

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

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

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ Віталій Цапар

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

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

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

на тему: Автоматизація процесів керування у виробництві вінілхлориду
гідрохлоруванням ацетилену _____

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

_____ Виборний Віталій Арсенійович _____
(прізвище, ім’я, по батькові)

Керівник _____ ст. викл. Жураковський Ярослав Юрійович _____
(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»**

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
(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
Виборний Віталій Арсенійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесів керування у виробництві
вінілхлориду гідрохлоруванням ацетилену _____ ,
науковий керівник дисертації Жураковський Я. Ю., ст. викл. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження процес виробництва вінілхлориду гідрохлоруванням
ацетилену _____ та _____ процес _____ охолодження _____ в
холодильнику _____

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

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Дослідити процес виробництва вінілхлориду гідрохлоруванням ацетилену та процес охолодження в холодильнику; розробити математичну модель досліджуваного об'єкту; спроектувати та дослідити систему керування в холодильнику

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

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

9. Дата видачі завдання 01.09.2025

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 холодильника	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 стартап-проекту	19.12.2025	

Студент

Віталій, ВИБОРНИЙ

Науковий керівник дисертації

Ярослав, ЖУРАКОВСЬКИЙ

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

В магістерській дисертації розглядається процес виробництва вінілхлориду гідрохлоруванням ацетилену. Дисертація складається з пояснювальної записки, яка складається з 78 сторінок і містить 49 рисунків, 22 таблиці, 10 літературних джерел і один додаток.

Метою дослідження є розробка системи, яка допоможе керувати процесом охолодження в технологічному об'єкті холодильник на виробництві вінілхлориду гідрохлоруванням ацетилену, щоб підвищити ефективність виробництва.

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

На основі моделі, яка показує процес охолодження 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 автоматизованої лінії переробки полівінілхлориду з інтелектуальним керуванням.

Для виконання роботи були використані методи математичного моделювання, оптимізації та автоматичного керування. Результати дослідження можна використовувати для проектування системи керування технологічним процесом з метою підвищення ефективності процесу.

Ключові слова: холодильник, ацетилен, вінілхлорид, охолодження, оптимізація керування, схема автоматизації, модель, система керування.

ABSTRACT

The master's thesis examines the process of vinyl chloride production by acetylene hydrochlorination. The thesis consists of an explanatory report comprising 77 pages and includes 49 figures, 22 tables, 10 references, and one appendix.

The aim of the study is to develop a system that helps control the cooling process in the refrigeration unit of the vinyl chloride production plant based on acetylene hydrochlorination, in order to improve production efficiency.

The research involved developing an automation scheme for the refrigeration unit as well as identifying a model of the studied object.

Based on the model representing the cooling process in the apparatus, a control system for this process was designed and studied. The system uses an MPC controller and fuzzy logic to ensure a fast transition to the steady-state value with possible overshoot. In addition, the model was used for control optimization.

Furthermore, an idea for a startup project was proposed — the development of an intelligent automated line for polyvinyl chloride processing

To perform the work, methods of mathematical modeling, optimization and automatic control were used. The results of the study can be used to design a process control system with the aim of increasing the efficiency of the process..

Keywords: refrigerator, acetylene, vinyl chloride, cooling, control optimization, automation scheme, model, control system.

Зміст

ВСТУП	8
1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ВІНІЛХЛОРИДУ ГІДРОХЛОРУВАННЯМ АЦЕТИЛЕНУ ТА АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА НА ВИРОБНИЦТВІ.....	9
1.1. Аналіз вінілхлориду та його виробництва	9
1.2. Аналіз технологічної схеми та процесу виробництва вінілхлориду гідрохлоруванням ацетилену	10
1.3. Постановка задачі на дослідження.....	13
2. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБ'ЄКТІ ХОЛОДИЛЬНИК	14
2.1. Аргументування вибору засобів автоматизації для апарату відповідно аналізу процесів що відбуваються в ньому.....	14
2.2. Опис функціональної схеми автоматизації процесів що відбуваються в холодильнику	14
3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ	17
3.1. Математичне моделювання каналу керування на основі експериментальних даних	17
3.2. Ідентифікація моделі статички	20
3.3. Ідентифікація динамічної моделі	21
3.4. Створення імітаційної моделі засобами <i>Matlab-Simulink</i>	24
4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ ХОЛОДИЛЬНИК.....	27
4.1. Синтез системи з використанням МРС-регулятора	27
4.2. Розробка нечіткої системи керування холодильника.....	31

5. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОХОЛОДЖЕННЯ В ХОЛОДИЛЬНИКУ	38
5.1. Вибір критерію оптимальності	38
5.2. Виведення необхідних умов оптимальності	38
5.3. Розрахунок оптимального програмного керування	39
5.4. Пошук оптимального програмного керування з зворотним зв'язком	43
5.4.1. Розробка оптимального лінійно-квадратичного П-регулятора..	43
5.4.2. Розроблення оптимального лінійно-квадратичного ПІ- регулятора	48
5.4.3. Зіставлення отриманих результатів для оптимального керування із зворотнім зв'язком	51
5.5. Керування за мінімальним часом за умови обмеження по керуванню	54
6. СТВОРЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ	58
6.1. Опис ідеї проекту	58
6.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	59
6.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	60
6.4. Розроблення ринкової стратегії та вибір стратегії конкурентної поведінки.....	68
6.5. Формування маркетингової концепції товару	70
ВИСНОВОК.....	74
ЛІТЕРАТУРА	75
ДОДАТКИ.....	77
Специфікація устаткування.....	77

ВСТУП

Теплообмінне обладнання відіграє важливу роль у хімічній промисловості, зокрема на етапі підготовки сировини у виробництві вінілхлориду методом гідрохлорування ацетилену. Ефективна робота холодильного апарата для охолодження ацетилену безпосередньо визначає продуктивність та безпеку всього технологічного комплексу. Будь-які відхилення в роботі цього вузла можуть призвести до порушення регламенту та зниження якості кінцевого продукту.

Метою дослідницької роботи є підвищення ефективності процесу виробництва вінілхлориду шляхом розробки та впровадження удосконаленої системи автоматичного керування холодильником. Це вимагає комплексного підходу до аналізу об'єкта та вибору технічних засобів автоматизації.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

1. Аналіз технологічного процесу та особливостей роботи досліджуваного теплообмінного апарата.
2. Розробка схеми автоматизації.
3. Ідентифікація математичної моделі холодильника як об'єкта керування.
4. Синтез та порівняльний аналіз ефективності різних систем керування.
5. Оптимізація керування розробленої системи.

Отримані результати дослідження можуть бути використані для підвищення стабільності температурного режиму теплообмінного апарату, зменшення ймовірності аварійних ситуацій та підвищити загальну ефективність виробництва.

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ВІНІЛХЛОРИДУ ГІДРОХЛОРУВАННЯМ АЦЕТИЛЕНУ ТА АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА НА ВИРОБНИЦТВІ

1.1. Аналіз вінілхлориду та його виробництва

Вінілхлорид належить до класу галогенопохідних ненасичених вуглеводнів і описується хімічною формулою C_2H_3Cl [7]. При нормальних умов речовина є безбарвним легкозаймистим газом. Вінілхлорид легко піддається скрапленню під тиском, малорозчинний у воді, проте добре розчинний у більшості органічних розчинників. Молекула вінілхлориду має подвійний зв'язок, що надає високу реакційною здатністю та схильність до полімеризації. Ця властивість визначає основне промислове застосування речовини для синтезу полівінілхлориду. Він є одним з наймасовіших термопластів, що знаходить широке застосування у виробництві труб, ізоляції, будівництві, медицині та машинобудуванні.

Основним промисловим способом одержання вінілхлориду є термічне або каталітичне хлорування етилену з подальшою дегідрохлоризацією 1,2-дихлоретану. Інший, менш поширений метод — це реакція ацетилену з хлороводнем у присутності каталізатора (зазвичай солей ртуті). Вибір технологічного маршруту залежить від доступності сировини та екологічних вимог до виробництва.

Вінілхлорид характеризується високою реакційною здатністю через наявність подвійного зв'язку між атомами вуглецю, що зумовлює його схильність до реакцій полімеризації [7]. Саме ця властивість робить його ключовим мономером у виробництві термопластів. Разом з тим, речовина є токсичною і канцерогенною; тривале або повторне вдихання парів вінілхлориду може призвести до ураження печінки, нервової системи та розвитку онкологічних захворювань.

З огляду на токсичність, усі технологічні процеси з використанням вінілхлориду проводяться у герметичних системах із суворим контролем

параметрів безпеки. Попри небезпеку, сполука залишається одним із найважливіших продуктів органічного синтезу, що має величезне значення для сучасної промисловості завдяки своїй ролі у створенні багатофункціональних полімерних матеріалів.

1.2. Аналіз технологічної схеми та процесу виробництва вінілхлориду гідрохлоруванням ацетилену

Промисловий синтез вінілхлориду базується на газофазному гетерогенно-каталітичному процесі гідрохлоруванні ацетилену. Як каталізатор у цьому процесі використовується активоване вугілля, просочене хлоридом ртуті HgCl_2 з масовою часткою 10%. Токсичність ртутних сполук та вибухонебезпечні властивості ацетилену висувають підвищені вимоги до безпеки виробництва. З огляду на значний екзотермічний ефект реакції, технологічний процес реалізується у реакторах трубчастого типу. Конструкція апарата передбачає розміщення каталізатора у внутрішньому просторі труб, через які подається реакційна газова суміш, тоді як у міжтрубному просторі циркулює теплоносієм для відведення тепла. Як холодоагенти застосовуються воду або водний конденсат. Використання води під тиском дозволяє забезпечити режим кипіння, що сприяє ефективній утилізації тепла з екзотермічної реакції та подальшої генерації пари.

Підготовка сировини є критичним етапом виробництва. Вихідні компоненти — очищений ацетилен та хлорид водню — надходять через попередню обробку. Канал подачі ацетилену оснащується вогнеперешкодником для гарантування безпеки. Процес осушення ацетилену після вогнеперешкодника здійснюється у два етапи: спочатку шляхом конденсації вологи у теплообмінному апараті та адсорбцією твердим лугом в осушувальній колоні. Підготовлений ацетилен змішується із сухим хлоридом водню у змішувачі, після чого суміш надходить до реактора. Забезпечення мінімального вологовмісту реагентів є обов'язковою умовою для запобігання побічній реакції утворення ацетальдегіду та зниження корозійного впливу на обладнання.

Реакційний процес відбувається при проходженні газової суміші крізь шар твердого каталізатора. Для зміщення хімічної рівноваги та підвищення ступеня конверсії ацетилену хлорид водню подається у надлишку 5–10 %. Оптимальний температурний режим процесу становить 160–180 °С. Такий діапазон забезпечує високу швидкість реакції при мінімізації виносу леткого хлориду ртуті.

Ефективність процесу реакції характеризуються ступенем конверсії ацетилену на рівні 97–98 %. Склад контактного газу на виході з реактора зазвичай включає: 93 % вінілхлориду, 5 % HCl, 0,5–1,0 % ацетилену, а також ацетальдегід (0,3 %) та 1,1-дихлоретан (1,1 %). Газові продукти забирають із собою пари сулеми. Стадія виділення та очищення цільового продукту розпочинається з охолодження реакційних газів, які містять пари сулеми. Очищення від залишків хлороводню здійснюється у скруберній системі, де послідовно використовуються соляна кислота (концентрації 20 %), вода та розчин лугу. Після стадії мокрого очищення газ піддається осушенню та стисненню до 0,7–0,8 МПа. Розділення суміші відбувається методом ректифікації, де спочатку відокремлюється залишок 1,1-дихлоретан, а потім — легколеткі компоненти (ацетилен, ацетальдегід), що дозволяє отримати вінілхлорид [9].

Технологічна схема процесу виробництва вінілхлориду гідрохлоруванням ацетилену наведена на рисунку 1.1.

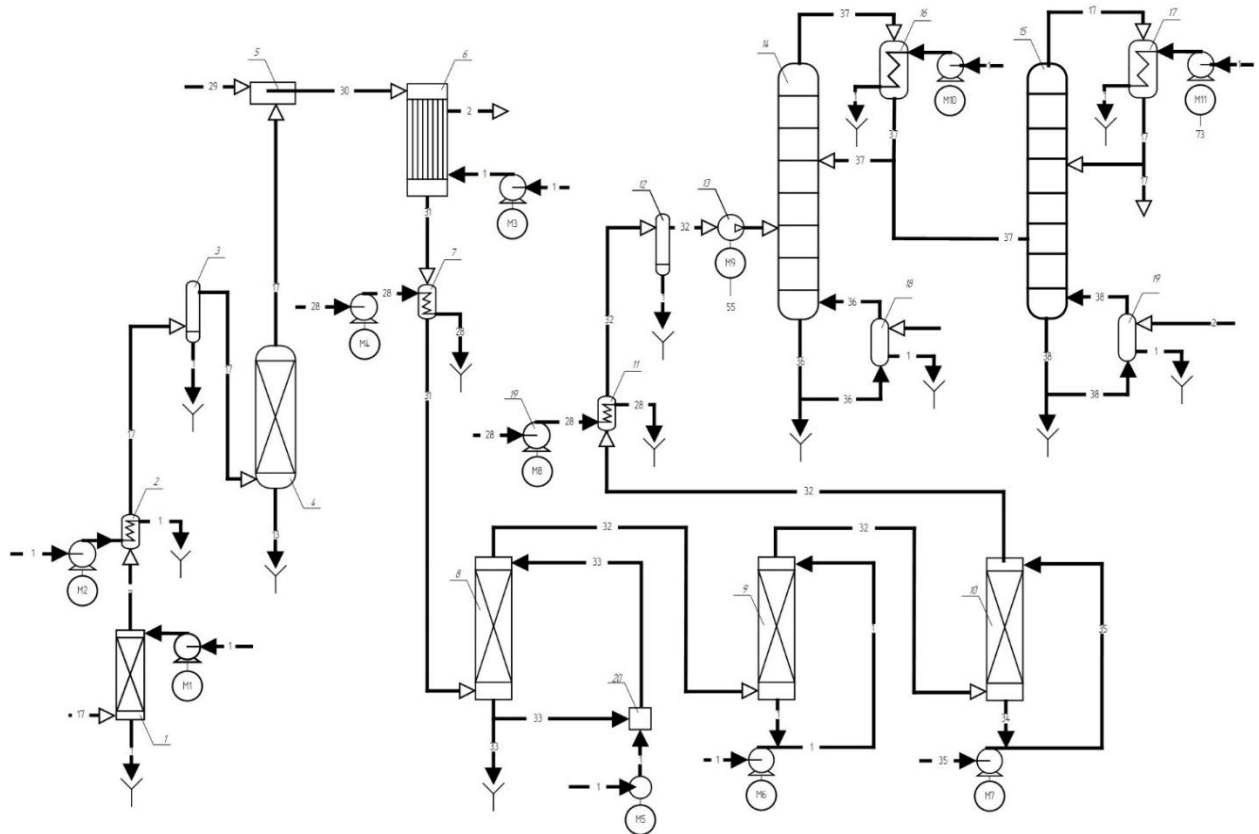


Рис. 1.1 – Схема технологічного процесу виробництва вінілхлориду гідрохлоруванням ацетилену: 1 – вогнеперешкодник; 2,7,11 – холодильник; 3,12 – сепаратор; 4 – осушувальна колона; 5,20 – змішувач; 6 – реактор; 8,9,10 – скруббер; 13 – компресор; 14,15 – колона ректифікації; 16,17 – дефлегматор; 18,19 – кип'ятильник.

Одержання вінілхлориду методом гідрохлорування ацетилену належить до поширених промислових технологій. Недоліком даного методу є висока леткість цієї сполуки у поєднанні з її токсичними властивостями створює потенційні загрози для персоналу та довкілля, що вимагає суворого дотримання заходів із ізоляції та безпеки.

1.3. Постановка задачі на дослідження

Теплообмінні апарати, зокрема холодильники, мають поширене використання у різних промислових виробництвах, не лише в процесі виробництва вінілхлориду. Незважаючи на це інформації про системи автоматичного керування такими об'єктами недостатньо, що зумовлює потребу у подальших дослідженнях та розробленні більш ефективних підходів до їх реалізації.

За мету дослідження було встановлено розв'язок наведених задач:

1. Проектування для теплообмінного апарату схеми автоматизації;
2. Ідентифікація математичної моделі для теплообмінника;
3. Створення та порівняння систем керування теплообмінного апарату за допомогою нечіткої логіки та алгоритмів оптимізації;
4. Дослідження варіантів оптимального керування процесом охолодження;
5. Створення стартап проєкту.

2. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБ'ЄКТІ ХОЛОДИЛЬНИК

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

Основними факторами, які впливають на процес охолодження ацетилену є температура в холодильнику.

Для забезпечення температури ацетилену 35..45 °С на виході, параметри холодильника повинні мати такі властивості:

- Рівномірний потік ацетилену 4.2..4.9 м³/год;
- Температура в холодильнику 30..40 °С;

Для забезпечення правильної температури в холодильнику потрібно дотримуватись таких вимог:

- Стабільна витрата води 4.5..6.5 м³/год;
- Температура води 15..25 °С. [10]

2.2. Опис функціональної схеми автоматизації процесів що відбуваються в холодильнику

Для процесу охолодження основними параметрами в холодильнику є температура ацетилену на виході з апарата та температура в середині апарату. Технологічну схему автоматизації досліджуваного об'єкту процесу охолодження наведено на рисунках 2.1 та 2.2.

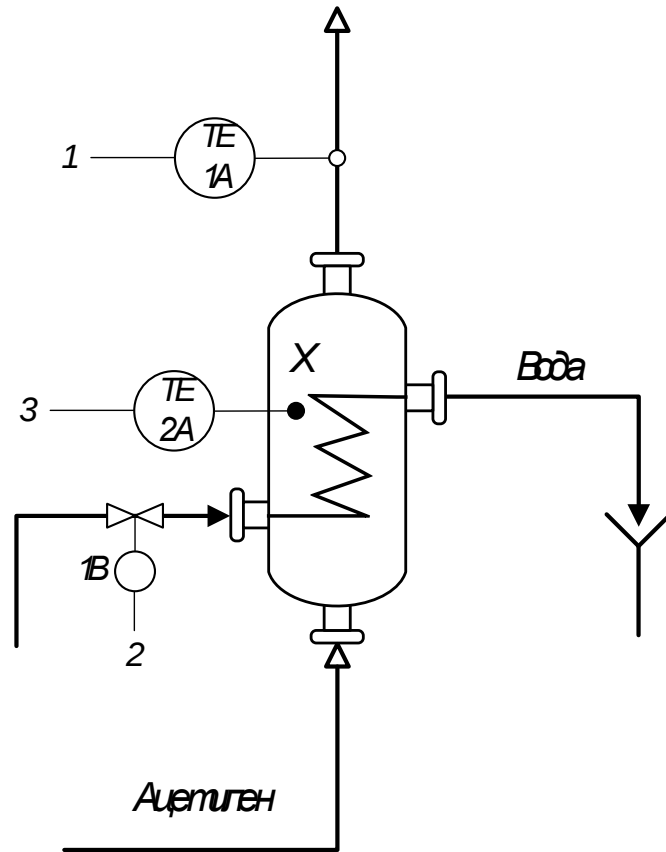


Рис. 2.1 – Фрагмент схеми автоматизації процесу охолодження:

X – Холодильник

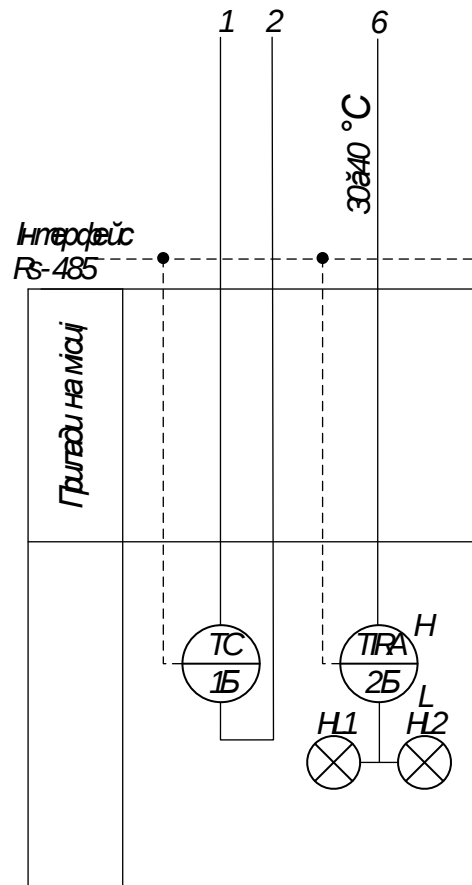


Рис. 2.2 – Фрагмент схеми автоматизації холодильника

Холодильник використовується для охолодження ацетилену. Ключовим параметром є температура ацетилену на виході з апарату. Контроль за температурою ацетилену здійснюється за рахунок вмонтованої термопари (1А) в трубопровід, що збирає показники температури ацетилену. На наступному етапі дані передаються до цифрового мікропроцесорного регулятора (1Б) на пульті управління, звідки сигнал переходить на виконавчий механізм (1В), регульований клапан, що вмонтований в трубопровід подачі холодної води.

Одночасно з цим, потрібно забезпечувати контроль температури в середині холодильника за рахунок термоелектричний перетворювача (2А). Наступним кроком дані передаються на відображення до реєструвального приладу (2Б) з цифровим дисплеєм, що має світлодіодні лампочки (HL1 і HL2) для сигналізації про стан обладнання, відповідно червоного та жовтого кольору.

3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ

3.1. Математичне моделювання каналу керування на основі експериментальних даних

Розробка системи автоматичного керування вимагає наявності математичної моделі, яка з достатньою точністю описує статичні та динамічні властивості технологічного об'єкту. Ефективним інструментом отримання такої моделі є метод ідентифікації.

Основна мета ідентифікації полягає у встановленні залежності між вхідними та вихідними змінними на основі експериментальних даних, за яких її відгук на вхідне збурення максимально наближається до реальної поведінки технологічного апарату. Отримані результати будуть використані для подальшого аналізу параметрів системи та оптимізації системи автоматичного керування.

Об'єктом дослідження обрано канал «витрата холодоагенту — температура ацетилену». Оскільки температурний режим ацетилену є визначальним для дотримання регламенту виробництва вінілхлориду методом гідрохлорування.

З огляду на невідомість природи процесів теплообміну, доцільно застосувати концепцію «чорної скриньки». Такий підхід дозволяє абстрагуватися від внутрішньої структури об'єкта та зосередитися на встановленні закономірностей впливу керуючого впливу на вихідний параметр.

На рисунку 3.1 наведено схему апарату охолодження, що використовується для проведення експериментальних досліджень.

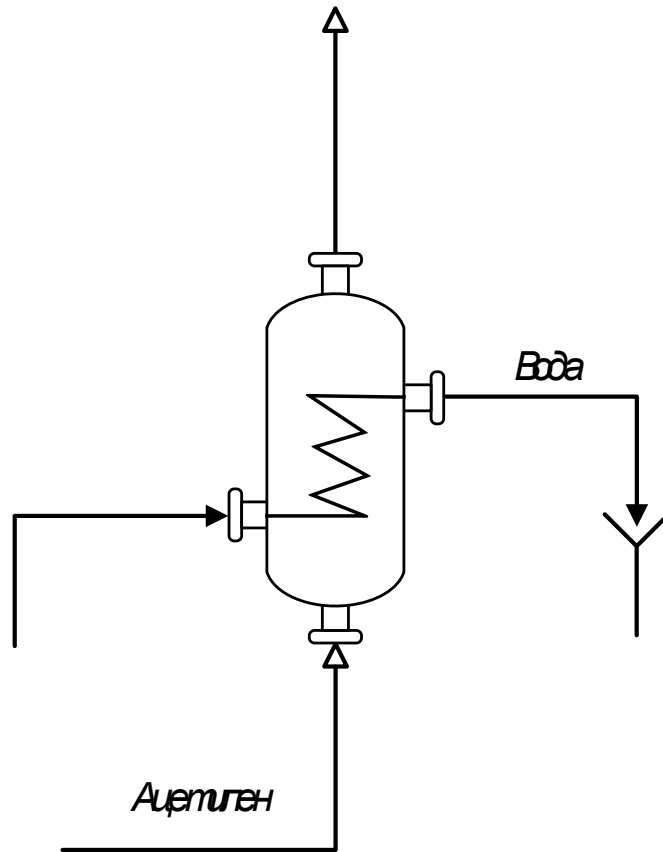


Рис 3.1 – Структура функціональної схеми холодильника

Для ідентифікації параметрів об'єкта система переводиться в режим ручного керування, щоб уникнути впливу компенсацій збурень. Перед початком кожного дослідження забезпечується стабілізація технологічного режиму до досягнення усталеного значення вихідної величини.

Експериментальні дослідження включають п'ять ітерацій застосування збурення за каналом «витрата холодоагенту»: три — зі збільшенням витрати холодоагенту, та дві — зі зменшенням. Збір даних проводився після завершення перехідного процесу та відновлення системи.

Динаміку зміни вхідного та вихідного сигналів у часі за результатами експериментальних досліджень відображено на рисунках 3.2 та 3.3.

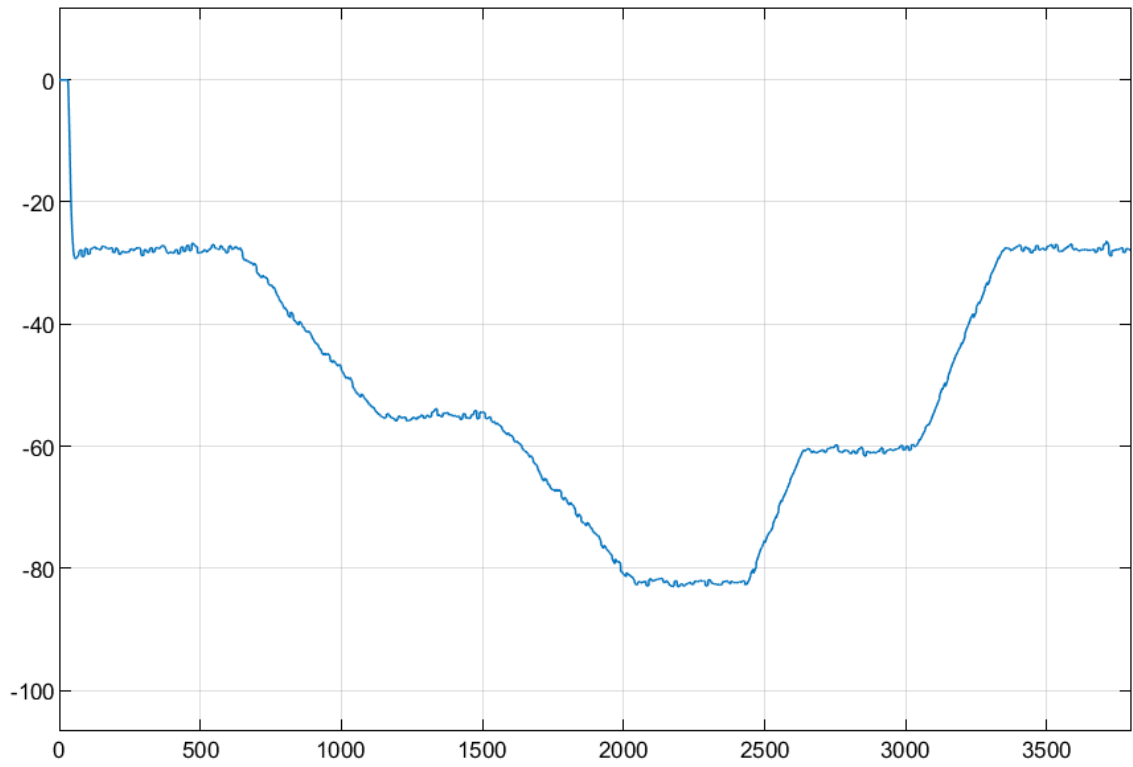


Рис. 3.2 – Графік зміни температури ацетилену

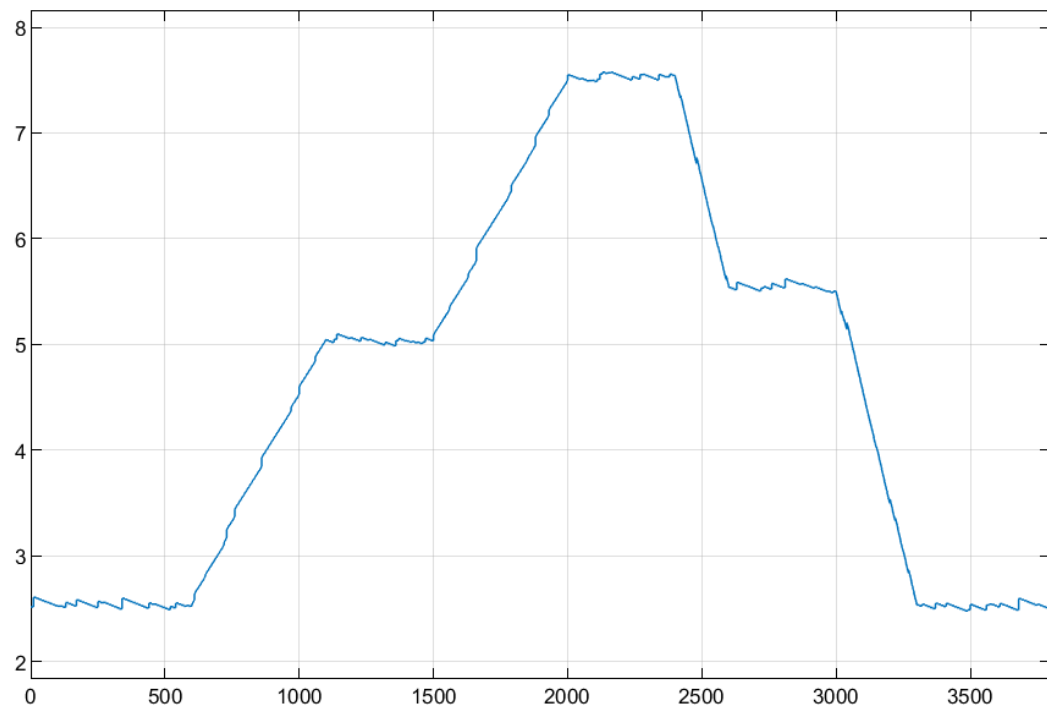


Рис. 3.3 – Графік зміни витрати води

3.2. Ідентифікація моделі статички

Ідентифікація статичної моделі виконується на основі експериментальних даних стаціонарного режиму, які наведено в таблиці 3.1. Для визначення характеристики статичного режиму об'єкта дослідження за каналом «витрата холодоагенту – температура ацетилену» використовуємо метод найменших квадратів.

Таблиця 3.1 – Експериментальні дані

№	Витрата води (X)	Температура ацетилену (Y)
1	2.43	-28.7
2	5.1	-54.9
3	7.49	-82.5
4	5.63	-61.3
5	2.44	-27.9

Методом найменших квадратів, називають метод регресійного аналізу, який полягає визначенні невідомих параметрів регресійної моделі.

Розрахунок коефіцієнтів регресії здійснено у середовищі *MathCad*, в результаті чого отримано наступні значення:

$$b_0 := \text{intercept}(X, Y) = -2.086 \quad (3.1)$$

$$b_1 := \text{slope}(X, Y) = -10.605 \quad (3.2)$$

Отримане рівняння статичного режиму для каналу «витрата холодоагенту – температура ацетилену»:

$$\theta_{\text{вих}} = -10.605 \cdot F_{\text{в}} - 2.086 \quad (3.3)$$

Графічно статичну характеристику представлено на рисунку 3.4.

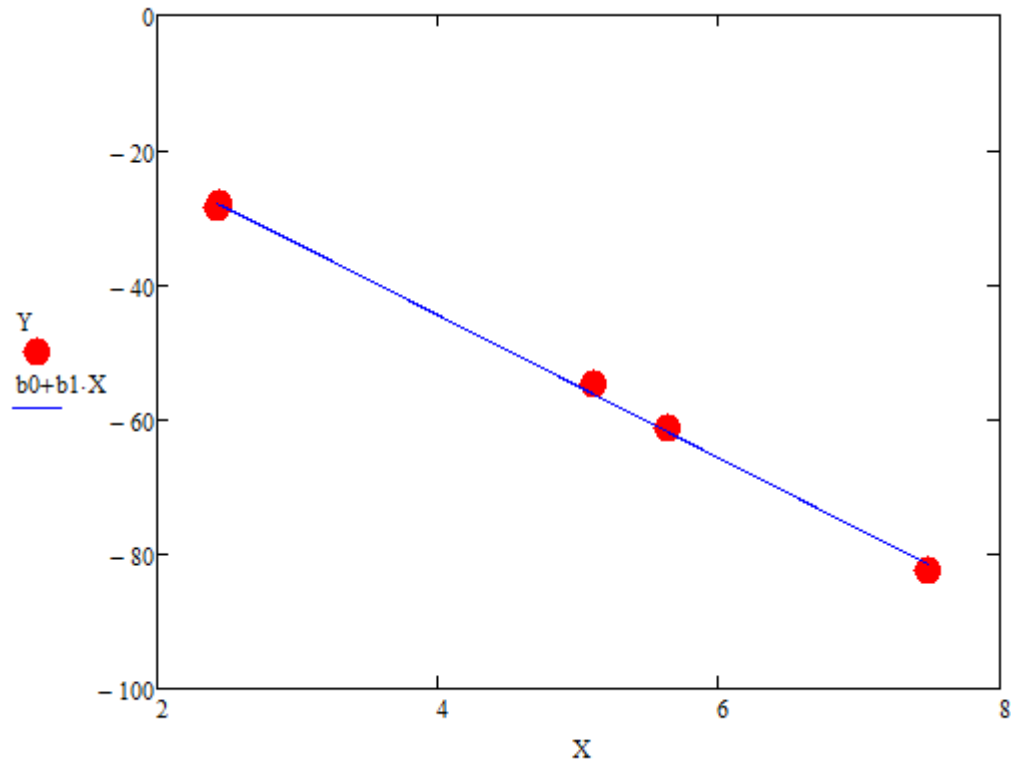


Рис. 3.4 – Статична характеристика холодильника каналу керування

3.3. Ідентифікація динамічної моделі

Ідентифікація динамічної моделі реалізовано з використанням програмного комплексу *MatLab* та додатку *System Identification Toolbox (SIT)*. Зазначений інструментарій дозволяє проводити дослідження динамічних властивостей та верифікацію отриманих моделей.

Алгоритм ідентифікації параметрів передбачає виконання таких етапів:

1. Формування масивів даних вхідних та вихідних сигналів об'єкта.
2. Попередня обробка даних, що включає фільтрацію шумів та видалення трендів.
3. Визначення структури майбутньої моделі.
4. Оцінювання параметрів та вибір оптимальної моделі на основі експериментально вимірянних даних та заданого критерію якості.
5. Перевірка моделі та аналіз її характеристик.

Процес ідентифікації можна вважати завершеним за умови відповідності моделі вимогам. У випадку незадовільних результатів здійснюється повернення до третього етапу для визначення іншої структури моделі.

Результати ідентифікації, включаючи перелік синтезованих моделей, відображаються в інтерфейсі *SIT*, поданого на рисунку 3.5.

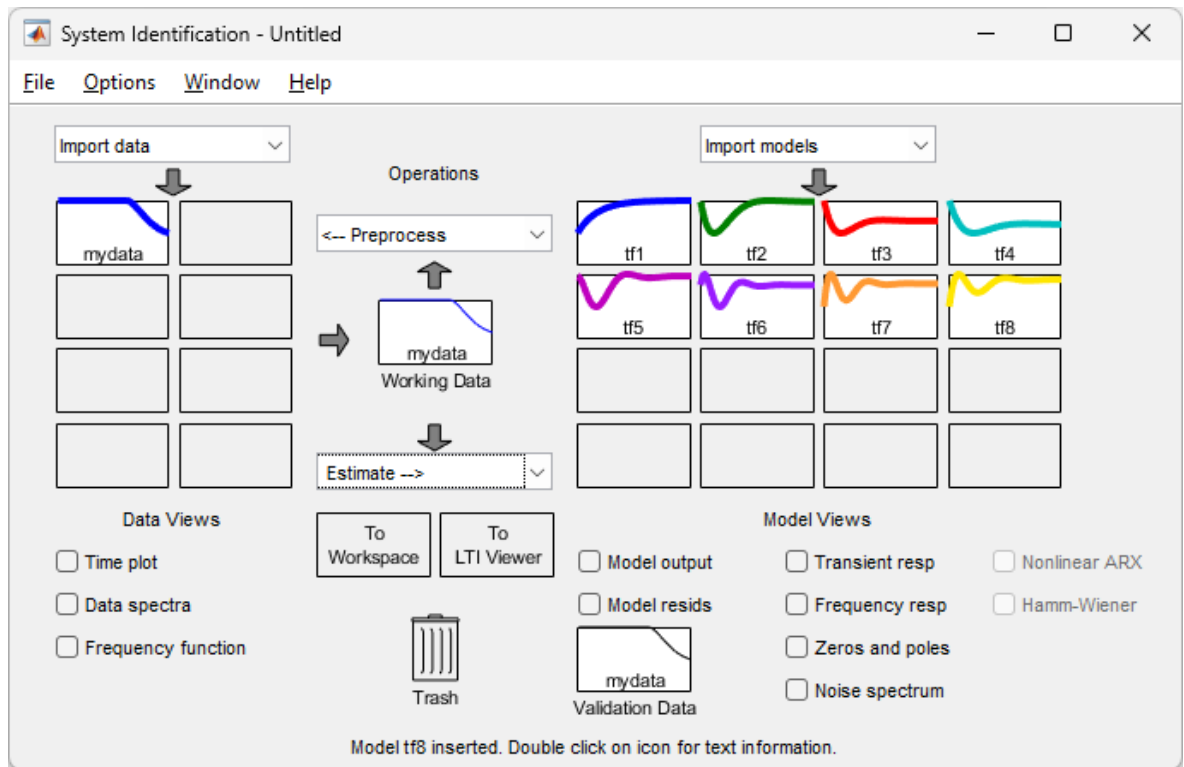


Рис. 3.5 – Вікно програмного додатку *SIT*

Графіки функцій апроксимацій та числові значення критеріїв точності для моделей наведено на рисунку 3.6.

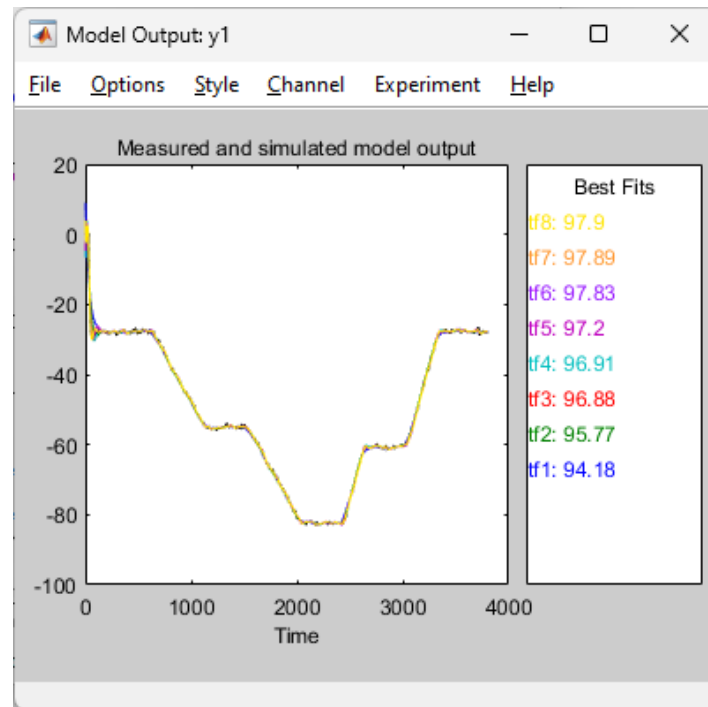


Рис. 3.6 – Графіки апроксимуючих функцій зі значеннями критеріїв точності

Перехідні характеристики ідентифікованих моделей проілюстровано на рисунку 3.7.

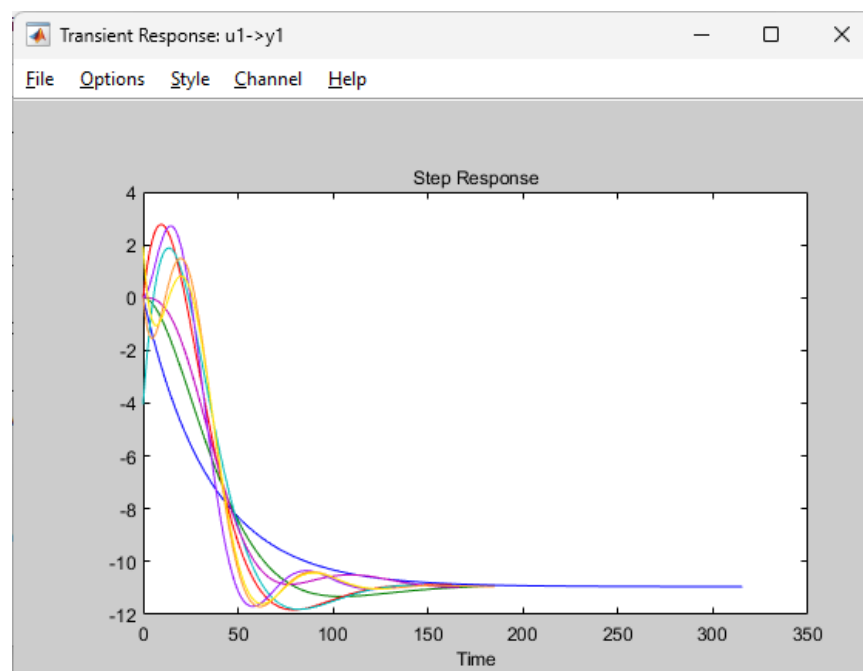


Рис. 3.7 – Перехідні характеристики ідентифікованих моделей за каналом керування

Аналіз отриманих результатів показав, що підвищення порядку моделі не забезпечує пропорційного покращення її якості. Виходячи з цього, оптимальним рішенням обрано апроксимацію ланкою другого порядку.

Отримана передавальна функція об'єкту ідентифікації має вигляд:

$$W = \frac{-0.02114}{s^2 + 0.06416 \cdot s + 0.001933} \quad (3.4)$$

Графік перехідної характеристики, що відповідає обраній математичній моделі, зображено на рисунку 3.8.

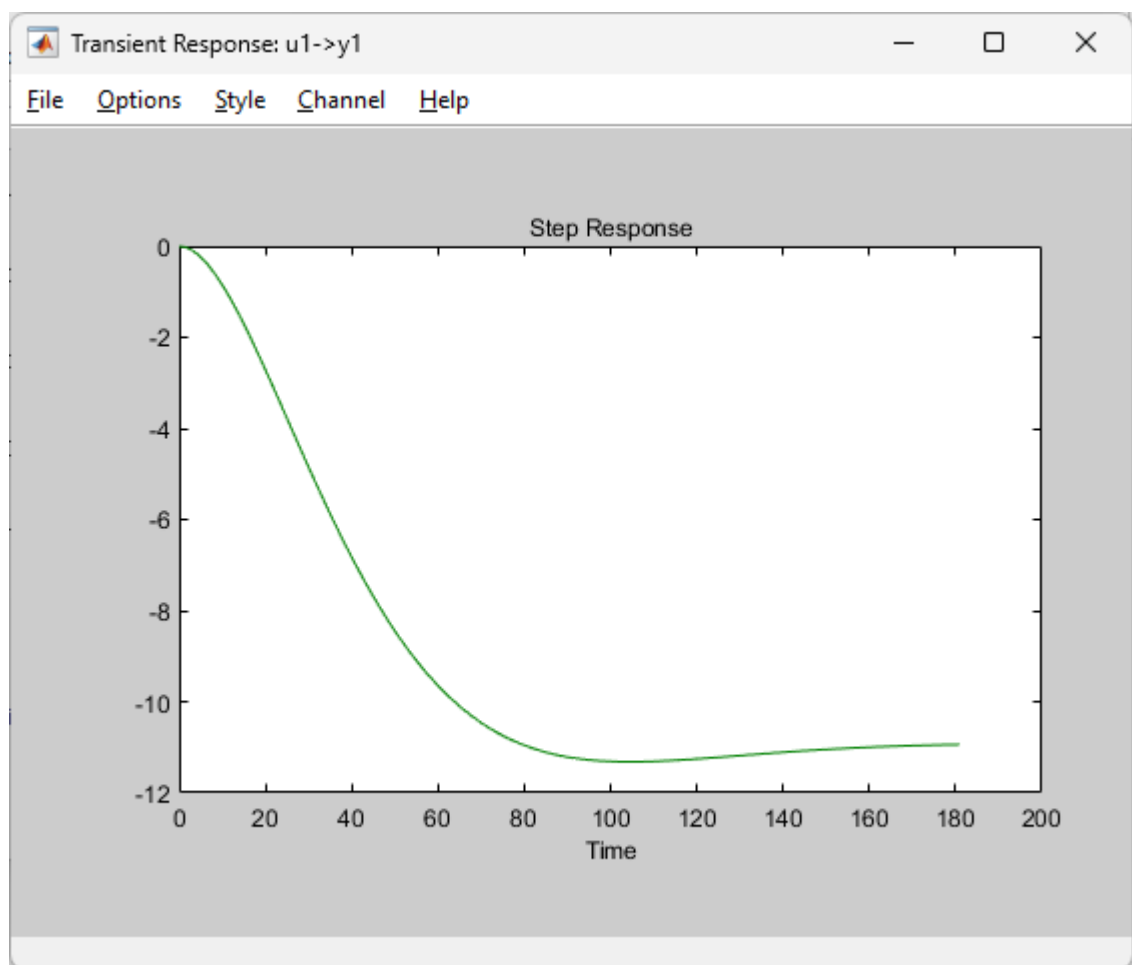


Рис. 3.8 – Перехідна характеристика моделі за каналом керування

3.4. Створення імітаційної моделі засобами *Matlab-Simulink*

Для детального дослідження об'єкта керування було прийнято рішення про розробку імітаційної моделі у програмному засобі *Matlab-Simulink* (рисунок

3.9). Це дозволить проаналізувати динамічні характеристики системи та її реакцію на вхідні впливи.

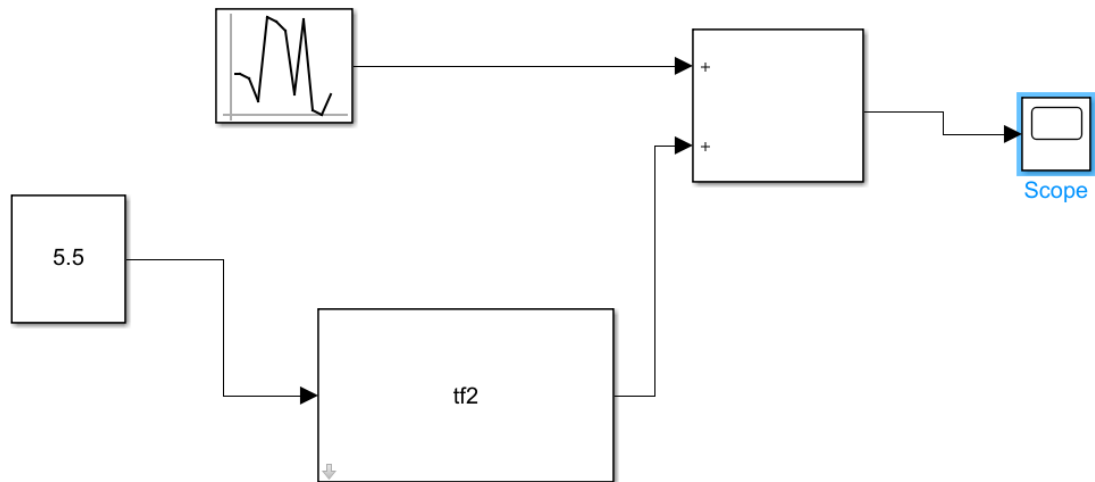


Рис. 3.9 – Структурна схема імітаційної моделі об'єкта з урахуванням збурень

Результат моделювання динаміки системи за досліджуваним каналом керування представлено у вигляді перехідної характеристики на рисунку 3.10.

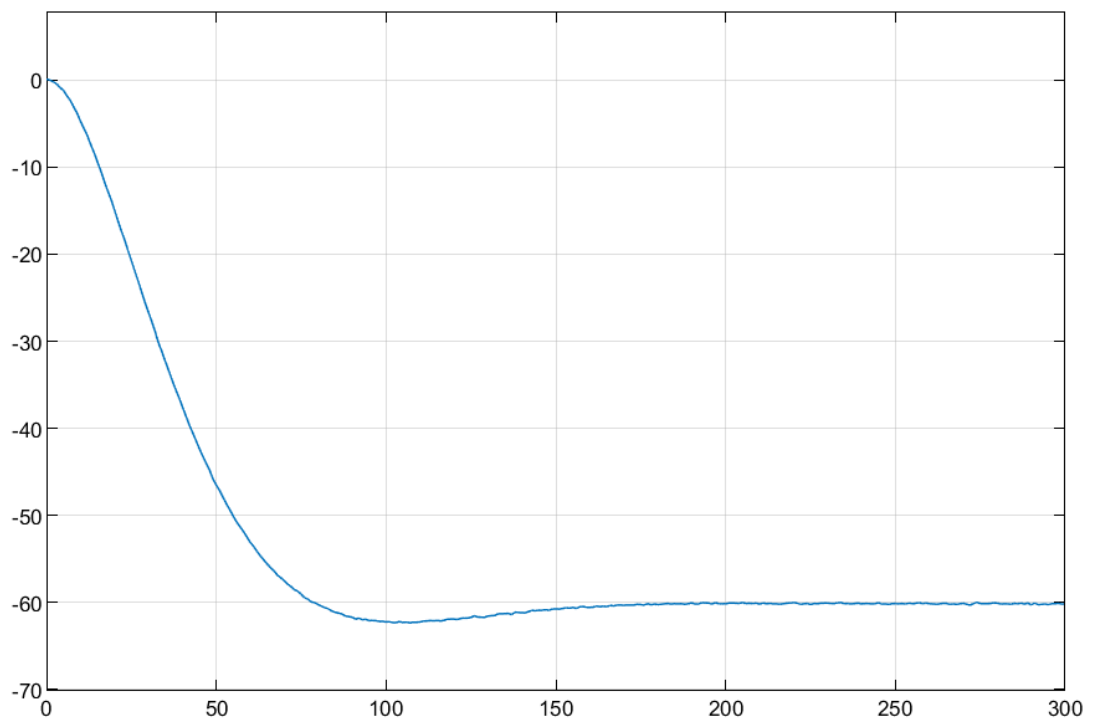


Рис. 3.10 – Графік перехідної характеристики каналу керування

Висновок: У даному розділі виконано аналіз та ідентифікацію параметрів технологічного об'єкта — холодильника для охолодження ацетилену. Застосування інструментарію *MATLAB/Simulink* дозволило отримати математичний опис об'єкта у вигляді передавальної функції та дослідити його перехідну характеристику за основним каналом керування.

4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ ХОЛОДИЛЬНИК

4.1. Синтез системи з використанням MPC-регулятора

Підхід до керування з прогнозуючою моделлю (*MPC*) є одним із найефективніших сучасних методів управління складними технологічними процесами, що функціонують в умовах встановлених обмежень. Даний підхід широко застосовується у хімічній, металургійній та нафтопереробній промисловості.

Перевагою керування з прогнозуючою моделлю *MPC* є здатність оптимізувати поточні керуючі впливи з урахуванням прогнозу поведінки системи на майбутньому часовому інтервалі. На відміну від лінійно-квадратичного регулятора (*LQR*), який оптимізує керування для всього часового горизонту одноразово, *MPC* здійснює перерахунок оптимальної траєкторії на кожному кроці дискретизації. Це дозволяє враховувати динамічні зміни та обмеження, що недоступно для класичних ПІД-регуляторів

Для налаштування контролера буде використано спрощену модель об'єкта, що дозволяє уникнути проблем, пов'язаних з не лінійністю оригінальної системи. Метою синтезу системи є забезпечення оптимального температурного режиму процесу охолодження за встановленим регламентом.

Структурна схема розробленої системи керування зображена на рисунку 4.1.

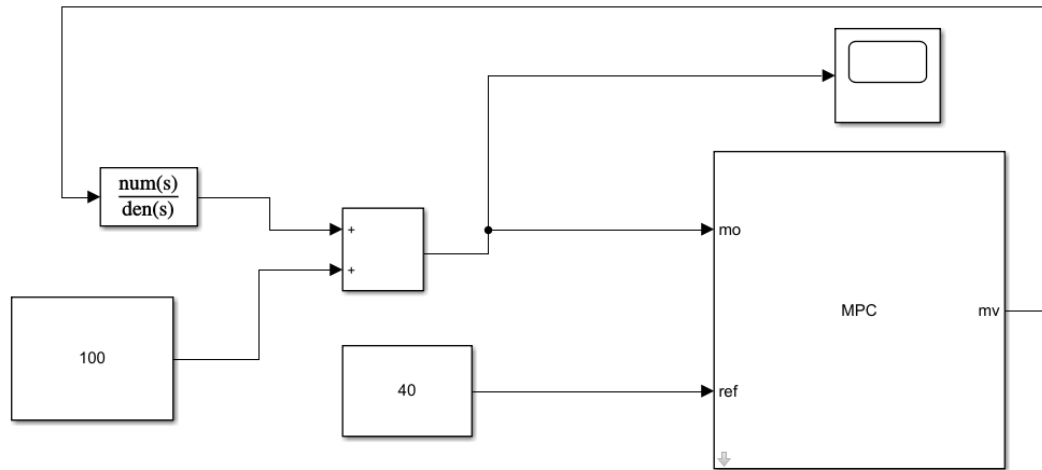


Рис. 4.1 – Структурна схема системи автоматичного керування на базі MPC-регулятора

Налаштування параметрів регулятора, зокрема визначення вхідних та вихідних змінних, а також обмежень на них, реалізовано в середовищі MATLAB (рисунок 4.2).

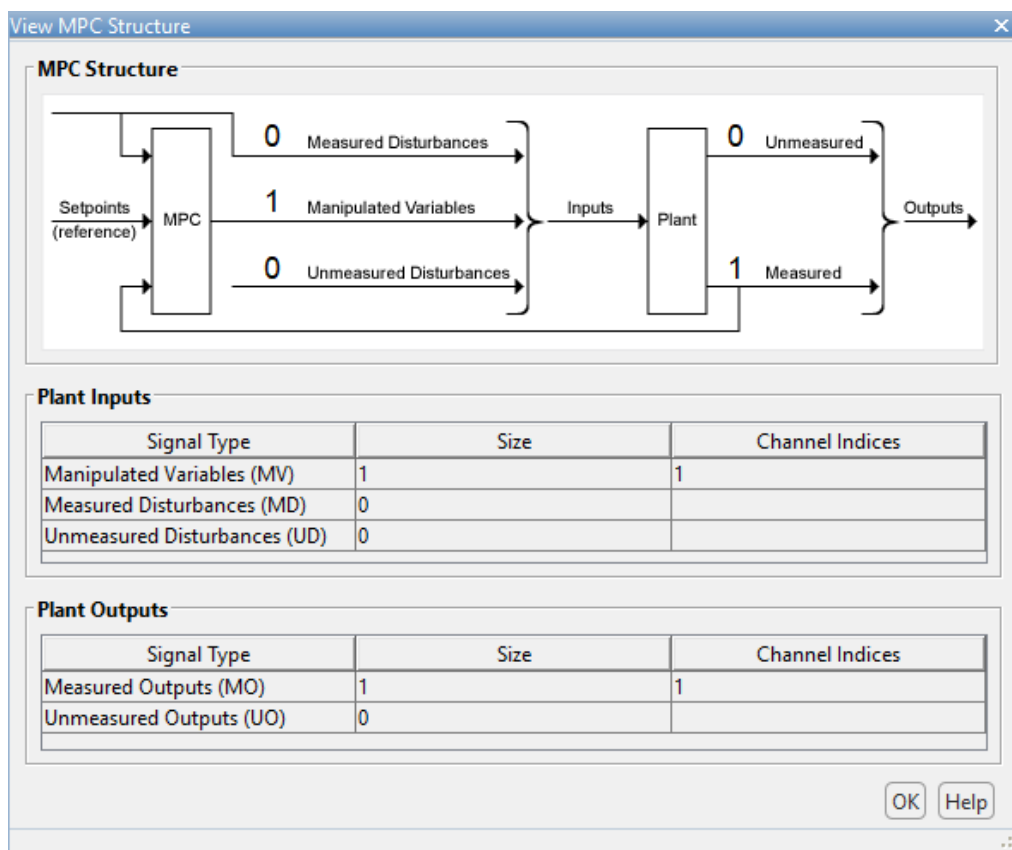


Рис. 4.2 – Інтерфейс налаштування параметрів МРС-регулятора

Результати моделювання роботи контролера в формуванні керуючого впливу та реакція системи, наведені на рисунках 4.3–4.5.

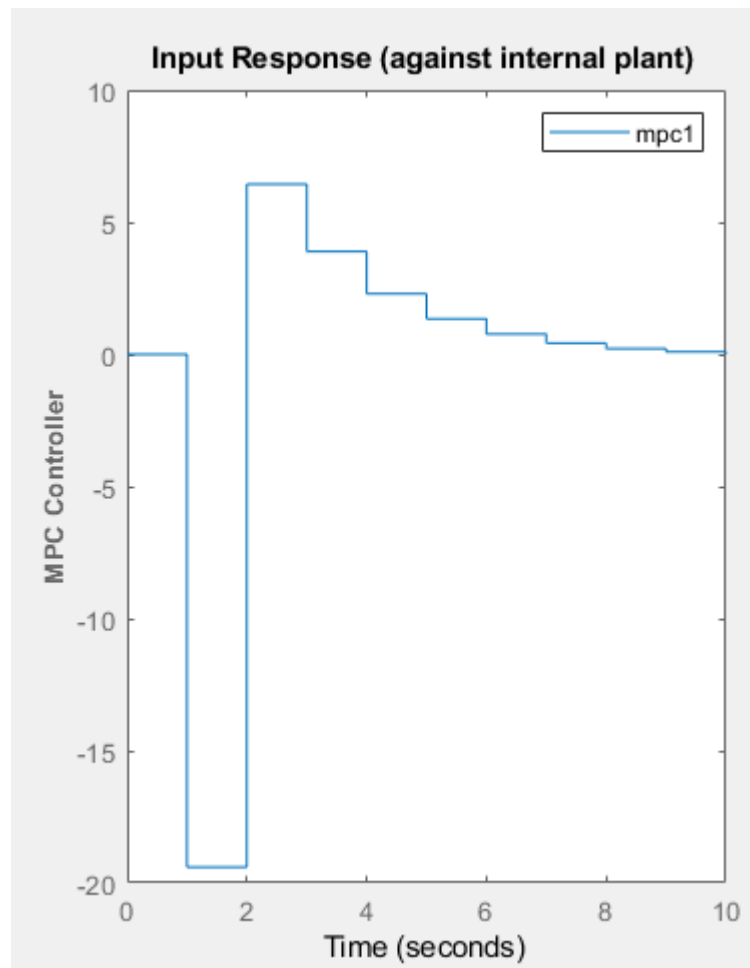


Рис. 4.3 – Графік дискретного керуючого впливу МРС-контролера

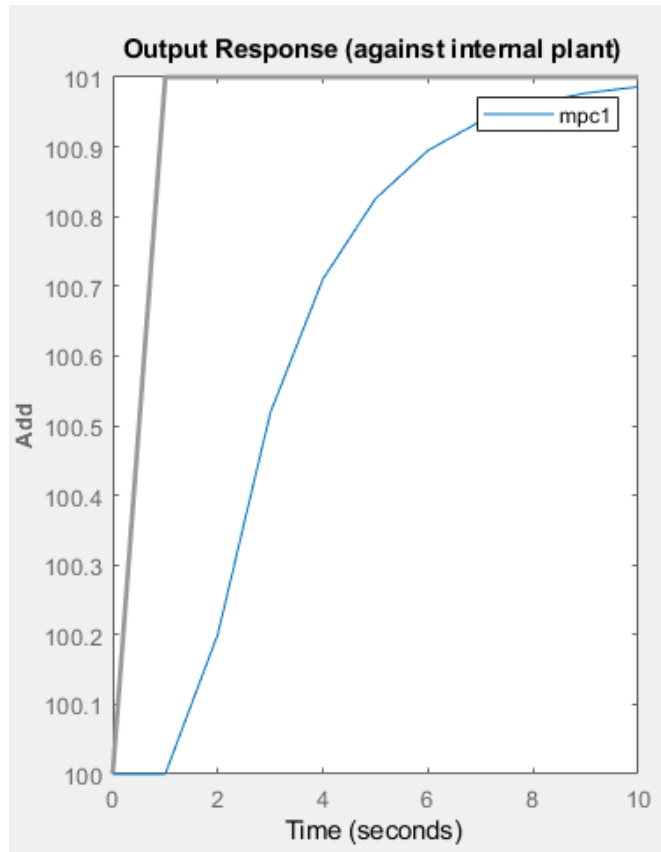


Рис. 4.4 – Динаміка вихідної змінної МРС-контролера

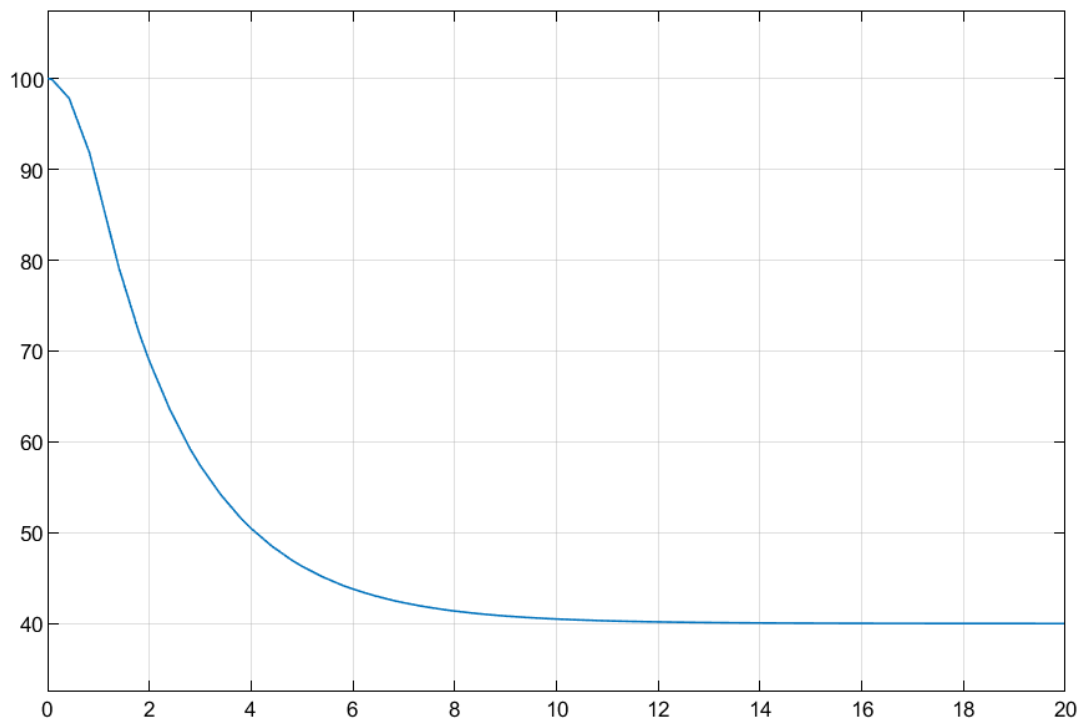


Рис. 4.5 – Перехідна характеристика системи з МРС-регулятором

4.2. Розробка нечіткої системи керування холодильника

Система нечіткого керування передбачає етапи фазифікації вхідних змінних та формування бази правил.

Температура на виході та витрата холодоагенту обираються, як керовані змінні.

Для опису змінних вводяться лінгвістичні терми: «Мала», «Нормальна», «Висока». Функції належності для витрати води описуються виразами 4.1–4.3, а для температури ацетилену — виразами 4.4 – 4.6.

Лінгвістична змінна:

мала
 ⟨Витрата води; нормальна; $4.5 < F \leq 6.5$ ⟩
 велика

Опишемо функції належності:

$$F_{B_Мала} = \begin{cases} 1, F < 4.75 \\ \frac{5.25-F}{0.5}, 4.75 \leq F \leq 5.25 \\ 0, F > 5.25 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$F_{B_Нормальна} = \begin{cases} 0, F < 5 \text{ або } F > 6 \\ \frac{F-5}{0.5}, 5 \leq F < 5.5 \\ \frac{6-F}{0.5}, 5.5 \leq F \leq 6 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$F_{B_Велика} = \begin{cases} 1, F > 6.25 \\ \frac{F-5.75}{0.5}, 5.75 \leq F \leq 6.25 \\ 0, F < 5.75 \end{cases} \quad (4.3)$$

низька
Лінгвістична змінна: ⟨Температура ацетилену; нормальна; $30 < T \leq 50$ ⟩
 висока

Опишемо функції належності:

$$T_{A_Низька} = \begin{cases} 1, T < 32.5 \\ \frac{37.5-T}{5}, 32.5 \leq T \leq 37.5 \\ 0, T > 37.5 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$T_{A_Нормальна} = \begin{cases} 0, T < 35 \text{ або } T > 45 \\ \frac{T-35}{5}, 35 \leq T < 40 \\ \frac{45-T}{5}, 40 \leq T \leq 45 \end{cases} \quad (4.5)$$

$$T_{A_Висока} = \begin{cases} 1, T > 47.5 \\ \frac{T-42.5}{5}, 42.5 \leq T \leq 47.5 \\ 0, T < 42.5 \end{cases} \quad (4.6)$$

Визначивши лінгвістичні змінні можемо сформулювати нечіткі правила керування:

ЯКЩО Температура ацетилену «Низька» **ТО** Витрата води «Мала».

ЯКЩО Температура ацетилену «Нормальна» **ТО** Витрата води «Нормальна».

ЯКЩО Температура ацетилену «Висока» **ТО** Витрата води «Велика».

Розробка нечіткої системи керування холодильника буде проведено в програмному додатку *MatLab Fuzzy Logic* вбудованого до середовища *MatLab*. В програмному додатку створюємо систему керування з 1 входом та 1 виходом. Змодельована структурну схему наведено на рисунку 4.6.

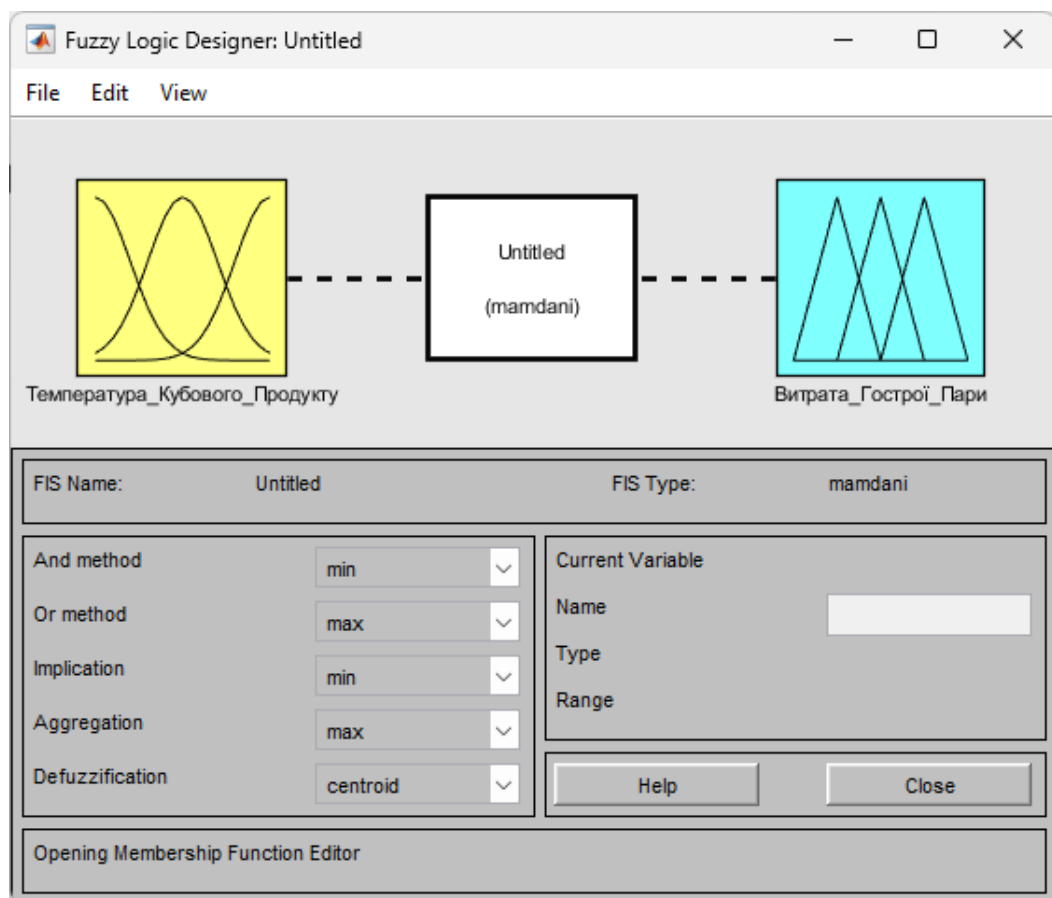


Рис. 4.6 – Структурна схема системи управління

Тепер введемо функції належності для вхідної та вихідної змінних за допомогою інтерфейсу вікна налаштувань. Графічна інтерпретація функцій належності для вхідної та вихідної змінних наведена на рисунку 4.7 та 4.8.

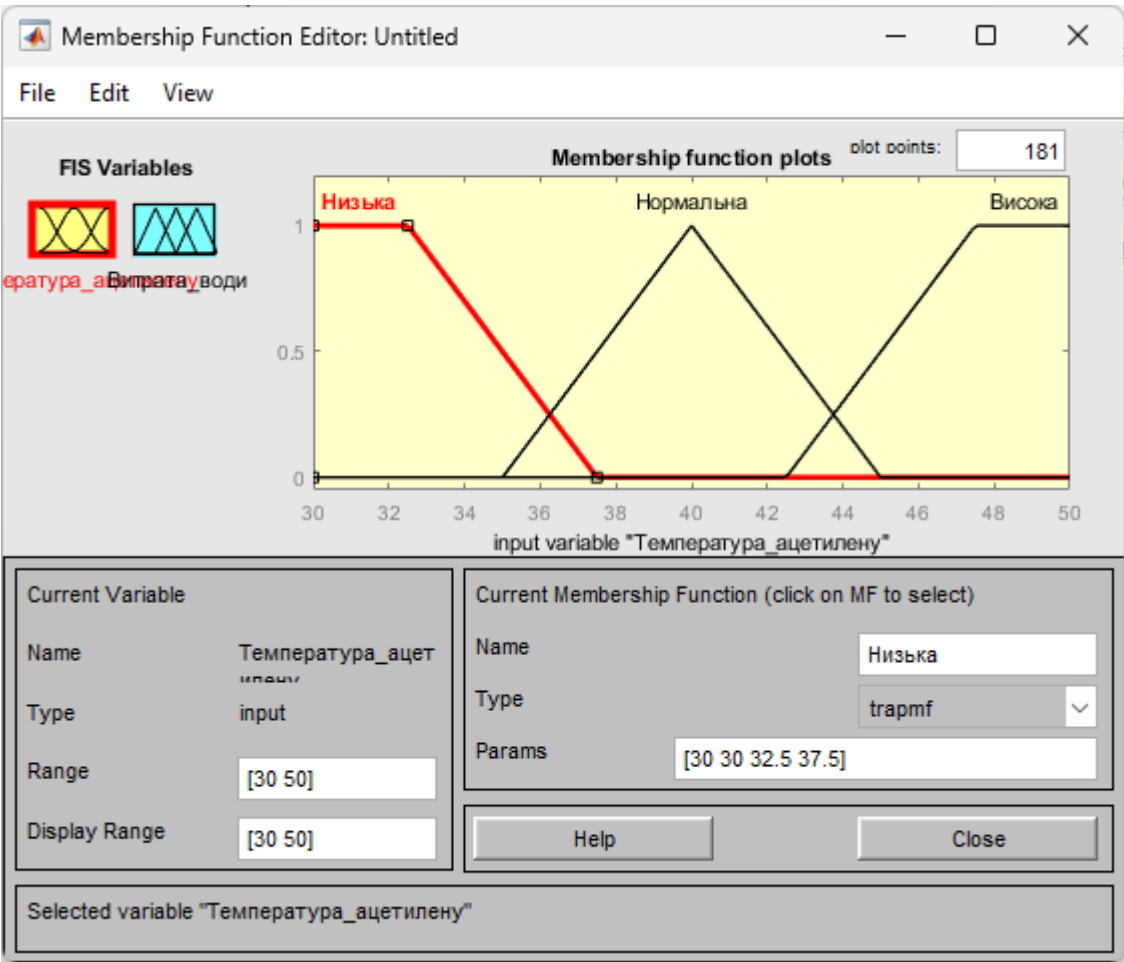


Рис. 4.7 – Змінна - «Температура ацетилену»

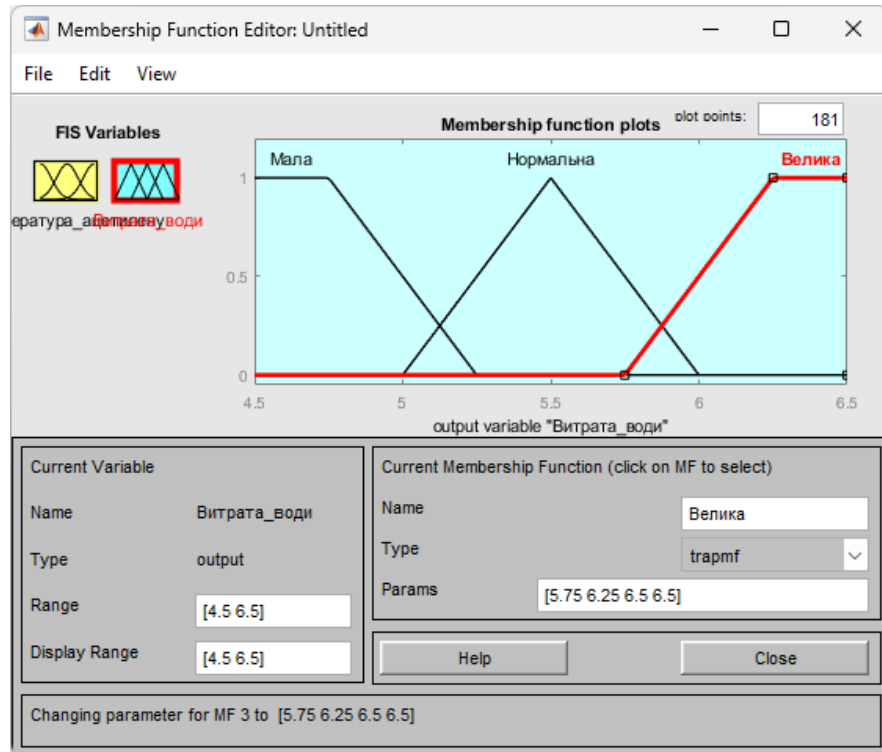


Рис. 4.8 – Змінна «Витрата холодоагенту»

Після цього проведемо налаштування бази правил у середовищі редактора правил відображено на рисунку 4.9.

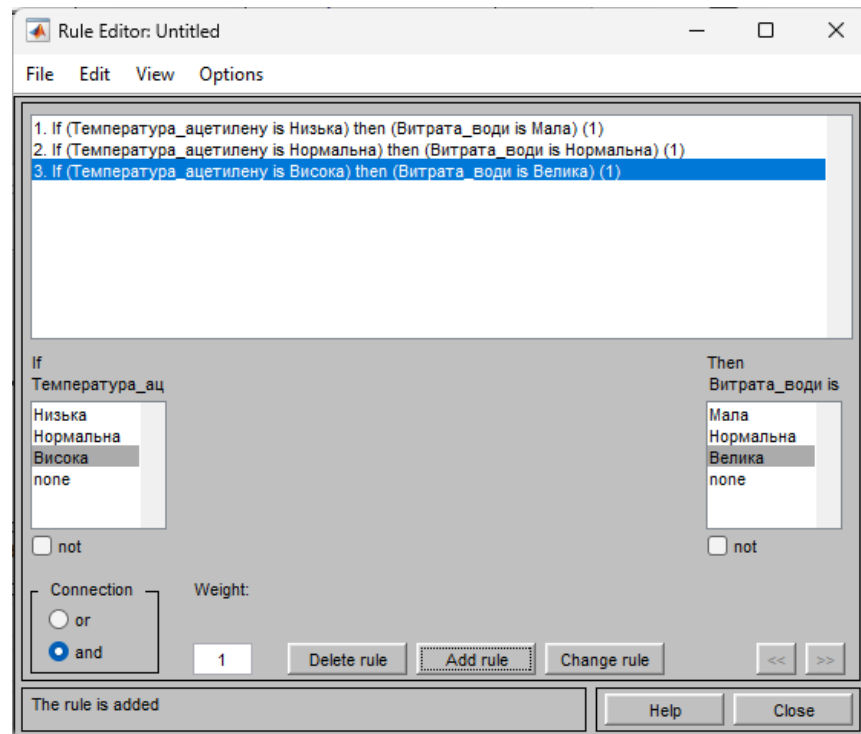


Рис. 4.9 – Інтерфейс редактора бази нечітких правил

Візуалізація роботи логічного виводу для конкретних значень вхідних величин та результуюча поверхня керування представлені на рисунку 4.10 та 4.11 відповідно.

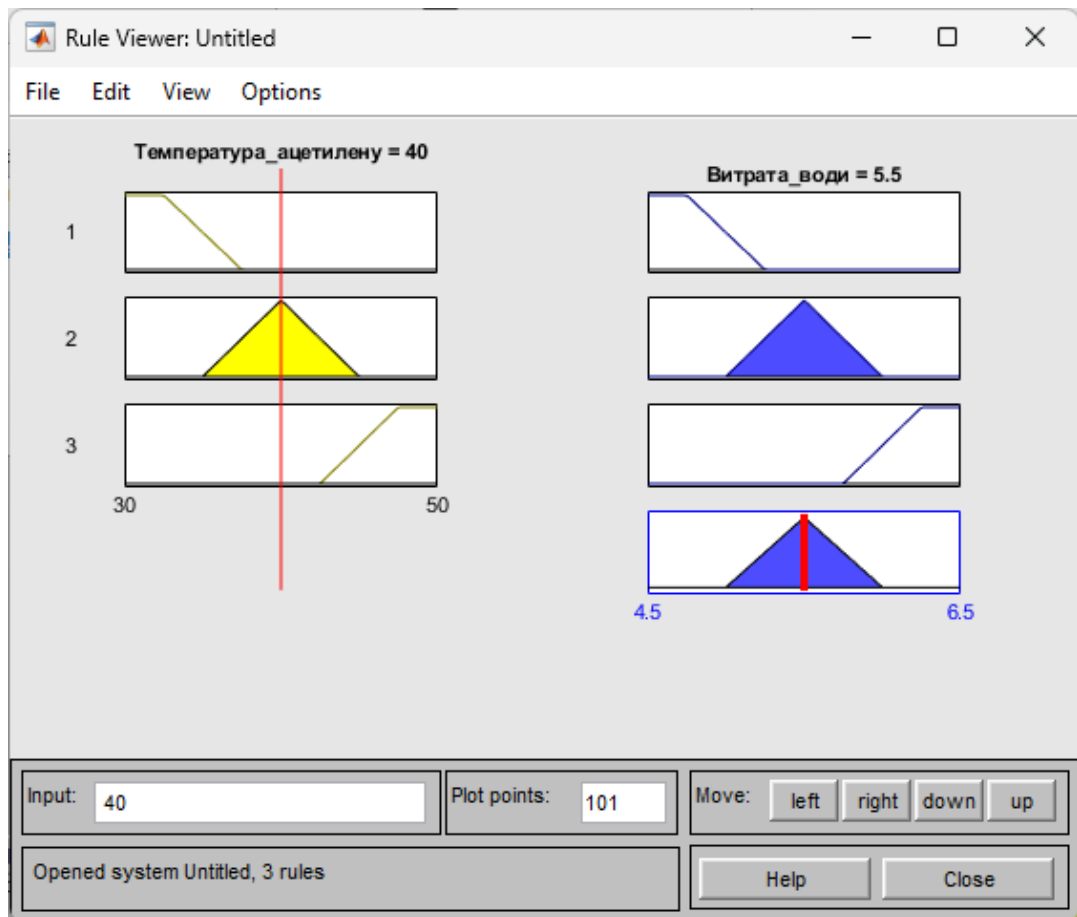


Рис. 4.10 – Правила для температури ацетилену 40 °С

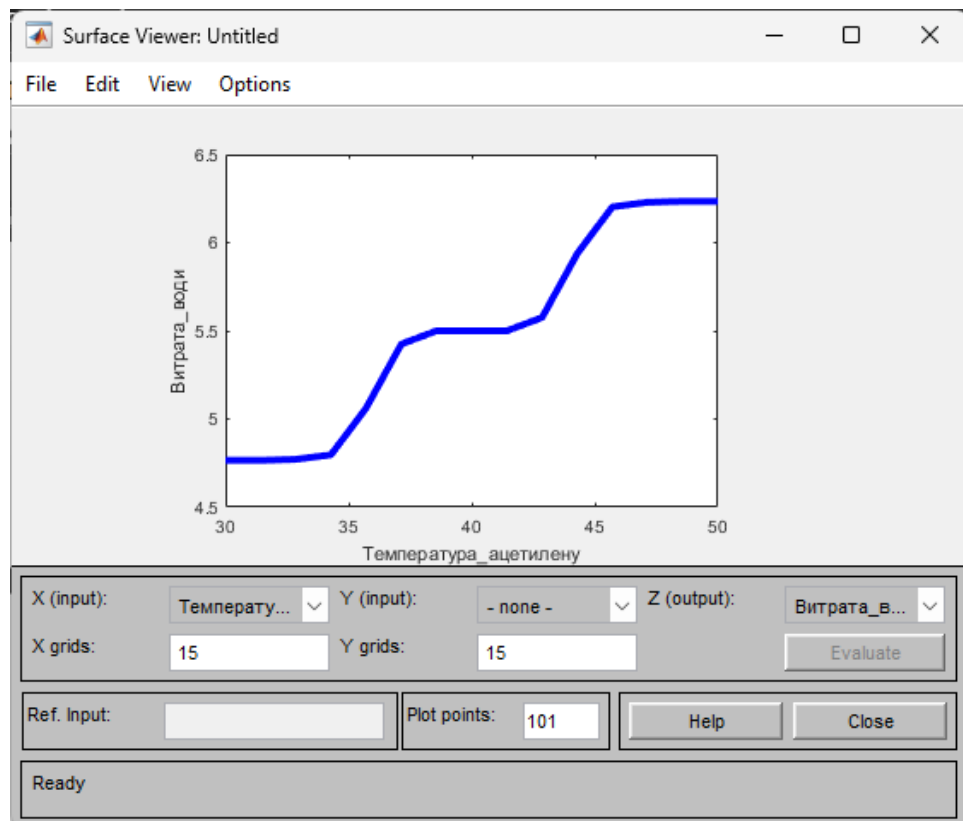


Рис. 4.11 – Графік поверхні нечіткого висновку для витрати води.

Для перевірки розробленого регулятора створено імітаційну модель замкненого контуру в середовищі *MatLab-Simulink*. Схему зображено на рисунку 4.12.

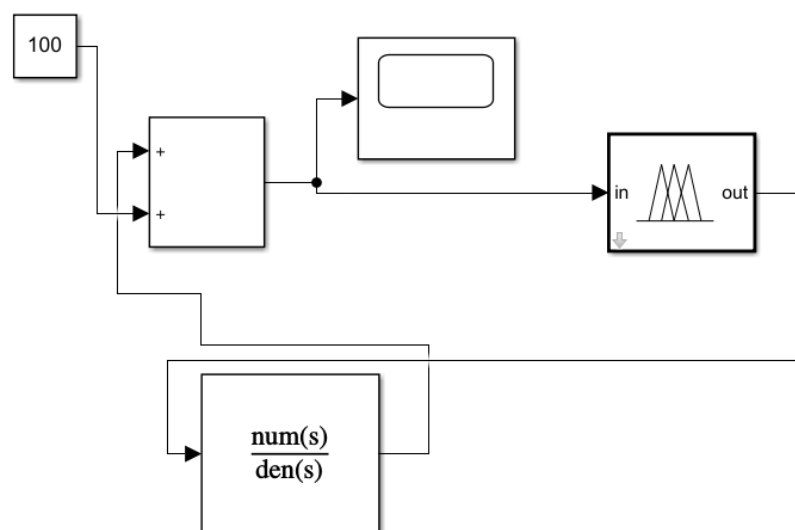


Рис. 4.12 – Схема системи керування у Simulink

Далі потрібно запустити схему в режимі симулятор та відкрити вікно осцилографа, щоб отримати перехідну характеристику системи керування замкнутого контуру. Результати моделювання перехідного процесу зображено на рисунку 4.13.

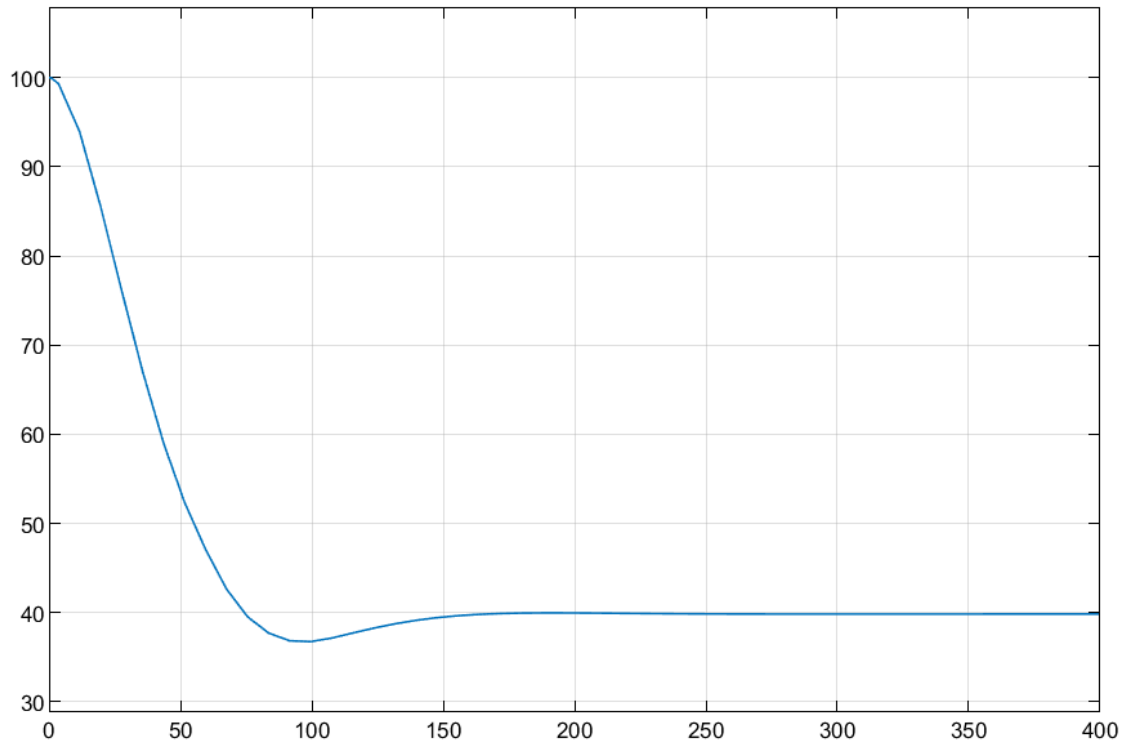


Рис. 4.13 – Перехідна характеристика системи з нечітким регулятором

Висновок: У цьому розділі було розроблено та проведено аналіз двох стратегій керування: на базі МРС-регулятора та нечіткої логіки. Результати моделювання показали, що система з МРС-регулятором забезпечує вихід на усталений режим на 156 секунд швидше з меншим перегулюванням, ніж система з нечітким регулятором. У процесі охолодження газу ацетилену критичним є відсутність перегулювань у зв'язку з висунутими умовами вибухонебезпеки виробництва. Однак нечітке керування може демонструвати вищу гнучкість при роботі з більшою кількістю параметрів, тоді як перевагами МРС є швидкодія, менша складність налаштування та відсутність перегулювання.

5. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОХЛАЖДЕНИЯ В ХОЛОДИЛЬНИКУ

5.1. Вибір критерію оптимальності

Завдання: у мінімізації витрати холодоагенту, що надходить до холодильника та забезпечення заданої температури ацетилену на виході.

Щоб вирішити задачу обрано інтегральний критерій якості:

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

Межі:

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

Математична модель об'єкта, отримана у розділі 3, представлена у просторі станів:

$$A = \begin{pmatrix} -0.0642 & -0.0019 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (5.2)$$

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

$$C = (0 \quad -0.0211), \quad (5.4)$$

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

5.2. Виведення необхідних умов оптимальності

Функція Гамільтона набуде вигляду:

$$\begin{aligned} H = & \frac{1}{2} ((x_1 - x_1^{30} \quad x_2 - x_2^{30}) \cdot Q \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_1^{30} \\ x_2 - x_2^{30} \end{pmatrix} + R \cdot u^2) \\ & + (\lambda_1 \quad \lambda_2) \cdot (A \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + B \cdot u). \end{aligned} \quad (5.6)$$

Умови оптимальності:

$$\lambda_1' = -\frac{\delta H}{\delta x_1} = -(q_{11} \cdot (x_1 - x_1^{3d}) + \lambda_1 \cdot a_{11} + \lambda_2 \cdot a_{21}), \quad (5.7)$$

$$\lambda_2' = -\frac{\delta H}{\delta \theta} = -(q_{22} \cdot (x_2 - x_2^{3d}) + \lambda_1 \cdot a_{12} + \lambda_2 \cdot a_{22}), \quad (5.8)$$

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

Оптимальне керування визначається з умов стаціонарності гамільтоніана

та має вигляд:

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

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

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

Рівняння системи в прямому часі

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

Спряжена система в спряженому часі

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

5.3. Розрахунок оптимального програмного керування

Здійснення обрахунку даного програмного керування та всі наступні розрахунки в цьому розділі виконуються у програмному середовищі *MatLab*. Програмний код, що реалізує алгоритм розв'язання, наведено на рисунках 5.1–5.3. Результати моделювання, що ілюструють поведінку системи та керуючого впливу, представлено 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 = [-4.297e-2; 2.838e+3];
5 q = 1; Q = [q 0; 0 q]; R = 2.188e+5; s = 1; S = [-3.828e+9 0; 0 -148.8];
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) = l;
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 – Лістинг програми розрахунку 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 u_l(1) = solve(diff(H, u), u);
37
38 for i=1:samples
39     U_opt(i) = u_l(l_i(i,1), l_i(i,2));
40 end
41
42 Y_opt(1) = C*X_opt(:, 1);
43 for i=1:samples-1
44     X_opt(:, i+1) = next_x(U_opt(i), X_opt(1,i), X_opt(2,i));
45     Y_opt(i+1) = C*X_opt(:, i+1);
46 end
47
48 %%
49 subplot(2,1,1);
50 plot(t,X(1, :))
51 ylabel('x1');
52 xlabel('uac, c')
53 subplot(2,1,2);
54 plot(t,X(2, :))
55 ylabel('x2');
56 xlabel('uac, c')
57 %%
58 plot(t,Y)

```

Рис. 5.2 – Фрагмент коду для візуалізації змінних стану

```

57 %%
58 plot(t,Y)
59 ylabel('Температура ацетилену, °C');
60 xlabel('Час, c')
61 %%
62 plot(t, u_opt)
63 ylabel('Витрата води, 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 ацетилену, °C');
86 xlabel('Час, c');

```

Рис. 5.3 – Фрагмент коду для побудови графіків керування та вихідної величини

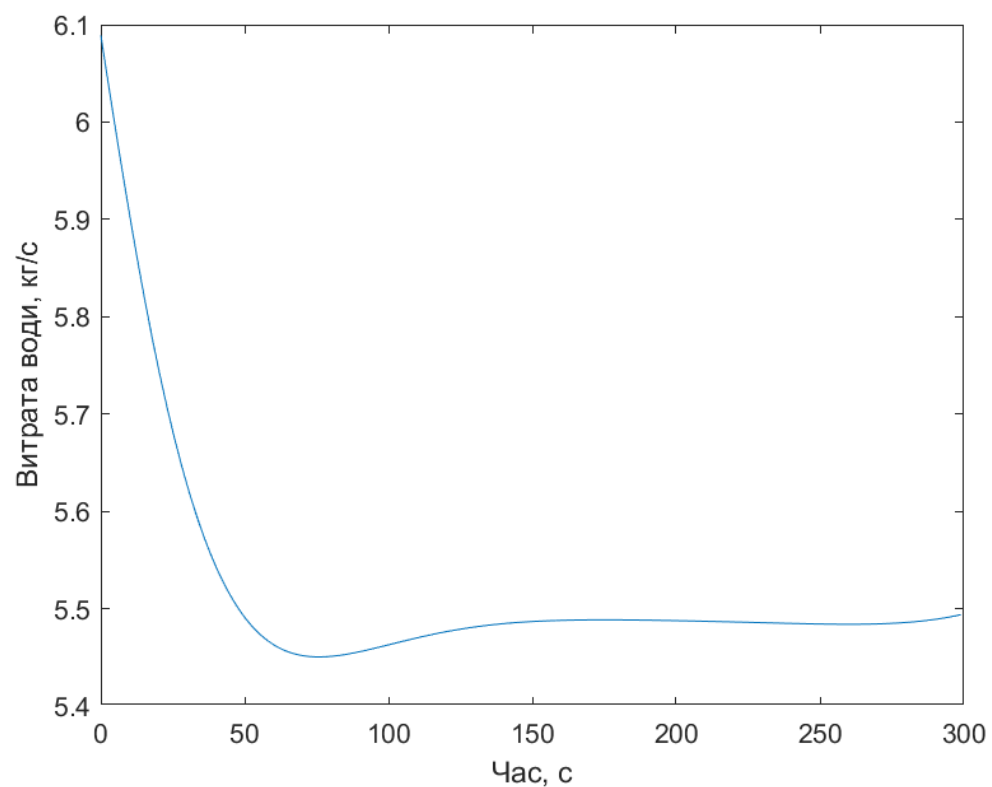


Рис. 5.4 – Графік розрахованого оптимального програмного керування

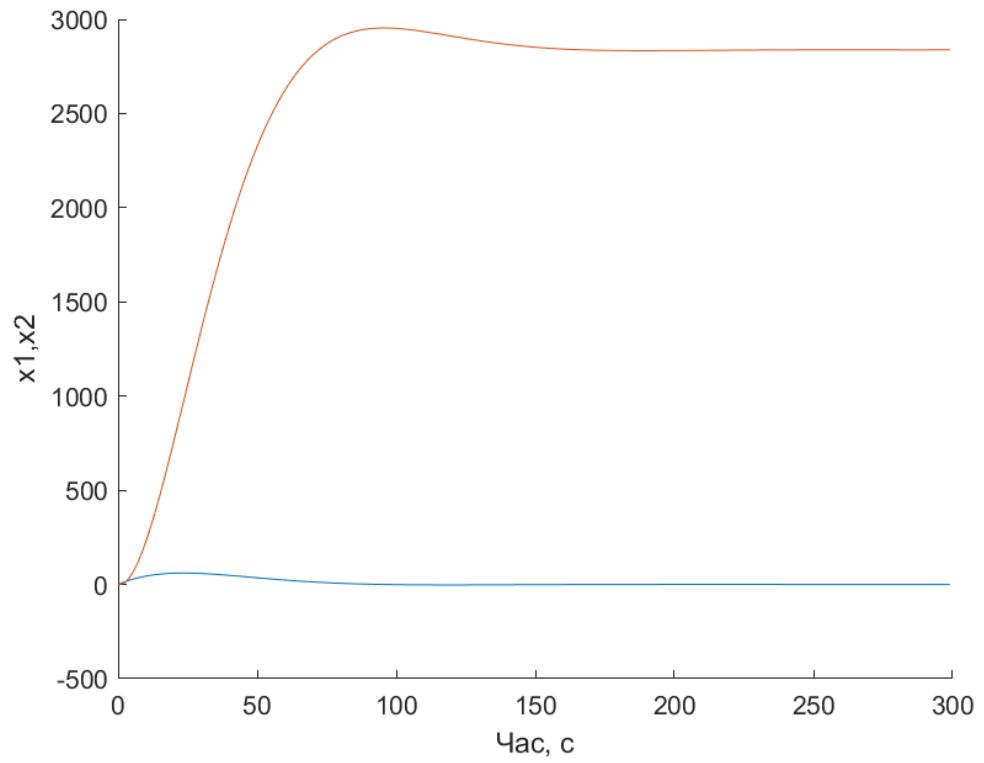


Рис. 5.5 – Графік оптимального стану об'єкта при програмному керуванні

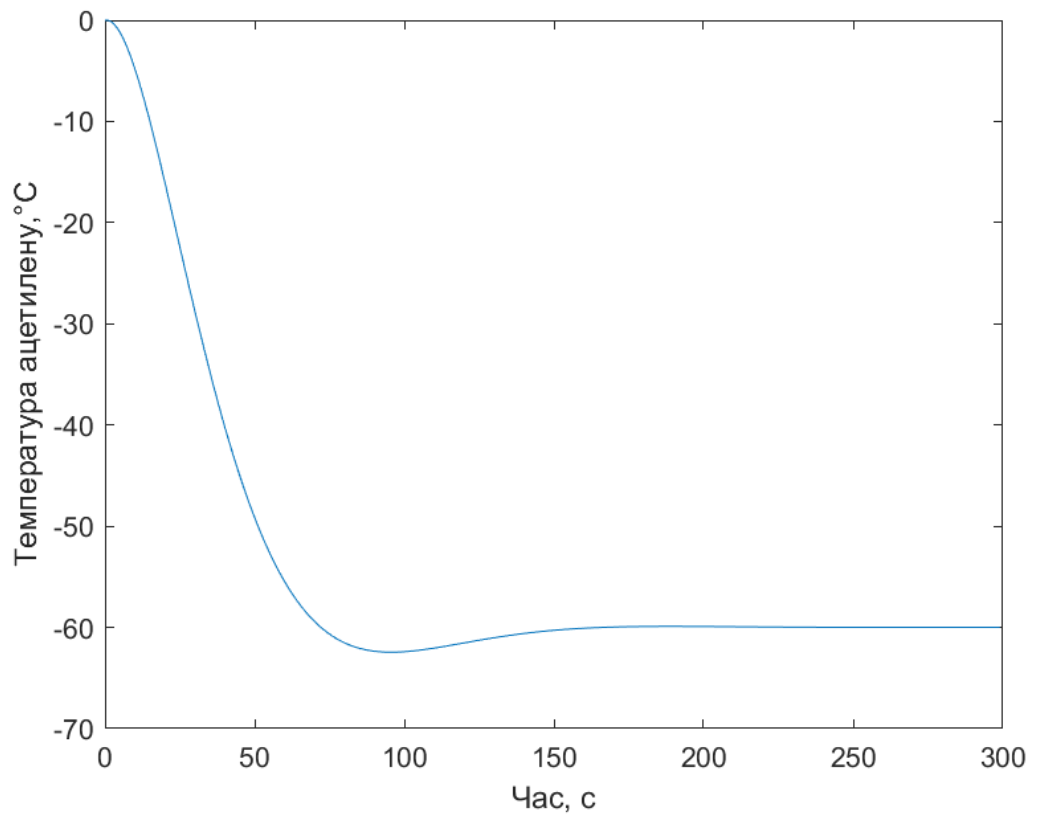


Рис. 5.6 – Графік оптимального виходу при програмному керуванні

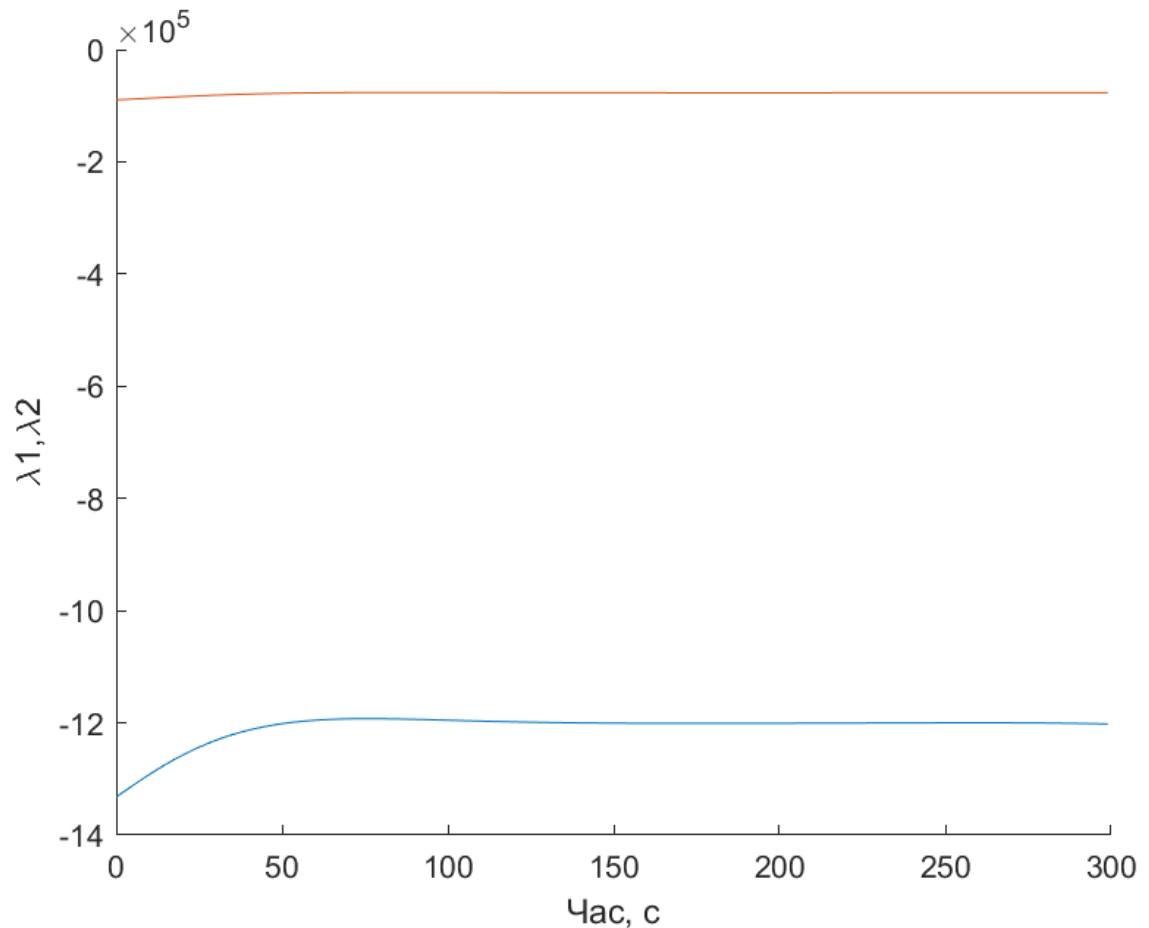


Рис. 5.7 – Графік зміни параметрів λ_1 та λ_2 при програмному керуванні

5.4. Пошук оптимального програмного керування з зворотним зв'язком

5.4.1. Розробка оптимального лінійно-квадратичного П-регулятора

Для реалізації закону керування за принципом зворотного зв'язку синтезовано оптимальний лінійний регулятор вигляду:

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

де

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

На основі введених залежностей виконується синтез лінійного оптимального регулятора з матрицею коефіцієнтів підсилення K [10]. Головним завданням контролера є зведення параметрів траєкторії системи до нульового значення. Синтез здійснюється з урахуванням наступних умов:

1. Якщо матриця K інваріантна щодо вектору стану X та керування U , її розрахунок можна виконати поза контуром керування. Для визначення K необхідно розв'язати диференціальне матричне рівняння Ріккати у оберненому часі.

2. У випадку стаціонарної системи (сталі матриці A, B, R, Q) та за умови $t \rightarrow \infty$, у цьому випадку матриця P набуває усталеного значення:

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

Це гарантує незмінність матричного коефіцієнту підсилення регулятора (K).

3. Необхідно встановити, що означає критерій якості. Використовуючи квадратичне зважування для кінцевого стану системи можна отримати ефективний інструмент для досягнення необхідної якості керування. Водночас у певних ситуаціях це зваження може бути заміником кількісного оцінювання керуючих дій. Це, у свою чергу, це надає можливість вивести найбільш підходящий аналітичний закон керування для зворотного зв'язку. Проте, різниця між поточним кінцевим станом та необхідним є через ціль надзвичайно великих вагових коефіцієнтів матриць R . Хоча великі значення керування U є наслідком надто малих вагових коефіцієнтів матриці R , важливими залишаються обмеження, серед яких необхідність позитивної визначеності RRR та неможливість накладання явних обмежень на X і U .

4. Вводячи загальніший критерій якості

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

Оптимальний регулятор можна визначити за допомогою алгебраїчного рівняння з коефіцієнтом підсилення, яке враховує взаємозв'язок між станом і керуванням, а також умови щодо позитивної визначеності RRR та відсутності можливості накладати явні обмеження на X і U :

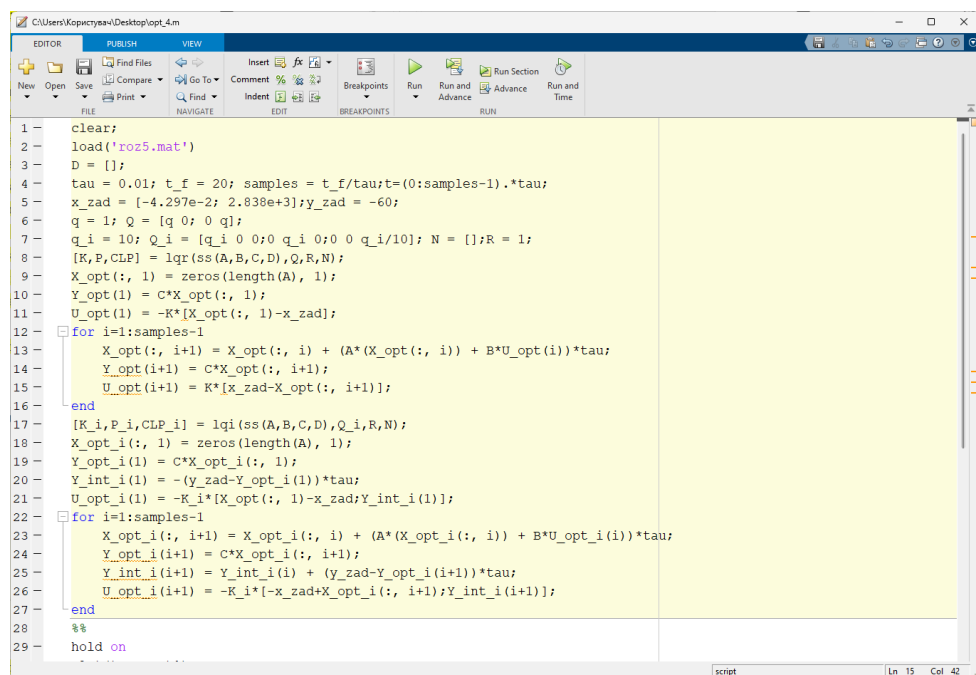
$$K = R^{-1}(B^T P - N^T) \quad (5.18)$$

Необхідними умовами існування оптимального регулятора:

1. Повна керованість матриць $[A, B]$;
2. Мають виконуватися відповідні нерівності $R > 0, Q - NR^{-1}N^T \geq 0$;
3. Необхідно уникати появи спостережуваних мод між двома матрицями $(Q - NR^{-1}N^T, A - BR^{-1}N^T)$ та їхніми значеннями на дійсній осі.

Необхідно відмітити, що використання алгоритмів для пошуку оптимального керування зазвичай не дозволяє отримати характеристики, які б точно наближалися до справжніх оптимальних значень. Це пов'язано з тим, що під час побудови математичної моделі процесу, яким здійснюється керування, найчастіше застосовують наближені або апроксимовані моделі. Вони відображають лише основні домінуючі зв'язки, але не повністю відповідають реальним умовам. У таких ситуаціях алгоритми оптимізації виявляються нестійкими, особливо при роботі в реальному часі та на великих часових інтервалах, коли зростає амплітуда їхніх коливань. Ця нестабільність пов'язана з особливостями розв'язання рівняння Ріккаті, оскільки отримуване рішення може втрачати властивість симетричності.

Програмна реалізація розрахунку лінійно-квадратичного регулятора наведена на рисунках 5.8-5.9.

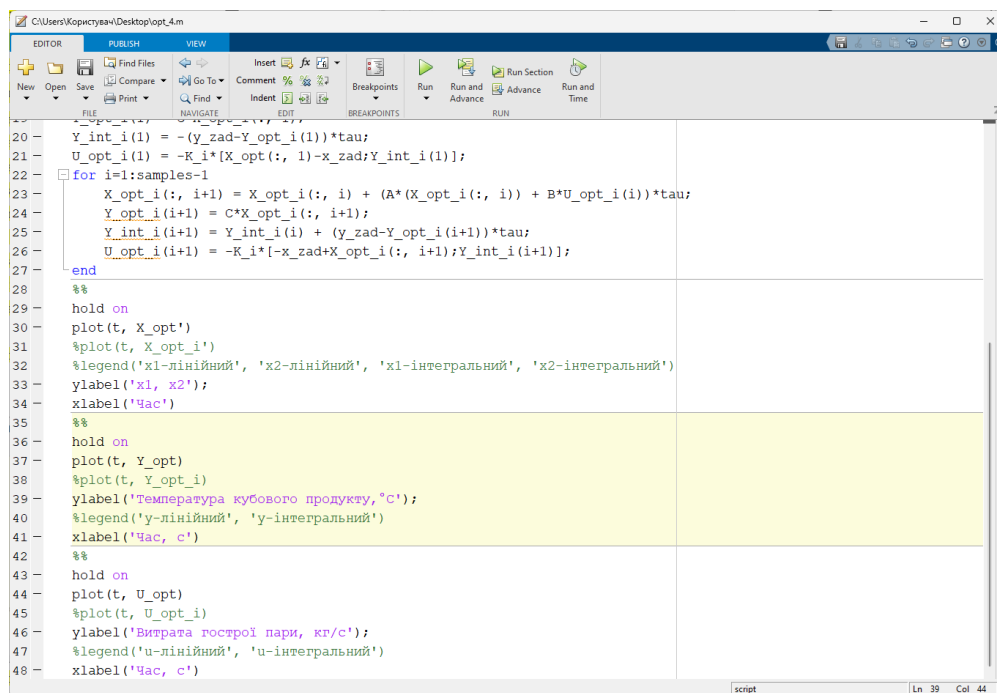


```

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 = [-4.297e-2; 2.838e+3]; y_zad = -60;
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)) + 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] = lqi(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 - hold on
29 -

```

Рис. 5.8 – Лістинг програми розрахунку лінійно-квадратичного регулятора



```

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, Y_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 кубового продукту, °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 гострої пари, кг/с');
47 %legend('u-лінійний', 'u-інтегральний')
48 xlabel('Час, c')

```

Рис. 5.9 – Програмний код для побудови перехідних процесів із лінійно-квадратичним регулятором

На рисунках 5.10–5.12 зображено отримані графіки динамічних характеристик.

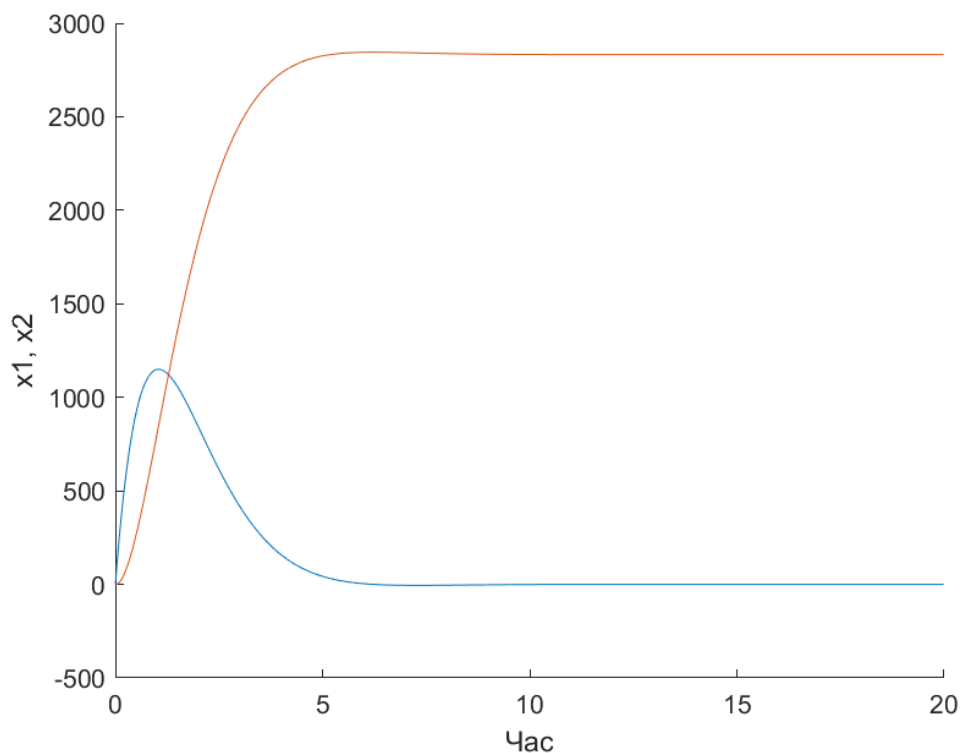


Рис. 5.10 – Динаміка змінних стану системи з лінійно-квадратичним регулятором

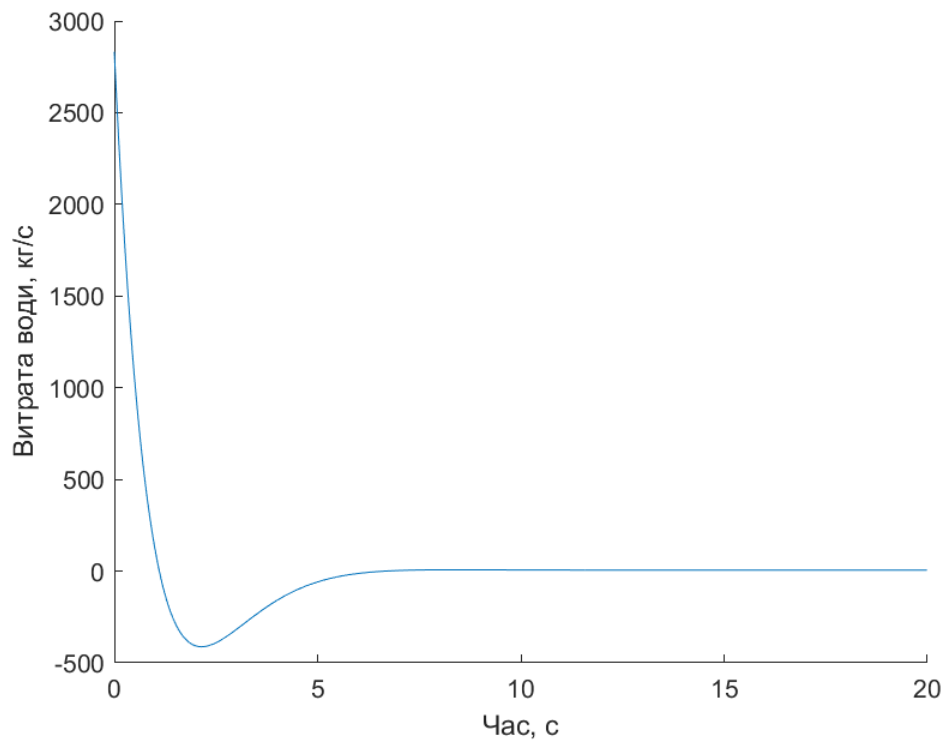


Рис. 5.11 – Динаміка зміни керуючого впливу лінійно-квадратичним контролером

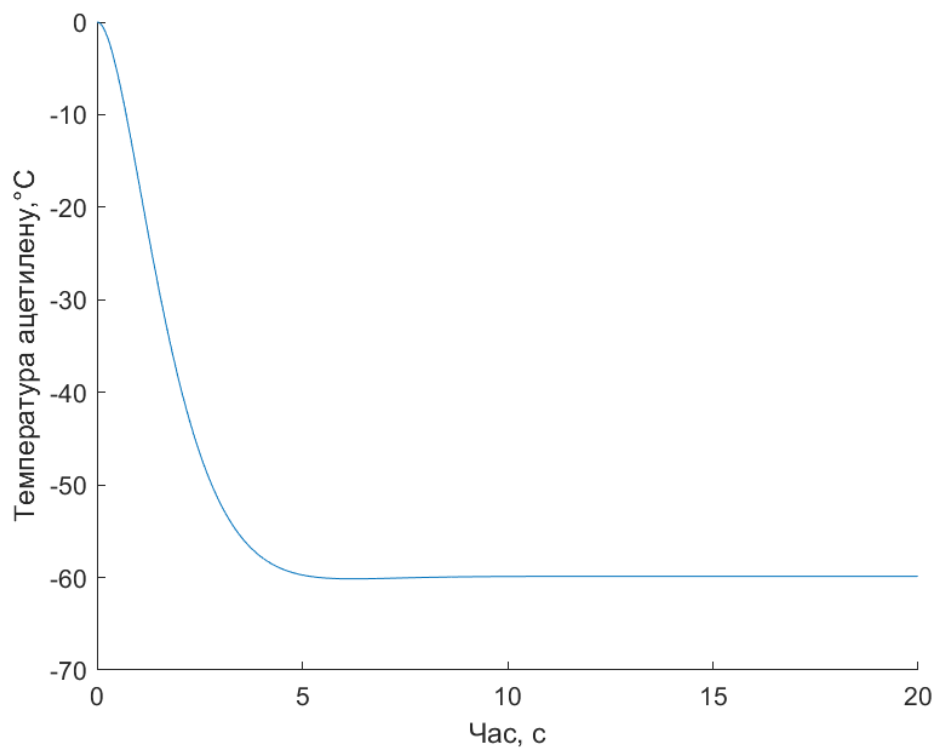


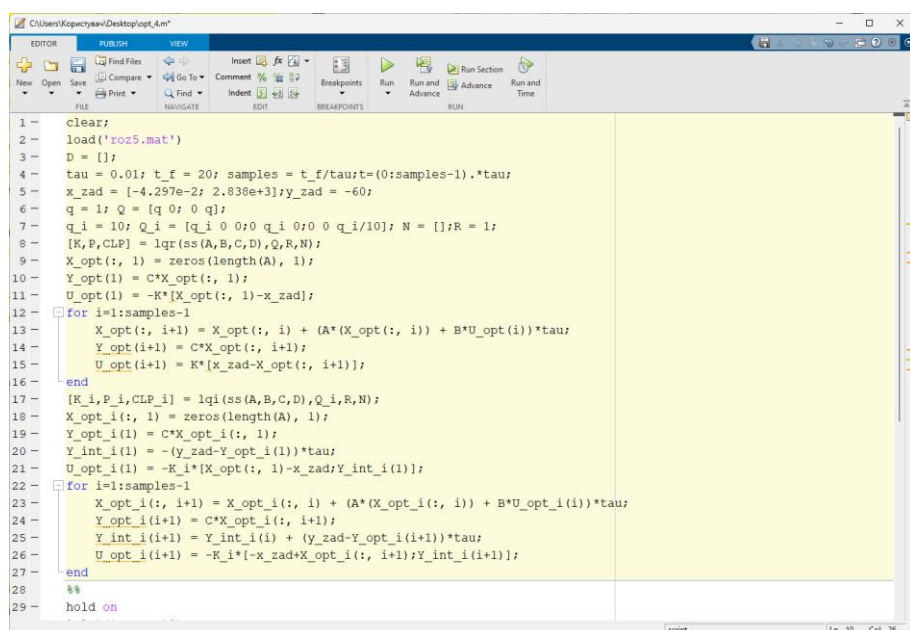
Рис. 5.12 – Динаміка зміни вихідної величини об'єкта лінійно-квадратичним регулятором

5.4.2. Розроблення оптимального лінійно-квадратичного ПІ-регулятора

Виявлено, що задачу побудови оптимального лінійно-квадратичного закону регулювання для лінійної системи можна розв'язати за допомогою звичайних пропорційних регуляторів. Такі регулятори можуть не мати впливу на вихід об'єкта при нульових початкових умовах або короткочасних імпульсних впливах. Проте, коли керувальні дії залишаються сталими або змінюються незначною мірою, ці регулятори не гарантують компенсацію відхилень керуючих величин до нульового рівня. Якщо ж одна частина закону керування залежить від вектора стану, а інша — від його інтеграла, то для виконання зазначеної умови закон керування повинен містити щонайменше дві складові.

Таким чином, постановку задачі синтезу регулятора необхідно змінити для випадку використання лише однієї частини керувального закону.

Далі наведено алгоритм коду розрахунку оптимального лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою, що показано на рисунках 5.13-5.17:

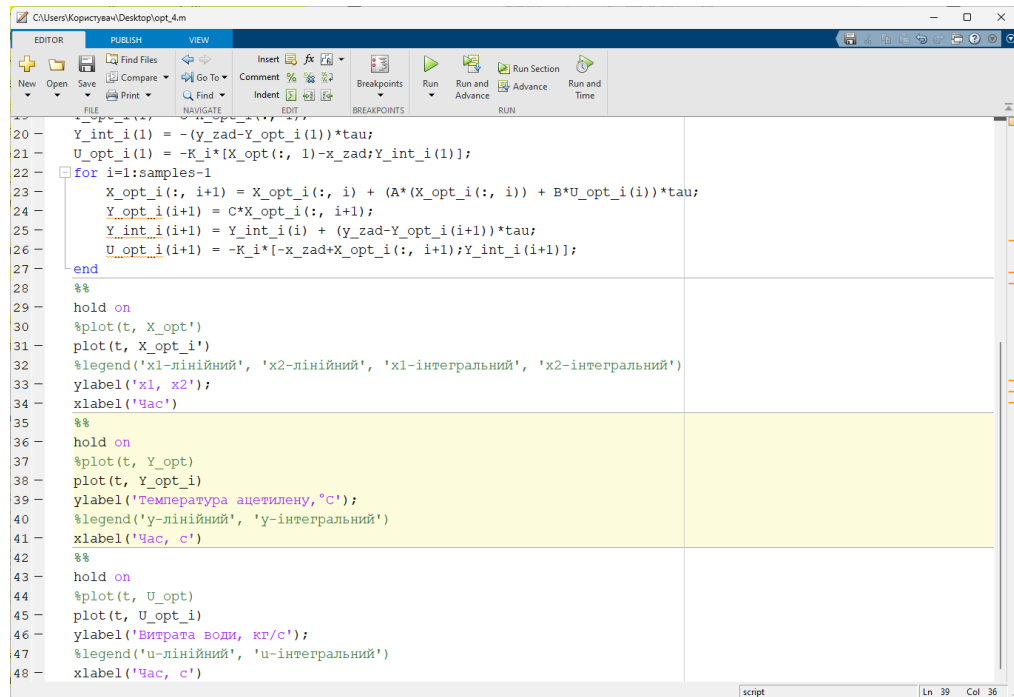


```

1- clear;
2- load('roz5.mat')
3- D = [];
4- tau = 0.01; t_f = 20; samples = t_f/tau; samples = (0:samples-1)*tau;
5- x_zad = [-4.297e-2; 2.838e+3]; y_zad = -60;
6- q = 1; Q = [q 0; 0 q];
7- q_i = 10; Q_i = [q_i 0 0; 0 q_i 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] = lqi(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(:, 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. 5.13 – Лістинг алгоритму програми розрахунку лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою



```

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 ацетилену, °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 води, кг/с');
47 %legend('u-лінійний', 'u-інтегральний')
48 xlabel('Час, c')

```

Рис. 5.14 – Фрагмент коду для візуалізації результатів роботи лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою

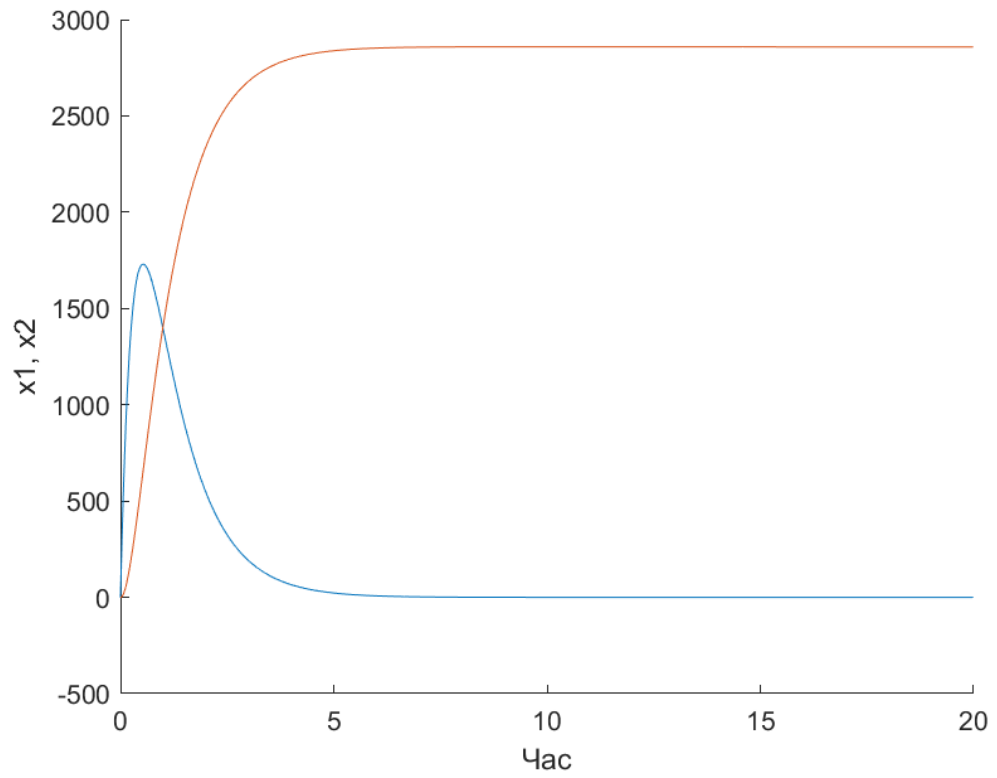


Рис. 5.15 – Динаміка змінних стану системи з лінійно-квадратичним регулятором з інтегральною складовою

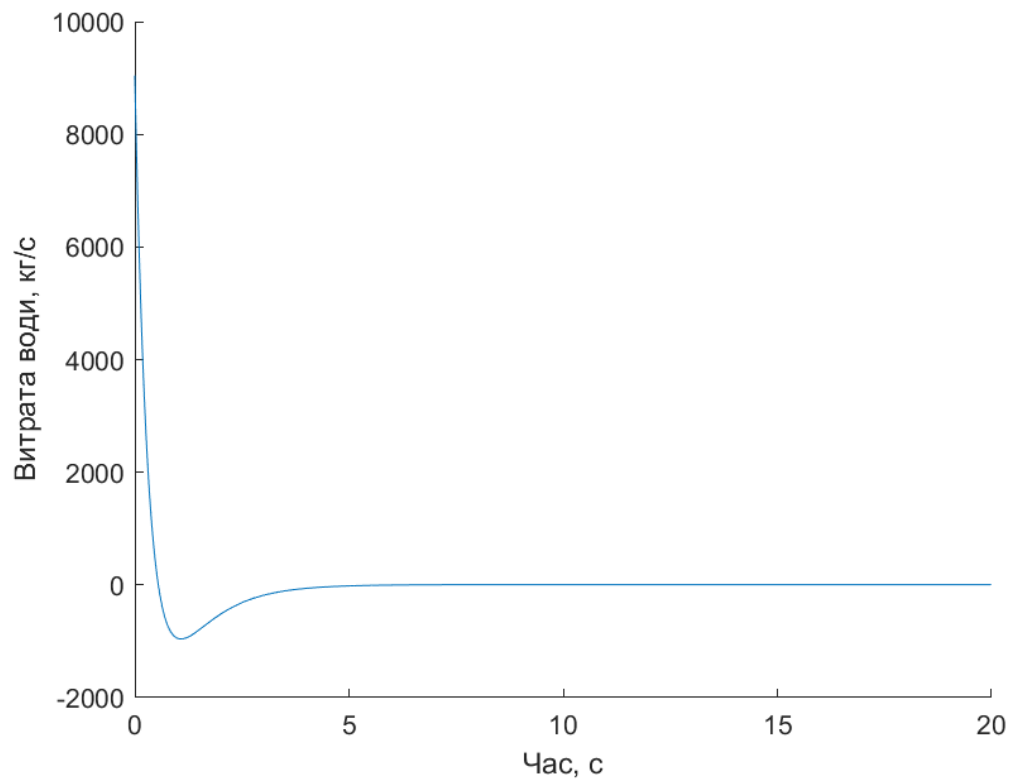


Рис. 5.16 – Графік керуючого впливу лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою

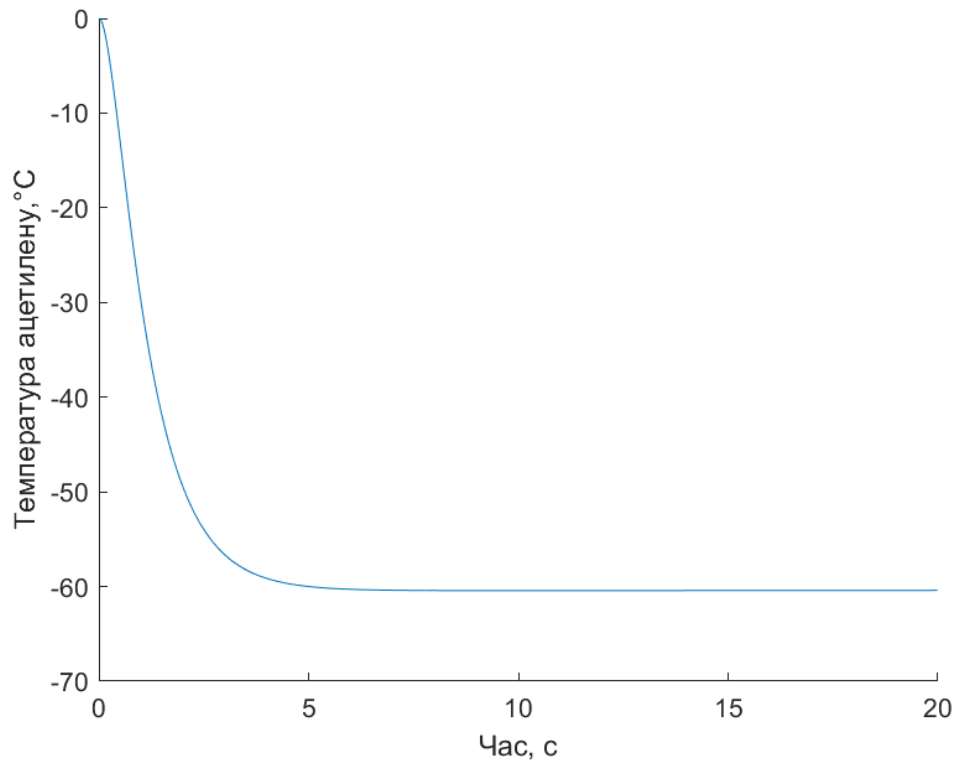


Рис. 5.17 – Перехідна характеристика вихідної величини системи з лінійно-квадратичним регулятором з інтегральною складовою

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

На рисунку 5.18 наведено графіки динаміки зміни параметрів стану для оптимального керування.

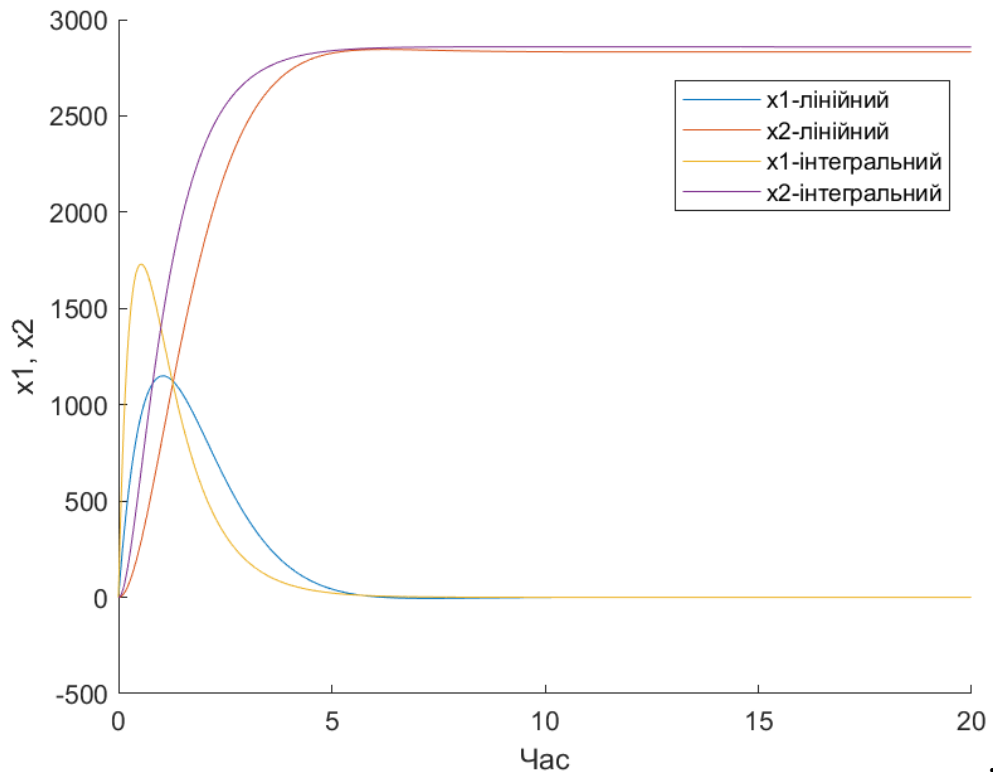


Рис. 5.18 – Порівняння динаміки змінних стану для оптимального керування

Для досягнення оптимального керування системи зворотного зв'язку застосовується лінійно-квадратичний регулятор з інтегральною складовою. Як видно з рисунка 5.19, використання лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою значно підвищує якість керування системи. Інтегральний елемент регулятора є важливим, оскільки він усуває статичну похибку — головний недолік стандартного лінійного регулятора, що забезпечує кращу оптимізацію керування, що видно з рисунку 5.20.

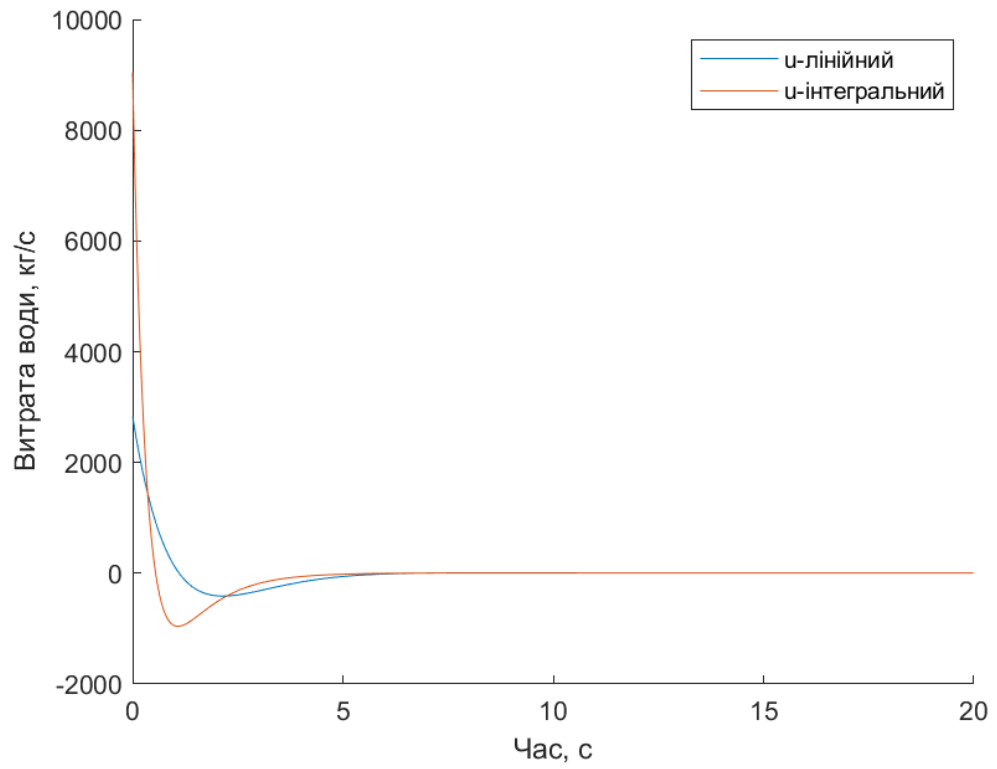


Рис. 5.19 – Порівняння керуючих впливів регуляторів

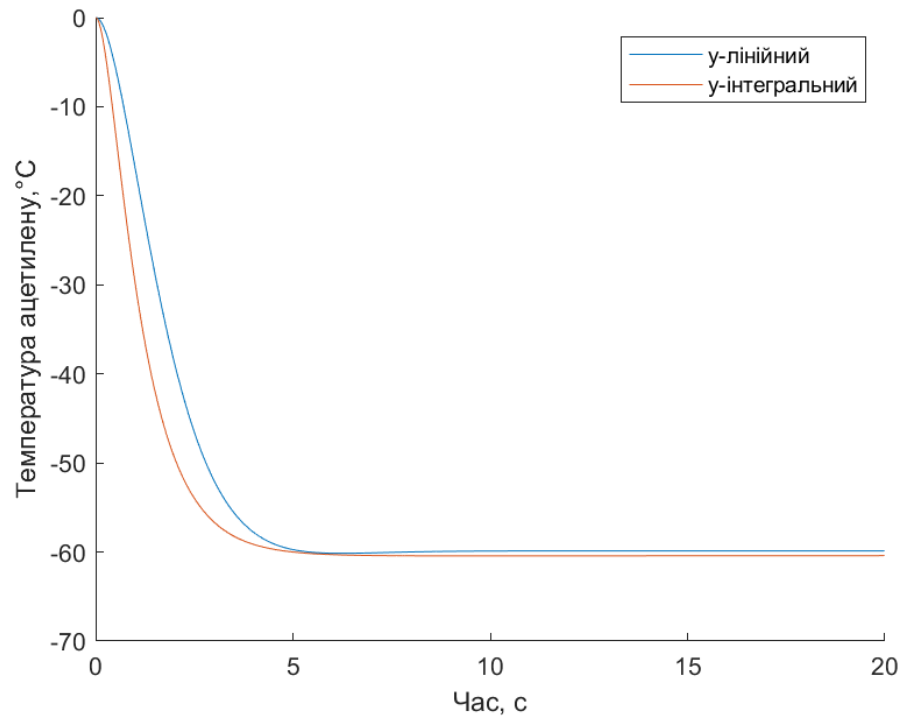


Рис. 5.20 – Порівняння перехідних характеристик вихідної величини з оптимальним керуванням

5.5. Керування за мінімальним часом за умови обмеження по керуванню

Для забезпечення швидкодії керування критично важливими є теорія N-інтервалів перемикавання та точне обчислення часу перемикавання.

Сформулюємо відповідний критерій оптимальності:

$$I = \frac{1}{2}((x_1 - x_1^{3\partial} \quad x_2 - x_2^{3\partial}) \cdot S \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_1^{3\partial} \\ x_2 - x_2^{3\partial} \end{pmatrix}) + t_f \quad (5.19)$$

Обмеження щодо керування F_ϵ :

$$F_{\epsilon.\min} \leq F_\epsilon \leq F_{\epsilon.\max} \quad (5.20)$$

$$F_{\epsilon.\max} - F_\epsilon \geq 0 \quad (5.21)$$

$$F_\epsilon - F_{\epsilon.\min} \geq 0 \quad (5.22)$$

Тепер ми перепишемо критерій:

$$I = \frac{1}{2}((x_1 - x_1^{3\partial} \quad x_2 - x_2^{3\partial}) \cdot S \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_1^{3\partial} \\ x_2 - x_2^{3\partial} \end{pmatrix}) + t_f + \int (U_{\max} - U) \cdot Q \cdot (U - U_{\min}) \cdot H(g_1 g_2) dt \quad (5.23)$$

У результаті Гамільтоніан буде мати вигляд:

$$H = (U_{\max} - U) \cdot Q \cdot (U - U_{\min}) \cdot H(g_1 g_2) + \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} \cdot (A \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_1^{3\partial} \\ x_2 - x_2^{3\partial} \end{pmatrix} + B \cdot U) \quad (5.24)$$

Складемо умови оптимальності:

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

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

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

$$\lambda_1(t_f) = S_{11}(x_1(t_f) - x_1^{3\partial}) \quad (5.28)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\delta I}{\delta t_f} = & 1 + S_{11}(\theta x_1(t_f) - x_1^{3\partial})\dot{x}_1(t_f) + S_{22}(x_2(t_f) - x_2^{3\partial})\dot{x}_2(t_f) \\ & + (U_{\max} - U) \cdot Q \cdot (U - U_{\min}) \cdot H(g_1 g_2) = 0 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Час перемикання вираховується за формулою:

$$\tau_s = \frac{\lambda_2(t_f)}{\lambda_1(t_f)} = - \frac{S_{22}(F_6(t_f) - F_{6.3\partial})}{S_{11}(Q_{a.n}(t_f) - Q_{a.n.3\partial})} \quad (5.31)$$

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

$$S_{11} = 1$$

$$S_{22} = 1$$

$$Q = 1$$

Коли програму запустили, було виявлено, що час перемикання становить 103.

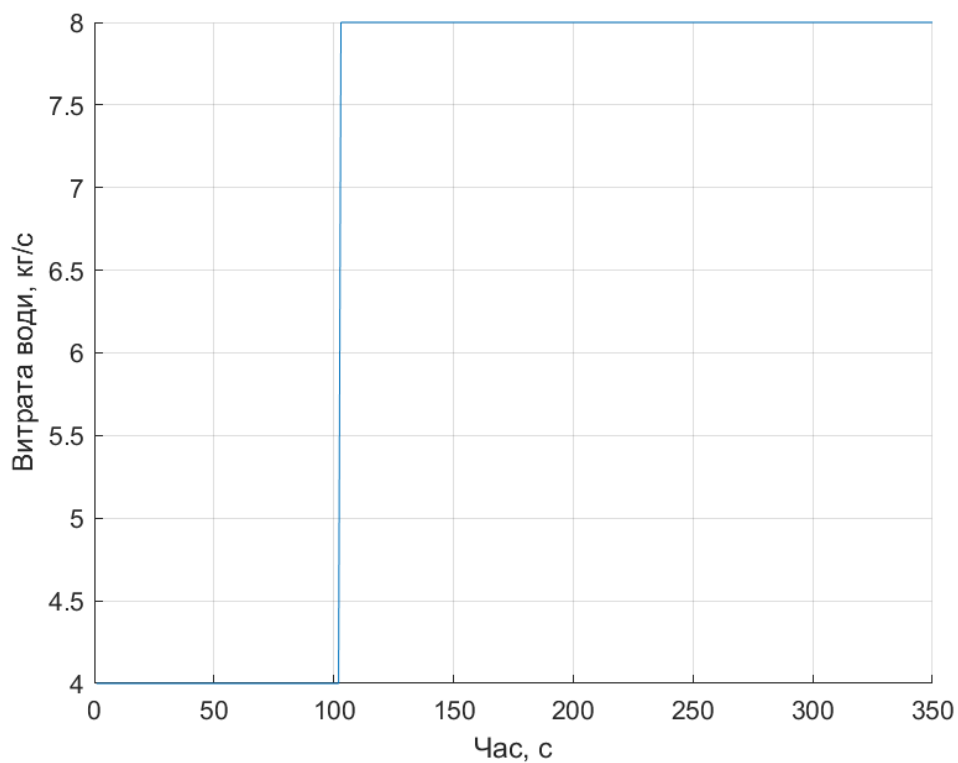


Рис. 5.21 – Графік лінії перемикання

Почекавши 103 секунд, система вийшла на правильний рівень і не потребує адаптації.

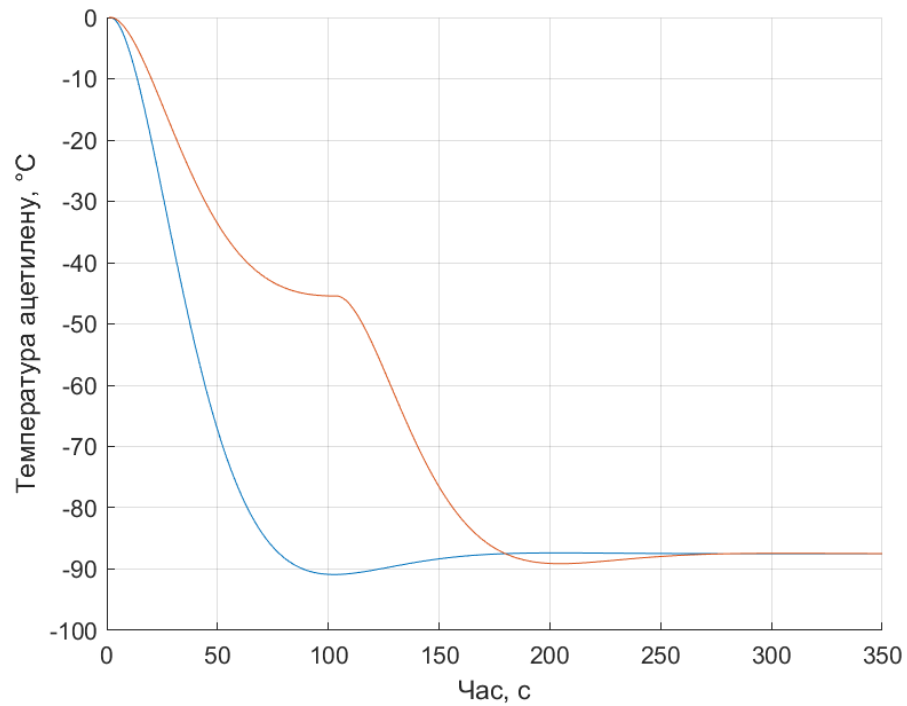


Рис. 5.22 – Графік змінних стану об'єкта до та після перемикання

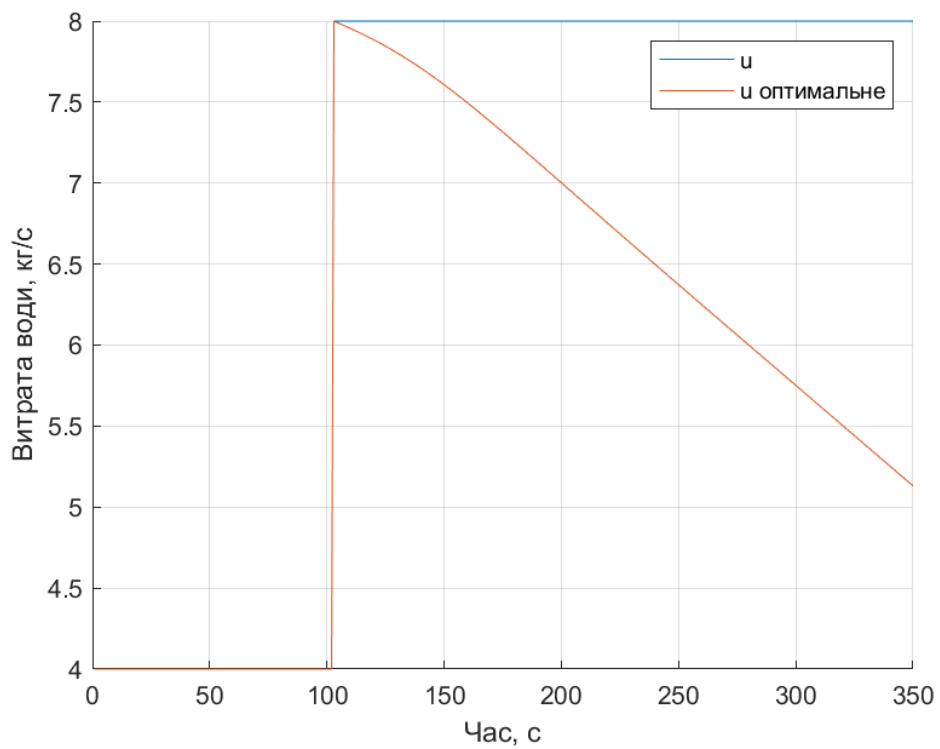


Рис. 5.23 – Графік динаміки зміни управління витратою холодоагенту

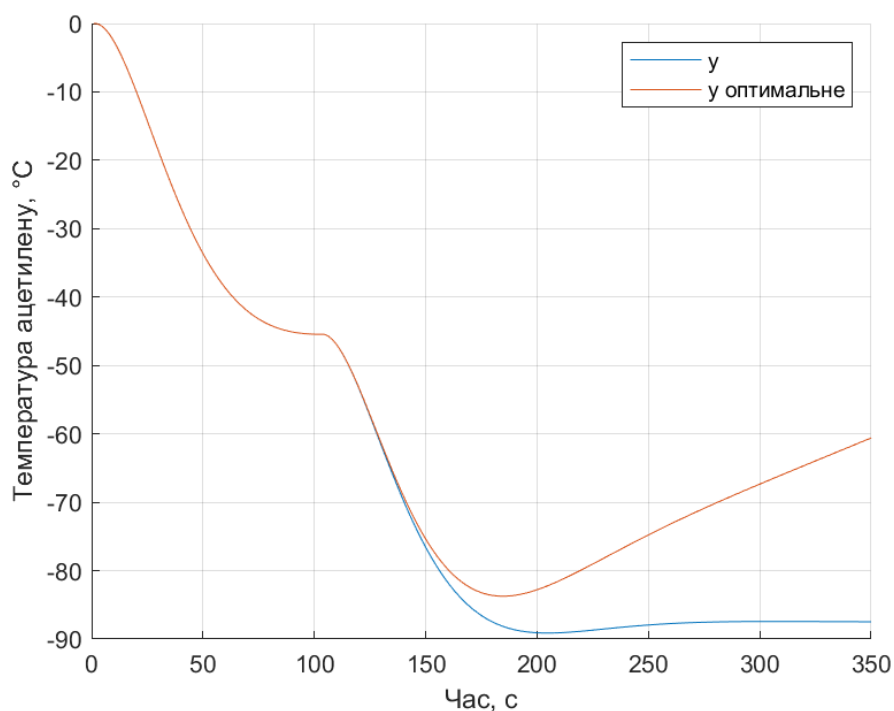


Рис. 5.24 – Графік динаміки температури ацетилену на етапах керування

Висновок: У цьому розділі дослідження увагу зосереджено на оптимізації процесу синтезу вінілхлориду шляхом гідрохлорування ацетилену. Нам вдалося встановити оптимальний температурний режим ацетилену, скоротити обсяги подачі охолоджувальної води до холодильника та покращити динамічні характеристики системи шляхом розрахунків та розробленому лінійно-квадратичному ПІ-регулятору. Проте, через високу обчислювальну складність запропонованих алгоритмів, що створює певні обмеження для впровадження цього методу в системах, що працюють у реальному часі.

6. СТВОРЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

6.1. Опис ідеї проекту

Полівінілхлорид є одним з найбільш поширених полімерів, що отримується шляхом полімеризації вінілхлориду. Однак, на відміну від інших пластиків, ПВХ критично чутливий до температурних режимів та наявності домішок під час вторинної переробки. При перегріві або попаданні сторонніх матеріалів відбувається деструкція матеріалу з виділенням хлороводню, що псує обладнання та є небезпечним для персоналу.

Суть запропонованої ідеї полягає в автоматизації процесів керування лінією переробки. Замість покладання на ручний процес, проект передбачає впровадження системи розпізнавання та сортування вхідної сировини, а також адаптивних алгоритмів керування екструдером, що автоматично корегують параметри (тиск, температуру, швидкість) в залежності від властивостей сировини.

Таблиця 6.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення автоматизованої лінії переробки ПВХ з інтелектуальним керуванням	Виробництво ПВХ-профілів та труб	- Зниження собівартості готової продукції за рахунок використання власної вторинної сировини - Гарантії якості сировини - Екологічний підхід

Таблиця 6.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) Товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
1.	Чистота вихідної сировини	Висока	Низька	Середня		+	
2.	Рівень автоматизації керування	Висока	Низький	Висока			+
3.	Вартість обладнання (інвестиції)	Середня	Низька	Висока			+
4.	Складність ремонту та налаштування	Середня	Низька	Висока		+	

6.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В основі пропозиції стартап-проекту лежить ідея створення автоматизованого виробничого модуля, який поєднує класичні методи механічної переробки полімерів із сучасними інформаційними технологіями. Ключова технічна пропозиція полягає у відмові від ручного керування параметрами екструзії на користь адаптивної системи автоматичного регулювання, що базується на безперервному моніторингу якості вхідної сировини.

Технологічна реалізація проекту передбачає використання наступні технології:

1. Механічної переробки: процеси подрібнення, нагрівання, пластикації та грануляції ПВХ.
2. Промислової автоматизації: використання програмованих логічних контролерів (ПЛК) для збору даних з датчиків температури, тиску та навантаження приводу.
3. Технічного зору: застосування оптичних сенсорів та алгоритмів розпізнавання сировини.

Таблиця 6.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ з/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення автоматизованої лінії переробки ПВХ з інтелектуальним керуванням	1. Технології механічної переробки	Наявні	Доступні
		2. Технології технічного зору	Наявні, потребують адаптації	Доступні
		3. Технології автоматичного керування	Наявні, потребують розробки алгоритмів	Доступні

За результатами аналізу таблиці 6.3 можна зробити висновок щодо повної можливості технологічної реалізації проекту, оскільки базові процеси механічної переробки добре вивчені та забезпечені обладнанням, ключові інноваційні компоненти базуються на доступних програмних бібліотеках та апаратних засобах, що не потребують фундаментальних наукових відкриттів, а лише інженерної розробки.

6.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Запропонований проект спрямований на ринок промислового обладнання для переробки полімерів та автоматизації виробництва. Цей ринок зараз перебуває на стадії активного росту через зростання цін на первинну сировину та посиленням екологічного законодавства, а також глобальні тренди на повторне використання відновлених ресурсів.

Таблиця 6.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	3, (в Україні: ТОВ «Полімер-Інжиніринг», ТОВ «Техно-Т», ТОВ «Укрбіо Транс-Сервіс»)
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум. од	150
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Експертність
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Вимоги до продукції відповідно до ДСТУ, ГОСТ, ISO
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	20-30 %

Ринок є привабливим для реалізації ідеї стартап-проекту, оскільки демонструє динаміку зростання, не є перенасиченим пропозицією від поточних гравців. Рентабельність проектів у галузі є більшою за альтернативні вкладення, такі як банківський депозит, що свідчить про доцільність подальшої розробки.

Сформуємо характеристику потенційних клієнтів та ймовірні вимоги до виробленої продукції. Дані наведено у таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (сегменти)	Відмінності у поведінці клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Зниження собівартості продукції	Виробники ПВХ-профілів, труб, кабелю	Орієнтованість виробництв на збільшенні прибутків. Внутрішні стандарти якості. Готові вкладати кошти в оптимізацію виробництва.	Сумісність з існуючою лінією, можливість включення в існуючий процес виробництва, висока якість вхідної речовини, автономність роботи, надійність технічного рішення.
2.	Отримання прибутку від переробки відходів	Сміттєпереробні заводи та комунальні підприємства	Чутливість до ціни обладнання та вартості обслуговування. Працюють з дуже різномірною сировиною.	Ефективна переробка різного виду сировини, надійність, простота ремонту, низьке енергоспоживання.

На основі аналізу зовнішнього середовища визначено фактори, що можуть негативно впливати на реалізацію проекту та створювати загрози, та фактори, що сприяють його розвитку. Фактори загроз та можливостей подані у таблицях 6.6 та 6.7.

Таблиця 6.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Нестабільність енергопостачання	Аварійні відключення електроенергії є критичними для устаткування, раптова зупинка роботи призводить до тривалої зупинки та очищення обладнання від застиглих речовин.	Впровадження в систему керування режим аварійної зупинки та використання джерел аварійного живлення для контролерів коректного завершення процесу.
2.	Коливання цін на комплектуючі	Основні вузли автоматизації (ПЛК, камери технічного зору, двигуни) є імпортними. Підвищення собівартість установки.	Укладання довгострокових контрактів з постачальниками електроніки. Партнерство з вітчизняними виробниками в Україні.
3.	Низька якість вхідної сировини	Ризик того, що система технічного зору не зможе розпізнати нові, нетипові види сировини, що призведе до зниження якості.	Віддалене оновлення програмного забезпечення на до навчених даних.
4.	Конкуренція з боку дешевих аналогів	Поява на ринку дешевших іноземних установок з базовим функціоналом.	Акцент у маркетингу на показниках якості, меншого браку вихідної продукції, важливість використання технологій для підвищення якості.

Таблиця 6.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Посилення екологічного законодавства	Впровадження норм використання вторинної сировини вимагатиме від виробників використовувати більший відсоток вторинної сировини у новій продукції. Це різко підвищує попит на лінії переробки.	Отримання екологічних сертифікатів відповідності та позиціонування проекту як інструменту для дотримання норм.
2.	Масштабна відбудова інфраструктури	Велика кількість будівельних відходів (демонтовані вікна, труби) створює надлишок дешевої сировини для переробки, яку потрібно утилізувати.	Оновлення програмного забезпечення з до навчанням на нових даних.
3.	Тренд на цифровізацію	Підприємства шукають обладнання з достатнім рівнем технологій цифровізації даних.	Розробка системи збору статистики та моніторингу потрібний параметрів устаткування.

Загальні риси конкуренції на ринку обладнання для переробки полімерів наведено в таблиці 6.8.

Таблиця 6.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії)
1. Тип конкуренції	На ринку діє олігополія – невелика кількість виробників з диференційованим товаром. Кожен пропонує унікальну продукцію.	Компанії необхідно чітко виділити свою унікальну торгову пропозицію.
3. За галузевою ознакою	Внутрішньогалузева.	Необхідність постійного моніторингу розвитку технологій та впровадження інновацій, проводити консультації та опитування потреб клієнтів.
4. Конкуренція за видами товарів:	Товарно-видова. Споживач обирає між різними видами ліній переробки: ручні/механічні проти складних автоматизованих.	Акцент на показниках якості, важливість використання технологій для її підвищення, меншого браку вихідної продукції,
5. За характером конкурентних переваг	Змішана. Певні виробники мають нижчу ціну, інші — високу якістю та бренд.	Пропонувати якість та технологічний функціонал.
6. За інтенсивністю	Не марочна. З фокусом на ціні чи функціональності товару	Демонстрація роботи прототипу, надання тестового періоду, участь у профільних виставках.

На основі аналізу конкурентного середовища та технічних переваг проекту визначено ключові фактори конкурентоспроможності, обґрунтування яких наведено в таблиці 6.9.

Таблиця 6.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, що роблять фактор значущим)
1.	Рівень автоматизації та інтелектуалізації	Вирішальний фактор для якості. На відміну від бюджетних аналогів, де якість залежить від уважності оператора, пропонується система автоматично відзначає домішки. Це гарантує клієнту відсутність поломок дорогого обладнання через неякісну сировину.
2.	Енергоефективність	Електроенергія складає до 30-40% собівартості переробки. Автоматична оптимізація роботи екструдера дозволяє знизити споживання на 15-20%, що прямо збільшує чистий прибуток клієнта.
3.	Вартість обладнання	Клієнти шукають найкращі рішення за найменшу ціну. Пропоноване устаткування є інноваційним за середньою ринковою ціною.
4.	Сервісна підтримка та локалізація	Для виробництва критичним є час простою. Наявність можливості планового обслуговування та запчастин є вагомим аргументом на користь вітчизняного продукту.

Таблиця 6.10 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ з/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали (вага) 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні зі стартап проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Рівень автоматизації та інтелектуалізації	5						+	
2	Енергоефективність	4						+	
3	Вартість обладнання	6					+		
4	Сервісна підтримка та локалізація	5							+
	Всього (зважена оцінка):	20							

Останнім етапом ринкового аналізу впровадження проекту є складання SWOT-аналізу, зведеного підсумку стратегічної позиції стартап проекту.

Таблиця 6.11 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Високий рівень якості за рахунок автоматизації та використання адаптивних алгоритмів 2. Оптимальна вартість обладнання 3. Локальне виробництво 4. Енергоефективність	1. Відсутність ринкової репутації 2. Залежність від імпорتنих компонентів 3. Обмежений маркетинговий бюджет
Можливості	Загрози
1. Вхід на ринок з інноваційним рішенням 4. Грантова підтримка місцевим виробництвам	1. Енергетична нестабільність 2. Зростання собівартості продукту 3. Демпінг конкурентів 4. Падіння платоспроможності клієнтів

На основі проведеного SWOT-аналізу формуємо альтернативну стратегію виходу на ринок.

Таблиця 6.12 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ з/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Модернізація існуючого обладнання. Продаж комплекту автоматизації для встановлення на наявні устаткування на виробництвах клієнтів.	Висока.	Стислі (3-6 місяців)
2.	Виготовлення готових автоматизованих ліній.	Низька.	Тривалі (12-18 місяців).

З наведених варіантів для подальшої реалізації проекту найкращим буде обрати модернізації існуючого обладнання, оскільки для неї отримання ресурсів є більш простим та ймовірним, строки реалізації є значно коротшими, що дозволяє швидше отримати перший прибуток та відгуки клієнтів.

6.4. Розроблення ринкової стратегії та вибір стратегії конкурентної поведінки

Першим кроком розробки стратегії є вибір та аналіз цільових сегментів ринку, на яких планується просування продукту. Оцінка привабливості сегментів наведена в таблиці 6.13.

Таблиця 6.13 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Приватні виробники ПВХ-продукції.	Висока. Підприємства мають власний брак продукції, або значні залишки сировини, що можуть бути перероблені на нову сировину.	Стабільний. Попит на модернізацію виробництв існує постійно.	Середня.	Середня.
2.	Комунальні підприємства.	Низька. Не зацікавлені в додаткових прибутках від переробки. Більш консервативні, часто обмежені бюджетом і звикли до простих механічних рішень.	Низький.	Низька.	Складна. Складні процедури закупівель.

За результатами аналізу обрано цільову групу приватні виробники ПВХ-продукції, як пріоритетний сегмент. Для охоплення ринку обрано стратегію концентрованого охоплення ринку, за для зосередження зусиль на одному ключовому сегменті.

Формуємо базову стратегію розвитку та критерії конкурентної поведінки.

Таблиця 6.14 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива	Ключові	Базова стратегія розвитку
---	---------------------	---------	---------------------------

з/п	розвитку та стратегія охоплення ринку	конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	
1.	Інтелектуальна модернізація існуючого обладнання. Стратегія охоплення: Концентрований маркетинг (робота з сегментом виробників ПВХ-профілів та труб).	1. Технологічна унікальність, використання машинного зору та алгоритмів аналізу. 2. Сервіс та локалізація.	Стратегія диференціації Стартап фокусується на наданні продукту з автоматизацією, автономним інтелектуальним керуванням, які сприймаються клієнтами як додаткова цінність, за яку вони готові платити.

Таблиця 6.15 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні.	Так. 1. Переманювати клієнтів, які незадоволені якістю дешевих ліній. 2. Залучати підприємства, які раніше не займалися переробкою, але змушені це робити через нові екологічні норми.	Так, частково. Копіюється механічна частина.	Стратегія заняття конкурентної ніші Компанія зосереджується на одному сегменті, де пропонує кращий сервіс та адаптивність, ніж масові виробники.

На основі вимог споживачів та обраної стратегії маркетингу сформовано систему позиціонування проекту на ринку.

Таблиця 6.16 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	1. Зниження витрат на сировину. 2. Автоматизація та мінімізація впливу людського фактору.	Стратегія диференціації (Відмінність від конкурентів за рахунок унікальних властивостей товару).	1. Інтелектуальна система розпізнавання та алгоритми аналізу. 2. Система сама підлаштовує режими роботи під якість сміття. 3. Автономність завдяки автоматизованій системі керування.	1. Автономність 2. Інтелект 3. Інновації

Результатом виконання розділу стала узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки. Стартап-проект виходитиме на ринок, фокусуючись на сегменті виробників ПВХ-продукції, використовуючи стратегію диференціації з позиціонуванням "Інтелектуальне та безпечне рішення для еко переробки вторинної сировини".

6.5. Формування маркетингової концепції товару

Першим кроком є визначення ключових переваг, які отримає споживач.

Таблиця 6.17 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1.	Отримання чистої сировини з відходів	Можливість використання вторинного ПВХ без втрати їх фізико-механічних властивостей.	Автоматичне розпізнавання та видалення дрібних домішок, які пропускають звичайні механічні сепаратори конкурентів.
2.	Захист обладнання від пошкоджень та автономний режим	Відсутність аварійних зупинок.	Автоматична система керування та захисту, швидкодія системи відсікання аварійних ситуацій вища, ніж реакція людини-оператора.

Розробка трирівневої маркетингової моделі товару з уточненою ідеєю продукту, його фізичні складові та характеристики, особливості процесу його надання.

Таблиця 6.18 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Технологія перетворення відходів у вторинну сировину.
II. Товар у реальному виконанні	1. Властивості/характеристики: – Продуктивність: 150-300 кг/год – Енергоспоживання: < 1.3 кВт·год. – Тип керування: Сенсорна панель з інтуїтивним інтерфейсом. – Безпека: Системи аварійного захисту. – Автоматизація: автономний режим роботи. 2. Якість: Відповідність нормам. 3. Пакування: Модульна поставка та програмне забезпечення на захищеному носії. 4. Марка: "Еco-PVC Loop".
III. Товар із підкріпленням	– Пусконаладжувальні роботи та навчання персоналу. – Віддалена діагностика через інтернет та моніторинг помилок. – Оновлення програмного забезпечення та алгоритмів розпізнавання.
Захист від копіювання: Авторське право.	

Таблиця 6.19 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
1.	Середній рівень. 80 000 – 200 000 грн.	Середній рівень Програмне забезпечення базової автоматизації: 70 – 120 тис грн.	Середній та Високий. Виробники ПВХ-профілів та труб — це стабільний бізнес із оборотами від 20 млн грн/рік.	Нижня межа: 80 тис грн. Верхня межа: 150 тис грн.

Таблиця 6.20 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Процес закупівлі займає 3-6 місяців і вимагає проведення переговорів, технічних презентацій та демонстрації роботи прототипу.	Доставка та монтаж.	Відсутність посередників, що дозволяє зберегти контроль над якістю впровадження та отримувати прямий зворотний зв'язок.	Власна система збуту.

Таблиця 6.21 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Інформаційний пошук та скептицизм. Клієнти активно шукають технічні рішення в інтернеті, читають специфікації та дивляться відеоогляди обладнання. Вони не довіряють словам без доказів.	1. Галузеві виставки. 2. Digital-канали: LinkedIn, YouTube, SEO-оптимізований сайт. 3. Email-розсилка комерційних пропозицій по базі заводів.	1. Зниження витрат на сировину. 2. Автоматизація та мінімізація впливу людського фактору.	Сформувати довіру та інтерес.	Витрачайте менше - Виробляйте більше.

За результатами аналізу стартап-проекту можна зробити висновок про високу ймовірність успішної комерціалізації, що підтверджує зростання ринку полімерів, відповідно зростання потреби на його переробку, попит на автоматизовані рішення стабільний, а рентабельність проекту є привабливою для інвесторів. Проект має хороші перспективи завдяки позиціонуванню.

Високі технічні та інноваційні ідеї зменшують ризик появи дрібних конкурентів.

ВИСНОВОК

У магістерській дисертації виконано дослідження технології виробництва вінілхлориду методом гідрохлорування ацетилену та розроблено відповідну систему автоматизації з обґрунтуванням технічних засобів. Ключовим етапом роботи стала ідентифікація математичної моделі холодильника, на базі якої спроектовано та досліджено дві стратегії керування: з використанням нечіткої логіки та МРС-регулятора. Також було вирішено задачі оптимізації процесу охолодження та керування з обмеженням часу.

В ході дослідження було проведено порівняно ефективність двох систем керування: нечіткої системи та МРС-регулятора.

Порівняльний аналіз ефективності показав беззаперечну перевагу МРС-регулятора. Він забезпечує вихід на усталений режим всього за 14 секунд, проти 170 секунд у системи з нечіткою логікою, характеризується відсутністю перерегулювання, простотою налаштування та високою адаптивністю до збурень.

Результати досліджень також містять пропозицію щодо початкового стартап-проєкту, спрямованого на розробку автоматизованої лінії переробки полівінілхлориду з інтелектуальним керуванням.

Результати дослідження можуть послужити важливою базою для модернізації систем керування холодильника, зокрема в контексті виробництва у виробництві вінілхлориду.

ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с. : іл. – Бібліогр.: с. 230-231. – 2003.
2. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / М. В. Лукінюк ; М-во освіти і науки України, НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 2,93 Мбайт). – Київ : Політехніка, 2008. – 236 с. – Назва з екрана. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49706>. – ISBN 978-966-622-287-2. (дата звернення: 10.10.2025).
3. Кубрак А.И., Жученко А.И., Кваско М.З. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем [Текст]: Навч. посібн. – К.: ІВЦ “Вид-во «Політехніка»”, 2004. – 424с.
4. Коржик М.В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab / Навч. посібн. для студентів вищих навч. закл. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 174 с.
5. Автоматизація технологічних процесів галузі – 2. Розрахунок параметрів регуляторів [Текст]: Метод. вказівки до викон. лабор. робіт для студ. напр. „Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології” // Уклад.: Д.О. Ковалюк, В.С. Цапар, О.О. Ковалюк – К. : НТУУ ”КПІ“, 2015. – 33 с.
6. Комп'ютерно-інтегровані технологічні комплекси – 2. Основи теорії інформації та кодування: Метод. вказівки до викон. розрах. роботи для студ. напряму підготовки „Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології” / Уклад.: Я. Ю. Жураковський, О. С. Жураковська.– К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 79 с.

7. VINYL CHLORIDE | CAMEO Chemicals | NOAA. CAMEO Chemicals | NOAA. URL: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/1692> (date of access: 15.10.2025).
8. Промислові засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2003
9. Hydrochlorination of acetylene to vinyl chloride monomer over bimetallic Au–La/SAC catalysts / H. Zhang et al. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2012. Vol. 18, no. 1. P. 49–54. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.11.075> (date of access: 15.10.2025).
10. Production of vinyl acetate from acetylene / O. B. S. Ugli et al. ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal. 2020. Vol. 10, no. 6. P. 1031 URL: <https://doi.org/10.5958/2249-7137.2020.00754.5> (date of access: 15.10.2025).

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	Ацетилен	35..45 °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	35..45 °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	35..45 °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 холодильника	30..40 °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 з-д, м. Луцьк
2Б	Температура	Те саме	Те саме	Пульт керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; $I_{\text{вих}} = 0...5 \text{ мА}$, $4...20 \text{ мА}$; виходи: 1 аналоговий і 2 дискретні; НСХ перетворювачів: термоелектричних – А-1, В, К, L, S, опору – 50П, 100П, 50М, 100М; граничнодопустима зведена похибка 0,2 %; цифрова індикація ($4...20 \text{ мА}$), $U_{\text{вих}} = 0...10 \text{ В}$; 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.