis examines the alkylation process of isobutane with n-butene. The thesis consists of an explanatory note comprising 98 pages and contains 47 figures, 21 tables, 10 literature sources, and one appendix.

The aim of the research is to develop a system that will help control the boiling process in the technological unit — the reboiler — during the alkylation of isobutane with n-butene, in order to improve production efficiency.

The study included the development of an automation scheme for the reboiler, as well as the identification of the model of the studied object.

Based on the model that describes the boiling process in the apparatus, a control system for this process was designed and investigated. The system uses an MPC controller and fuzzy logic to ensure a rapid approach to the steady-state value with the possibility of overshoot. Additionally, the model was used for control optimization.

Furthermore, an idea was proposed for a startup business focused on developing an intelligent temperature control system for the heat exchanger of an alkylation unit.

To carry out the work, concepts such as mathematical modeling, optimization, and automatic control were employed. The research results can be used for designing a control system for this technological process aimed at improving process efficiency.

Keywords: reboiler, alkylate, boiling, control optimization, automation scheme, model, control system.

Зміст

ВСТУП	10
1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ АЛКІЛУВАННЯ ІЗОБУТАНУ Н-БУТЕНОМ ТА АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА НА ВИРОБНИЦТВІ	11
1.1. Аналіз ацетальдегіду та його виробництва	11
1.2. Аналіз технологічної схеми та процесу алкілування ізобутану н- бутеном	12
1.3. Постановка задачі на дослідження	15
2. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КИП’ЯТІННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБ’ЄКТІ ТЕПЛООБМІННИКА.....	16
2.1. Аргументування вибору засобів автоматизації для апарату відповідно аналізу процесів що відбуваються в ньому	16
2.2. Опис функціональної схеми автоматизації процесів що відбуваються в теплообміннику.....	16
3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ	19
3.1. Математичне моделювання каналу керування на основі експериментальних даних	19
3.2. Ідентифікація моделі статички	22
3.3. Ідентифікація динамічної моделі.....	23
3.4. Створення імітаційної моделі засобами <i>Matlab-Simulink</i>	27
4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБ’ЄКТОМ ВІДГІННА КОЛОНА	30
4.1. Синтез системи з використанням МРС-регулятора	30
4.2. Розробка нечіткої системи керування теплообмінника.....	34
5. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КИП’ЯТІННЯ В ТЕПЛООБМІННИКУ	44

5.1. Вибір критерію оптимальності.....	44
5.2. Виведення необхідних умов оптимальності	44
5.3. Розрахунок оптимального програмного керування	45
5.4. Пошук оптимального програмного керування з зворотним зв'язком	49
5.4.1. Розробка оптимального лінійно-квадратичного П-регулятора	49
5.4.2. Розроблення оптимального лінійно-квадратичного ПІ-регулятора	54
5.4.3. Зіставлення отриманих результатів для оптимального керування із зворотнім зв'язком.....	57
5.5. Керування за мінімальним часом за умови обмеження по керуванню	59
6. СТАРТАП-ПРОЄКТ: ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ТЕПЛООБМІННИКА УСТАНОВКИ АЛКІЛУВАННЯ.....	Помилка! Закладку не визначено.
6.1. Опис ідеї стартап-проєкту	Помилка! Закладку не визначено.
6.1.1 Зміст ідеї, напрямки застосування та вигоди для користувача	Помилка! Закладку не визначено.
6.1.2 Порівняння техніко-економічних характеристик із конкурентами/аналогами та визначення W–N–S.....	Помилка! Закладку не визначено.
6.2. Технологічний аудит ідеї проєкту.....	Помилка! Закладку не визначено.
6.3.10 Альтернативи ринкового впровадження та вибір оптимальної	Помилка! Закладку не визначено.
6.4.2 Визначення базової стратегії розвитку.....	Помилка! Закладку не визначено.

6.5.2 Опис трьох рівнів моделі «товару/послуги»Помилка! Закладку не визначено.

ВИСНОВОК.....	101
ЛІТЕРАТУРА	103
ДОДАТКИ.....	107
Специфікація устаткування	107

ВСТУП

Теплообмінник є ключовим елементом багатьох виробничих операцій, зокрема процесу алкілування ізобутану н-бутеном. Через його важливе призначення будь-які порушення в роботі можуть суттєво вплинути на ефективність усього технологічного циклу.

Метою цього дослідження є підвищення результативності процесу алкілування ізобутану н-бутеном шляхом створення системи керування роботою теплообмінника. Для її досягнення потрібен комплексний підхід до добору й налаштування засобів автоматизації, що гарантуватиме стабільність технологічного процесу та мінімізує ризик аварій.

У межах роботи розглянуто вплив окремих параметрів на функціонування теплообмінника, здійснено вибір оптимальних засобів автоматизації та сформовано стратегію керування. Забезпечення стабільності та високої ефективності виробництва є визначальними для досягнення позитивних результатів. Реалізувати це можна, вирішивши такі завдання:

1. Провести аналіз виробництва та досліджуваного обладнання;
2. Розробити схему автоматизації;
3. Виконати ідентифікацію моделі теплообмінника;
4. Спроекувати системи керування для обраного процесу та порівняти їх ефективність;
5. Оптимізувати систему керування.

У цьому дослідженні подано відповіді на зазначені питання. Отримані результати можуть стати корисними для підвищення продуктивності, підтримання стабільної роботи та зменшення ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації теплообмінника.

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ АЛКІЛУВАННЯ ІЗОБУТАНУ Н-БУТЕНОМ ТА АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА НА ВИРОБНИЦТВІ

1.1. Аналіз ацетальдегіду та його виробництва

Алкілат — це суміш вуглеводнів із високим октановим числом, що належать до групи розгалужених ізоалканів. Він утворюється під час реакції алкілування ізопарафінів (переважно ізобутану) олефінами, наприклад бутенами. У промисловому виробництві алкілат являє собою прозору, летку рідину без різкого запаху, яка майже не містить ароматичних чи ненасичених сполук, що забезпечує її високу хімічну стабільність.

Основним компонентом алкілату є ізомери октану, серед яких найбільш цінним вважається 2,2,4-триметилпентан (ізооктан). Саме він визначає високе октанове число отриманого продукту [1]. Окрім октанових ізомерів, у складі можуть бути незначні кількості розгалужених гептанів та інших вищих алканів, що виникають як побічні продукти реакції.

Алкілат відіграє важливу роль як високооктановий компонент моторних бензинів. Його додають для отримання паливних фракцій зі стабільними характеристиками, що відповідають сучасним екологічним стандартам. Завдяки низькому вмісту сірки та відсутності бензолу й олефінів алкілат сприяє виробництву бензинів з кращими екологічними та токсикологічними властивостями.

З технологічної точки зору синтез алкілату відбувається за участі сильних кислотних каталізаторів, таких як сірчана або фтористоводнева кислота. Реакцію проводять за низьких температур і підвищеного тиску, що сприяє формуванню розгалужених алканів із високою стійкістю до детонації. Вибір каталізатора впливає на будову обладнання, енергоспоживання та вимоги щодо безпеки.

Комбінація високих октанових показників, низької токсичності та мінімальної кількості небажаних домішок робить алкілат цінною сировиною в нафтопереробній галузі. Його широко застосовують у виробництві сучасних

екологічних бензинів, а також розглядають як компонент спеціальних палив, для яких важливі висока стабільність та чистота кінцевого продукту.

1.2. Аналіз технологічної схеми та процесу алкілування ізобутану н-бутеном

У промисловості процес алкілування переважно застосовують до ізобутану, а значно рідше — до ізопентану. Основними алкілюючими агентами серед олефінів виступають н-бутени, які реагують з ізобутаном, утворюючи алкілат — продукт, збагачений С8-вуглеводнями, що зазвичай називають ізооктаном. Для цієї мети часто використовують бутан-бутенову фракцію крекінг-газів, оскільки вона містить усі потрібні реагенти та не включає 1,3-бутадієн [2].

Реакційна маса являє собою емульговану двофазну систему, яку формують за допомогою мішалок або насосів. Процес із використанням сірчаної кислоти потребує ретельного контролю її концентрації. Найвищі показники досягаються при концентрації 98–100%, однак у процесі роботи кислота поступово розбавляється через наявність вологи у вихідних речовинах. Мінімально допустимою вважають концентрацію 88–90%, тому частину кислоти регулярно вилучають і замінюють свіжою.

Зазвичай на виробництві витрати сірчаної кислоти становлять 5–7 кг на 100 літрів алкілату. У реакторі співвідношення кислоти до вуглеводнів близьке до 1:1 і може досягати 70%. Надлишковий каталізатор відокремлюють у сепараторі та повертають у зону реакції. Існують два основні типи апаратів для алкілування, які відрізняються способом відведення теплоти: або за допомогою внутрішнього охолодження рідким аміаком чи пропаном, або шляхом випаровування надлишкового ізобутану.

У першому випадку в алкілаторі з інтенсивною мішалкою встановлені охолоджувальні трубки, у яких випаровується теплоносії (див. рис. 1а). Пари теплоносія подають на холодильну установку для повторного конденсації. Найефективнішим методом тепловідведення є випаровування надлишкового ізобутану, що дає змогу точно регулювати температуру реакції.

Один із апаратів, що працюють за цим принципом, зображений на рис. 4 (апарат 4). У ньому реакційна зона поділена перегородками на декілька секцій з мішалками (каскадів). Бутени подають окремо в кожну секцію, що забезпечує низьку концентрацію олефінів і зменшує утворення побічних полімеризаційних продуктів [2].

Сірчану кислоту та ізобутан вводять у першу секцію зліва. Утворена емульсія послідовно переходить крізь вертикальні перегородки до наступних секцій. Остання права секція виконує функцію сепаратора: тут кислота відокремлюється від вуглеводнів і повертається на повторне використання. Через фінальну перегородку виходить суміш вуглеводнів, що спрямовується на подальшу переробку.

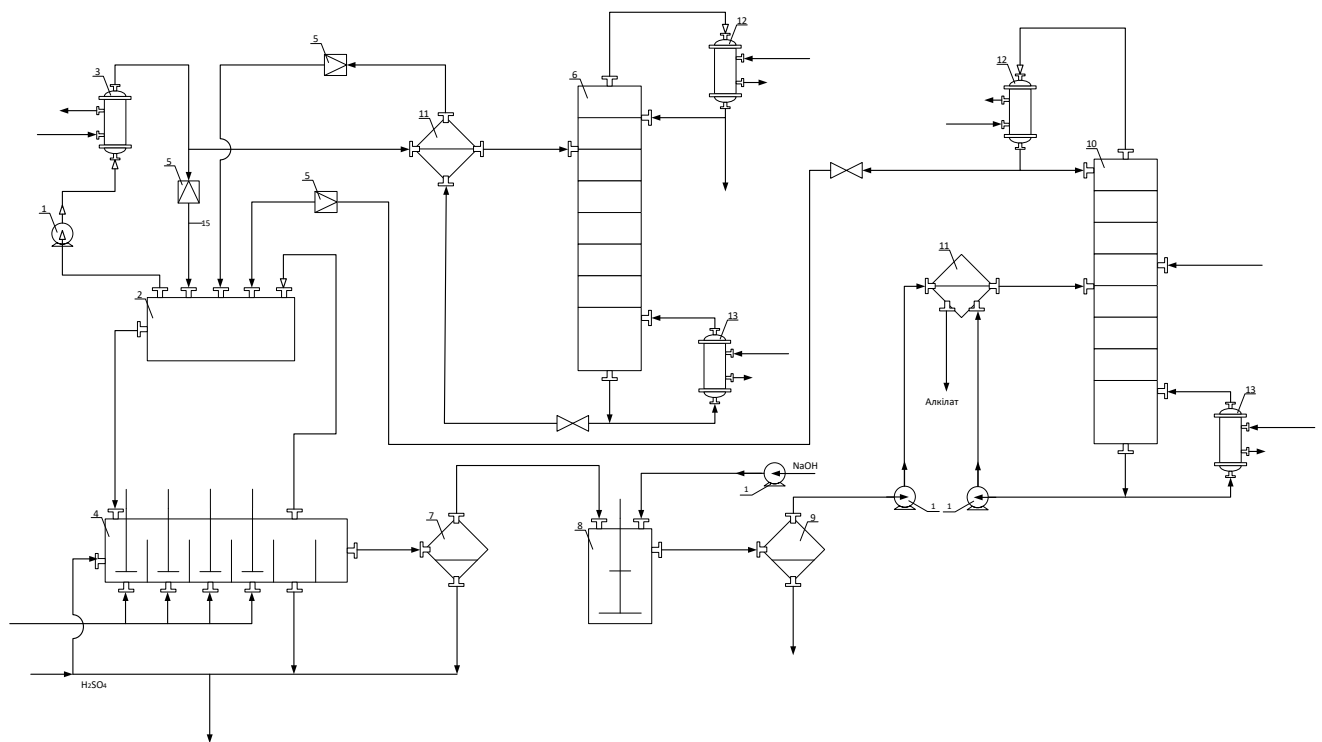


Рис. 1.1. Схема технологічного процесу алкілювання ізобутану н-бутеном:
1 – насос; 2 – ємність; 3 – конденсатор; 4 – реактор; 5 – дросильні вентилі;
6 – депропанізатор; 7, 9 – сепаратор; 8 – нейтралізатор; 10 – дебутанізатор;
11 – теплообмінник; 12 – конденсатор; 13 – нагрівальний апарат.

Технологічна схема процесу алкілювання ізобутану н-бутеном наведена на рисунку 1.1

1.3. Постановка задачі на дослідження

Теплообмінники широко застосовуються в різних технологічних процесах, однак доступної інформації щодо їх автоматизації та систем керування досить мало. Тому в межах цього дослідження основну увагу буде приділено аналізу процесів, що відбуваються всередині такого апарата [3].

Метою дисертаційної роботи є розв'язання таких завдань:

1. Розробити схему автоматизації для досліджуваного теплообмінного апарата;
2. Виконати ідентифікацію математичної моделі теплообмінника;
3. Створити та порівняти системи керування теплообмінником із використанням методів нечіткої логіки та алгоритмів оптимізації;
4. Провести оптимізацію процесу керування;
5. Розробити стартап-проект на основі отриманих результатів.

2. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КИП'ЯТІННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБ'ЄКТІ ТЕПЛООБМІННИКА

2.1. Аргументування вибору засобів автоматизації для апарату відповідно аналізу процесів що відбуваються в ньому

Основними факторами, які впливають на процес кип'ятіння продукту є температура в теплообміннику.

Для забезпечення температури алкілату 110..130 °C на виході, параметри теплообмінника повинні мати такі властивості:

- Рівномірний потік вхідного продукту 4.2..5.3 м³/год;
- Температура в теплообміннику 140..160 °C;

Для забезпечення правильної температури в теплообміннику потрібно дотримуватись таких вимог:

- Стабільна витрата водяної пари 3.1...7.1 м³/год;
- Температура водяної пари 180..190 °C

2.2. Опис функціональної схеми автоматизації процесів що відбуваються в теплообміннику

Процес нагрівання в теплообміннику відбувається під дією кількох ключових параметрів. Першим серед них є температура алкілату на виході, яка повинна відповідати встановленому значенню регулятора температури. Другим важливим параметром є температура всередині теплообмінника. На рисунках 2.1 та 2.2 подано технологічну схему роботи теплообмінника [5].

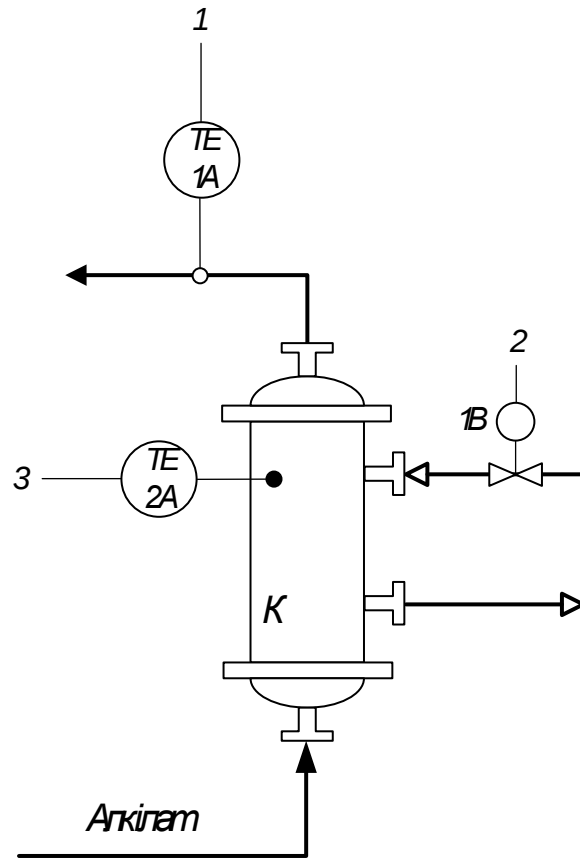


Рис. 2.1. Фрагмент схеми автоматизації процесу кип'ятіння:

К – Теплообмінник

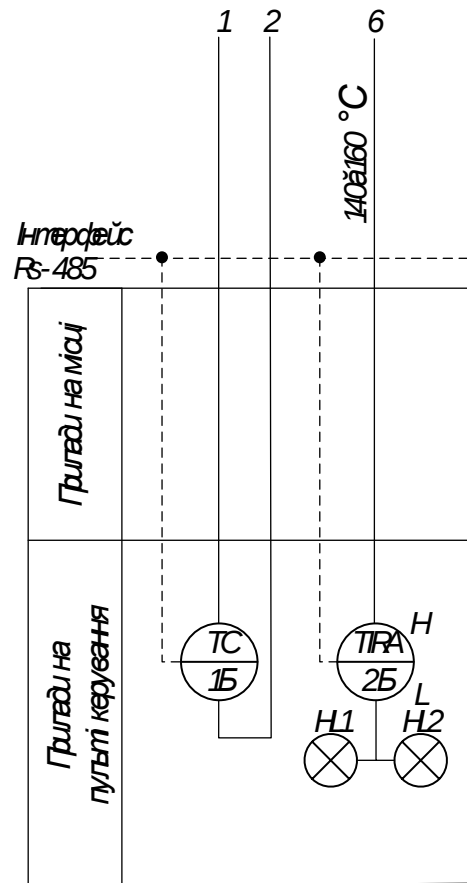


Рис. 2.2 – Фрагмент схеми автоматизації теплообмінника

Теплообмінник використовується для нагріву алкілату. Ключовий параметри є температура алкілату на виході. Термопара (1А), вбудована в трубопровід, вимірює температуру алкілату. Після цього отримані дані надходять до блоку формування сигналу (1Б), а далі — до цифрового безперервного регулятора (1В), розміщеного на пульті керування. Завершальним етапом є передача сигналу на виконавчий механізм (1Г), встановлений у трубопроводі подачі водяної пари [6].

Контроль температури всередині теплообмінника здійснюється за допомогою перетворювача (2А). Передані від нього дані відображаються на цифровому індикаторі (2Б), який оснащений двома світлодіодними лампами — червоною НЛ1 і жовтою НЛ2, що сигналізують про робочий або аварійний стан обладнання.

3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ

3.1. Математичне моделювання каналу керування на основі експериментальних даних

Для ефективного керування технологічним об'єктом необхідно мати його математичну модель, яка описує поведінку системи як у статичних, так і в динамічних режимах [7]. Отримати таку модель можна шляхом ідентифікації.

Процес ідентифікації передбачає виконання експериментів та порівняння вхідних і вихідних сигналів. Головною метою є вибір математичної моделі, що найбільш точно відтворює властивості об'єкта. При цьому важливо, щоб і модель, і реальний об'єкт реагували однаково на один і той самий вхідний вплив. Результати ідентифікації слугують основою для подальшого проектування, оптимізації та аналізу параметрів системи.

Для побудови системи керування було обрано керуючий канал «витрата водяної пари — температура алкілату». Дослідження саме цього каналу є важливим, оскільки він відіграє ключову роль у процесі алкілування ізобутану н-бутеном.

Оскільки точні фізичні механізми, що впливають на вихідний сигнал, нам невідомі, об'єкт розглядається як «чорна скринька». Тому наше завдання полягає в дослідженні того, як зміна вхідних впливів впливає на вихідні характеристики об'єкта. Саме це і визначає предмет даної роботи. Систему автоматизації теплообмінника, що використовується для експериментів, наведено на рисунку

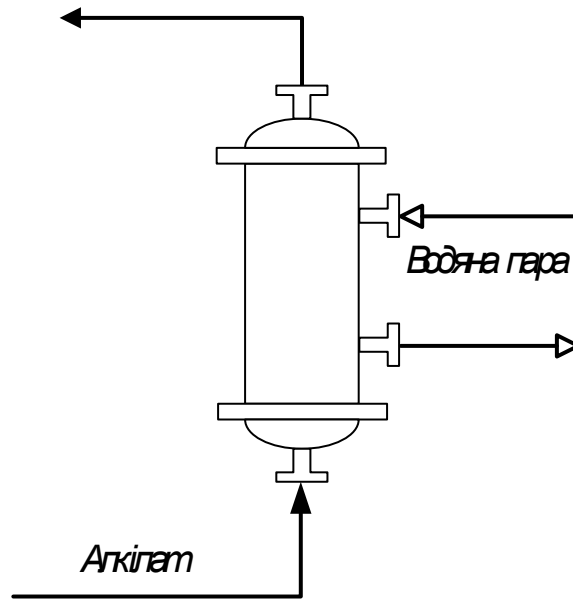


Рис 3.1 – Структура функціональної схеми теплообмінника

Щоб під час експерименту уникнути компенсації збурень, поточну систему регулювання необхідно тимчасово вимкнути [7]. Після цього за допомогою ручного керування змінюють подачу водяної пари, що надходить у теплообмінник. Це дає змогу сформувану реакцію об'єкта на імпульс, яка є максимально східчастою.

Було проведено п'ять окремих досліджень з різною метою: три спрямовані на збільшення витрати пари та два — на її зменшення. Кожне нове збурення вводили лише після того, як система поверталася до стабільного режиму роботи.

Графіки на рисунках 3.2. та 3.3, отримані за результатами експериментів, демонструють зміну керуючої дії та контрольованої змінної у часовому масштабі.

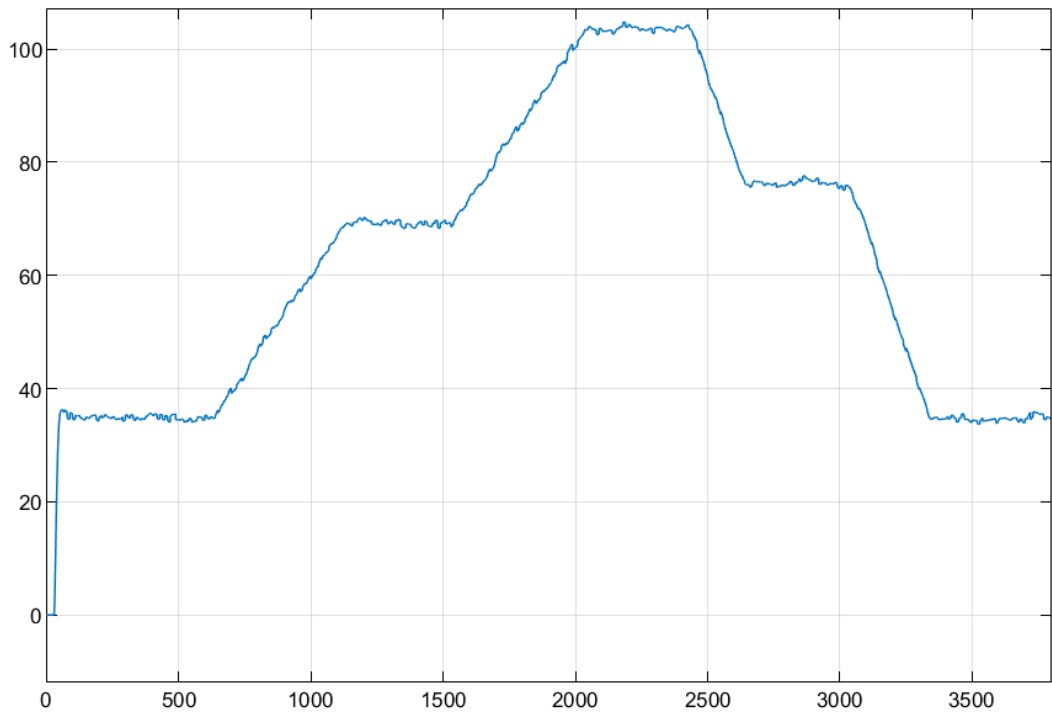


Рис. 3.2 – Графік зміни температури алкілату

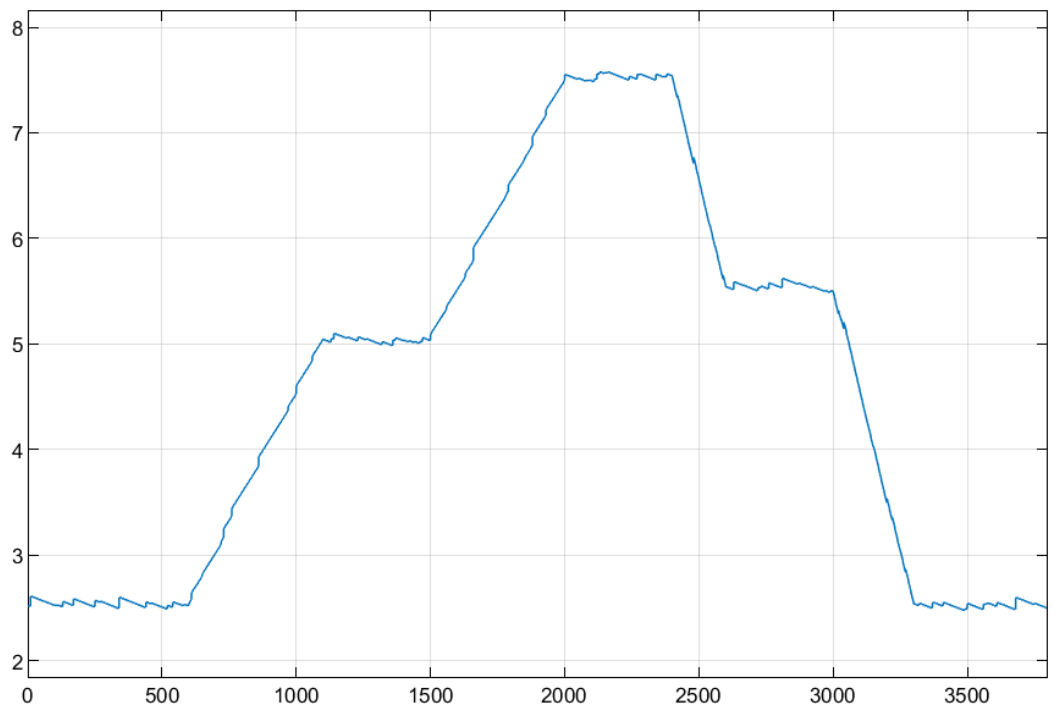


Рис. 3.3 – Графік зміни витрати водяної пари

3.2. Ідентифікація моделі статички

Для побудови статичної моделі використовувалися лише дані, отримані в усталеному режимі роботи системи. Підсумки проведеного експерименту подано в таблиці 3.1.

Для визначення статичних характеристик досліджуваного об'єкта було застосовано метод найменших квадратів.

Табл. 3.1 – Експериментальні дані

№	Витрата водяної пари (X)	Температура алкілату (Y)
1	2.43	34.2
2	5.16	68.4
3	7.38	103.7
4	5.48	76.5
5	2.54	33.7

Метод найменших квадратів — це підхід регресійного аналізу, що використовується для оцінювання невідомих параметрів у регресійній моделі.

Обчислення коефіцієнтів буде виконано за допомогою програмного середовища MathCad.

$$b0 := \text{intercept}(X, Y) = -1.626 \quad (3.1)$$

$$b1 := \text{slope}(X, Y) = 14.121 \quad (3.2)$$

Отримано таке рівняння статичної характеристики:

$$\theta_{\text{вих}} = 14.121 \cdot F_{\text{ал}} - 1.626 \quad (3.3)$$

Графічне відображення статичної характеристики керуючого каналу наведено на рисунку 3.4.

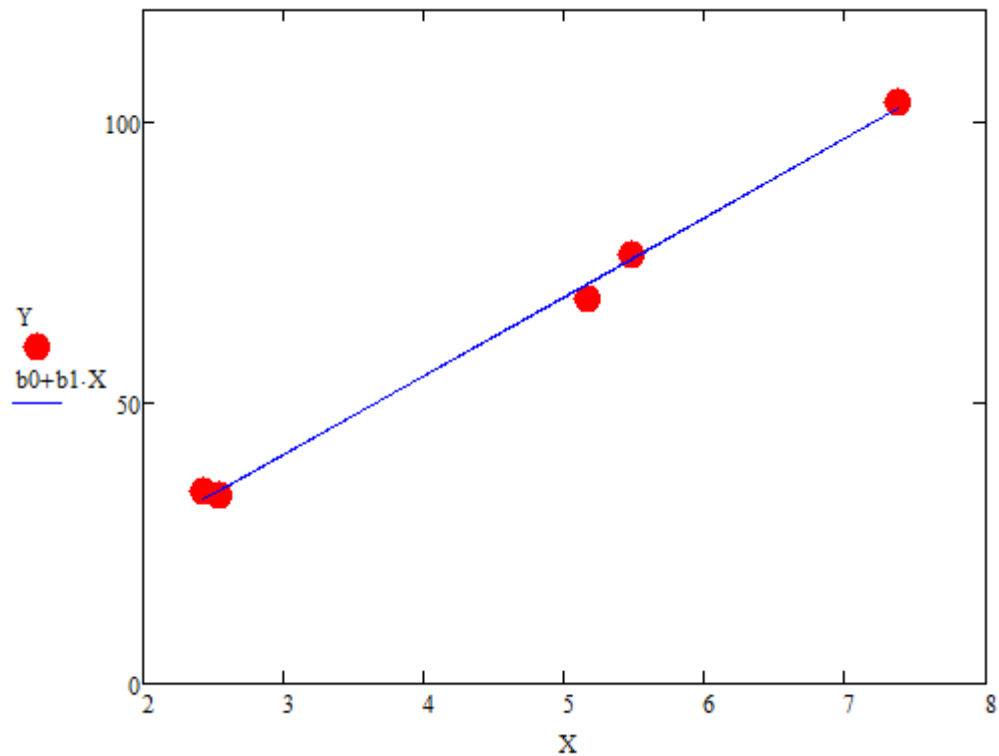


Рис. 3.4 – Статичний аналіз керуючого каналу

3.3. Ідентифікація динамічної моделі

Для виконання динамічної ідентифікації використовується програмне середовище *MatLab* разом із додатковим модулем *System Identification Toolbox (SIT)* [7]. Цей інструментарій також забезпечує можливості для аналізу, валідації та діагностики моделей.

Орієнтовна послідовність визначення параметрів включає такі етапи:

1. Формування масивів даних на основі виміряних вхідних та вихідних сигналів об'єкта.
2. Попередня обробка даних — фільтрація, усунення трендів та підготовка сигналів до аналізу.
3. Вибір структури моделі, у межах якої здійснюватиметься ідентифікація.
4. Пошук найбільш придатної моделі за експериментальними даними відповідно до вибраного критерію якості та структури.

5. Перевірка отриманої моделі, оцінювання її адекватності та визначення основних характеристик.

Процес ідентифікації завершується, коли модель задовольняє необхідним вимогам. Якщо ж критерії не виконані, повертаються до третього етапу для вибору нової структури моделі.

На рисунку 3.5 наведено вікно *SIT* із переліком отриманих моделей.

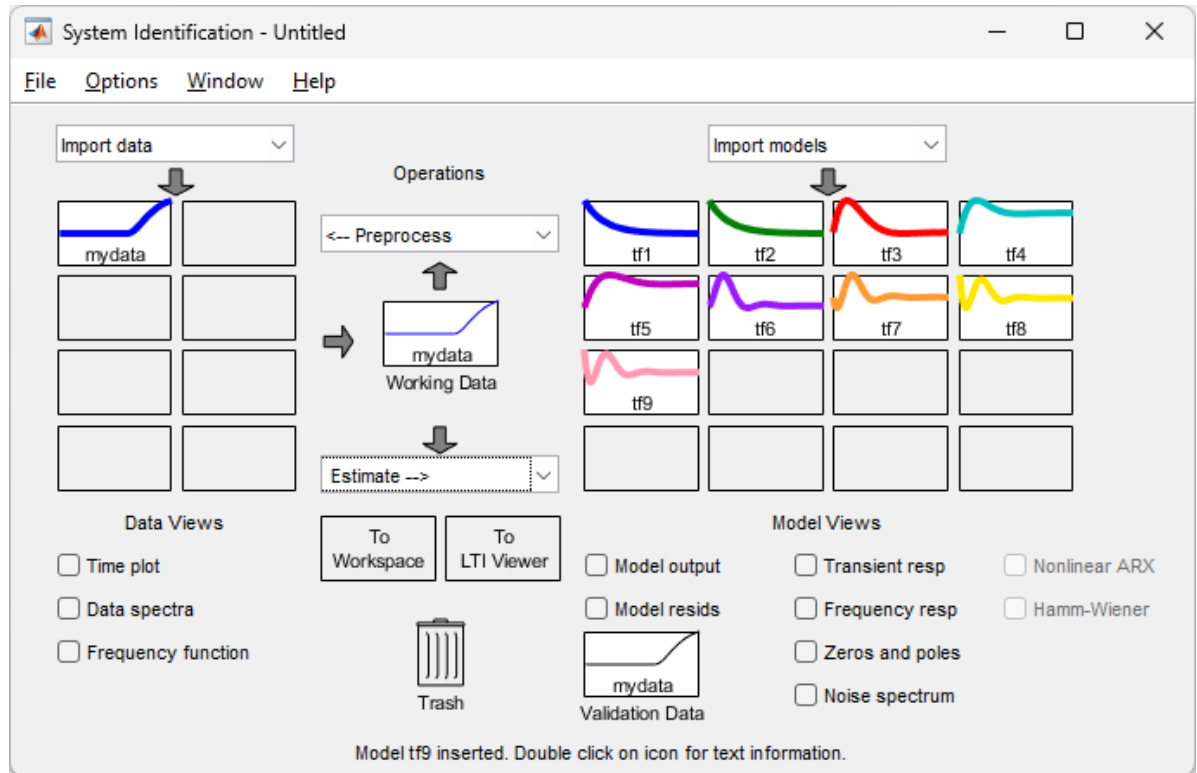


Рис. 3.5 – Інтерфейс *System Identification Toolbox*

На рисунку 3.6 наведено графічне відображення апроксимувальних функцій разом із показниками точності отриманих моделей.

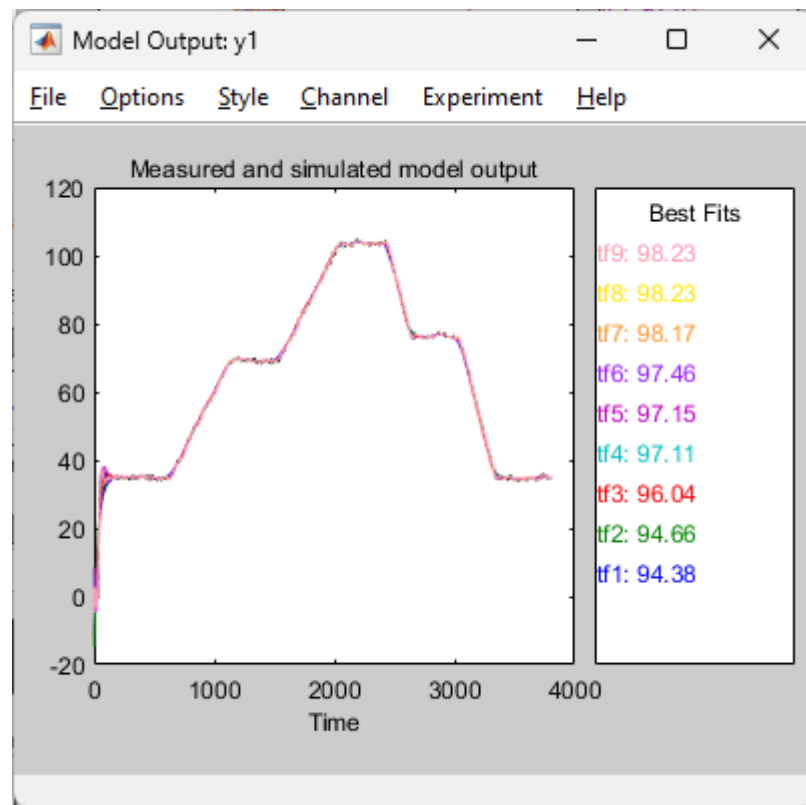


Рис. 3.6 – Побудовані апроксимувальні залежності.

На рисунку 3.7 подано перехідні характеристики отриманих моделей.

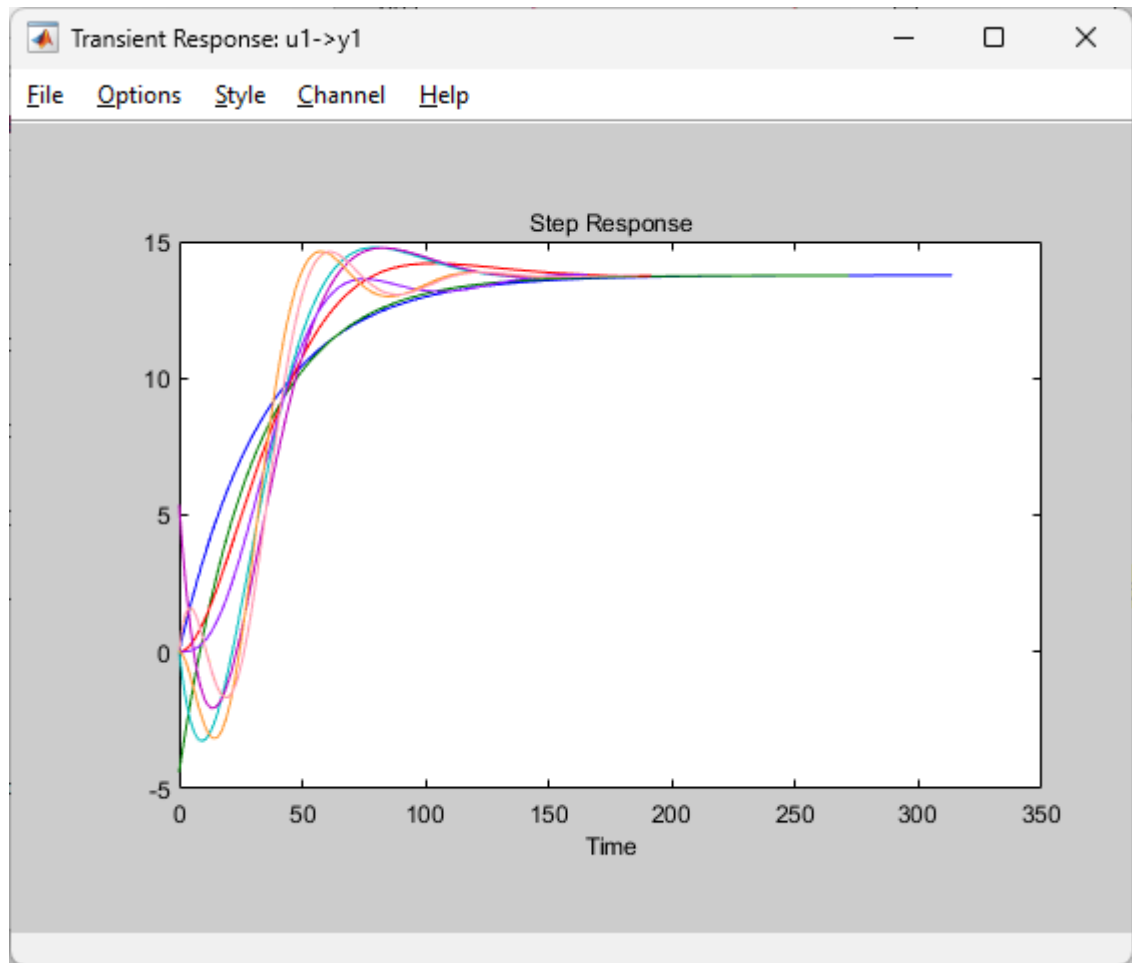


Рис. 3.7 – Перехідні характеристики моделей керуючого каналу.

Оскільки підвищення порядку моделі не забезпечує відповідного поліпшення її точності, доцільно використовувати модель другого порядку.

Передавальна функція ідентифікованого об'єкта має такий вигляд:

$$W = \frac{0.02789}{s^2 + 0.06639 \cdot s + 0.002028} \quad (3.4)$$

На рисунку 3.8 подано перехідні характеристики обраної моделі керуючого каналу

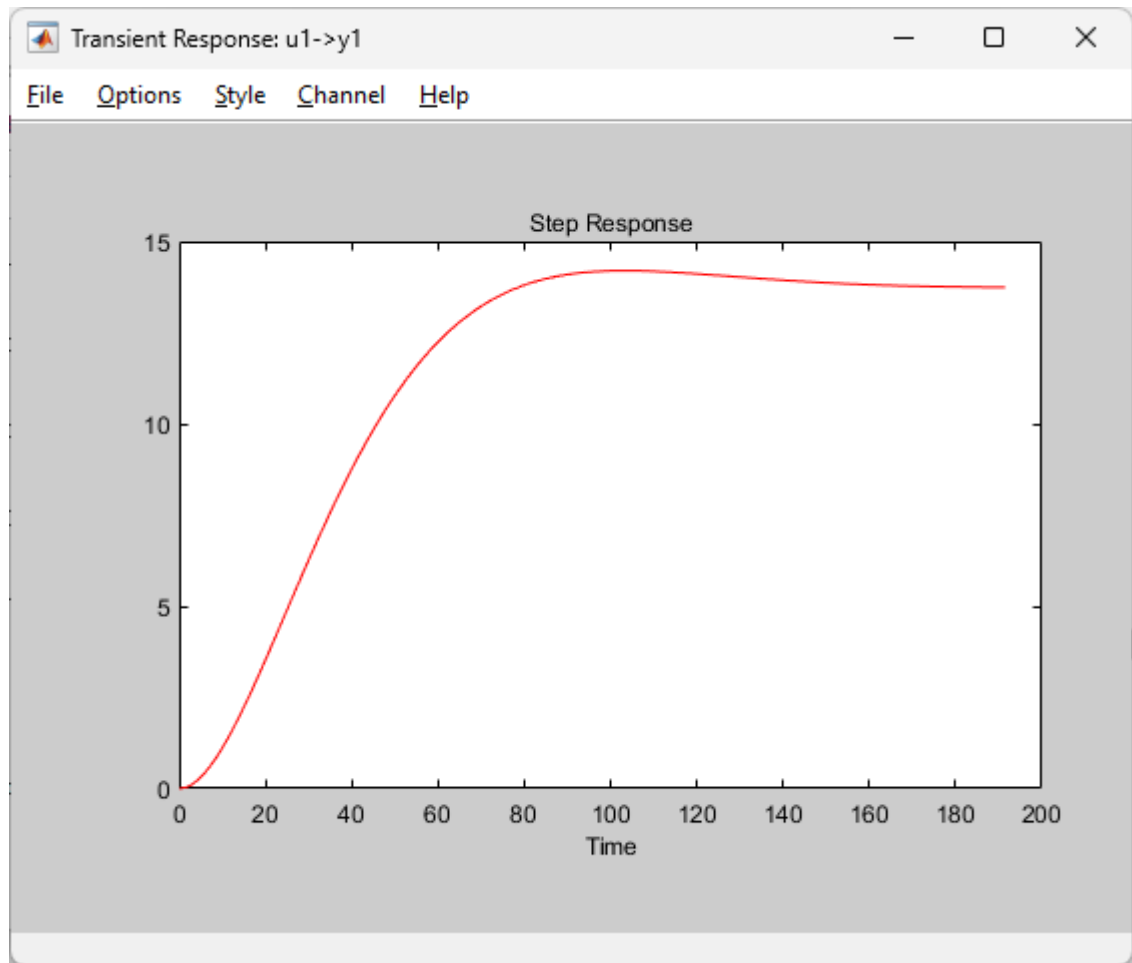


Рис. 3.8 – Перехідна характеристика обраної моделі керуючого каналу.

3.4. Створення імітаційної моделі засобами *Matlab-Simulink*

Було вирішено розробити імітаційну модель для дослідження об'єкта керування. Це дозволить детальніше проаналізувати його динамічні властивості (рисунок 3.9).

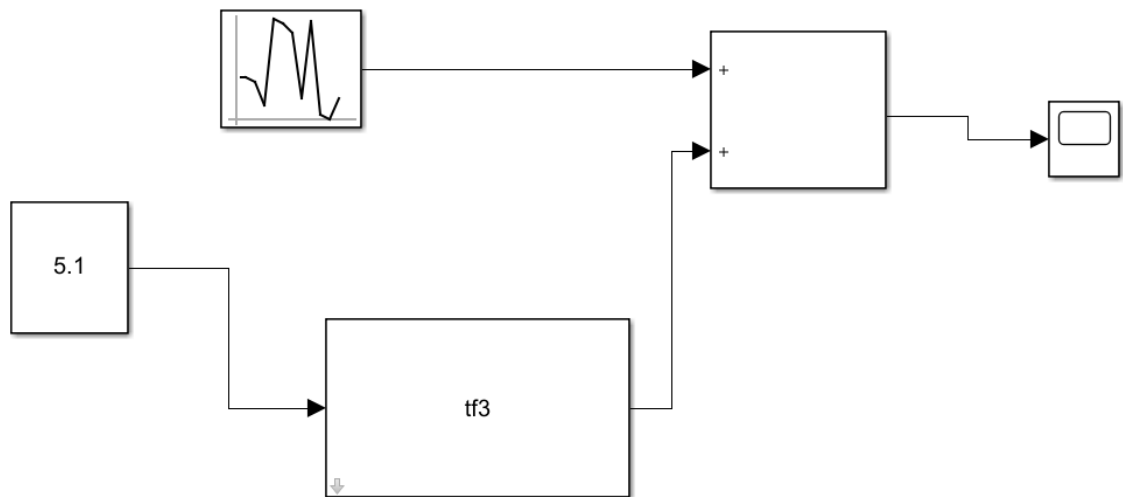


Рис. 3.9 – Розроблена модель об'єкта з урахуванням збурення.

Перехідна характеристика динамічної моделі обраного керуючого каналу наведена на рисунку 3.10.

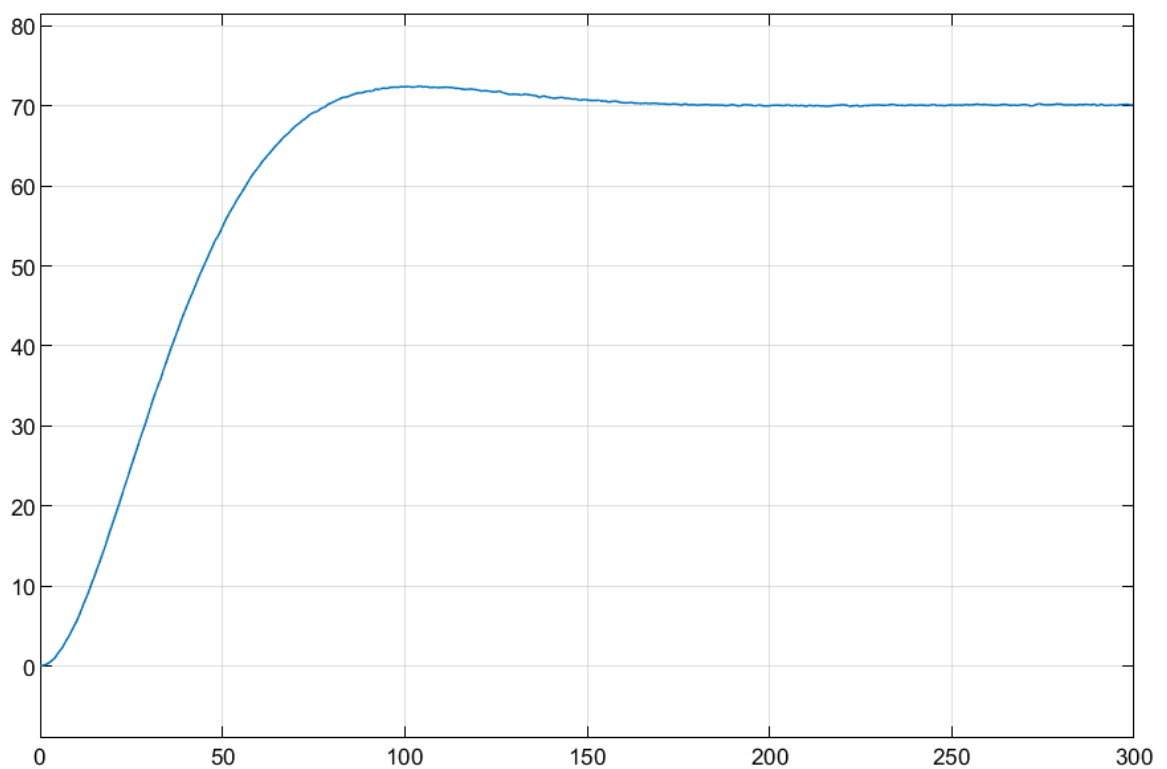


Рис. 3.10 – Перехідна характеристика керуючого каналу

Висновок: У цьому розділі виконано аналіз та проведено ідентифікацію теплообмінника, що використовується для нагрівання алкілату. Для

виконання ідентифікації було застосовано Matlab-Simulink. Передавальна функція та перехідна характеристика отримані за відповідним керуючим каналом.

4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ ВІДГІННА КОЛОНА

4.1. Синтез системи з використанням MPC-регулятора

Модельне прогнозне керування (MPC) належить до сучасних стратегій автоматичного регулювання, що дають змогу ефективно керувати процесами з урахуванням заданих обмежень [8]. Цей підхід широко використовують на промислових підприємствах, особливо в хімічній та нафтопереробній галузях, а також у задачах балансування енергосистем. Головною перевагою MPC є здатність оптимізувати поточний режим роботи, одночасно враховуючи майбутні часові інтервали. На відміну від лінійно-квадратичного регулятора (LQR), де оптимізація виконується лише в межах поточного інтервалу з подальшим переобчисленням, MPC дозволяє передбачати поведінку системи наперед і відповідно коригувати керуючі дії. Це робить його значно ефективнішим, ніж традиційні ПІД-регулятори, які не мають прогнозуючих можливостей. Хоча існують методики пришвидшення відгуку за допомогою спеціальних аналогових схем, MPC зазвичай реалізують у цифрових системах керування.

Для налаштування MPC-регулятора буде використано спрощену модель, що містить зворотні зв'язки між входами та виходами. Таке спрощення потрібне, оскільки налаштування регулятора безпосередньо на основі повної моделі ускладнюється наявністю нелінійностей і внутрішніх зворотних зв'язків. Основним завданням налаштування MPC є визначення оптимальних параметрів регулятора, які забезпечать стабільний та ефективний процес нагрівання.

На рисунку 4.1 представлено структуру системи керування з MPC-регулятором. Вхідні та вихідні параметри наведені відповідно до моделі, отриманої в розділі 3.

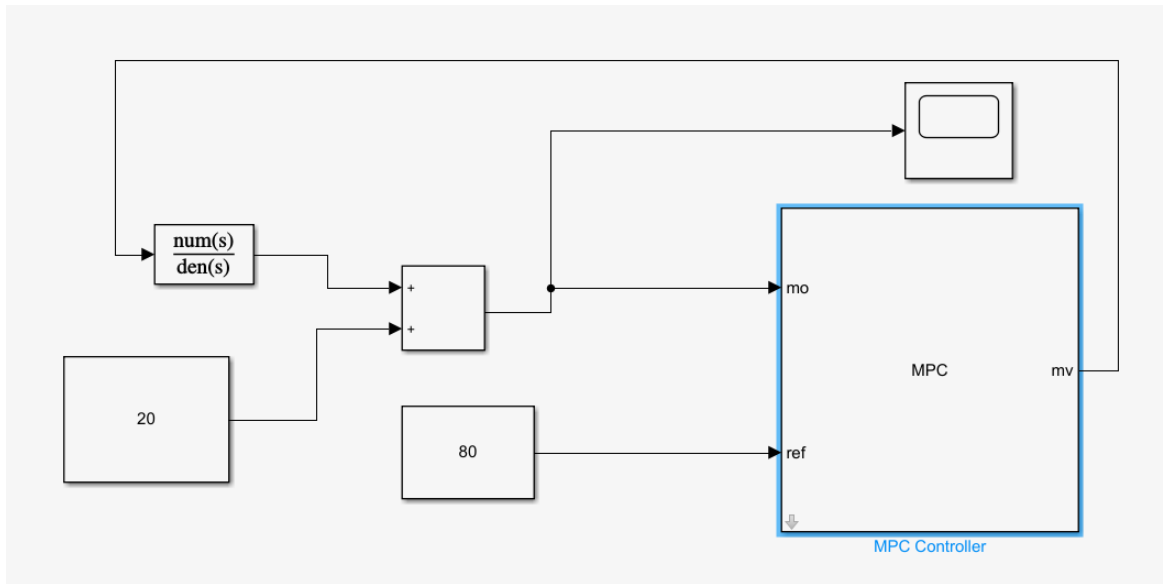


Рис. 4.1 – Узагальнена структура системи керування з MPC-контролером.

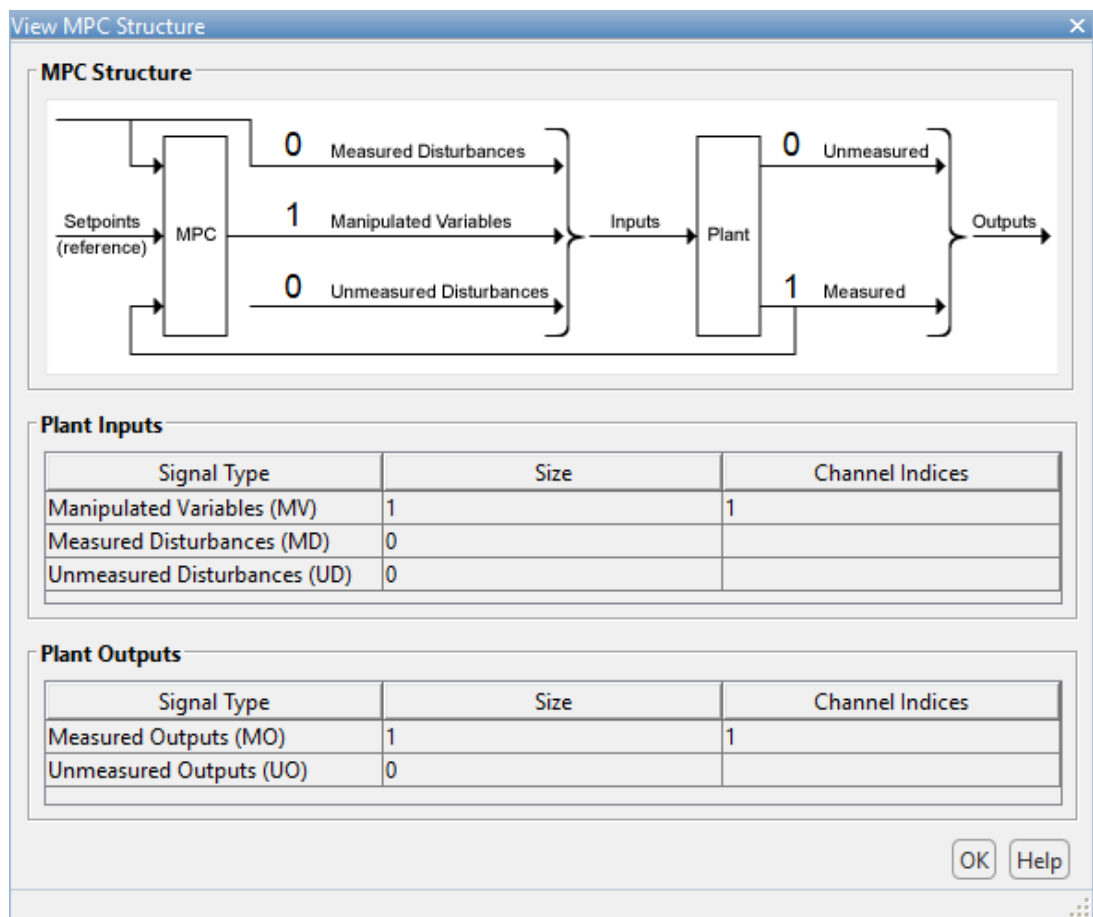


Рис. 4.2 – Параметри налаштування регулятора.

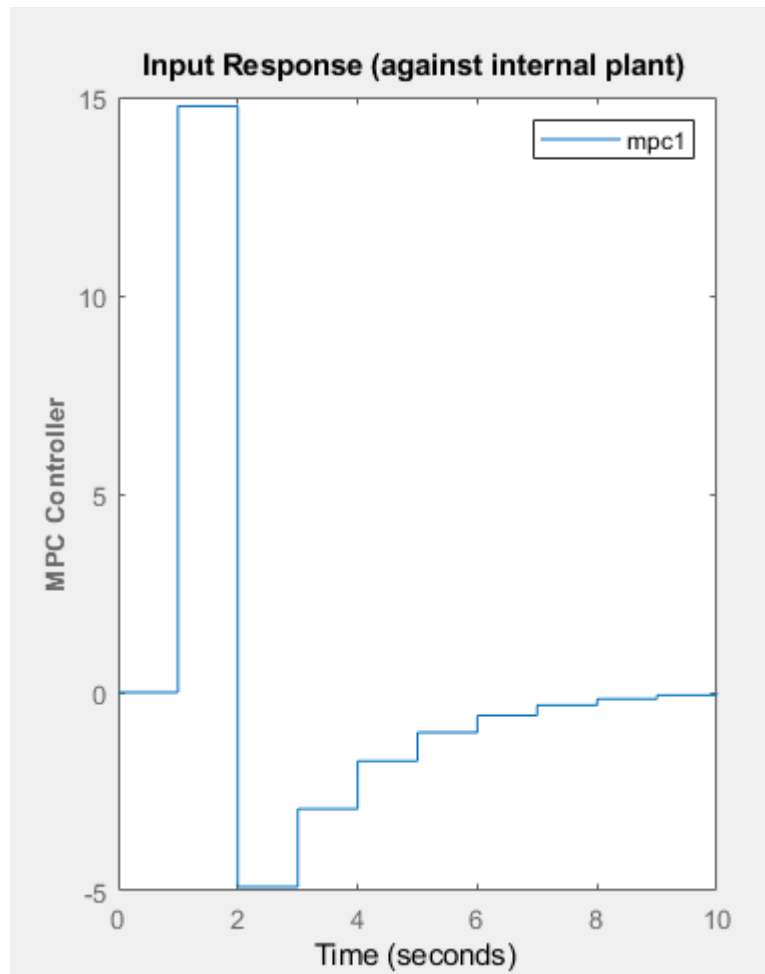


Рис. 4.3 – Дискретний вихід МРС-контролера.

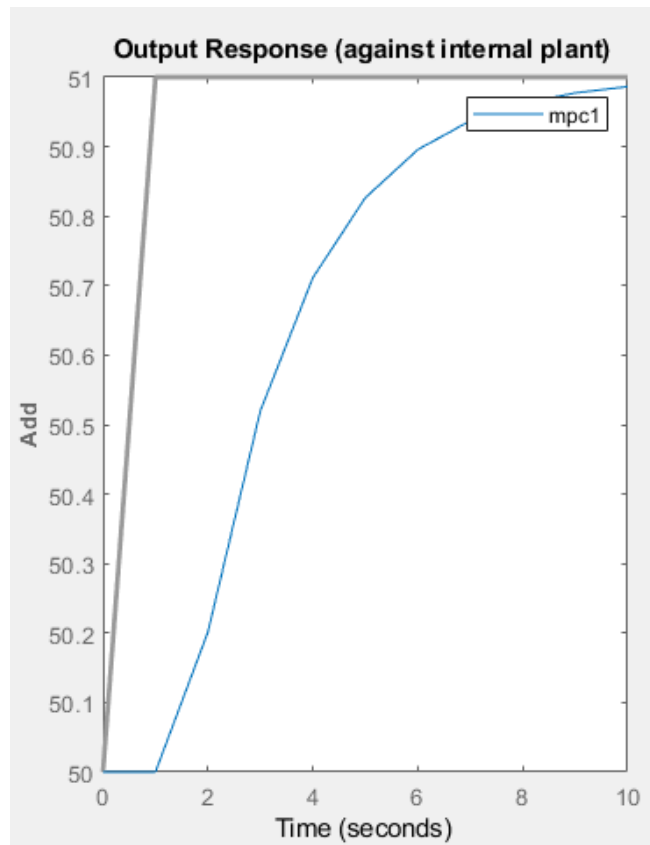


Рис. 4.4 – Результат роботи МРС-контролера.

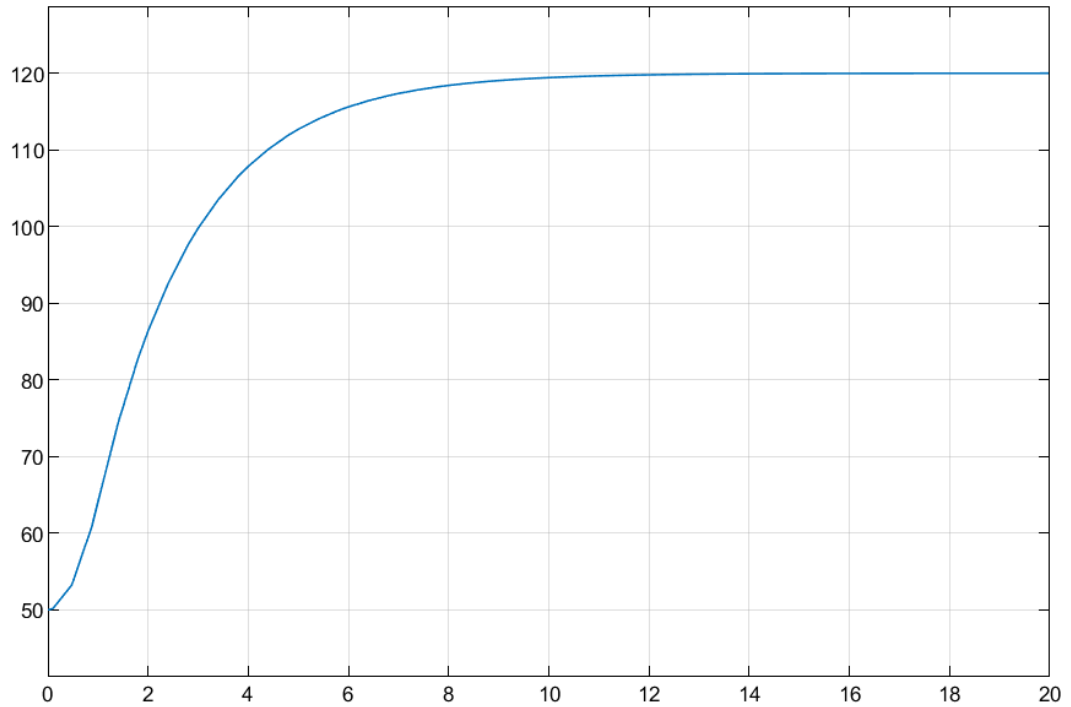


Рис. 4.5 – Відгук системи під керуванням МРС-контролера.

4.2. Розробка нечіткої системи керування теплообмінника

Нечітка система керування відгінною колоною потребує проведення фаззифікації та визначення керованих змінних.

У якості таких змінних розглядатимуться температура на виході та витрата водяної пари, які підлягатимуть регулюванню.

Далі буде проаналізовано лінгвістичні змінні, що використовуються для опису обраних параметрів [9].

Лінгвістична змінна:

мала
 (Витрата водяної пари; нормальна; $3.1 < F \leq 7.1$)
 велика

Опишемо функції належності:

$$F_{\text{ВП_Мала}} = \begin{cases} 1, F < 3.6 \\ \frac{4.6-F}{1}, 3.6 \leq F \leq 4.6 \\ 0, F > 4.6 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$F_{\text{ВП_Нормальна}} = \begin{cases} 0, F < 4.1 \text{ або } F > 6.1 \\ \frac{F-4.1}{1}, 4.1 \leq F < 5.1 \\ \frac{6.1-F}{1}, 5.1 \leq F \leq 6.1 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$F_{\text{ВП_Велика}} = \begin{cases} 1, F > 6.6 \\ \frac{F-5.6}{1}, 5.6 \leq F \leq 6.6 \\ 0, F < 5.6 \end{cases} \quad (4.3)$$

низька
Лінгвістична змінна: (Температура алкілату; нормальна; $92.6 < T \leq 147.4$)
 висока

Опишемо функції належності:

$$T_{\text{АЛ_Низька}} = \begin{cases} 1, T < 99.45 \\ \frac{113.15-T}{13.7}, 99.45 \leq T \leq 113.15 \\ 0, T > 113.15 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$T_{\text{АЛ_Нормальна}} = \begin{cases} 0, T < 106.3 \text{ або } T > 133.7 \\ \frac{T-106.3}{13.7}, 106.3 \leq T < 120 \\ \frac{133.7-T}{13.7}, 120 \leq T \leq 133.7 \end{cases} \quad (4.5)$$

$$T_{\text{АЛ_Висока}} = \begin{cases} 1, T > 140.55 \\ \frac{T-126.85}{13.7}, 126.85 \leq T \leq 140.55 \\ 0, T < 126.85 \end{cases} \quad (4.6)$$

Сформувавши лінгвістичні змінні, можна задати попередні, ще неточні, правила керування:

ЯКЩО Температура алкілату *«Низька»* **ТО** Витрата водяної пари *«Велика»*.

ЯКЩО Температура алкілату *«Нормальна»* **ТО** Витрата водяної пари *«Нормальна»*.

ЯКЩО Температура алкілату *«Висока»* **ТО** Витрата водяної пари *«Мала»*.

Для розробки нечіткої системи керування ми використаємо інструментарій *MatLab Fuzzy Logic* [9]. Метою є створення одновимірної системи керування — з одним входним та одним вихідним сигналом — що дасть змогу здійснювати регулювання нашого об'єкта. Схему побудованої системи наведено на рисунку 4.6.

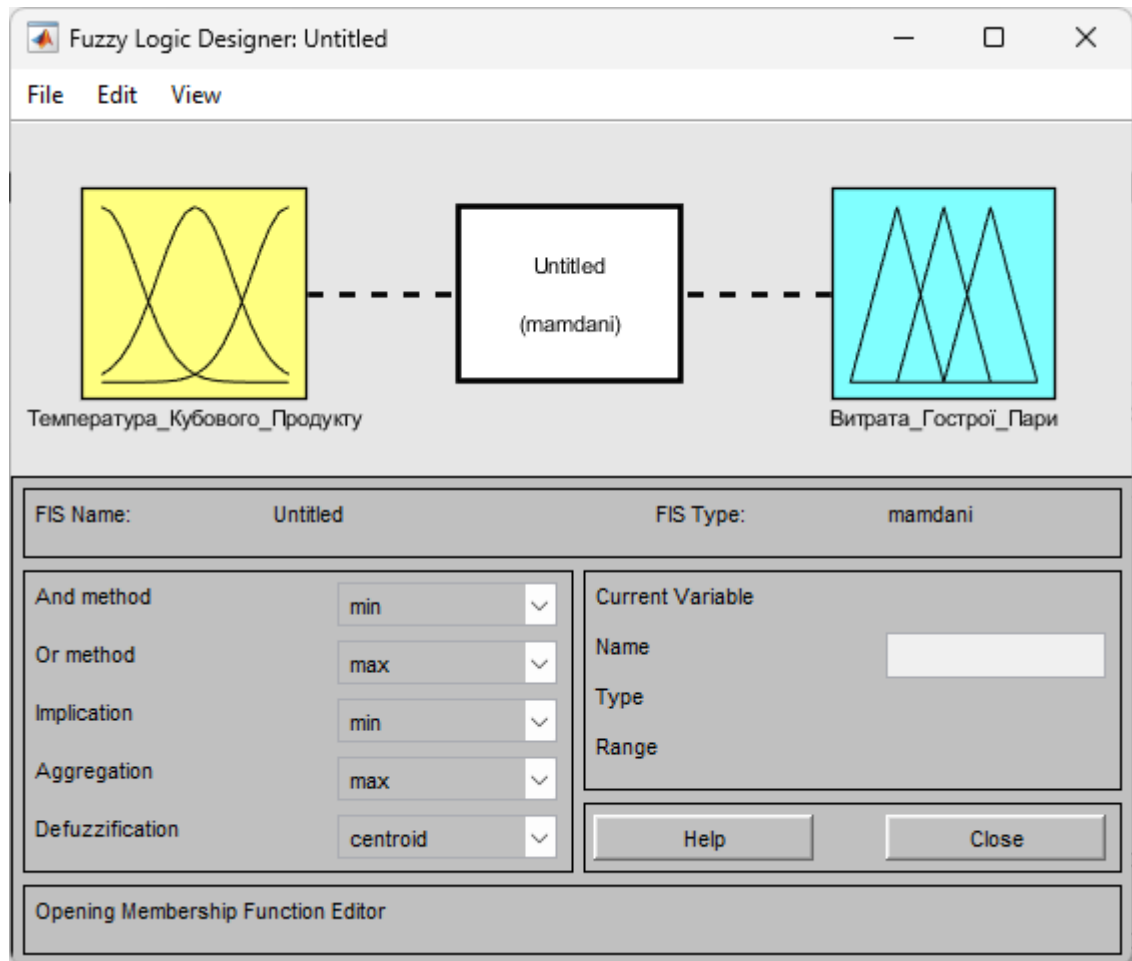


Рис. 4.6 – Структура системи керування.

Далі проаналізуємо лінгвістичні параметри створеної системи керування. Це здійснюється у вікні редагування функцій належності. На рисунках 4.7 і 4.8 наведено графічне відображення функцій належності термів зазначених змінних.

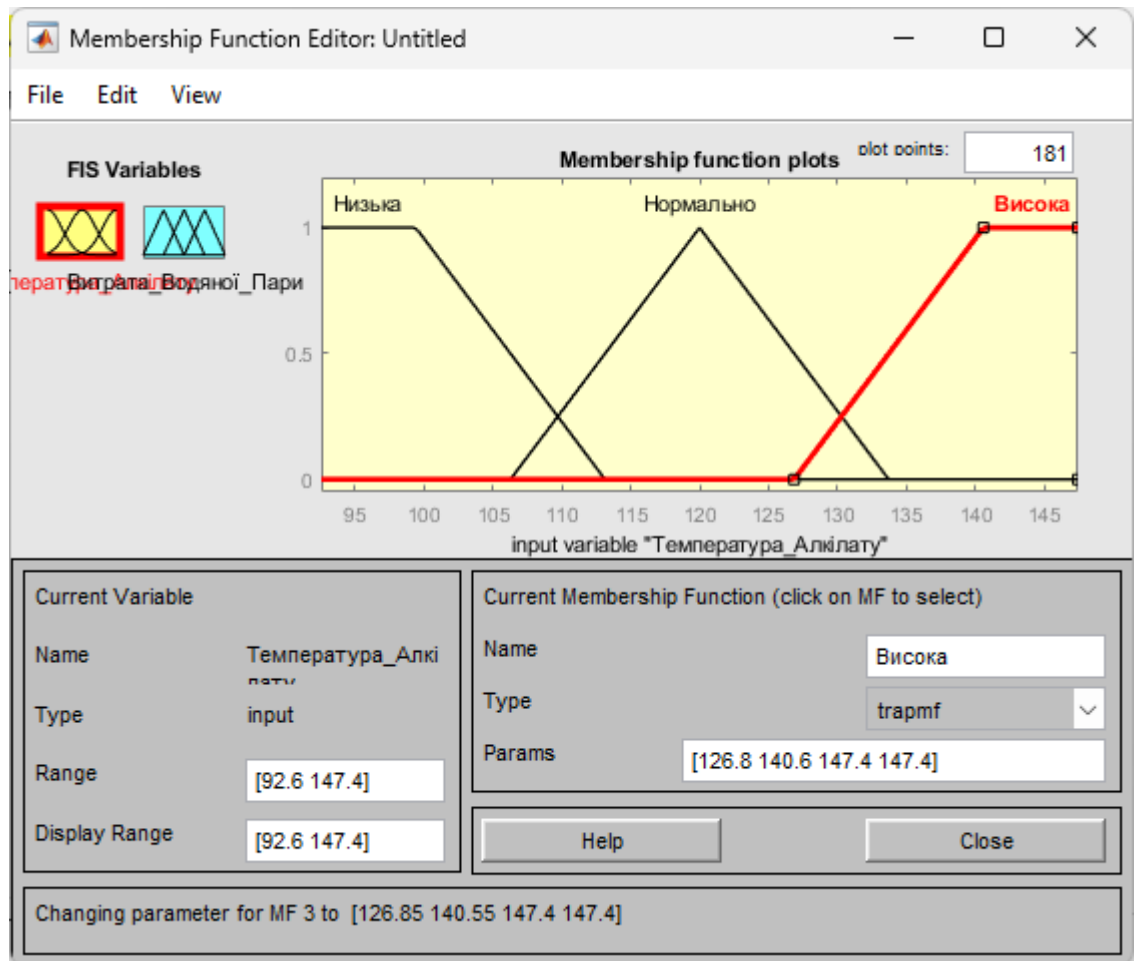


Рис. 4.7 – Змінна - «Температура алкілату»

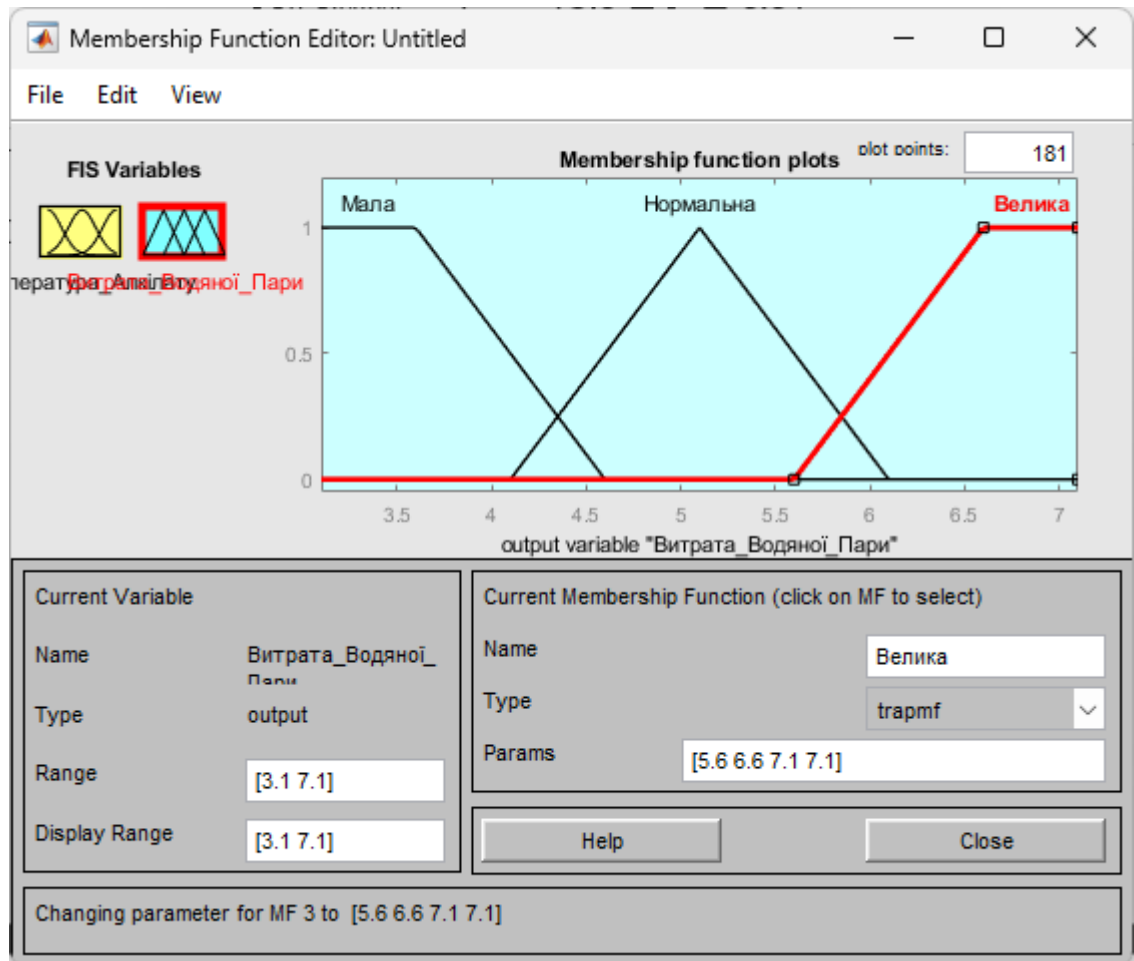


Рис. 4.8 – Змінна «Витрата водяної пари»

Далі необхідно сформулювати нечіткі правила для нашої системи керування [9]. На рисунку 4.9 наведено інтерфейс редагування цих правил. Для їх створення відкриваємо відповідне вікно, яке й показано на рисунку 4.9.

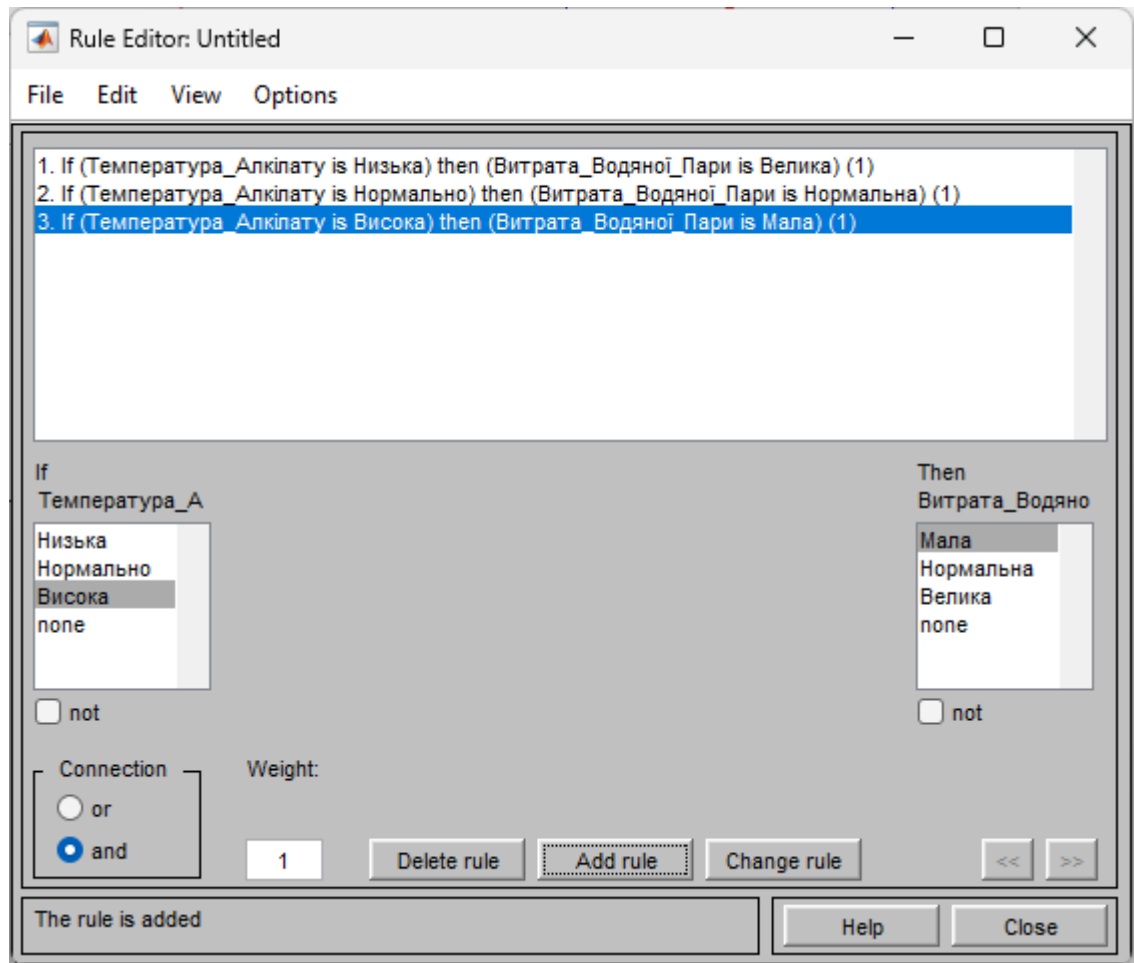


Рис. 4.9 – Інтерфейс налаштування правил.

Після завершення наведених вище налаштувань система керування готова до використання. Для оцінювання її роботи можна проаналізувати поверхню нечіткого висновку та уточнити функціонування заданих правил. Перевірку правил і поверхонь нечіткого висновку показано на рисунках 4.10 та 4.11.

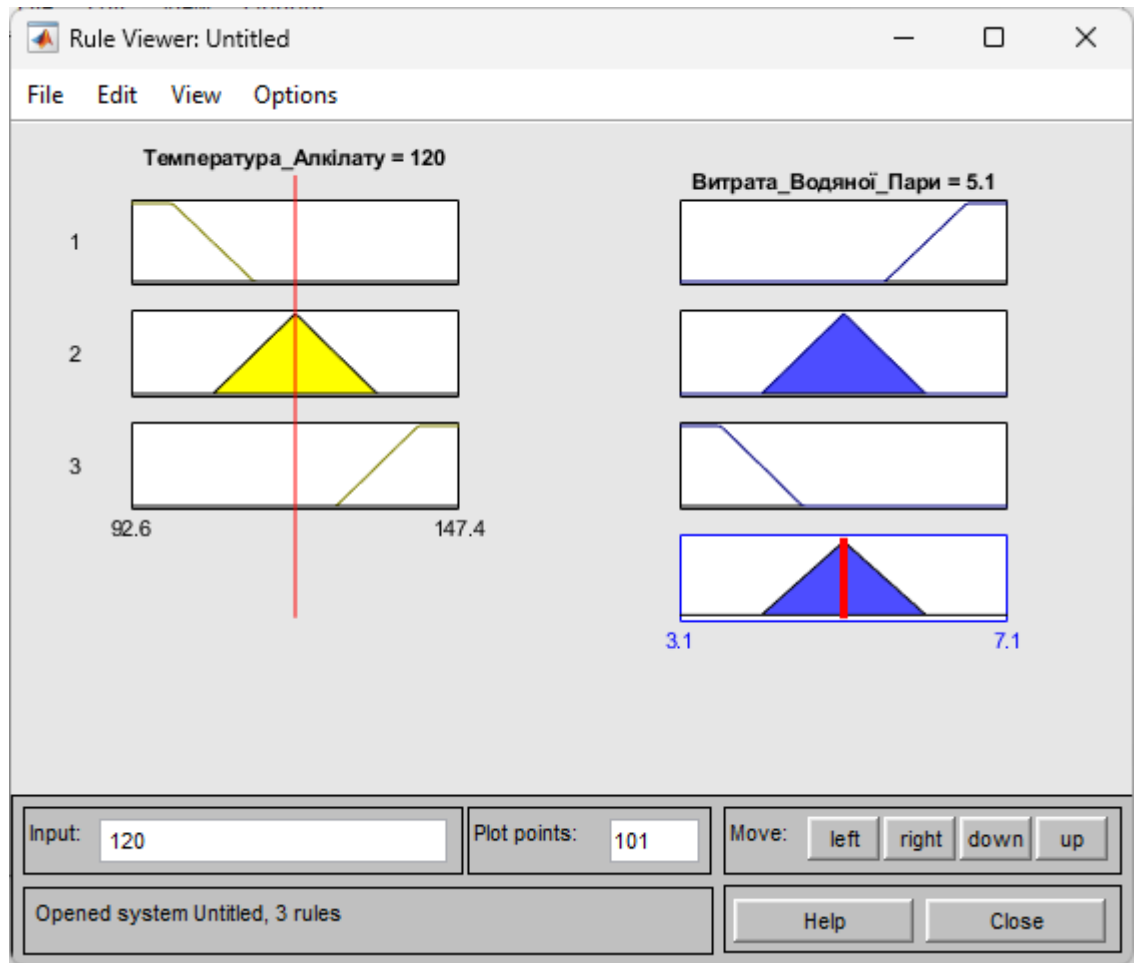


Рис. 4.10 – Правила для температури кубового продукту 120 °C

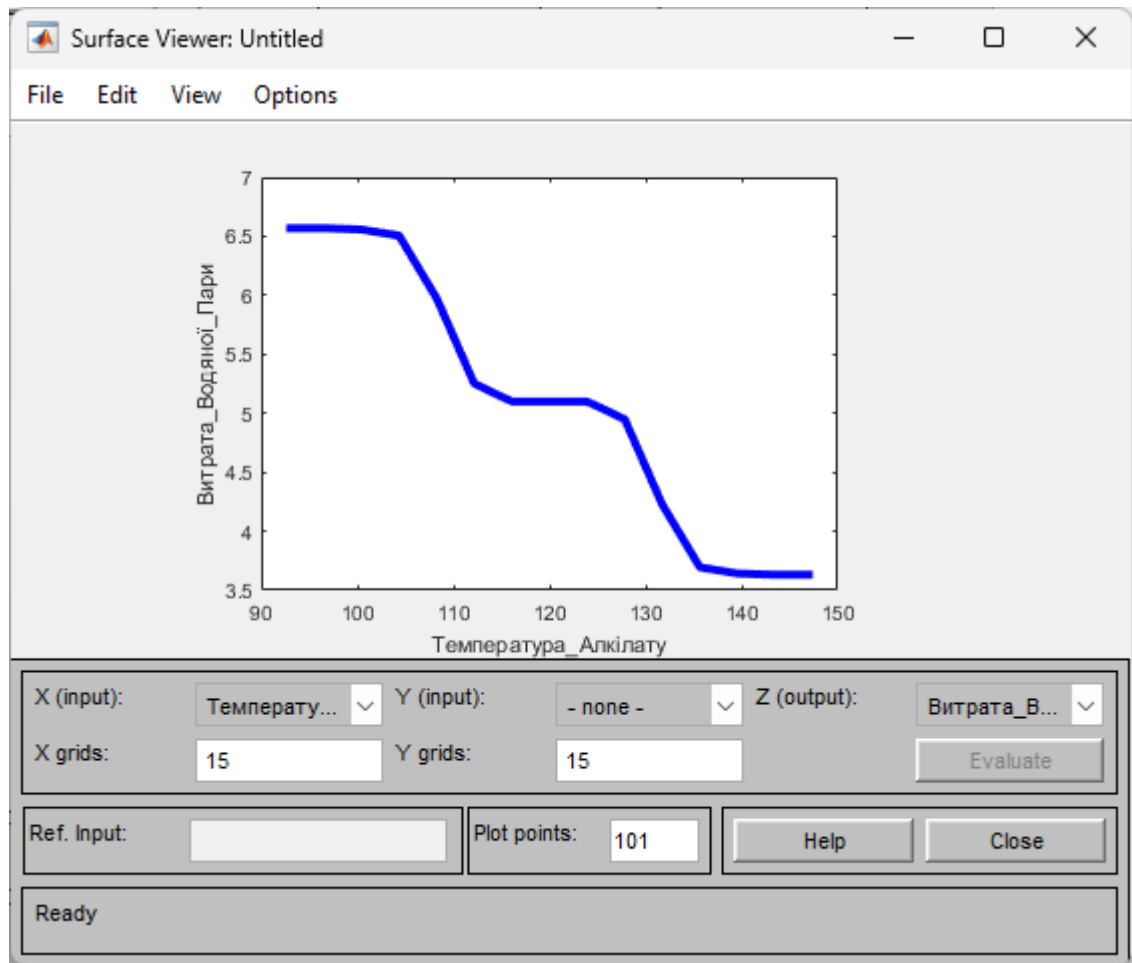


Рис. 4.11 – Поверхня нечіткого висновку.

Для підтвердження коректної роботи розробленої системи керування формується контур регулювання в середовищі Simulink, після чого здійснюється його тестовий запуск. Схему моделі в Simulink наведено на рисунку 4.12.

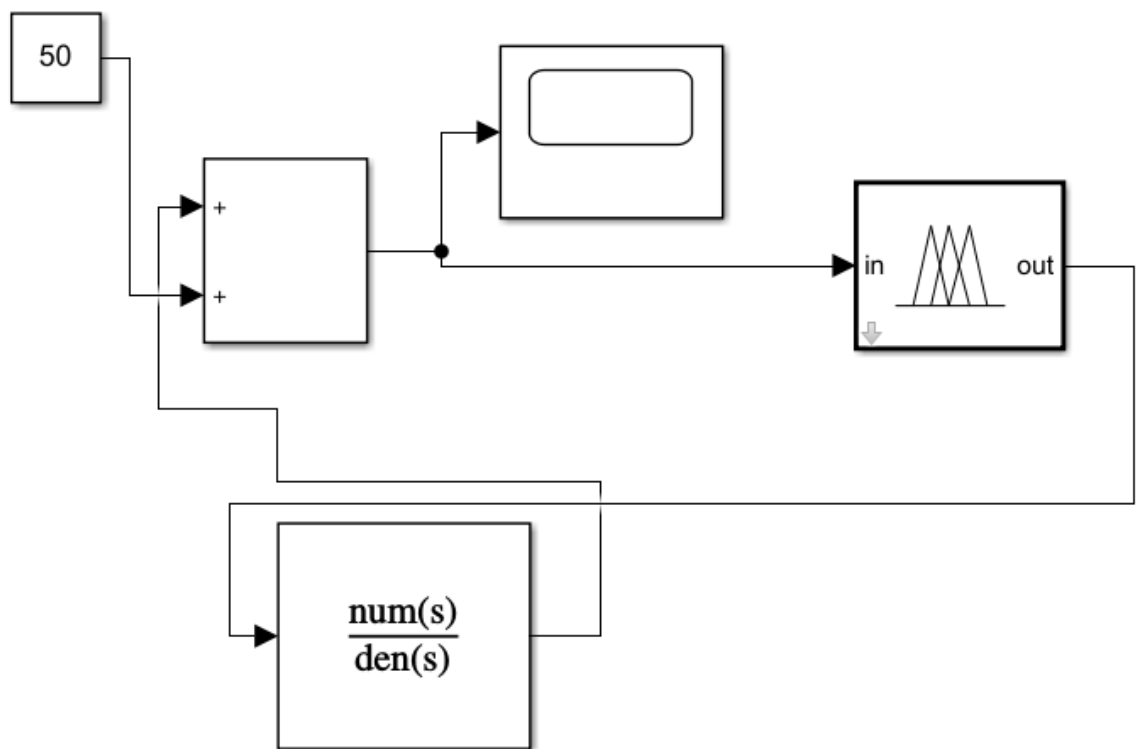


Рис. 4.12 – Модель контурів керування.

Для перегляду перехідної характеристики замкненого контуру з нечіткою системою керування запускаємо симуляцію та відкриваємо осцилограф. Отриману перехідну характеристику наведено на рисунку 4.13.

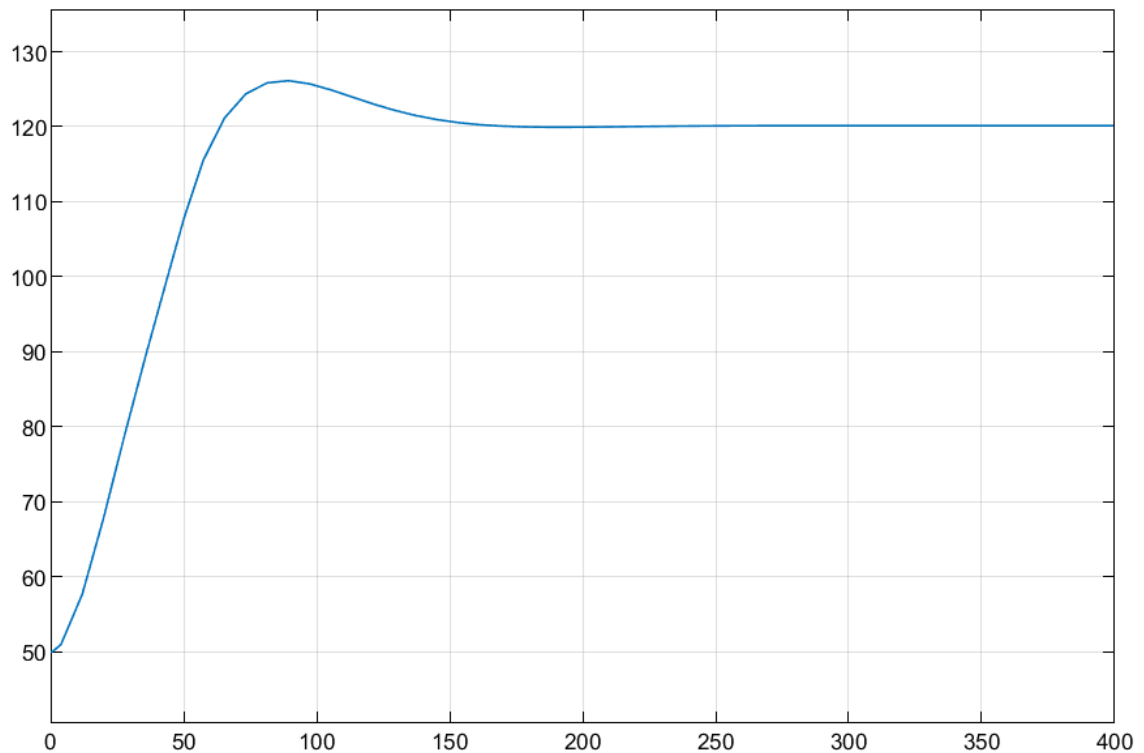


Рис. 4.13 – Відгук замкненого контуру регулювання

Висновок: У цьому розділі було розроблено та порівняно два підходи до керування змодельованим об'єктом: нечітку систему керування та регулятор на основі МРС. Аналіз отриманих графіків і результатів дослідження показав, що МРС-контролер забезпечує вихід на усталений режим швидше — на 156 секунд раніше. Серед його переваг варто відзначити високу швидкодію та відносну простоту налаштування.

Водночас використання нечіткої логіки надає більшої гнучкості системі керування, оскільки дозволяє адаптувати числові параметри відповідно до конкретних умов і вимог, що може бути корисним у складніших або нелінійних процесах.

5. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КИП'ЯТЕНИЯ В ТЕПЛООБМЕНИКЕ

5.1. Выбор критерия оптимальности

Завдання полягає у зниженні подачі водяної пари до теплообмінника та визначенні температури алкілату на його виході.

Для розв'язання цієї задачі застосовують інтегральний критерій якості, який дає змогу забезпечити необхідний температурний режим [10]:

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} [q(Q - Q_{завд}) + \frac{1}{2} \cdot r \cdot F_{ен}^2] dt \rightarrow \min. \quad (5.1)$$

Межі:

$$F_{ен, \min} \leq F_{ен} \leq F_{ен, \max}$$

Відповідно, модель із розділу 3 перетворюємо у вигляд простору станів.

$$A = \begin{pmatrix} -0.0664 & -0.0020 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (5.2)$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5.3)$$

$$C = (0 \quad 0.0279), \quad (5.4)$$

$$D = 0. \quad (5.5)$$

5.2. Выведения необходимых условий оптимальности

Вираз для функції Гамільтона набуває такого вигляду:

$$H = \frac{1}{2} ((x_1 - x_1^{з\partial} \quad x_2 - x_2^{з\partial}) \cdot Q \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_1^{з\partial} \\ x_2 - x_2^{з\partial} \end{pmatrix} + R \cdot u^2) + (\lambda_1 \quad \lambda_2) \cdot (A \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + B \cdot u). \quad (5.6)$$

Умови, що забезпечують оптимальність:

$$\lambda_1' = -\frac{\delta H}{\delta x_1} = -(q_{11} \cdot (x_1 - x_1^{30}) + \lambda_1 \cdot a_{11} + \lambda_2 \cdot a_{21}), \quad (5.7)$$

$$\lambda_2' = -\frac{\delta H}{\delta \theta} = -(q_{22} \cdot (x_2 - x_2^{30}) + \lambda_1 \cdot a_{12} + \lambda_2 \cdot a_{22}), \quad (5.8)$$

$$\frac{\delta H}{\delta u} = R \cdot u + \lambda_1 \cdot b_1 + \lambda_2 \cdot b_2 = 0. \quad (5.9)$$

Оптимальне керування:

$$u = \frac{-\lambda_1 \cdot b_1 - \lambda_2 \cdot b_2}{r}, \quad (5.10)$$

$$\lambda_1(t_f) = 0, \quad (5.11)$$

$$\lambda_2(t_f) = 0. \quad (5.12)$$

Рівняння, що описують систему в прямому часі

$$\begin{cases} \frac{x_1^{v+1} - x_1^v}{\tau} = a_{11} \cdot x_1^v + a_{12} \cdot x_2^v + b_1 \cdot u \\ \frac{x_2^{v+1} - x_2^v}{\tau} = a_{21} \cdot x_1^v + a_{22} \cdot x_2^v + b_2 \cdot u \end{cases} \quad (5.13)$$

Модель спряженої системи у відповідному часовому просторі

$$\begin{cases} \frac{\lambda_1^{v-1} - \lambda_1^v}{\tau} = q_{11} \cdot [x_1 - x_1^{3D}] + \lambda_1 \cdot a_{11} + \lambda_2 \cdot a_{21} \\ \frac{\lambda_2^{v-1} - \lambda_2^v}{\tau} = q_{22} \cdot [x_2 - x_2^{3D}] + \lambda_1 \cdot a_{12} + \lambda_2 \cdot a_{22} \end{cases} \quad (5.14)$$

5.3. Розрахунок оптимального програмного керування

Усі дані програмного керування та послідовні обчислення, наведені в цьому розділі, отримано за допомогою програмного середовища MatLab. Програмний код, що виконує розрахунок оптимального керуючого впливу та формує відповідні графічні результати, подано на рисунках 5.1–5.3. Підсумкові результати роботи програми наведено на рисунках 5.4–5.7.

```

1 clear;
2 load('roz5.mat')
3 tau = 1; t_f = 300; samples = t_f/tau; t=(0:samples-1).*tau;
4 x_zad = [6.646e-3; 2.51e+3];
5 q = 1; Q = [q 0; 0 q]; R = 1.96e+5; s = 1; S = [-3.86e+10 0; 0 -133.88];
6 syms u real;
7 x = sym('x',[length(A) 1],'real');
8 l = sym('l',[1 length(A)],'real');
9 H = (1/2)*(x - x_zad)'*Q*(x - x_zad) + (u^2)*R + l*(A*x + B*u);
10 for i = 1:length(A)
11     M_x(i) = x(i) + diff(H, l(i))*tau;
12 end
13 syms next_x(u, x1, x2)
14 next_x(u, x1, x2) = M_x(:);
15 for i = 1:length(A)
16     M_l(i) = l(i) + diff(H, x(i))*tau;
17 end
18 syms next_l(l1, l2, x1, x2)
19 next_l(l1, l2, x1, x2) = M_l(:)';
20 for i = 1:samples
21     u(i) = 1;
22 end
23 X(:,1) = [0; 0];
24 Y(:, 1) = C*X(:, 1);
25 for i=1:samples-1
26     X(:, i+1) = X(:, i) + (A*(X(:, i)) + B*U(i))*tau;
27     Y(:, i+1) = C*X(:, i+1);
28 end
29

```

Рис. 5.1 – Код програми для обчислення оптимального програмного керування.

```

30 X_opt = X;
31 U_opt = U;
32 l_i(samples, :) = S*X_opt(:, samples);
33 for i=samples:-1:2
34     l_i(i-1, :) = next_l(l_i(i,1), l_i(i,2), X_opt(1, i), X_opt(2, i));
35 end
36
37 u_l(1) = solve(diff(H, u), u);
38
39 for i=1:samples
40     U_opt(i) = u_l(l_i(i,1), l_i(i,2));
41 end
42
43 Y_opt(1) = C*X_opt(:, 1);
44 for i=1:samples-1
45     X_opt(:, i+1) = next_x(U_opt(i), X_opt(1,i), X_opt(2,i))';
46     Y_opt(i+1) = C*X_opt(:, i+1);
47 end
48
49 %%
50 subplot(2,1,1);
51 plot(t,X(1, :))
52 ylabel('x1');
53 xlabel('Час, c')
54 subplot(2,1,2);
55 plot(t,X(2, :))
56 ylabel('x2');
57 xlabel('Час, c')
58 %%
59 plot(t,Y)
60

```

Рис. 5.2 – Код програми для побудови графіків зміни стану.

```

57  %%
58  plot(t,Y)
59  ylabel('Температура алкілату, °C');
60  xlabel('Час, c')
61  %%
62  plot(t, U_opt)
63  ylabel('Витрата водяної пари, кг/с');
64  xlabel('Час, c')
65  %%
66  subplot(2,1,1);
67  plot(t,l_i(:, 1))
68  ylabel('\lambda1');
69  xlabel('Час, c');
70  subplot(2,1,2);
71  plot(t,l_i(:, 2))
72  ylabel('\lambda2');
73  xlabel('Час, c');
74  %%
75  subplot(2,1,1);
76  plot(t,X_opt(1, :))
77  ylabel('x1');
78  xlabel('Час, c')
79  subplot(2,1,2);
80  plot(t,X_opt(2, :))
81  ylabel('x2');
82  xlabel('Час, c')
83  %%
84  plot(t(1:end), Y_opt)
85  ylabel('Температура алкілату, °C');

```

Рис. 5.3 – Код програми для побудови графіків зміни керуючої дії та вихідного сигналу.

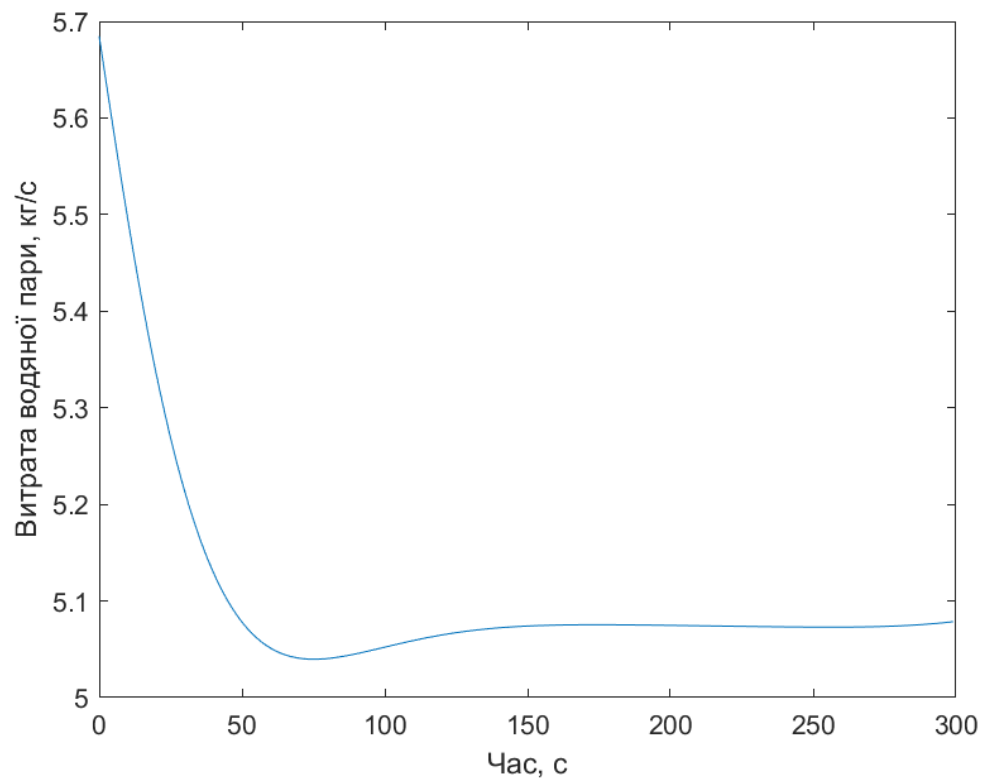


Рис. 5.4 – Графічне відображення оптимального програмного керування.

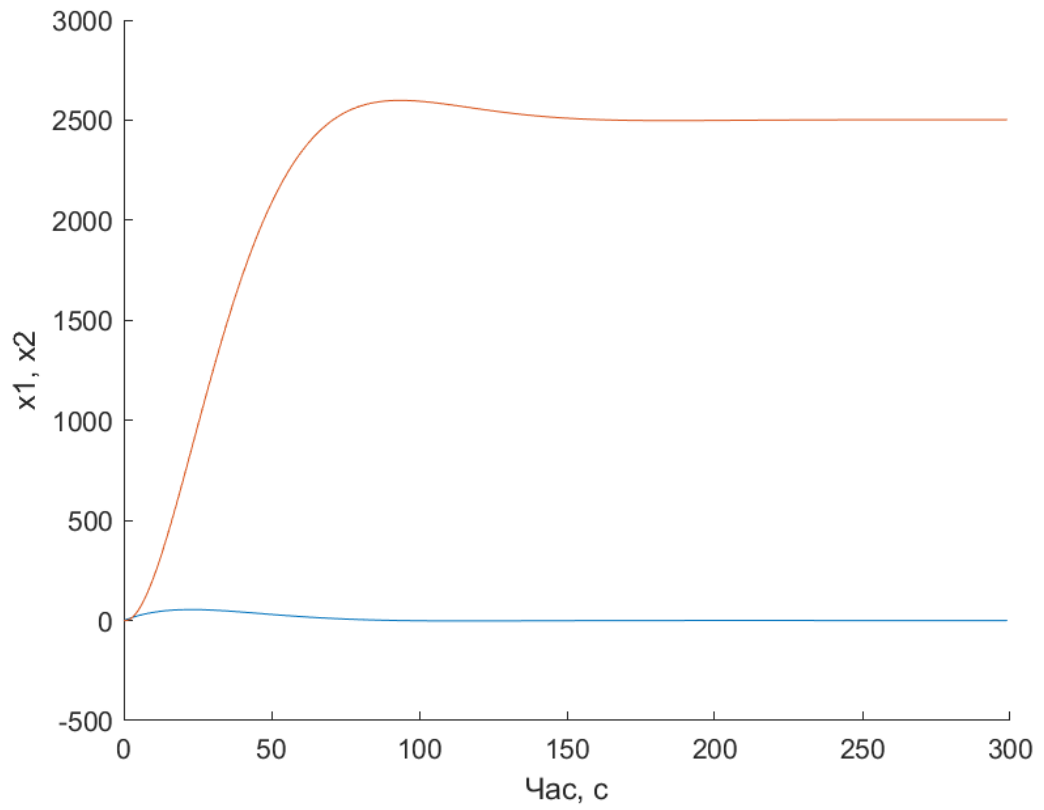


Рис. 5.5 – Графік оптимальної траєкторії стану об'єкта під час програмного керування.

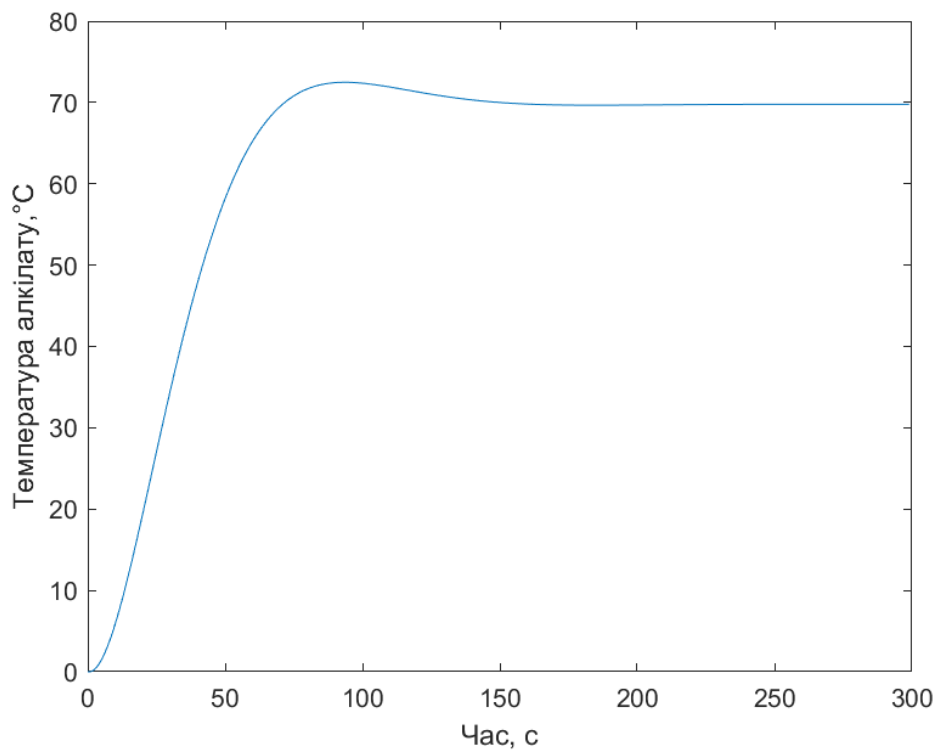


Рис. 5.6 – Графік оптимального вихідного сигналу за програмного керування.

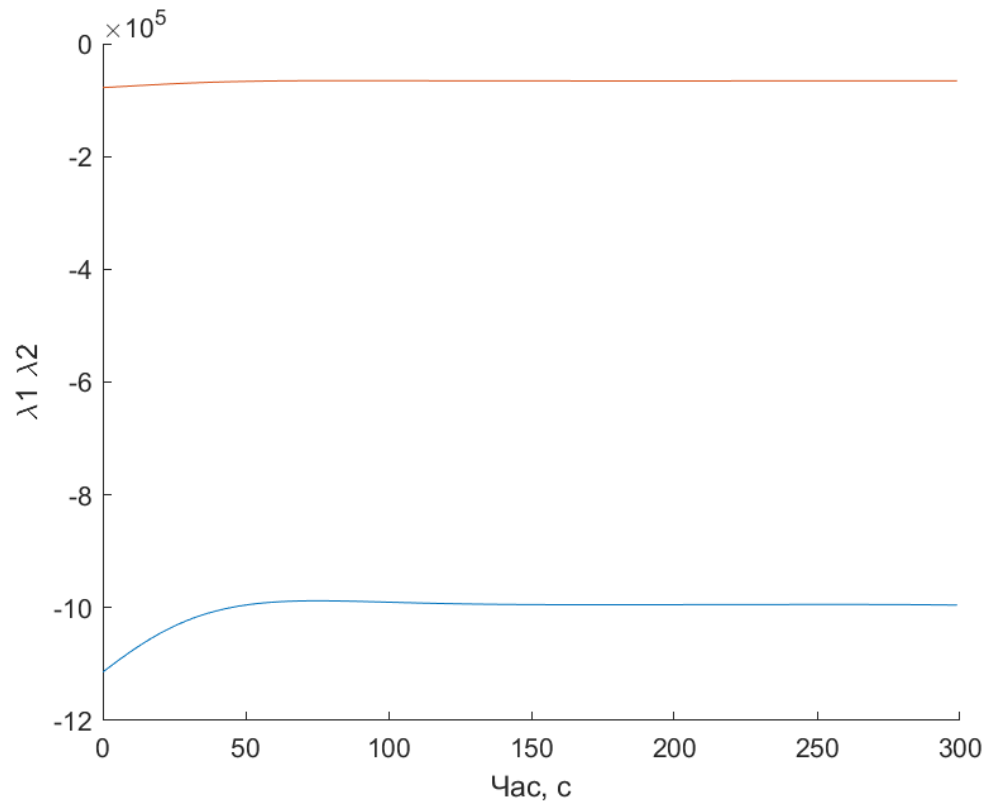


Рис. 5.7 – Графік зміни параметрів λ_1 та λ_2 під час програмного керування

5.4. Пошук оптимального програмного керування з зворотним зв'язком

5.4.1. Розробка оптимального лінійно-квадратичного П-регулятора

Оптимальний лінійний регулятор:

$$U(t) = -K(t)X(t) \quad (5.15)$$

де

$$K(t) = -R^{-1}BP(t) \quad (5.16)$$

Отримані залежності будуть використані для визначення лінійного оптимального регулятора з матричним коефіцієнтом підсилення K [10]. За допомогою такого контролера траєкторії системи можуть бути наближені до нуля за дотримання таких умов:

1. Якщо коефіцієнт K не залежить від X або U , його можна обчислити поза контуром керування. Для цього необхідно розв'язати рівняння Ріккати в зворотному часі та визначити значення K .

2. Під час розв'язання алгебраїчного матричного рівняння для постійних матриць A, B, R, Q , при $t \rightarrow \infty$ матриця P набуває сталого (усталеного) значення.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}P + Q = 0 \quad (5.17)$$

Це забезпечує сталість матричного коефіцієнта підсилення регулятора K .

3. Необхідно уточнити, що саме означає критерій якості. Завдяки квадратичному зважуванню для кінцевого стану можна досягти бажаного рівня керування, однак таке зваження не завжди добре інтерпретується, особливо тоді, коли витрати ресурсів є незначними [10]. У певних випадках подібне зваження може розглядатися як альтернатива прямому числовому оцінюванню дій керуючої системи. Крім того, воно дозволяє визначити оптимальний аналітичний закон зворотного зв'язку. Водночас поточний кінцевий стан може відрізнитися від бажаного через надто великі вагові коефіцієнти матриці R . У свою чергу, надто малі значення вагових коефіцієнтів R можуть призводити до надмірно великих керуючих дій U . Основні обмеження включають вимогу додатної визначеності матриці R та неможливість явного задання обмежень для X та U .

4. Розширивши критерій якості:

$$J = \frac{1}{2} \cdot X(t_f)^T S_f X(t_f) + \frac{1}{2} \cdot \int_0^{t_f} (X^T Q X + U^T R U + 2X^T N U) dt \quad (5.17)$$

Використовуючи алгебраїчне рівняння разом із коефіцієнтом підсилення, можна визначити оптимальний регулятор, який враховує взаємозв'язок між станом системи та керуючою дією. При цьому слід урахувати вимогу додатної визначеності матриці R та неможливість введення прямих обмежень на X і U :

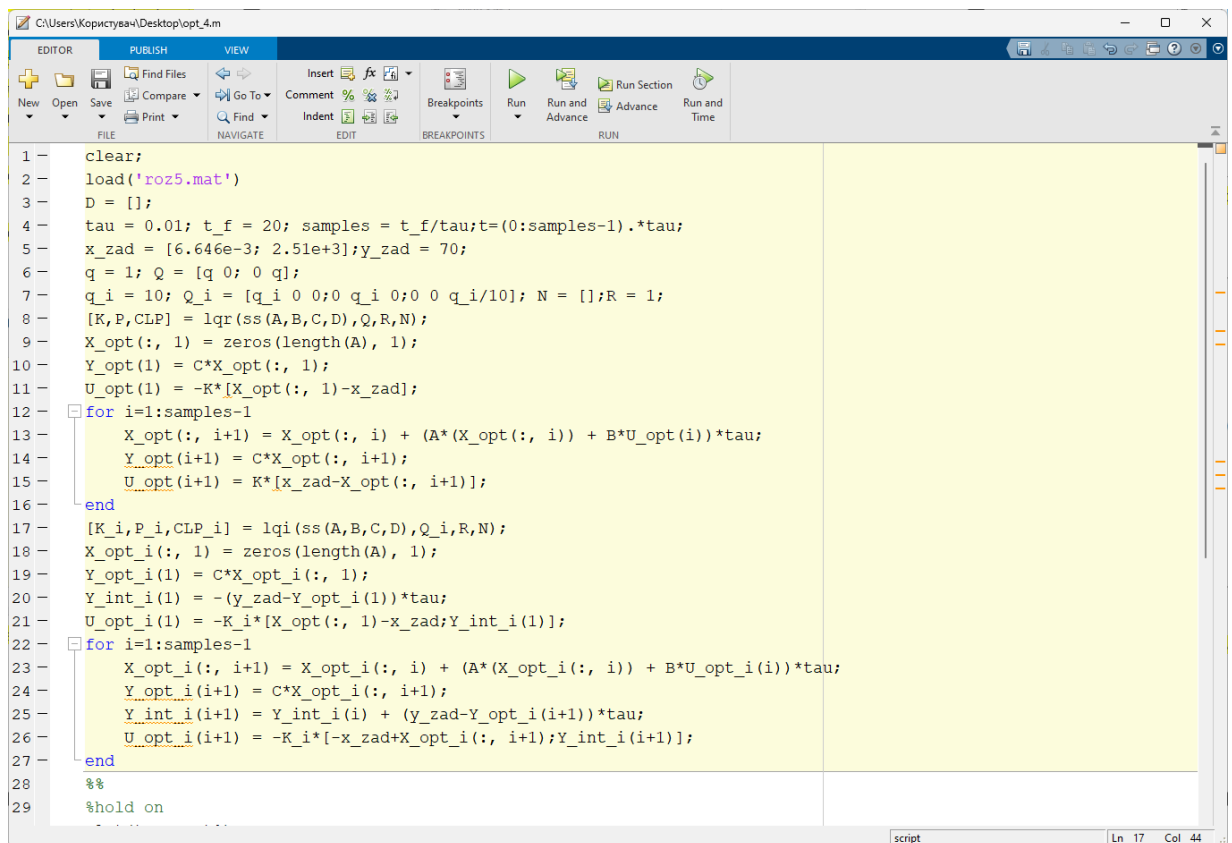
$$K = R^{-1}(B^T P - N^T) \quad (5.18)$$

Необхідні умови для існування ідеального квадратичного регулятора:

1. Пара матриць $[A, B]$ має бути повністю керованою;
2. Повинні виконуватися умови $R > 0, Q - NR^{-1}N^T \geq 0$;
3. Не допускається наявність спостережуваних мод між матрицями $(Q - NR^{-1}N^T, A - BR^{-1}N^T)$ та їх значеннями що розташовані на дійсній осі.

Варто зазначити, що застосування алгоритмів оптимального керування на практиці часто не дає можливості отримати характеристики, максимально наближені до теоретично оптимальних. Це пояснюється тим, що при побудові математичної моделі об'єкта використовують наближені або апроксимовані моделі, які відображають лише основні домінуючі зв'язки, але не враховують усіх реальних особливостей процесу. Крім того, алгоритми оптимізації можуть демонструвати нестійкість, особливо при великих часових інтервалах, коли коливання в системі зростають у реальному часі. Така нестійкість часто зумовлена специфікою розв'язання рівняння Ріккаті, у якому може втрачатися властивість симетричності розв'язку.

На рисунках 5.8–5.12 наведено реалізацію обчислення оптимального лінійно-квадратичного регулятора:



```

1 clear;
2 load('roz5.mat')
3 D = [];
4 tau = 0.01; t_f = 20; samples = t_f/tau; t=(0:samples-1).*tau;
5 x_zad = [6.646e-3; 2.51e+3]; y_zad = 70;
6 q = 1; Q = [q 0; 0 q];
7 q_i = 10; Q_i = [q_i 0 0; 0 q_i 0 0; 0 0 q_i/10]; N = []; R = 1;
8 [K,P,CLP] = lqr(ss(A,B,C,D),Q,R,N);
9 X_opt(:, 1) = zeros(length(A), 1);
10 Y_opt(1) = C*X_opt(:, 1);
11 U_opt(1) = -K*[X_opt(:, 1)-x_zad];
12 for i=1:samples-1
13     X_opt(:, i+1) = X_opt(:, i) + (A*(X_opt(:, i)) + B*U_opt(i))*tau;
14     Y_opt(i+1) = C*X_opt(:, i+1);
15     U_opt(i+1) = K*[x_zad-X_opt(:, i+1)];
16 end
17 [K_i,P_i,CLP_i] = lqr(ss(A,B,C,D),Q_i,R,N);
18 X_opt_i(:, 1) = zeros(length(A), 1);
19 Y_opt_i(1) = C*X_opt_i(:, 1);
20 Y_int_i(1) = -(y_zad-Y_opt_i(1))*tau;
21 U_opt_i(1) = -K_i*[X_opt_i(:, 1)-x_zad;Y_int_i(1)];
22 for i=1:samples-1
23     X_opt_i(:, i+1) = X_opt_i(:, i) + (A*(X_opt_i(:, i)) + B*U_opt_i(i))*tau;
24     Y_opt_i(i+1) = C*X_opt_i(:, i+1);
25     Y_int_i(i+1) = Y_int_i(i) + (y_zad-Y_opt_i(i+1))*tau;
26     U_opt_i(i+1) = -K_i*[-x_zad+X_opt_i(:, i+1);Y_int_i(i+1)];
27 end
28 %%
29 hold on

```

Рис. 5.8 – Код програми для обчислення лінійно-квадратичного регулятора.

```

C:\Users\Koprynya\\Desktop\opt_4.m
EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Compare Go To Insert Comment % Indent Breakpoints Run Run and Advance Run and Time
FILE NAVIGATE EDIT
20 Y_int_i(1) = -(y_zad-Y_opt_i(1))*tau;
21 U_opt_i(1) = -K_i*[X_opt(:, 1)-x_zad;Y_int_i(1)];
22 for i=1:samples-1
23     X_opt_i(:, i+1) = X_opt_i(:, i) + (A*(X_opt_i(:, i)) + B*U_opt_i(i))*tau;
24     Y_opt_i(i+1) = C*X_opt_i(:, i+1);
25     Y_int_i(i+1) = Y_int_i(i) + (y_zad-Y_opt_i(i+1))*tau;
26     U_opt_i(i+1) = -K_i*[-x_zad+X_opt_i(:, i+1);Y_int_i(i+1)];
27 end
28 %%
29 %hold on
30 plot(t, X_opt')
31 %plot(t, X_opt_i')
32 %legend('x1-лінійний', 'x2-лінійний', 'x1-інтегральний', 'x2-інтегральний')
33 ylabel('x1, x2');
34 xlabel('Час')
35 %%
36 %hold on
37 plot(t, Y_opt)
38 %plot(t, Y_opt_i)
39 ylabel('Температура алкілату, °C');
40 %legend('y-лінійний', 'y-інтегральний')
41 xlabel('Час, c')
42 %%
43 %hold on
44 plot(t, U_opt)
45 %plot(t, U_opt_i)
46 ylabel('Витрата водяної пари, кг/с');
47 %legend('u-лінійний', 'u-інтегральний')
48 xlabel('Час, c')
script Ln 38 Col 18

```

Рис. 5.8 – Реалізація алгоритму розрахунку лінійно-квадратичного регулятора.

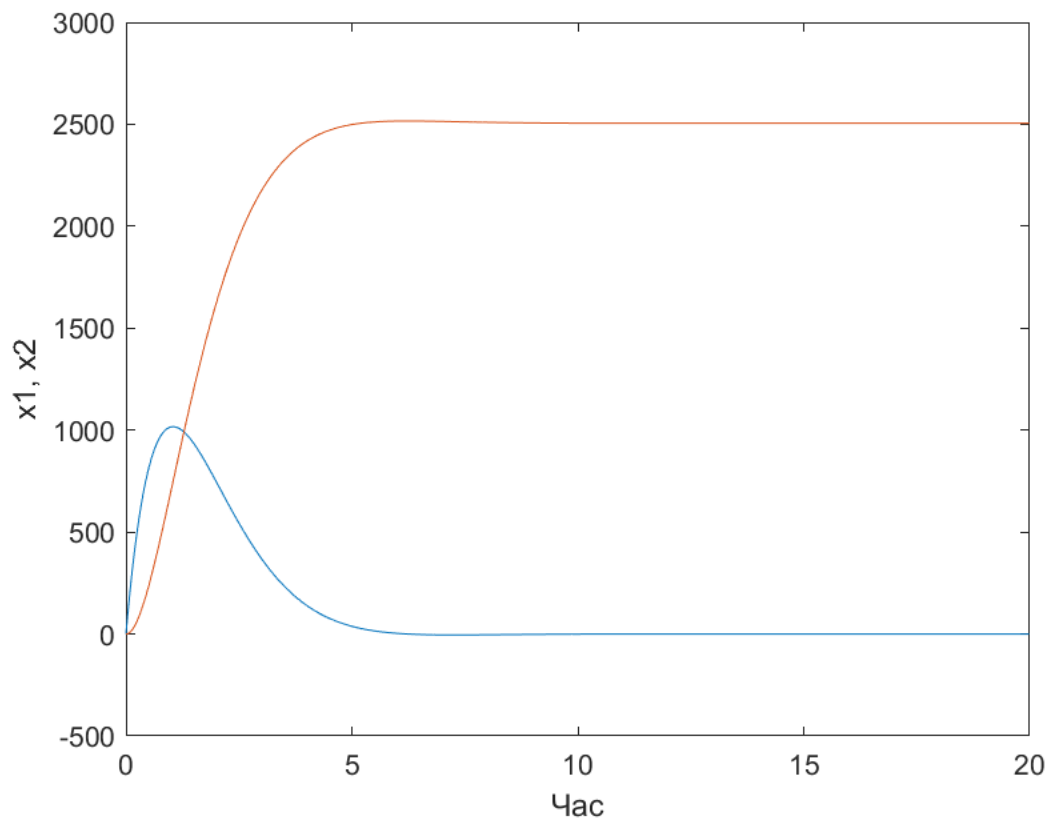


Рис. 5.10 – Динаміка змін стану процесу під дією лінійно-квадратичного регулятора.

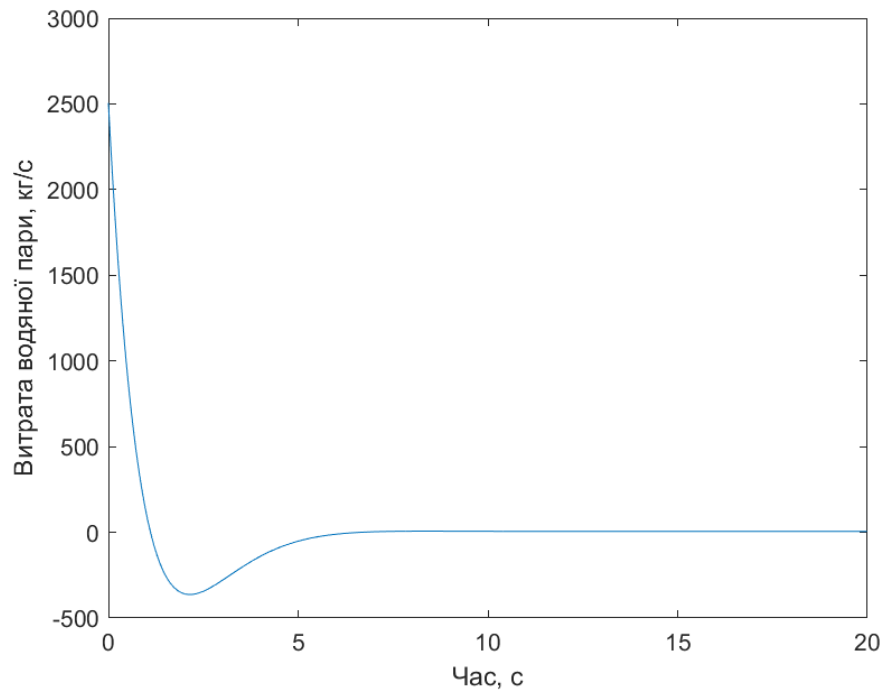


Рис. 5.11 – Динаміка зміни керуючої дії процесу під впливом лінійно-квадратичного контролера.

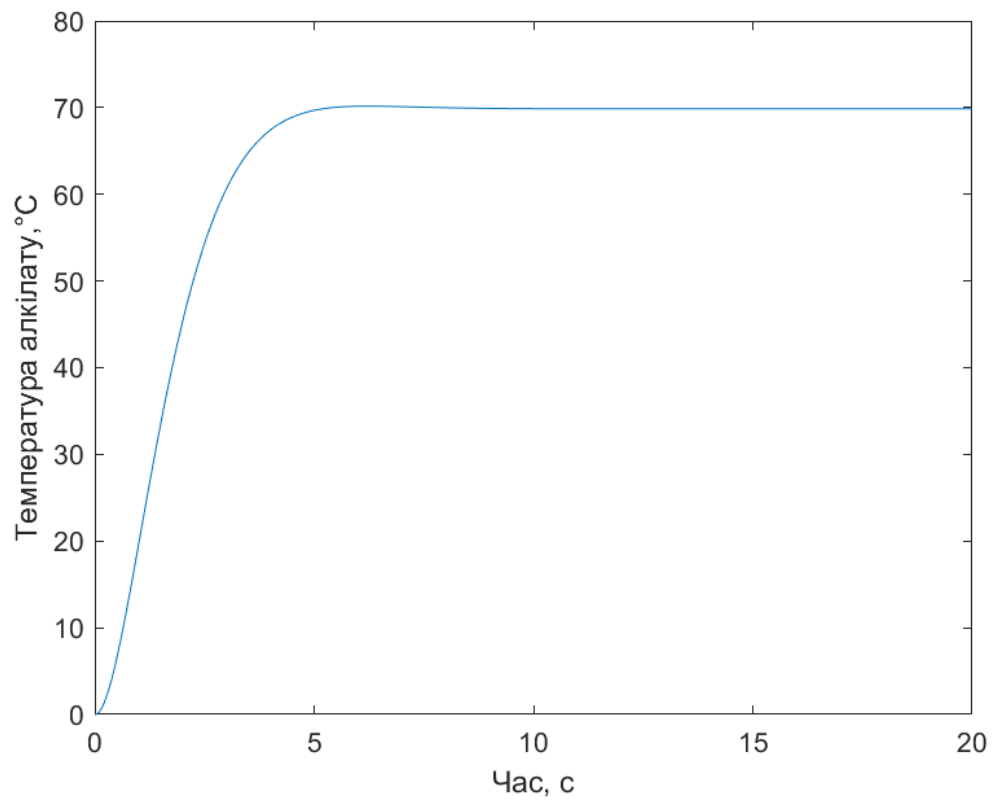


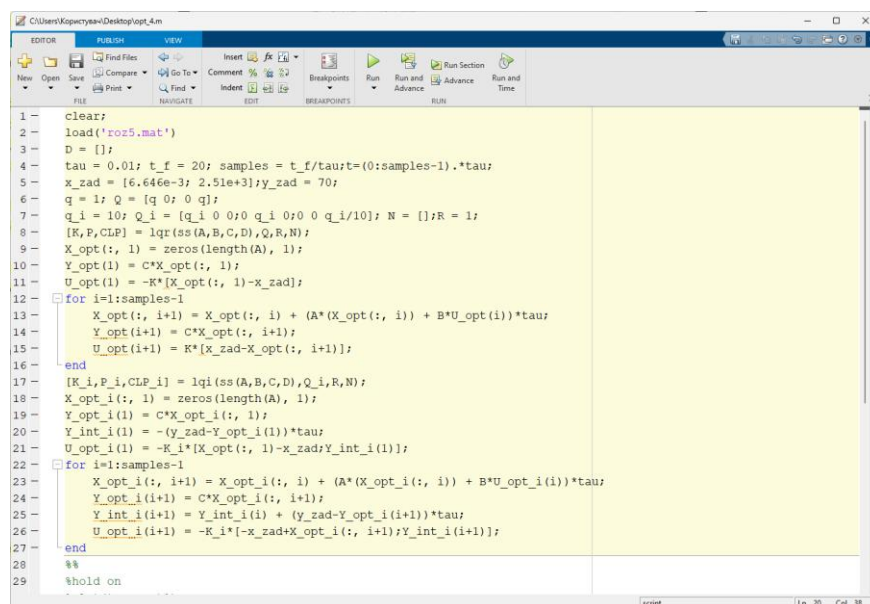
Рис. 5.12 – Динаміка зміни вихідного сигналу об'єкта під дією лінійно-квадратичного регулятора.

5.4.2. Розроблення оптимального лінійно-квадратичного ПІ-регулятора

Було встановлено, що задачу синтезу оптимального лінійно-квадратичного закону керування для лінійної системи можна розв'язати за допомогою звичайних пропорційних регуляторів [10]. Такі регулятори здатні забезпечити поступове зменшення впливу на вихід об'єкта до нуля, якщо початкові умови або короткочасний імпульсний вплив дорівнюють нулю. Однак у ситуаціях, коли керуючі дії залишаються сталими або змінюються незначно, пропорційні регулятори не гарантують зведення до нуля відхилень керуючих величин від заданих значень. Якщо одна частина закону керування залежить від вектора станів, а інша — від його інтегральної складової, то сам закон повинен містити щонайменше дві компоненти, щоб виконувати цю умову.

Таким чином, постановку задачі синтезу регулятора необхідно змінити так, щоб єдина керуюча дія забезпечувала компенсацію помилки керування.

Надалі розглянемо приклад реалізації обчислення оптимального лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою. Відповідні результати наведено на рисунках 5.13–5.17:



```

1 clear;
2 load('roz5.mat')
3 D = [];
4 tau = 0.01; t_f = 20; samples = t_f/tau; t = (0:samples-1)*tau;
5 x_zad = [6.646e-3; 2.51e+3]; y_zad = 70;
6 q = 1; Q = [q 0; 0 q];
7 q_i = 10; Q_i = [q_i 0 0; 0 q_i 0; 0 0 q_i/10]; N = []; R = 1;
8 [K,P,CLP] = lqr(ss(A,B,C,D),Q,R,N);
9 X_opt(:, 1) = zeros(length(A), 1);
10 Y_opt(1) = C*X_opt(:, 1);
11 U_opt(1) = -K*[X_opt(:, 1)-x_zad];
12 for i=1:samples-1
13     X_opt(i+1) = X_opt(i) + (A*(X_opt(i) - x_zad) + B*U_opt(i))*tau;
14     Y_opt(i+1) = C*X_opt(i+1);
15     U_opt(i+1) = K*[x_zad-X_opt(i+1)];
16 end
17 [K_i,P_i,CLP_i] = lqr(ss(A,B,C,D),Q_i,R,N);
18 X_opt_i(:, 1) = zeros(length(A), 1);
19 Y_opt_i(1) = C*X_opt_i(:, 1);
20 Y_int_i(1) = -(y_zad-Y_opt_i(1))*tau;
21 U_opt_i(1) = -K_i*[X_opt_i(:, 1)-x_zad; Y_int_i(1)];
22 for i=1:samples-1
23     X_opt_i(i+1) = X_opt_i(i) + (A*(X_opt_i(i) - x_zad) + B*U_opt_i(i))*tau;
24     Y_opt_i(i+1) = C*X_opt_i(i+1);
25     Y_int_i(i+1) = Y_int_i(i) + (y_zad-Y_opt_i(i+1))*tau;
26     U_opt_i(i+1) = -K_i*[-x_zad+X_opt_i(i+1); Y_int_i(i+1)];
27 end
28 %%
29 %hold on
  
```

Рис. 5.13 – Код програми для обчислення лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою.

```

C:\Users\Копытчан\Desktop\opt_4.m
EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Compare Go To Comment Find Indent Breakpoints Run Run and Advance Run Section Advance Run Time
FILE EDIT BREAKPOINTS RUN
20 Y_int_i(1) = -(y_zad-Y_opt_i(1))*tau;
21 U_opt_i(1) = -K_i*[X_opt(:, 1)-x_zad;Y_int_i(1)];
22 for i=1:samples-1
23     X_opt_i(:, i+1) = X_opt_i(:, i) + (A*(X_opt_i(:, i)) + B*U_opt_i(i))*tau;
24     Y_opt_i(i+1) = C*X_opt_i(:, i+1);
25     Y_int_i(i+1) = Y_int_i(i) + (y_zad-Y_opt_i(i+1))*tau;
26     U_opt_i(i+1) = -K_i*[-x_zad+X_opt_i(:, i+1);Y_int_i(i+1)];
27 end
28 %%
29 %hold on
30 %plot(t, X_opt')
31 plot(t, X_opt_i')
32 %legend('x1-лінійний', 'x2-лінійний', 'x1-інтегральний', 'x2-інтегральний')
33 ylabel('x1, x2');
34 xlabel('Час')
35 %%
36 %hold on
37 %plot(t, Y_opt)
38 plot(t, Y_opt_i)
39 ylabel('Температура алкілату, °C');
40 %legend('y-лінійний', 'y-інтегральний')
41 xlabel('Час, c')
42 %%
43 %hold on
44 %plot(t, U_opt)
45 plot(t, U_opt_i)
46 ylabel('Витрата водяної пари, кг/с');
47 %legend('u-лінійний', 'u-інтегральний')
48 xlabel('Час, c')
script Ln 38 Col 17

```

Рис. 5.14 – Код програми для побудови графіків із застосуванням лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою

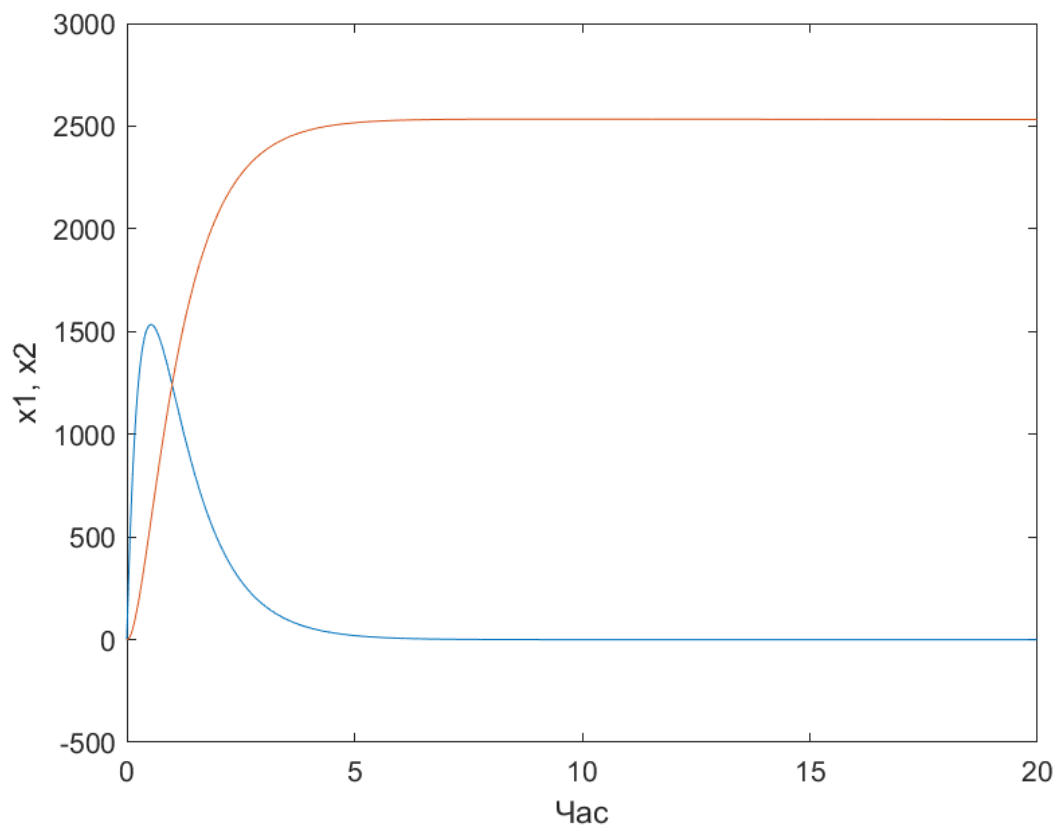


Рис. 5.15 – Динаміка зміни параметрів стану під дією лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою.

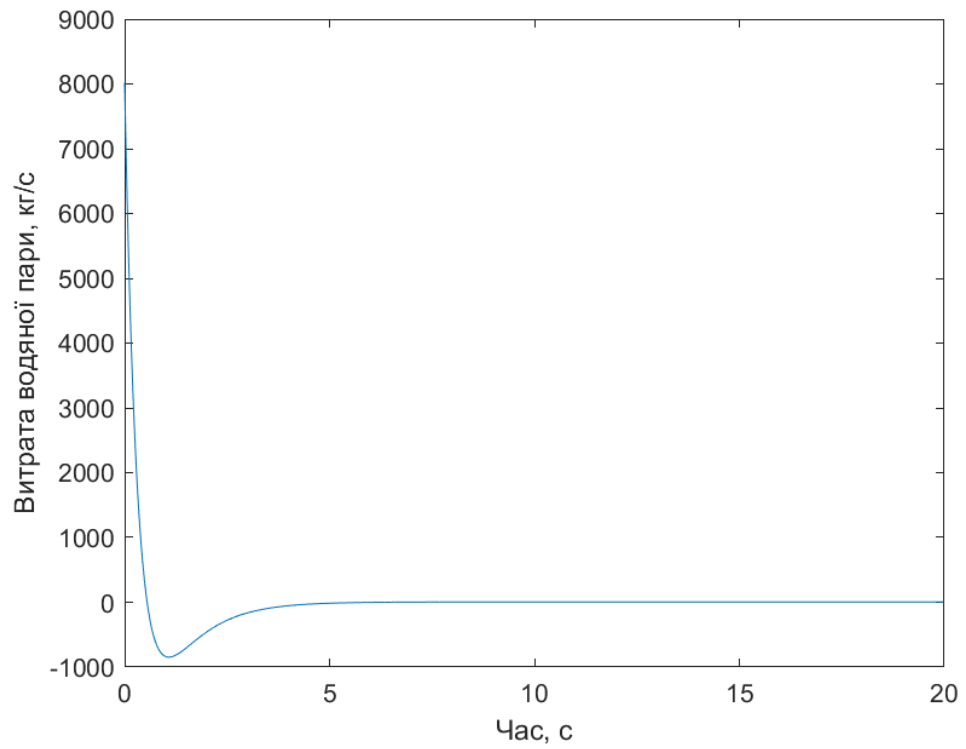


Рис. 5.16 – Динаміка роботи лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою.

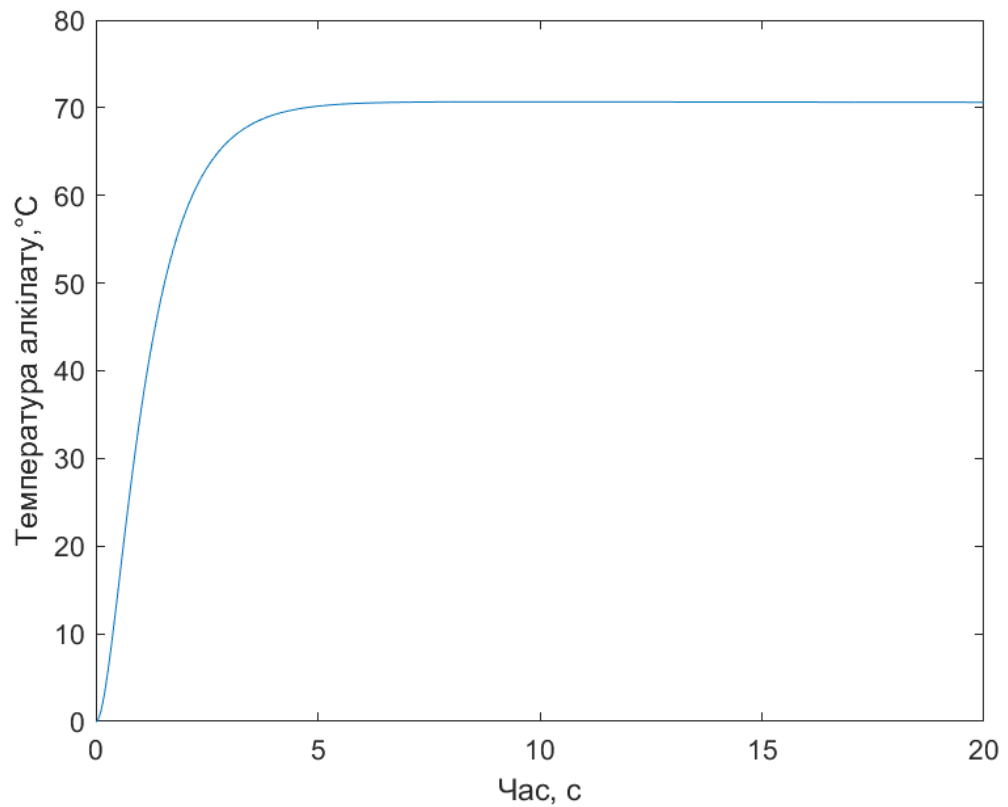


Рис. 5.17 – Динаміка зміни вихідних параметрів об'єкта під дією лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою

5.4.3. Зіставлення отриманих результатів для оптимального керування із зворотнім зв'язком

На рисунку 5.16 наведено графічне відображення динаміки зміни параметрів стану під час оптимального керування.

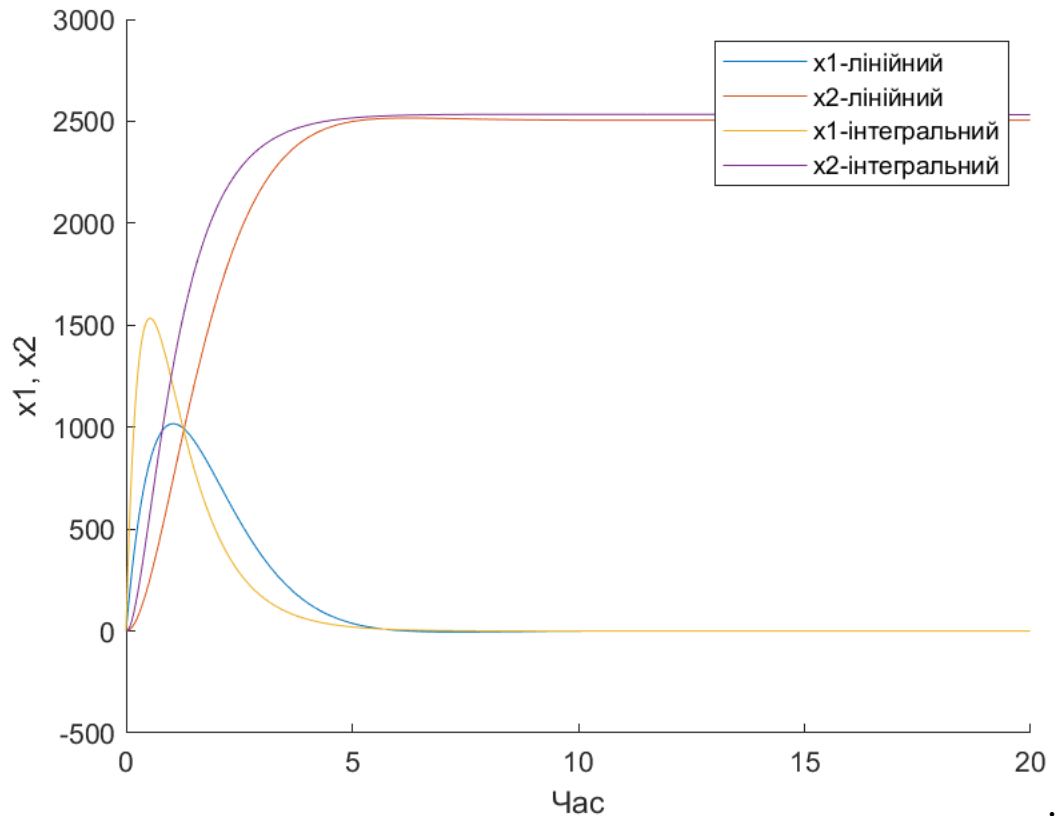


Рис. 5.18 – Графік динаміки зміни параметрів стану під час оптимізації.

Використання лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою для визначення оптимального керування в системі зі зворотним зв'язком підвищує якість регулювання, що продемонстровано на рисунку 5.19.

Включення інтегральної складової усуває головний недолік звичайного лінійного регулятора — статичну похибку, що в підсумку забезпечує ефективнішу оптимізацію керування. Це підтверджується графіком на рисунку 5.20.

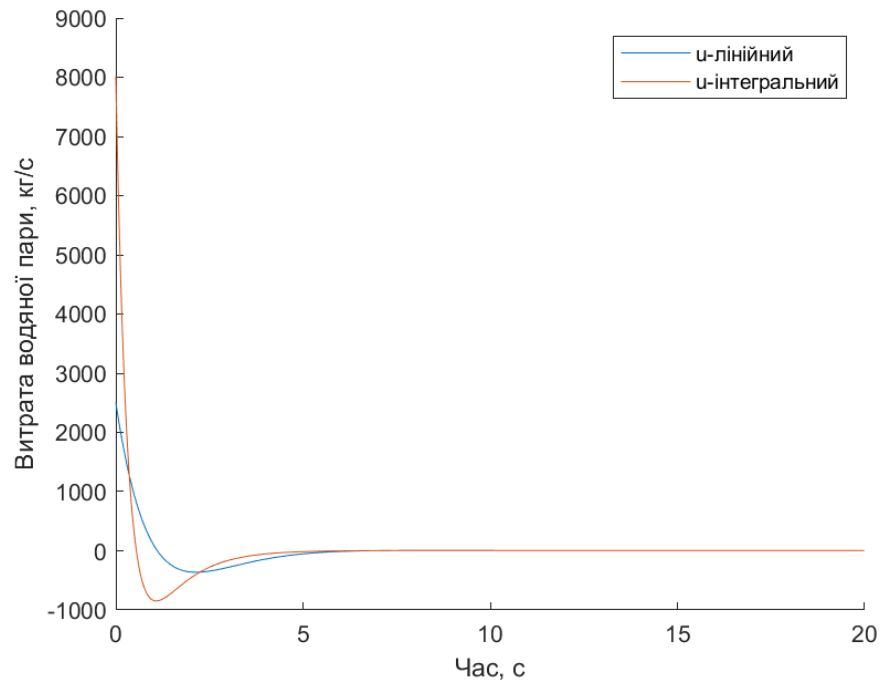


Рис. 5.19 – Графік динаміки оптимального керуючого впливу.

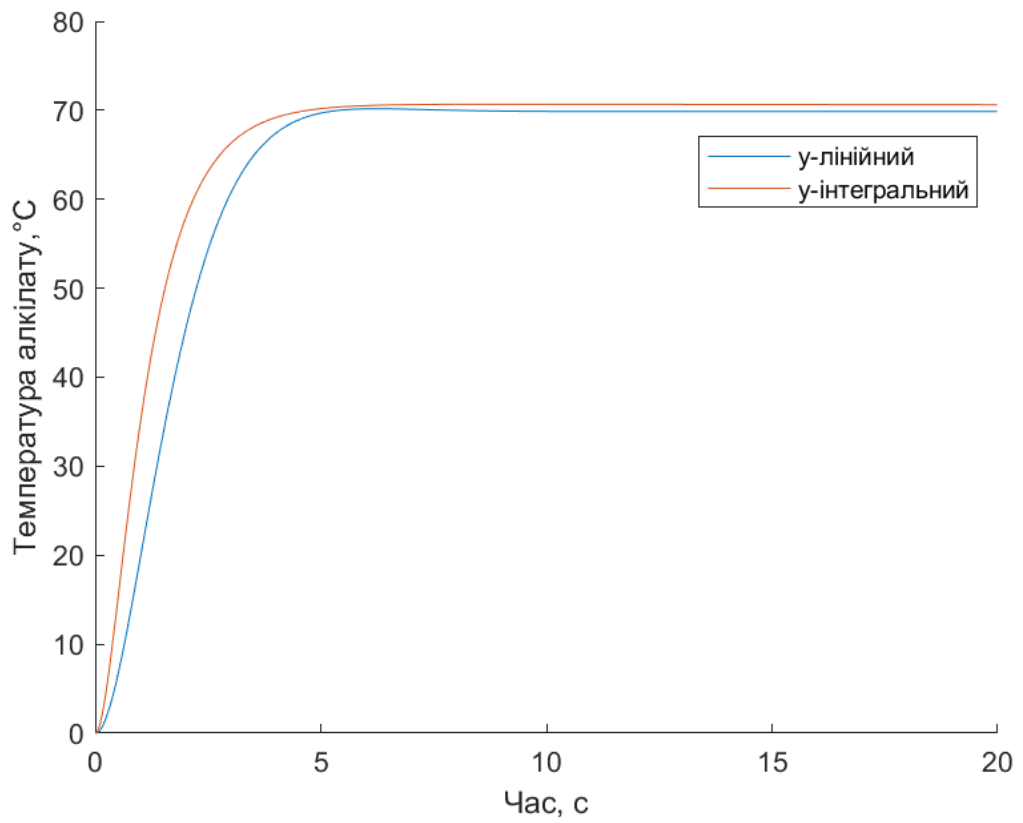


Рис. 5.20 – Порівняння вихідних характеристик об'єкта під оптимальним керуванням.

5.5. Керування за мінімальним часом за умови обмеження по керуванню

Теорія N-інтервального перемикавання та визначення моментів перемикавання використовуються для досягнення оптимального керування за мінімально можливий проміжок часу [10].

Сформулюємо відповідний критерій оптимальності:

$$I = \frac{1}{2}((x_1 - x_1^{30} \quad x_2 - x_2^{30}) \cdot S \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_1^{30} \\ x_2 - x_2^{30} \end{pmatrix}) + t_f \quad (5.19)$$

Обмеження щодо керування $F_{\Gamma\Pi}$:

$$F_{\Gamma\Pi, \min} \leq F_{\Gamma\Pi} \leq F_{\Gamma\Pi, \max} \quad (5.20)$$

$$F_{\Gamma\Pi, \max} - F_{\Gamma\Pi} \geq 0 \quad (5.21)$$

$$F_{\Gamma\Pi} - F_{\Gamma\Pi, \min} \geq 0 \quad (5.22)$$

Тепер ми перепишемо критерій:

$$I = \frac{1}{2}((x_1 - x_1^{30} \quad x_2 - x_2^{30}) \cdot S \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_1^{30} \\ x_2 - x_2^{30} \end{pmatrix}) + t_f + \int (U_{\max} - U) \cdot Q \cdot (U - U_{\min}) \cdot H(g_1 g_2) dt \quad (5.23)$$

У результаті Гамільтоніан буде мати вигляд:

$$H = (U_{\max} - U) \cdot Q \cdot (U - U_{\min}) \cdot H(g_1 g_2) + \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} \cdot \left(A \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_1^{30} \\ x_2 - x_2^{30} \end{pmatrix} + B \cdot U \right) \quad (5.24)$$

Складемо умови оптимальності:

$$\lambda_1' = -\frac{\delta H}{\delta x_1} = -\lambda_1 \cdot a_{11} - \lambda_2 \cdot a_{21} \quad (5.25)$$

$$\lambda_2' = -\frac{\delta H}{\delta x_2} = -\lambda_1 \cdot a_{12} - \lambda_2 \cdot a_{22} \quad (5.26)$$

$$\frac{\delta H}{\delta U} = -2qUH(g_1 g_2) + qU_{\max}UH(g_1 g_2) + qU_{\min}UH(g_1 g_2) + U \quad (5.27)$$

$$\lambda_1(t_f) = S_{11}(x_1(t_f) - x_1^{30}) \quad (5.28)$$

$$\lambda_2(t_f) = S_{22}(x_2(t_f) - x_2^{3\partial}) \quad (5.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta I}{\delta t_f} = & 1 + S_{11}(\theta x_1(t_f) - x_1^{3\partial})x_1'(t_f) + S_{22}(x_2(t_f) - x_2^{3\partial})x_2'(t_f) \\ & + (U_{\max} - U) \cdot Q \cdot (U - U_{\min}) \cdot H(g_1 g_2) = 0 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Час перемикання вираховується за формулою:

$$\tau_s = \frac{\lambda_2(t_f)}{\lambda_1(t_f)} = - \frac{S_{22}(F_{\partial n}(t_f) - F_{\partial n.3\partial})}{S_{11}(Q_{ал.н}(t_f) - Q_{ал.н.3\partial})} \quad (5.31)$$

Лінія перемикання управління матиме вигляд:

$$\zeta(\tau) = \int_0^r e^{-A(\tau-p)} b \operatorname{sign}(\lambda_1(t_f) e^{Apb}) dt \quad (5.32)$$

Де вираз $\lambda_1(t_f) e^{Apb} = 0$ - це точка перемикання.

Далі вирахуємо час і лінії перемикання та складемо графік (рисунок 5.19).

$$\begin{aligned} S_{11} &= 1 \\ S_{22} &= 1 \\ Q &= 1 \end{aligned}$$

Коли програму запустили, було виявлено, що час перемикання становить

101.

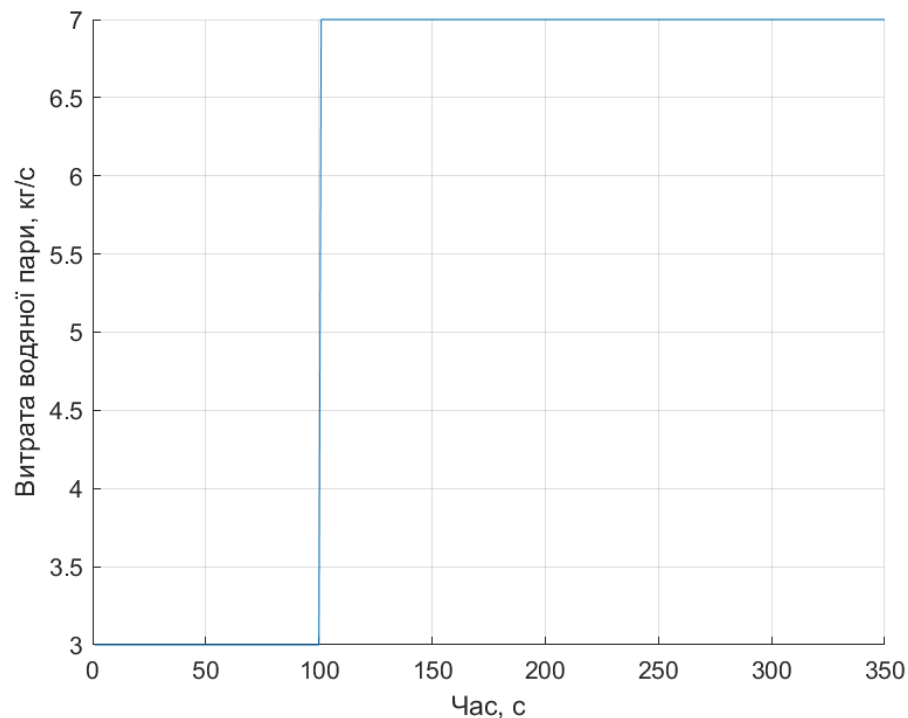


Рис. 5.21 – Графік лінії перемикання

Почекавши 101 секунд, система вийшла на правильний рівень і не потребує адаптації.

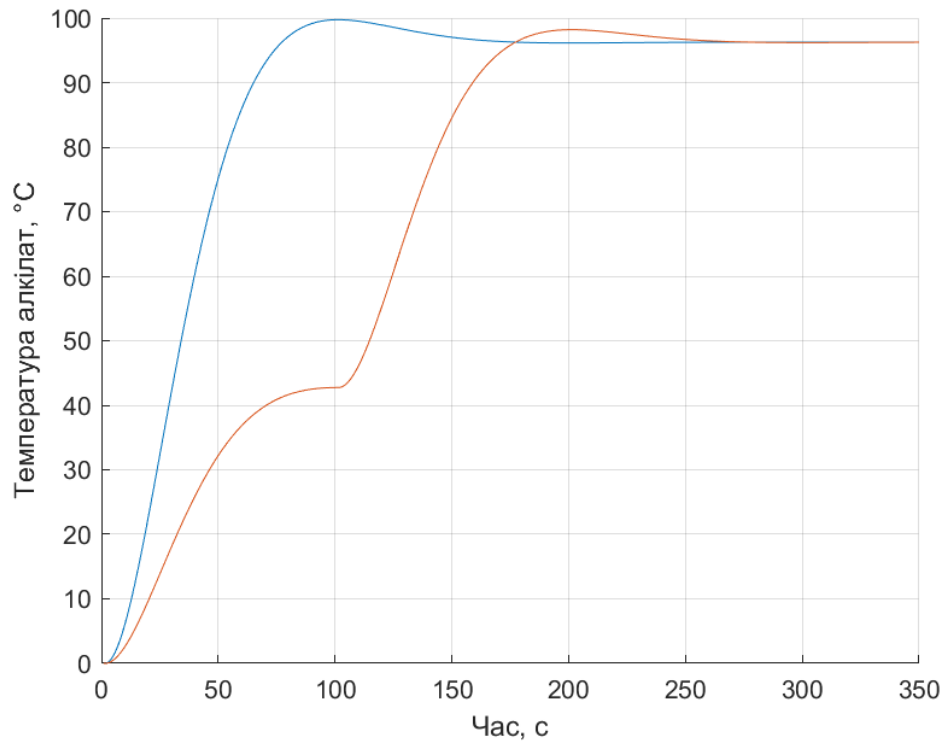


Рис. 5.22 – Графік змінних стану об'єкта як до, так і після перемикання

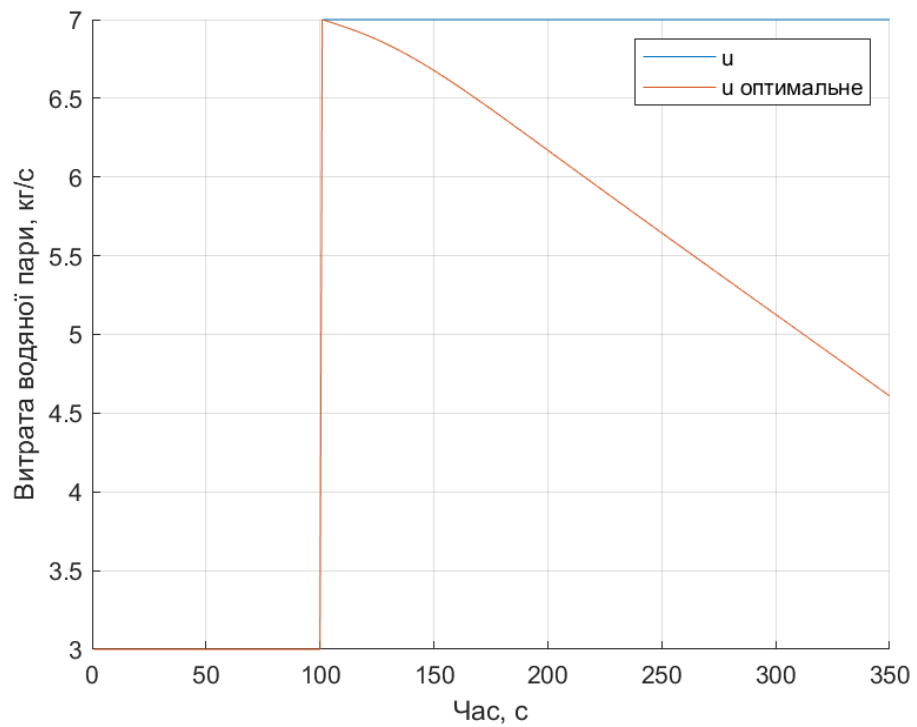


Рис. 5.23 – Графік показує динаміку зміни управління витратою.

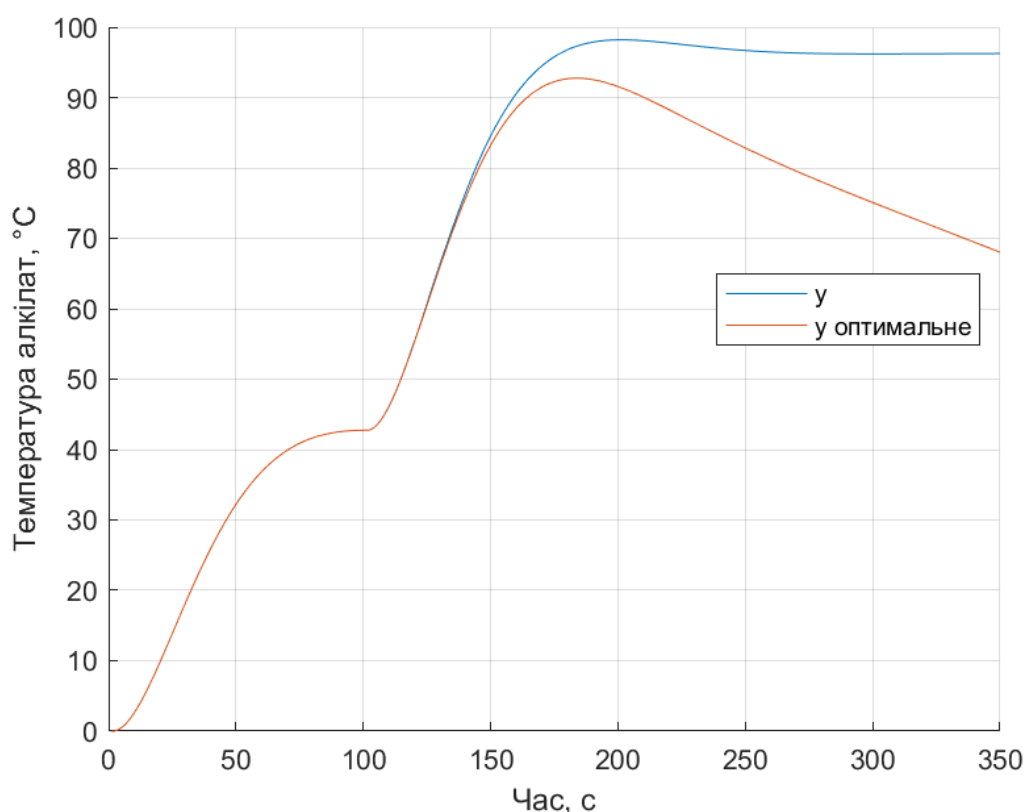


Рис. 5.24 – Зміна відсотку покриття на етапах керування

Висновок: У дослідженому процесі алкілювання ізобутану н-бутеном у цьому розділі дисертації було визначено оптимальну температуру алкілату та знижено витрату водяної пари, що подається до теплообмінника. Підвищення ефективності керування, зокрема зменшення споживання реагентів і покращення перехідної характеристики, було досягнуто завдяки застосуванню математичних методів оптимізації. Водночас виконання таких розрахунків потребує значних обчислювальних ресурсів. Тому можна стверджувати, що практичне використання цього підходу у промислових умовах може бути складнішим та забезпечувати більш обмежені результати.

6. СТАРТАП-ПРОЄКТ: ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ТЕПЛООБМІННИКА УСТАНОВКИ АЛКІЛУВАННЯ

6.1. Опис ідеї стартап-проєкту

Запропонований стартап-проєкт «HeatEx Control» полягає у розробці інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінника установки алкілування ізобутану н-бутеном. Система призначена для автоматизованого підтримання оптимальних температурних параметрів теплообмінного обладнання з використанням сучасних алгоритмів керування, зокрема MPC-регуляторів та елементів нечіткої логіки.

6.1.1 Зміст ідеї, напрямки застосування та вигоди для користувача

Ідея стартапу «HeatEx Control» базується на результатах магістерської дисертації та передбачає створення програмно-алгоритмічного модуля, який може інтегруватися в існуючі системи автоматизації технологічних процесів хімічної та нафтопереробної промисловості. Запропонована система дозволяє підвищити стабільність температурного режиму теплообмінника, зменшити енерговитрати та знизити ризик аварійних ситуацій.

Основними потенційними споживачами продукту є підприємства, що експлуатують установки алкілування, ректифікації або інші технологічні системи з теплообмінними апаратами, де критичним є точне регулювання температури.

Таблиця 6.1.1 – Опис ідеї стартап-проєкту «HeatEx Control»

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Інтелектуальна система керування температурним	1. Установки алкілування ізобутану н-бутеном	Стабільне підтримання температури, зменшення перерегулювань

режимом теплообмінника установки алкілування	2. Теплообмінники ректифікаційних та відгінних колон	Зниження витрат енергоресурсів (пари, теплоносіїв)
	3. Системи автоматизації хімічних та нафтопереробних підприємств	Підвищення безпеки та надійності технологічного процесу
	4. Модернізація існуючих АСУ ТП	Можливість інтеграції без повної заміни обладнання

Запропонована система забезпечує адаптивне керування температурою теплообмінника з урахуванням динамічних властивостей об'єкта та зовнішніх збурень. На відміну від класичних ПІД-регуляторів, інтелектуальна система дозволяє прогнозувати поведінку процесу, мінімізувати відхилення від заданих значень та оптимізувати використання енергоресурсів.

Застосування даного рішення є універсальним і не обмежується лише установками алкілування, що значно розширює потенційний ринок збуту стартап-продукту.

Комерціалізація стартап-проєкту «HeatEx Control» передбачається у формі інжинірингової B2B-послуги, що включає аудит теплообмінного обладнання, адаптацію математичної моделі, впровадження алгоритмів MPC та нечіткого керування, інтеграцію з існуючими SCADA/DCS-системами та сервісний супровід. На початковому етапі проєкт реалізується у форматі пілотних впроваджень (MVP) на окремих теплообмінних апаратах з подальшим масштабуванням рішення.

6.1.2 Порівняння техніко-економічних характеристик із конкурентами/аналогами та визначення W–N–S

Запропонована інтелектуальна система керування температурним режимом теплообмінника установки алкілування має низку техніко-економічних переваг порівняно з існуючими аналогами та товарами-замінниками, що використовуються на промислових підприємствах.

Для проведення аналізу було визначено орієнтовний перелік основних техніко-економічних характеристик ідеї, які є найбільш значущими з точки зору ефективності керування, енерговитрат, надійності та можливості впровадження в діючі автоматизовані системи керування технологічними процесами.

Основні проекти-аналоги та замінники:

- класичні ПІД-регулятори температури теплообмінників;
- стандартні промислові контролери без елементів прогнозування;
- системи керування з фіксованими параметрами налаштування;
- комерційні програмні рішення АСУ ТП без адаптації до конкретного об'єкта.

Збір інформації щодо характеристик конкурентних рішень здійснювався на основі аналізу типових промислових рішень, навчальної та науково-технічної літератури, а також практики застосування автоматизованих систем керування в хімічній та нафтопереробній промисловості.

Таблиця 6.1.2 – Порівняння техніко-економічних характеристик з аналогами та оцінка W–N–S

Характеристика	«HeatEx Control»	Класичні ПІД-системи	Стандартні промислові АСУ ТП	Комерційні програмні рішення	W N S
Точність підтримання температури	Висока (статична похибка $\leq \pm 1$)	Середня (похибка $\pm 3\text{--}5$ °C,	Середня ($\pm 2\text{--}3$ °C)	Висока, але залежить від конфігурації	SS

	°С, адаптація до збурень)	чутливість до збурень)			
Перерегулювання	Низьке (≤ 10 % за рахунок прогнозування)	Високе (30–40 %)	Середнє (20–30 %)	Середнє (15–25 %)	SS
Час встановлення режиму	Короткий (8–10 хв)	Тривалий (20–30 хв)	Середній (15–20 хв)	Середній (10–15 хв)	SS
Енергоефективність	Підвищена (економія теплової енергії 8–12 %)	Низька (0–3 %)	Середня (3–5 %)	Середня (5–7 %)	SS
Адаптивність до змін режиму	Висока (прогнозування та нечітка логіка)	Низька	Обмежена	Середня	SS
Інтеграція з існуючими АСУ ТП	Повна, без заміни апаратури	Повна	Повна	Часто обмежена ліцензіями	N
Складність впровадження	Середня (налаштування моделі та алгоритмів)	Низька	Середня	Висока	WN
Вартість впровадження	Середня, нижча за комерційні аналоги	Низька	Середня	Висока	NN

Проведений порівняльний аналіз показує, що запропонована інтелектуальна система керування має виражені сильні сторони (S) за такими ключовими параметрами, як точність регулювання температури, стійкість до збурень,

енергоефективність та можливість адаптації до конкретного теплообмінного обладнання.

До слабких сторін (W) можна віднести підвищену складність початкового налаштування та необхідність використання більш кваліфікованого персоналу на етапі впровадження. Водночас ці недоліки компенсуються підвищеною якістю керування та економічним ефектом у процесі експлуатації.

Нейтральні характеристики (N) пов'язані з можливістю інтеграції системи в існуючі АСУ ТП, оскільки сучасні промислові рішення загалом підтримують стандартизовані інтерфейси обміну даними.

Таким чином, визначений перелік сильних, слабких та нейтральних характеристик підтверджує конкурентоспроможність і практичну доцільність реалізації стартап-проєкту на основі інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінника установки алкілування.

6.2. Технологічний аудит ідеї проєкту

У межах даного підрозділу проведено технологічний аудит ідеї стартап-проєкту, який передбачає створення інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінника установки алкілування. Метою аудиту є оцінка технологічної здійсненності проєкту, визначення можливих технологій його реалізації, а також аналіз їх доступності для авторів проєкту.

Технологічна реалізація ідеї стартапу базується на поєднанні програмних та алгоритмічних рішень у сфері автоматизованого керування технологічними процесами. Запропонована система не потребує створення принципово нового апаратного обладнання, а може бути реалізована шляхом використання вже наявних промислових контролерів і датчиків з доповненням їх інтелектуальними алгоритмами керування.

6.2.1 Технології реалізації сервісу, наявність і доступність

Для оцінки технологічної здійсненності реалізації сервісу інтелектуального керування температурним режимом теплообмінного апарата установки алкілювання було проаналізовано основні технології, які можуть бути використані для впровадження стартап-проєкту. Аналіз охоплює як алгоритмічні, так і програмно-апаратні рішення, а також оцінку їх наявності та доступності для практичної реалізації..

Табл. 6.2.1. Технологічна здійсненність ідеї стартап-проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Інтелектуальна система керування температурним режимом теплообмінника установки алкілювання	Класичні ПІД-регулятори температури	Технології наявні, широко застосовуються	Доступні авторам проєкту
2	Те саме	МРС-керування на основі математичної моделі об'єкта	Технології наявні, потребують налаштування та адаптації	Доступні авторам проєкту
3	Те саме	Нечіткі алгоритми керування (Fuzzy Logic)	Технології наявні, використовуються в АСУ ТП	Доступні авторам проєкту
4	Те саме	Програмна реалізація в середовищі Matlab/Simulink або аналогах	Технології наявні	Доступні авторам проєкту

5	Те саме	Інтеграція з існуючими АСУ ТП через стандартні промислові протоколи	Технології наявні	Доступні авторам проєкту
---	---------	---	-------------------	--------------------------

Як видно з таблиці 6.2.1, усі ключові технології, необхідні для реалізації ідеї стартап-проєкту, є наявними та широко застосовуються в сучасних автоматизованих системах керування технологічними процесами. Запропоновані алгоритми прогнозованого керування та нечіткої логіки не потребують розробки принципово нових технічних засобів, а можуть бути реалізовані на базі існуючих програмних і апаратних платформ. Це підтверджує технологічну здійсненність проєкту та можливість його впровадження в реальних виробничих умовах.

6.2.2 Обрана технологія реалізації та короткий висновок щодо здійсненності

За результатами проведеного технологічного аудиту можна зробити висновок, що реалізація стартап-проєкту є технологічно здійсненною. Усі необхідні технології для створення інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінника є наявними на сучасному рівні розвитку автоматизації, не потребують розробки принципово нових технічних рішень та доступні авторам проєкту.

Обрана технологічна концепція дозволяє реалізувати стартап-проєкт із мінімальними витратами на апаратну частину, зосередившись на програмно-алгоритмічній складовій, що підвищує гнучкість, масштабованість та комерційну привабливість проєкту.

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Аналіз ринкових можливостей стартап-проєкту проводиться з метою визначення доцільності його впровадження в реальних ринкових умовах, а також виявлення потенційних можливостей і загроз, що можуть впливати на комерційну реалізацію проєкту. Дослідження виконується з урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій існуючих конкурентів.

Запропонований стартап-проєкт орієнтований на ринок автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСУ ТП) у хімічній та нафтопереробній промисловості, де ключовими факторами є надійність, енергоефективність і точність регулювання параметрів процесу.

6.3.1 Попередня характеристика потенційного ринку

На першому етапі аналізу ринкових можливостей проводиться оцінка наявності попиту, обсягу та динаміки розвитку ринку, на який орієнтований стартап-проєкт. Потенційними споживачами інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінника є промислові підприємства, що експлуатують установки алкілування, ректифікаційні та теплообмінні апарати з високими вимогами до стабільності температурних режимів.

Попит на подібні рішення зумовлений необхідністю:

- зниження енергетичних витрат;
- підвищення стабільності та якості технологічних процесів;
- модернізації застарілих систем керування без повної заміни обладнання;
- зменшення впливу людського фактора.

Табл. 6.3.1. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	Обмежена кількість великих інтеграторів АСУ ТП та виробників промислових систем керування
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум. од.	Середній, з тенденцією до поступового зростання
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Високі вимоги до надійності, кваліфікації персоналу та репутації постачальника
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність промисловим стандартам АСУ ТП, вимогам безпеки та експлуатації
6	Середня норма рентабельності в галузі або на ринку, %	Вища за середню банківську ставку

Проведений аналіз показує, що ринок автоматизованих систем керування технологічними процесами є достатньо привабливим для входження, оскільки характеризується стабільним попитом та позитивною динамікою розвитку. Середня норма рентабельності в галузі перевищує банківський відсоток за депозитними вкладеннями, що свідчить про економічну доцільність інвестування в даний стартап-проект.

Наявні обмеження для входу на ринок мають переважно технологічний та організаційний характер і можуть бути подолані за рахунок використання результатів наукових досліджень, отриманих у межах магістерської дисертації, а також фокусування на вузькій спеціалізації — інтелектуальному керуванні температурними режимами теплообмінників.

6.3.2 Характеристика потенційних клієнтів і вимоги до послуги

На наступному етапі аналізу ринкових можливостей стартап-проекту визначаються потенційні групи клієнтів, їхні характеристики, а також формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної з цільових груп.

Запропонований стартап-проект — інтелектуальна система керування температурним режимом теплообмінника установки алкілування — орієнтований на промислових споживачів, для яких критичними є стабільність технологічних параметрів, енергоефективність і надійність систем керування. Базова потреба ринку полягає в забезпеченні оптимального температурного режиму теплообмінних апаратів за умов змінних навантажень і зовнішніх збурень.

Основними потенційними клієнтами є підприємства хімічної та нафтопереробної промисловості, а також компанії-інтегратори автоматизованих систем керування технологічними процесами.

Табл. 6.3.2. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Стабільне підтримання температурного режиму теплообмінника	Промислові підприємства хімічної та нафтопереробної галузі	Орієнтація на надійність, відповідність стандартам, мінімізацію аварійних ризиків	До продукції: висока точність регулювання, стійкість до збурень; до компанії-постачальника: технічна підтримка
2	Зниження енерговитрат та експлуатаційних витрат	Підприємства з великим споживанням теплової енергії	Орієнтація на економічний ефект та	До продукції: енергоефективність, адаптивність; до компанії-

			окупність інвестицій	постачальника: гарантії результату
3	Модернізація застарілих систем керування	Підприємства з існуючими АСУ ТП	Обережність у впровадженні нових рішень, важлива сумісність	До продукції: інтеграція з АСУ ТП; до компанії-постачальника: досвід та репутація
4	Автоматизація без значного втручання в апаратну частину	Системні інтегратори та інжинірингові компанії	Орієнтація на універсальність і масштабованість рішення	До продукції: гнучкість налаштування; до компанії-постачальника: відкритість до співпраці

Як видно з таблиці 6.3.2, потенційні клієнти стартап-проєкту мають чітко сформовані потреби, пов'язані зі стабільністю температурного режиму теплообмінних апаратів, зниженням енергетичних та експлуатаційних витрат, а також модернізацією існуючих систем керування. Для більшості цільових груп ключовими факторами вибору є надійність рішення, економічний ефект від впровадження та можливість інтеграції з діючими АСУ ТП без значного втручання в апаратну частину.

Визначені вимоги до продукції та компанії-постачальника свідчать про доцільність орієнтації стартап-проєкту на промисловий сегмент B2B з акцентом на інтелектуальне керування, енергоефективність та сервісну підтримку. Отримані результати аналізу формують основу для подальшого дослідження факторів ринкового середовища, зокрема потенційних загроз і можливостей реалізації проєкту.

6.3.3 Фактори загроз і реакція проєкту

Після визначення потенційних груп клієнтів та їхніх вимог до товару доцільно провести аналіз ринкового середовища стартап-проєкту шляхом виявлення факторів, що можуть перешкоджати ринковому впровадженню, а також факторів, які сприяють його реалізації та розвитку.

Для цього складено перелік основних загроз та можливостей запуску стартап-проєкту з урахуванням специфіки ринку автоматизованих систем керування технологічними процесами. Фактори подано в порядку зменшення їх значущості.

Табл. 6.3.3. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Високі вимоги до надійності та безпеки	Потенційні клієнти обережно ставляться до нових рішень через ризик впливу на технологічний процес	Проведення пілотних проєктів, демонстрація результатів моделювання та тестування
2	Консервативність промислових підприємств	Повільне прийняття інноваційних систем керування	Орієнтація на поетапне впровадження та сумісність з існуючими АСУ ТП
3	Конкуренція з великими інтеграторами	Домінування відомих компаній на ринку АСУ ТП	Нішування продукту та фокус на спеціалізованому рішенні
4	Потреба у кваліфікованому персоналі	Необхідність підготовки персоналу для роботи з інтелектуальними системами	Надання навчальних матеріалів і технічної підтримки
5	Фінансові обмеження клієнтів	Обмежені бюджети на модернізацію	Гнучка цінова політика, обґрунтування економічного ефекту
6	Воєнні ризики та нестабільність енергосистеми	Перебої електро- та теплопостачання, логістичні обмеження	Орієнтація на енергоефективність і автономні режими

7	Мобілізація персоналу	Дефіцит кваліфікованих операторів	Підвищення рівня автоматизації та зниження людського фактору
---	-----------------------	-----------------------------------	--

Поряд із наявними загрозами, ринкове середовище створює низку можливостей для розвитку проєкту системи автоматичного керування теплообмінним апаратом. Основні фактори можливостей та відповідні управлінські реакції наведено в таблиці 6.3.4.

Табл. 6.3.4. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на енергоефективні рішення	Підприємства зацікавлені у зниженні енергоспоживання	Акцент на економічний ефект від впровадження системи
2	Модернізація застарілих АСУ ТП	Значна кількість підприємств використовує застарілі системи керування	Пропозиція рішення для інтеграції без заміни обладнання
3	Розвиток цифрових технологій	Поширення інтелектуальних алгоритмів керування	Використання сучасних методів МРС та нечіткої логіки
4	Підвищення вимог до стабільності процесів	Зростає значущість точного регулювання параметрів	Орієнтація на високу точність та стійкість системи
5	Інтерес до локальних інноваційних рішень	Підприємства зацікавлені у співпраці з розробниками	Гнучка адаптація продукту під потреби клієнта

Наведені в таблиці 6.3.4 фактори можливостей свідчать про сприятливе ринкове середовище для впровадження стартап-проєкту інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінного апарата. Зростання попиту на енергоефективні рішення, модернізація застарілих АСУ ТП та

активний розвиток цифрових і інтелектуальних технологій створюють передумови для комерційного успіху запропонованого продукту.

Можливість інтеграції сучасних алгоритмів прогнозованого керування та нечіткої логіки у вже існуючі системи автоматизації дозволяє мінімізувати витрати на впровадження та підвищити привабливість рішення для промислових споживачів. Виявлені можливості доцільно використовувати при формуванні стратегії розвитку стартап-проекту та позиціонуванні його як гнучкого, адаптивного й економічно ефективного інструмента керування технологічними процесами.

6.3.5 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Конкурентне середовище у сфері систем автоматичного керування теплообмінними апаратами в процесах нафтохімічного виробництва, зокрема алкілування ізобутану з н-бутеном, є складним і багаторівневим. Конкуренція проявляється між виробниками автоматизованих систем керування, інжиніринговими компаніями, постачальниками програмно-апаратних комплексів, а також альтернативними технологічними рішеннями з підвищення ефективності теплообміну та безпеки процесу. Для успішного впровадження проекту необхідні технічна надійність, висока точність регулювання, відповідність галузевим стандартам та інтеграція з існуючими системами автоматизації.

Табл. 6.3.5. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№ п/п	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1.	Тип конкуренції	Конкуренція на ринку автоматизованих систем	Чітке позиціонування проекту як вужькоспеціалізованого рішення

		керування є наближеною до олігополістичної: домінують великі міжнародні automation-компанії (Siemens, ABB, Emerson, Honeywell), що пропонують універсальні комплексні рішення	для керування температурним режимом теплообмінників установки алкілування
2.	Рівень конкурентної боротьби	Високий на міжнародному рівні та середній на локальних ринках через обмежену кількість спеціалізованих рішень для процесів алкілування	Орієнтація на нішеві сегменти ринку, співпраця з науково-дослідними та інжиніринговими організаціями
3.	Галузева ознака	Конкуренція має внутрішньогалузевий характер у межах автоматизації нафтохімічних процесів та міжгалузевий — з боку універсальних систем оптимізації та енергоефективності	Формування комплексної пропозиції, що поєднує автоматичне керування, підвищення енергоефективності та стабільність процесу
4.	Конкуренція за видом “товару”	Конкуренція між програмно-апаратними SCADA/DCS-системами та локальними регуляторами температури з обмеженим функціоналом	Акцент на перевагах інтелектуального керування: прогнозування, зниження перерегулювання, стабільність температури
5.	Характер конкуренції за цінами	Цінова конкуренція є помірною; ключовими факторами вибору є надійність, довгострокова ефективність та експлуатаційні витрати	Застосування стратегії value-based pricing з обґрунтуванням економічного ефекту від впровадження
6.	Інтенсивність конкуренції	Загальна інтенсивність конкуренції є нерівномірною: переважають універсальні	Сертифікація рішення, відповідність стандартам ІЕС,

		рішення, водночас зростає попит на спеціалізовані системи	ISA, API та впровадження сучасних алгоритмів керування
--	--	---	--

Таким чином, ступеневий аналіз конкурентного середовища свідчить, що ринок інтелектуальних систем керування теплообмінними апаратами характеризується домінуванням універсальних рішень та помірною інтенсивністю конкуренції. Водночас наявність вузькоспеціалізованої ніші створює сприятливі умови для впровадження розроблюваного стартап-проекту, орієнтованого на керування температурним режимом теплообмінників установки алкілування.

Табл. 6.3.6. Аналіз конкуренції в галузі за моделлю 5 сил

Сила конкуренції	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Склад сил та їх характеристика	Великі міжнародні компанії з автоматизації та інжинірингу (Siemens, ABB, Honeywell, Emerson), що пропонують готові DCS/SCADA-рішення для нафтохімії	Інжинірингові фірми та стартапи, які розробляють спеціалізовані системи керування або впроваджують цифрові рішення Industry 4.0	Виробники датчиків температури, тиску, витрати; постачальники ПЛК, контролерів, приводів, ПЗ	Нафтопереробні та нафтохімічні підприємства, що експлуатують установки алкілування	Ручне або напівавтоматичне керування, універсальні регулятори, альтернативні методи підвищення енергоефективності

Інтенсивність впливу	Висока, оскільки ринок насичений універсальними автоматизованими рішеннями	Середня: вхід на ринок потребує значних інвестицій, експертизи та доступу до промислових об'єктів	Середня: постачальники численні, але якісні промислові компоненти мають обмежене коло виробників	Висока: клієнти мають широкий вибір та високі вимоги до надійності й безпеки	Середня: замітники існують, але поступаються за точністю та ефективністю
Фактори посилення або послаблення конкуренції	Стандартизація рішень, висока репутація брендів, довгострокові контракти	Високий поріг входу, необхідність сертифікації та досвіду у нафтохімії	Залежність від імпортованих компонентів, вимоги до сертифікації	Чутливість до ціни, вимоги до безперебійної роботи, гарантії сервісу	Нижча вартість, але обмежений функціонал та менша безпека
Висновок щодо сили тиску	Конкурентний тиск є значним	Загроза входу нових гравців обмежена	Тиск постачальників помірний	Клієнти мають сильну переговорну позицію	Загроза заміників обмежена для складних процесів алкілування
Можливі дії проєкту	Фокус на спеціалізації саме для теплообмінника алкілування, підвищення точності та стабільності процесу	Розвиток унікальних алгоритмів керування, накопичення експлуатаційних даних	Диверсифікація постачальників, використання стандартних інтерфейсів	Пропозиція індивідуальних рішень, сервісна підтримка, довгострокові контракти	Акцент на перевагах автоматизації: безпека, енергоефективність, стабільність

Проведений аналіз конкурентного середовища за моделлю п'яти сил Портера (табл. 6.3.6) свідчить про наявність помірного та високого конкурентного тиску з боку окремих груп учасників ринку. Найбільший вплив на діяльність стартап-проєкту мають існуючі конкуренти в галузі автоматизації та клієнти, для яких критичними є показники надійності, безпеки та стабільності технологічного процесу.

Водночас загроза появи нових конкурентів обмежується високими бар'єрами входу, зумовленими необхідністю спеціалізованих знань, сертифікації та досвіду роботи з нафтохімічними процесами. Вплив товарів-замінників оцінюється як середній, оскільки універсальні рішення не забезпечують необхідної точності та адаптивності для процесів алкілування.

Отримані результати підтверджують доцільність фокусування стартап-проєкту на розробці спеціалізованої інтелектуальної системи керування теплообмінними апаратами з використанням прогнозованого керування та нечіткої логіки, що дозволяє знизити конкурентний тиск і сформувати стійкі конкурентні переваги.

6.3.7 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Умови конкуренції на ринку систем автоматичного керування технологічними процесами, специфічні вимоги нафтохімічного виробництва та наявність альтернативних рішень визначають перелік факторів, за якими система автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном має перевершувати аналоги. Ключовими є фактори, що поєднують технічну надійність, точність регулювання, безпеку експлуатації та зручність інтеграції в існуючі АСУ ТП.

Табл. 6.3.7. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники значущості)
1	Точність керування температурним режимом	Для процесу алкілування критичною є стабільність температури теплообміну, оскільки відхилення можуть призвести до зниження виходу цільового продукту та підвищення ризику побічних реакцій
2	Швидкість реакції системи та прогнозування	Система повинна оперативно реагувати на зміни теплового навантаження та мати можливість прогнозного регулювання для запобігання аварійним режимам
3	Надійність і безперервність роботи	Нафтохімічні установки працюють у безперервному режимі; збої в керуванні теплообмінником можуть призвести до значних економічних втрат
4	Безпека технологічного процесу	Автоматичне керування знижує людський фактор та мінімізує ризики перегріву, витоків і аварійних ситуацій
5	Сумісність з існуючими АСУ ТП	Можливість інтеграції з SCADA/DCS-системами дозволяє зменшити витрати на впровадження та модернізацію
6	Енергоефективність	Оптимізація теплового режиму знижує споживання енергії та експлуатаційні витрати підприємства
7	Гнучкість налаштувань і масштабованість	Система має адаптуватися до різних режимів роботи установки та можливого розширення виробництва
8	Діагностика та моніторинг стану обладнання	Наявність функцій контролю параметрів і раннього виявлення несправностей зменшує ризик аварій та простоїв
9	Відповідність галузевим стандартам	Дотримання стандартів API, IEC, ISA підвищує довіру замовників та спрощує сертифікацію системи
10	Зручність експлуатації та обслуговування	Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і простота технічного обслуговування знижують навантаження на персонал
11	Ціна та сукупна вартість володіння	Клієнти оцінюють не лише початкову ціну, а й витрати на експлуатацію, енергію, обслуговування та аварійні ризики

Наведені в таблиці 6.3.7 фактори конкурентоспроможності відображають ключові вимоги до системи автоматичного керування теплообмінними апаратами установки алкілування, зумовлені специфікою технологічного процесу та підвищеними вимогами до безпеки й стабільності роботи. Найбільшу значущість мають точність температурного керування, швидкість реакції

системи, надійність та безперервність функціонування, оскільки саме ці характеристики безпосередньо впливають на якість продукту та зниження аварійних ризиків.

6.3.8 Порівняльний аналіз сильних і слабких сторін проєкту за факторами

Оцінювання виконано за шкалою від **-3 до +3**, де від'ємні значення відповідають слабшим позиціям проєкту порівняно з альтернативними рішеннями, а додатні — сильнішим. Вагомість факторів відображено показником **«бали 1–20»**, що визначає їх пріоритетність для конкурентоспроможності системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном.

Табл. 6.3.8. Порівняльний аналіз факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1–20	Оцінка конкурента
1	Точність керування температурним режимом	20	-2
2	Швидкість реакції та прогнозування процесу	16	-2
3	Надійність і безперервність роботи	18	0
4	Сумісність з існуючими АСУ ТП	15	0
5	Прозорість алгоритмів керування та налаштувань	14	-1
6	Безпека технологічного процесу	13	0
7	Сервісна підтримка та можливість модернізації	12	+1

8	Спеціалізація на теплообмінниках алкілювання	17	-3
9	Накопичення експлуатаційних даних і аналітика	10	-1
10	Масштабованість і стабільність якості	11	+4

У таблиці 6.3.8 значення «0» відповідає розроблюваному стартап-проекту та використовується як базова точка відліку. Від'ємні значення (–1...–3) свідчать про гірші позиції конкурента за відповідним фактором, тоді як додатні значення (+1...+3) — про переваги конкурента порівняно з розроблюваним рішенням.

6.3.9 SWOT-аналіз

SWOT-аналіз узагальнює результати оцінювання та відображає логіку взаємозв'язку сильних і слабких сторін проекту з можливостями та загрозами ринку систем автоматичного керування технологічними процесами. Проведений аналіз дозволяє перейти до обґрунтування сценаріїв ринкового впровадження системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілювання ізобутану з н-бутеном.

Табл. 6.3.9. SWOT-аналіз проекту

Сильні сторони: фокус на конкретному технологічному процесі алкілювання; висока точність керування температурним режимом; підвищена безпека та зниження людського фактору; інтеграція з існуючими АСУ ТП; енергоефективність; можливість	Слабкі сторони: залежність від висококваліфікованих фахівців на етапі впровадження; значні початкові інвестиції; складність інтеграції з застарілим обладнанням; обмежені ресурси на
--	--

накопичення та аналізу експлуатаційних даних; відповідність галузевим стандартам	ранній стадії проєкту; потреба в сертифікації
Можливості: зростання попиту на автоматизацію нафтохімічних виробництв; підвищення вимог до безпеки та енергоефективності; модернізація існуючих НПЗ; розвиток концепцій Industry 4.0; партнерство з інжиніринговими компаніями та виробниками обладнання; вихід на міжнародні ринки	Загрози: висока конкуренція з боку великих міжнародних automation-компаній; технологічне копіювання рішень; жорсткі регуляторні вимоги; ризики збоїв у постачанні обладнання; можливі аварії, що негативно впливають на репутацію

Проведений SWOT-аналіз свідчить, що стартап-проєкт інтелектуальної системи керування теплообмінним апаратом має суттєві внутрішні переваги, зумовлені високою точністю температурного регулювання, підвищеним рівнем безпеки та сумісністю з існуючими АСУ ТП. Виявлені можливості ринку, пов'язані з цифровізацією нафтохімічних виробництв і зростанням вимог до енергоефективності, створюють сприятливі умови для впровадження проєкту.

Водночас наявні слабкі сторони та зовнішні загрози доцільно мінімізувати шляхом поетапного впровадження системи, партнерства з інжиніринговими компаніями та дотримання галузевих стандартів і регуляторних вимог.

6.3.10 Альтернативи ринкового впровадження та вибір оптимальної

Альтернативи ринкового впровадження доцільно розглядати як різні комплекси заходів виходу на ринок, які відрізняються потребою в ресурсах, строками реалізації та рівнем ризику. Для проєкту системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном

раціональними є сценарії від пілотного впровадження на одному промисловому об'єкті до поетапного масштабування через інжинірингові партнерства.

Табл. 6.3.10. Альтернативи ринкового впровадження проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів ринкового впровадження)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Запуск пілотного проєкту (MVP) на одному теплообмінному апараті установки алкілування з базовими модулями автоматичного регулювання температури, моніторингу та аварійної сигналізації	Висока, оскільки потребує обмежених фінансових і кадрових ресурсів та може бути реалізований у співпраці з одним підприємством	Короткі, 2–3 місяці для запуску та 1 виробничий цикл для оцінки ефективності
2	Вихід на ринок через партнерство з інжиніринговими компаніями, що спеціалізуються на автоматизації нафтохімічних установок	Середня, оскільки залежить від репутації проєкту та умов співпраці	Середні, 3–5 місяців для укладання партнерських угод і перших впроваджень
3	Поетапне розширення функціоналу системи (прогнозне керування, аналітика даних, інтеграція з DCS/SCADA) після успішного пілоту	Низько-середня, через зростання потреби у фінансуванні та висококваліфікованих фахівцях	Довші, 5–8 місяців до повної реалізації
4	Фокус на нішевому сегменті модернізації застарілих теплообмінних апаратів на діючих установках алкілування	Середня, потребує доступу до промислових об'єктів і експертних ресурсів	Середні, 3–4 місяці для формування перших кейсів

Як оптимальну альтернативу доцільно обрати сценарій пілотного впровадження (MVP) системи автоматичного керування теплообмінним апаратом на одному об'єкті алкілування. Такий підхід забезпечує швидкий вихід на ринок, відносно низьку потребу в ресурсах і можливість зниження технічних та фінансових

ризиків за рахунок поетапного вдосконалення системи на основі реальних експлуатаційних даних. Надалі результати пілотного проєкту можуть стати основою для масштабування та розширення партнерств.

6.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Ринкова стратегія проєкту «Система автоматичного керування теплообмінним апаратом в процесі алкілування ізобутану з н-бутеном» визначає пріоритетні групи споживачів, етапи виходу на ринок, а також підходи до розвитку продукту, каналів збуту та сервісної підтримки. З огляду на специфіку нафтохімічного виробництва та високу вартість помилок у технологічному процесі, стратегічні рішення орієнтовані на поетапне впровадження, технічну надійність, відповідність галузевим стандартам і формування довіри з боку промислових замовників. Такий підхід забезпечує стійкі конкурентні переваги та можливість масштабування рішення на суміжні виробничі процеси.

6.4.1 Вибір цільових груп потенційних споживачів

На стартовому етапі доцільно визначити ті цільові групи споживачів, у яких поєднуються висока потреба в автоматизації, наявність відповідної інфраструктури та готовність до впровадження нових технічних рішень. Для проєкту системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном ключовими є промислові споживачі та організації, для яких стабільність температурного режиму, безпека процесу та енергоефективність мають критичне значення. Додатково перспективними є інжинірингові компанії та науково-дослідні установи, які залучені до проєктування, модернізації й оптимізації нафтохімічних установок.

Табл. 6.4.1. Вибір цільових груп потенційних споживачів проєкту

№ п/п	Потреба (на яку орієнтується проект)	Цільові групи споживачів	Основні вимоги цільової групи	Доцільність вибору (аргументація)
1	Підвищення стабільності та точності температурного режиму теплообміну	Нафтопереробні та нафтохімічні підприємства (установки алкілування)	Висока точність регулювання, безперервність роботи, відповідність стандартам безпеки	Критична залежність якості продукту та безпеки процесу від температурного режиму
2	Зниження аварійності та людського фактору	Оператори та служби експлуатації технологічних установок	Надійність, автоматичний контроль, аварійна сигналізація, зручний інтерфейс	Високі ризики простоїв і аварій роблять автоматизацію економічно доцільною
3	Оптимізація енергоспоживання	Підприємства з високими витратами на теплоенергію	Енергоефективність, прогнозне керування, аналітика даних	Зростання цін на енергоносії підвищує попит на оптимізаційні рішення
4	Модернізація застарілих систем керування	Інжинірингові та ЕРС-компанії	Гнучкість інтеграції, сумісність з SCADA/DCS, масштабованість	Інжинірингові компанії виступають каналом масштабування рішення
5	Науково-технічна оптимізація процесів	Науково-дослідні установи та проектні організації	Доступ до даних, можливість моделювання та аналізу режимів	Використання системи для досліджень і проектування нових установок

Наведені в таблиці потреби та аргументація вибору підтверджують актуальність і доцільність реалізації стартап-проекту інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінних апаратів. Ключовими

факторами, що формують попит на запропоноване рішення, є підвищені вимоги до точності регулювання, безпеки технологічних процесів, зниження аварійності та оптимізації енергоспоживання.

Аналіз цільових груп споживачів і їхніх основних вимог свідчить про відповідність функціональних можливостей проєкту сучасним тенденціям розвитку нафтохімічної та нафтопереробної галузі. Це підтверджує перспективність впровадження системи як на етапі модернізації існуючих установок, так і під час проєктування нових виробничих об'єктів.

6.4.2 Визначення базової стратегії розвитку

Базова стратегія розвитку проєкту «Система автоматичного керування теплообмінним апаратом в процесі алкілування ізобутану з н-бутеном» має враховувати промисловий характер продукту, високі вимоги до безпеки та надійності, а також значні інвестиційні ризики на початковому етапі. З огляду на це доцільною є стратегія поетапного зростання з пріоритетом якості, технічної спеціалізації та накопичення експлуатаційних кейсів. Такий підхід передбачає запуск базової версії системи для одного технологічного сегмента з подальшим розширенням функціональності та ринкової присутності.

Табл. 6.4.2. Базова стратегія розвитку проєкту

№ п/п	Альтернативний варіант базової стратегії	Умови застосування	Очікувані результати	Обґрунтування вибору для проєкту
1	Стратегія швидкого охоплення ринку (масове впровадження)	Значні інвестиції, широка мережа партнерів, готовність масштабування	Швидке зростання кількості впроваджень, але високі ризики втрати якості	Недоцільна на старті через високі вимоги до безпеки та складність технології
2	Стратегія фокусування (спеціалізація на	Глибока експертиза в одному процесі, тісна взаємодія з клієнтами	Висока цінність рішення, сильна диференціація, стабільний попит	Найбільш доцільна, оскільки проєкт орієнтований на вужький

	теплообмінниках алкілування)			технологічний сегмент
3	Стратегія поетапного зростання (MVP → розширення)	Запуск базового функціоналу, тестування на пілотних об'єктах	Контрольоване зростання, зниження ризиків, можливість масштабування	Оптимальна для старту, дозволяє розвивати систему з мінімальними ресурсами
4	Партнерська стратегія (вихід через інжинірингові компанії)	Наявність партнерських угод, спільна реалізація проєктів	Швидший доступ до клієнтів, підвищення довіри	Доцільна як доповнення до поетапного зростання, але не як базова

Для проєкту «Система автоматичного керування теплообмінним апаратом в процесі алкілування ізобутану з н-бутеном» базовою доцільно обрати стратегію поетапного зростання зі збереженням фокусу на технічній спеціалізації. Такий підхід забезпечує баланс між швидкістю виходу на ринок, контролем якості, мінімізацією ризиків і потенціалом подальшого масштабування.

6.4.3 Визначення стратегії конкурентної поведінки

Конкурентна поведінка проєкту системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном має враховувати одночасно прямих конкурентів (постачальників автоматизованих систем керування) та товари-замінники (універсальні регулятори, напівавтоматичні рішення). Пріоритетною є нецінова конкуренція, оскільки домінування цінових інструментів у високоризикових нафтохімічних процесах призводить до зниження якості, підвищення аварійних ризиків і втрати довіри замовників. Конкурентна перевага проєкту формується через технічну спеціалізацію, високі стандарти якості, безпеку та структурований сервісний супровід.

Табл. 6.4.3. Стратегії конкурентної поведінки проєкту

№ п/п	Можливі стратегії конкурентної поведінки	Сутність стратегії	Ризики	Доцільність для проєкту
-------	--	--------------------	--------	-------------------------

1	Цінова конкуренція (демпінг)	Залучення замовників через мінімізацію вартості впровадження	Зниження маржинальності, ризики втрати якості та безпеки	Низька; допустима лише в окремих пілотних проєктах
2	Диференціація за якістю	Акцент на точності керування, надійності, відповідності стандартам і сервісній підтримці	Зростання витрат на контроль якості та сертифікацію	Висока; відповідає вимогам нафтохімічної галузі
3	Нішування (фокусування)	Спеціалізація на теплообмінних апаратах установок алкілування	Обмеження обсягу ринку на старті	Висока; формує чітку ціннісну пропозицію та зменшує пряме порівняння
4	Партнерська конкуренція	Посилення позицій через співпрацю з інжиніринговими та ЕРС-компаніями	Залежність від партнерів, складність координації	Середньо-висока; доцільна як канал масштабування
5	Інноваційна конкуренція	Використання прогностичного керування, аналітики даних, цифрових двійників	Високі витрати на розробку, технологічні ризики	Середня; доцільна після етапу MVP

Для проєкту «Система автоматичного керування теплообмінним апаратом в процесі алкілування ізобутану з н-бутеном» основною стратегією конкурентної поведінки доцільно визначити диференціацію за якістю у поєднанні з нішуванням на спеціалізованих технологічних процесах, що забезпечує стійку нецінову конкурентну перевагу та формує довгострокову довіру з боку промислових замовників.

6.4.4 Визначення стратегії позиціонування

Позиціонування проєкту системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном має бути сформульоване як чітка відповідь на питання, чим запропоноване рішення відрізняється від універсальних систем автоматизації та стандартних регуляторів технологічних параметрів. Ключовою ідеєю позиціонування є поєднання високої точності керування з технологічно структурованим процесом впровадження та експлуатаційного супроводу, що забезпечує не лише автоматизацію, а й контроль безпеки, стабільності та ефективності процесу алкілування.

Табл. 6.4.4. Стратегія позиціонування проєкту

№ п/п	Варіант позиціонування	Цільова група	Ключове повідомлення	Перевага відносно альтернатив
1	«Спеціалізоване керування теплообмінником алкілування»	Нафтохімічні та нафтопереробні підприємства	Стабільний температурний режим, контроль безпеки та якості процесу	Вища точність і надійність порівняно з універсальними системами
2	«Автоматизація з гарантіями технологічної безпеки»	Служби експлуатації та технічного контролю	Зниження аварійності, мінімізація людського фактору	Вищий рівень безпеки та контроль ризиків
3	«Енергоефективне керування теплообміном»	Підприємства з високими енерговитратами	Оптимізація теплових режимів і зменшення споживання енергії	Економічна ефективність у довгостроковій перспективі
4	«Пілотне впровадження з поетапним масштабуванням»	Інжинірингові та ЕРС-компанії	Гнучка інтеграція, можливість адаптації до різних установок	Швидше та безпечніше впровадження без зупинки виробництва

Узагальнюючи, стратегія позиціонування проєкту «Система автоматичного керування теплообмінним апаратом в процесі алкілування ізобутану з н-бутеном» формує образ вузькоспеціалізованого промислового рішення, яке забезпечує не просто автоматизацію, а керований, безпечний і енергоефективний процес із високими стандартами якості та орієнтацією на потреби конкретного технологічного сегмента.

6.5 Розроблення маркетингової програми проєкту

Маркетингова програма проєкту «Система автоматичного керування теплообмінним апаратом в процесі алкілування ізобутану з н-бутеном» орієнтована на формування чіткої ціннісної пропозиції для цільових сегментів промислових споживачів, узгодження технічних параметрів рішення з вимогами нафтохімічних підприємств та визначення ефективних інструментів виходу на ринок. З огляду на індустріальний характер продукту, ключовими факторами успіху є довіра до надійності та безпеки системи, відповідність галузевим стандартам, прогнозованість технічних і економічних результатів, а також зручність інтеграції та сервісного супроводу протягом усього життєвого циклу рішення.

6.5.1 Визначення ключових переваг концепції послуги

Ключові переваги концепції послуги в межах проєкту системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном формуються як відповідь на базові потреби промислових споживачів: забезпечення стабільного та безпечного температурного режиму, мінімізація технологічних ризиків, зниження енергетичних витрат і прогнозованість результатів експлуатації. Концепція послуги створює додану цінність за рахунок поєднання технічного рішення з регламентованим процесом впровадження, експлуатаційного супроводу та гарантій якості, що відрізняє проєкт від універсальних і фрагментарних рішень автоматизації.

Табл. 6.5.1. Визначення ключових переваг концепції потенційної послуги

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує послуга	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Забезпечити стабільний температурний режим теплообміну	Точне автоматичне регулювання температури з	Фокус на конкретному процесі алкілування, а не універсальні алгоритми керування

		урахуванням змін навантаження	
2	Запобігти аварійним режимам і помилкам персоналу	Автоматичний контроль параметрів і аварійна сигналізація	Зниження людського фактору; вищий рівень безпеки порівняно з напіваавтоматичними системами
3	Забезпечити відповідність технологічним і галузевим стандартам	Вбудовані регламенти контролю та протоколи якості	Орієнтація на стандарти API, IEC, ISA; готовність до аудиту та сертифікації
4	Отримати прогнозований результат експлуатації	Прогнозне керування та аналітика експлуатаційних даних	Можливість оцінки ефективності та попередження відхилень до їх виникнення
5	Зменшити енерговитрати	Оптимізація теплових режимів і мінімізація теплових втрат	Довгострокова економія енергії порівняно зі стандартними регуляторами
6	Забезпечити сумісність з існуючими АСУ ТП	Інтеграція з SCADA/DCS без повної заміни обладнання	Менші витрати на впровадження та модернізацію
7	Отримати надійний сервісний супровід	Регламентоване обслуговування, оновлення та технічна підтримка	Прозорі умови сервісу та контроль якості на всьому життєвому циклі
8	Накопичувати та використовувати експлуатаційний досвід	Архів даних і режимів роботи теплообмінника	Формування «ефекту накопичення» та зростання цінності системи з часом

Наведені в таблиці 6.5.1 ключові переваги концепції потенційної послуги демонструють її орієнтацію на вирішення критичних для споживачів завдань, пов'язаних зі стабільністю температурного режиму, безпекою технологічного процесу та підвищенням енергоефективності. Запропонована система поєднує спеціалізацію на конкретному процесі алкілування з використанням

інтелектуальних алгоритмів керування, що забезпечує вищу точність і надійність порівняно з універсальними рішеннями.

Сформовані переваги створюють основу для конкурентного позиціонування послуги на ринку, знижують ризики впровадження та підвищують економічну доцільність її використання для промислових споживачів. Це підтверджує перспективність розвитку стартап-проєкту та його відповідність сучасним вимогам автоматизації технологічних процесів.

6.5.2 Опис трьох рівнів моделі «товару/послуги»

Систему автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном доцільно розглядати як багаторівневий продукт, у якому базова цінність полягає в забезпеченні стабільного, безпечного та енергоефективного теплообміну, а конкурентні відмінності формуються через алгоритми керування, сервісний супровід, інтеграцію з АСУ ТП та інфраструктуру експлуатаційної підтримки.

Табл. 6.5.2. Опис трьох рівнів моделі послуги

Рівні послуги	Сутність та складові
I. Послуга за задумом	Базова потреба: забезпечити стабільний температурний режим теплообмінного апарата в процесі алкілування ізобутану з н-бутеном з мінімальними ризиками для безпеки та якості продукту. Основна функціональна вигода: зниження аварійності, стабілізація технологічного процесу та підвищення виходу цільового продукту за рахунок точного автоматичного регулювання температури.
II. Послуга у реальному виконанні	Функціональні складові системи: збір і обробка даних з датчиків температури, тиску та витрати; алгоритми автоматичного та прогнозного керування; аварійна сигналізація; інтеграція з SCADA/DCS; журнал подій і параметрів.

	Якість: відповідність галузевим стандартам (API, IEC, ISA), надійність роботи в безперервному режимі, контроль точності регулювання, вимоги до кібербезпеки. «Пакування» у сервісному сенсі: інтерфейс оператора, єдине середовище налаштувань і моніторингу, документація, інструкції для персоналу. Марка: спеціалізоване промислове рішення з фокусом на процес алкілування.
III. Послуга з підкріпленням	До впровадження: технічний аудит теплообмінного апарата, моделювання режимів, пілотне тестування (MVP). Після впровадження: сервісна підтримка, оновлення алгоритмів, аналітика експлуатаційних даних, навчання персоналу, регламент технічного обслуговування. Засоби утримання клієнта: накопичення експлуатаційної історії, рекомендації з оптимізації режимів, можливість масштабування системи на інші апарати установки.

Представлена структура послуги демонструє комплексний підхід до впровадження інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінного апарата на всіх етапах її життєвого циклу — від проєктування та пусконаладження до експлуатації й сервісного супроводу. Така поетапна модель дозволяє адаптувати рішення до конкретних умов технологічного процесу алкілування та мінімізувати ризики, пов'язані з впровадженням нових алгоритмів керування.

Поєднання функціональних, якісних і сервісних складових послуги підвищує її цінність для промислових споживачів, забезпечуючи стабільність роботи обладнання, відповідність галузевим стандартам і можливість подальшої оптимізації режимів. Це створює передумови для довгострокової співпраці з клієнтами та формування стійкої конкурентної позиції стартап-проекту.

6.5.3 Визначення меж встановлення ціни

Ціноутворення для проєкту системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном має забезпечити баланс між економічною доцільністю для промислових споживачів та можливістю підтримувати високі стандарти якості, безпеки й сервісного супроводу. Межі ціни доцільно формувати з урахуванням вартості альтернативних рішень (універсальні системи автоматизації, локальні регулятори, ручне керування), цінових орієнтирів інжинірингових компаній та платоспроможності цільових груп. Остаточне коригування ціни можливе після пілотного впровадження та аналізу фактичного економічного ефекту (зниження енерговитрат, аварійності, простоїв).

Табл. 6.5.3. Визначення меж встановлення ціни на послугу

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на послугу
1	Ручне або напівавтоматичне керування теплообмінником – 30 000–60 000	Базові локальні регулятори температури – 50 000–80 000	Середній (підприємства з обмеженим бюджетом модернізації)	Верхня межа: локальне автоматичне керування без аналітики – 110 000
2	Універсальні SCADA/DCS-модулі без спеціалізації – 120 000–200 000	Типові інжинірингові рішення з автоматизації – 150 000–250 000	Середній–високий (діючі НПЗ та нафтохімічні підприємства)	Верхня межа: пакет керування з сервісним супроводом – 220 000
3	Часткова оптимізація процесу без прогнозування – 200 000–300 000	Індивідуальні інжинірингові проєкти – 250 000–400 000	Високий (підприємства з фокусом на безпеку й ефективність)	Нижня межа: погодинний інжиніринговий супровід – 180 000 Верхня межа: комплексне

				рішення з MPC та нечіткою логікою – 350 000
4	Відсутність автоматизації (приховані втрати від аварій і простоїв) – >400 000	Преміальні системи автоматизації світових виробників – 400 000–600 000	Різний, але з високою чутливістю до ризиків	Верхня межа: повне інтелектуальне керування з аналітикою – 500 000

Наведені в таблиці 6.5.3 межі встановлення ціни на послугу інтелектуального керування температурним режимом теплообмінного апарата сформовані з урахуванням рівня цін на товари-замінники та аналоги, а також фінансових можливостей цільових груп споживачів. Запропонований ціновий діапазон дозволяє позиціонувати послугу між базовими рішеннями локального керування та преміальними комплексними системами автоматизації.

Встановлення гнучких верхніх і нижніх меж ціни забезпечує адаптацію пропозиції до різних сценаріїв впровадження — від пілотних проєктів до повнофункціональних інтелектуальних систем з прогнозованим керуванням. Це підвищує конкурентоспроможність послуги та створює умови для її економічно доцільного впровадження на промислових підприємствах.

6.5.5 Концепція маркетингових комунікацій

Комунікаційна політика проєкту системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном має одночасно формувати довіру до надійності, безпеки та технологічної обґрунтованості рішення й пояснювати його цінність у порівнянні з універсальними системами автоматизації та частковими замінниками. Доцільним є поєднання експертно-контентної стратегії (кейси, технічні

обґрунтування, демонстрація ефекту) з точковими B2B-каналами комунікації, орієнтованими на інженерів, технічних керівників і менеджерів проєктів.

Табл. 6.5.5. Концепція маркетингових комунікацій проєкту

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Технічні керівники та головні інженери орієнтуються на безпеку, стабільність і відповідність стандартам	Професійні конференції, галузеві виставки, технічні публікації, прямі B2B-презентації	«Контроль температури без аварій і відхилень», «Відповідність галузевим стандартам»	Сформувати довіру до технічної надійності рішення	«Стабільний теплообмін — основа безпечного алкілування»
2	Служби експлуатації цінують простоту, автоматизацію та зниження людського фактору	Демонстраційні сесії, вебінари, технічні інструкції, пілотні проєкти	«Мінімізація ручних операцій», «Автоматичний контроль і сигналізація»	Показати зниження навантаження на персонал	«Система, що працює замість людини — без помилок»
3	Менеджери з модернізації орієнтуються на економічний ефект	Бізнес-презентації, кейс-стаді, комерційні пропозиції	«Енергоефективність», «Зниження простоїв і втрат»	Довести економічну доцільність впровадження	«Менше втрат — більше контролю»

4	Інжинірингові та ЕРС-компанії шукають масштабовані та інтегровані рішення	Партнерські зустрічі, галузеві каталоги, LinkedIn, професійні мережі	«Гнучка інтеграція», «Пілот → масштабування»	Позиціонувати продукт як зручний модуль для проєктів	«Готове рішення для складних процесів»
5	Для всіх сегментів критична репутація постачальника	Відгуки клієнтів, кейси, сертифікати, рекомендації	«Контроль якості», «Прозорі умови сервісу»	Знизити ризик недовіри до нового рішення	«Доведена ефективність у промислових умовах»

Наведена таблиця відображає системний підхід до формування комунікаційної та рекламної стратегії стартап-проєкту з урахуванням специфіки цільових сегментів споживачів. Обрані канали комунікації, ключові позиціонувальні образи та рекламні повідомлення спрямовані на демонстрацію технічної надійності, безпеки та економічної доцільності впровадження інтелектуальної системи керування теплообмінним апаратом.

Запропонована концепція рекламного звернення орієнтована на зниження бар'єрів довіри з боку промислових споживачів та формування уявлення про продукт як готове, ефективне й масштабоване рішення для автоматизації технологічних процесів. Це забезпечує узгодженість маркетингових комунікацій із загальною стратегією позиціонування стартап-проєкту на ринку.

6.6 Висновки до розділу

У межах розділу сформовано та обґрунтовано проєкт системи автоматичного керування теплообмінним апаратом у процесі алкілування ізобутану з н-бутеном, орієнтований на підвищення стабільності технологічного режиму, безпеки

виробництва та енергоефективності нафтохімічних установок. Показано, що цінність проєкту полягає у поєднанні спеціалізованих алгоритмів керування з регламентованим процесом впровадження та експлуатаційного супроводу, що забезпечує прогнозований результат і зниження технологічних ризиків. Такий підхід дозволяє чітко відокремити запропоноване рішення від універсальних систем автоматизації та часткових замінників, які не враховують специфіку процесу алкілування.

Техніко-економічний та ринковий аналіз засвідчив, що реалізація системи є практично здійсненою, оскільки її апаратно-програмні компоненти (датчики, контролери, алгоритми керування, SCADA/DCS-інтеграція, засоби діагностики та безпеки) базуються на перевірених і широко застосовуваних промислових технологіях. Доцільним визначено модульний підхід до реалізації з поетапним впровадженням функціоналу, що забезпечує швидкий запуск пілотного проєкту та створює умови для подальшого масштабування без втрати керованості системи.

Оцінювання конкурентного середовища показало, що ринок автоматизації нафтохімічних процесів характеризується високою конкуренцією з боку великих міжнародних виробників універсальних рішень, а також наявністю товарів-замінників. У таких умовах ключовими факторами конкурентоспроможності проєкту визначено високу точність керування температурним режимом, безпеку експлуатації, енергоефективність, відповідність галузевим стандартам та прозорий сервісний супровід. Проведений аналіз сильних і слабких сторін засвідчив, що найбільш уразливим параметром на стартовому етапі є потреба у висококваліфікованих фахівцях та накопиченні експлуатаційних кейсів, водночас найбільш вираженими перевагами проєкту є вузька технологічна спеціалізація та можливість стандартизації якості керування.

Стратегічно доцільним визначено фокусування на нішевому сегменті теплообмінних апаратів установок алкілування з подальшим поетапним розширенням функціональності та ринкової присутності. Обґрунтовано вибір стратегії поетапного зростання з початковим пілотним впровадженням (MVP),

що дозволяє знизити інвестиційні та репутаційні ризики. Як основний тип конкурентної поведінки рекомендовано диференціацію за якістю у поєднанні з нішуванням, що забезпечує стійку нецінову конкурентну перевагу в умовах високої цінової конкуренції.

Розроблена маркетингова програма визначає ключові переваги системи, описує її багаторівневу модель як комплексної послуги, окреслює межі ціноутворення та концепцію маркетингових комунікацій, орієнтованих на B2B-сегмент. У результаті сформовано цілісне бачення виходу проєкту на ринок і його подальшого розвитку, а також визначено умови, за яких система автоматичного керування теплообмінним апаратом може бути технічно обґрунтованою, економічно доцільною та комерційно перспективною за рахунок забезпечення стабільної якості, безпеки, прозорих регламентів взаємодії та масштабованості відповідно до зростання потреб нафтохімічних підприємств.

ВИСНОВОК

У межах магістерської роботи було здійснено ґрунтовне дослідження процесу алкілування ізобутану н-бутеном. У результаті розроблено систему автоматизації, що включає запропоновані технічні рішення та компоненти. Особливу увагу приділено ідентифікації моделі теплообмінника, на основі якої були створені та проаналізовані дві системи керування: на основі нечіткої логіки та МРС-регулятора. Проведено оптимізацію процесу відгону й побудовано моделі оптимального керування, зокрема варіант із часовими обмеженнями.

У ході дослідження порівняно ефективність обох систем керування — нечіткої та МРС.

Зіставлення результатів показало, що МРС-регулятор продемонстрував кращі характеристики: він простіший у налаштуванні, швидше виходить на усталений режим (14 секунд проти 170 у нечіткої системи), не викликає перерегулювання та краще адаптується до змін у системі. Крім того, МРС-методика ефективно працює за наявності точної математичної моделі об'єкта.

Результати досліджень також містять пропозицію щодо початкового стартап-проєкту, спрямованого на розробку інтелектуальної системи керування температурним режимом теплообмінника установки алкілування.

Отримані результати можуть стати ваговою основою для подальшого вдосконалення системи керування теплообмінником, що використовується у процесі алкілування ізобутану н-бутеном.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мартинюк В. А., Грицай В. О. Хімія і технологія палива. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 480 с.
2. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / М. В. Лукінюк; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с.
3. Данькевич А. О., Баранівський Д. М. / Аналітична модель контактного апарату у виробництві циклогексанолу гідруванням фенолу під тиском / Данькевич А. О., Баранівський Д. М. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» / УДК 661.1.
4. Лисиця С.С. Автоматизація технологічного процесу виробництва азотної кислоти / Лисиця С.С. – НТУ «Дніпровська політехніка» / Матеріали 77-ї студентської науково-технічної конференції «Тиждень студентської науки».
5. Проектування систем керування: навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології» / М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленський – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 342 с.
6. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг Криворізький коледж НАУ, 2019 р. – 366 с.
7. Павленко І. В., Симоновський В. І.: Методи ідентифікації параметрів математичних моделей коливальних процесів. Сумський державний університет. УДК 681.5.015:[539.3+66.074.1].
8. Методологія удосконаленого керування технологічними процесами. Комп'ютерний практикум: навч. посіб. для аспірантів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Укладачі: О. В. Степанець, Ю. І. Маріяш; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 26 с.

9. Апостолук В. О. А76 Інтелектуальні системи керування: конспект лекцій [Текст] / В. О. Апостолук, О. С. Апостолук. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 88 с. – Бібліогр.: с. 84 –85. – 50 пр.

10. Оптимальне керування системами.: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Л. Р. Ладієва; КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019, - 162с.

11. Rawlings J. B., Mayne D. Q., Diehl M. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*. Madison: Nob Hill Publishing, 2017.

12. Camacho E. F., Bordons C. *Model Predictive Control*. Springer, London, 2013.

13. Qin S. J., Badgwell T. A. *A survey of industrial model predictive control technology*. Control Engineering Practice, 2003.

14.Маркетинг стартап-проектів : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>

15.Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

16.Semeniuk, S., Levytskyi, V., Fomina, O., Fedorchenko, K., Yudina, N.,Ratynskiy, V., Shcherbatiuk, O., Bendiuh, V., & Zhurakivska, Y. (2024). Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(13 (129), 57–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304997> <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/304997> .

17.Yudina N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // Marketing and Management of

innovations. 3'2017, P. 245-256. DOI:10.21272/mmi.2017.3-23
<http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.

18.Yudina, N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №23 (2022). PP. 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.23.2022.264637>.

19.Yudina, N. Algorythm Of Marketing Decision Making. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №22 (2022). PP. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.22.2022.260163>.

20.Yudina, N. Future Study Implementation Into Marketing Activity Of Companies. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №19 (2021). PP. 1-9 URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/240315>.

21.Yudina, N., Pidlisna, O. Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №18 (2021). PP. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.18.2021.238105>.

22.Yudina, N., Instrumenty Zarządzania Przyszłością. Marketing Instytucji Naukowych I Badawczych, Vol. 38, Issue 4,, 2020, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa. Poland, Warszawa, p. 1-19 ISSN 2353-8503 eISSN 2353-8414. http://minib.pl/wp-content/uploads/2020/12/4-Yudina_pl.pdf. DOI: 10.2478/minib-2020-0027.

23.Yudina, N. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. Economic Bulletin of National Technical University of

Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". №17(2020). P. 372-383. URL :
<http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/216380/>

ДОДАТКИ

Специфікація устаткування

Позиція на схемі	Технологічний параметр	Середовище і місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва та характеристика	Тип моделі	Кількість	Завод-виробник
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Контроль температури								
1А	Температура	Алкілат	110..130 °С	Трубопр овід	Термоелектричний перетворювач, НСХ А-1, діапазон вимірювання 0...2200 (2500) °С, захисна арматура –оксид берилію, довжина монтажної частини 500 мм; діаметр захисної арматури 10 мм; умовний тиск – атмосферний або вакуум; інерційність 30 с; клас допуску 2	ТВР-3488	1	НВО «Електротермія », Приладобудівний з-д, м. Луцьк
1Б	Температура	Трубопровід	110..130 °С	Пульт керування	Мікропроцесорний регулятор, плата комутації КБЗ-28К-11, вихід АО1 = 4...20мА	МІК-21	1	ТОВ МІКРОЛ, м. Івано-Франківськ, вул. Автолітмашевська, 5, ООО «Мікрол»
1В	Температура	Трубопровід	110..130 °С	Трубопр овід	Регулювальний клапан, вхідний сигнал 4...20мА, живлення 230 В	РУСТ-410	1	ООО «СОВТЕК», ООО КСК-АВТОМАТИЗАЦІЯ (02660), м. Київ, вул. М. Раскової 4-б

2А	Температура	Середовище теплообмінника	140..160 °С	Конденсатор	Термоелектричний перетворювач, НСХ А-1, діапазон вимірювання 0...2200 (2500) °С, захисна арматура –оксид берилію, довжина монтажної частини 500 мм; діаметр захисної арматури 10 мм; умовний тиск – атмосферний або вакуум; інерційність 30 с; клас допуску 2	ТВР-3488	1	НВО «Електротермія», Приладобудівний 3-д, м. Луцьк
2Б	Температура	Те саме	Те саме	Пульт керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; $I_{\text{вих}} = 0 \dots 5 \text{ мА}$, $4 \dots 20 \text{ мА}$; виходи: 1 аналоговий і 2 дискретні; НСХ перетворювачів: термоелектричних – А-1, В, К, L, S, опору – 50П, 100П, 50М, 100М; граничнодопустима зведе-на похибка 0,2 %; цифрова індикація ($4 \dots 20 \text{ мА}$), $U_{\text{вих}} = 0 \dots 10 \text{ В}$; цифровий інтерфейс RS-485	ІТМ-11	1	ВАТ «Підприємство “МІКРОЛ”», м. Івано-Франківськ
Електроапарати								
HL1 HL2 HL3 HL4	Сигналізація	-	-	Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна (LED) з жовтим індикатором (матриця), $W_{\text{мах}} = 0,01 \text{ Вт}$, $U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}$, 50 Гц, монтажна глибина ніші: 72,5 мм; кріплення на DIN-рейку	ЛС-47М	2	«ІЕК Україна», м. Вишневе Київська обл.