

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ

Група АКП-21-1

Зімакін Максим

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Зімакін Максим Георгійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.53

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розробка системи автоматизації технологічного

(назва роботи)

процесу виробництва полієфірів

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

к.т.н., доцент

О.В Кучмистенко

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Рецензент

к.т.н., доцент

О.В Кучмистенко

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1

М.Г. Зімакін

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент

А.І. Лагойда

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

к.т.н., доцент

А.І. Лагойда

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ - 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ.

А.І Лагойда.

«___» _____ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Зімакіну Максиму Георгійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка система автоматизації технологічного процесу
виробництва полієфірів

керівник роботи Андрій Іванович Лагойда, кандидат технічних наук, доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Технологічна схема процесу, опис та параметри
проходження процесу, каталоги, методичні вказівки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) Вступ. 1 Аналіз технологічного процесу виробництва полієфірів.

2. Математичне моделювання та ідентифікація реактора.

3. Синтез одноконтурної та каскадної САК. 4. Розробка основних проектних
рішень.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Лист 1 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКТ – 06.00.00.001

Лист 2 – Принципові електричні схеми – БР.АКТ – 06.00.00.002

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу виробництва полієфірів	15.05.2025 17.05.2025	
2	Опис математичної моделі реактора	20.05.2025	
3	Структурна та параметрична ідентифікація об'єкта керування	25.05.2025	
4	Перевірка моделі на адекватність	27.05.2025	
5	Вибір оптимального регулятора	30.05.2025	
6	Розробка кінцевої моделі об'єкта керування	02.06.2025	
7	Опис технічних засобів автоматизації	05.06.2025	
8	Розробка функціональної схеми	06.06.2025	
9	Проектування принципів схем	07.06.2025	

Студент _____
(підпис)

М.Г Зімакін _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

А.І Лагойда _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 83 сторінки друкованого тексту, 78 рисунків, 4 таблиці, 15 посилань на джерела.

Тема: “Розробка системи автоматизації технологічного процесу виробництва полієфірів”

Об’єкт дослідження: тепловий режим роботи реактора-полімеризатора

Мета роботи: розробка автоматичної системи керування тепловим режимом реактора-полімеризатора.

Методи дослідження: ідентифікація, аналіз та синтез одноконтурної та каскадної систем керування, імітаційне моделювання, отримання перехідних характеристик процесу.

Результати бакалаврської роботи: для досягнення поставленої задачі було проведено опис технологічної схеми виробництва полієфірів, наведено характеристики технологічного обладнання. Було здійснено вибір та обґрунтування параметрів контролю та регулювання. Проведено математичний опис об’єкта керування. На основі даних експерименту було змодельована АСК витрати теплоносія. За допомогою програмного забезпечення Matlab по експериментальним даним було розраховано параметри налаштування регуляторів для одноконтурної та каскадної АСР.

Ключові слова: реактор, регулятор, об’єкт керування, каскадна система, полієфір, система керування, передавальна функція

ANNOTATION

Bachelor's thesis contains: 83 pages of printed text, 78 figures, 4 tables, 15 references to sources.

Topic: “Development of an automation system for the technological process of polyester production”

Object of research: thermal mode of operation of the reactor-polymerizer

Project goal: development of an automatic control system for the thermal mode of the reactor-polymerizer.

Research methods: identification, analysis and synthesis of single-loop and cascade control systems, simulation modeling, obtaining transient characteristics of the process.

Results of the bachelor's thesis: to achieve the task, a description of the technological scheme for the production of polyesters was carried out, the characteristics of the technological equipment were given. The selection and justification of control and regulation parameters were carried out. A mathematical description of the control object was carried out. Based on the experimental data, the ASC of the coolant flow was simulated. Using the Matlab software, the parameters for setting the regulators for the single-loop and cascade ASR were calculated based on the experimental data.

Keywords: reactor, regulator, control object, cascade system, polyester, control system, transfer function

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІЕФІРІВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ.....	10
1.1 Призначення установки та суть процесу	10
1.2 Характеристика продукції, сировини та реагентів	12
1.3 Аналіз технологічної схеми установки по виробництву поліефірів	13
1.4 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання	21
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	25
2.1 Опис математичної моделі	25
2.2 Отримання динамічної та статичної характеристик.....	28
2.3 Ідентифікація реактора	31
2.4 Перевірка отриманої моделі на адекватність	40
2.4.1 Створення моделі об'єкта в Matlab Simulink	40
2.4.2 Перевірка на адекватність	41
3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	47
3.1 Синтез одноконтурної системи керування та підбір регулятора	47
3.2 Синтез каскадної системи керування.....	61
4 РОЗРОБКА ОСНОВНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ПО АВТОМАТИЗАЦІЇ	64
4.1 Вибір технічних засобів автоматизації	64
4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації	73
4.3 Розробка принципової електричної схеми сигналізації.....	75
4.4 Розробка принципової електричної схеми керування двигуном	76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	80

					БР.АКП-06.00.00.000 ПЗ					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка системи автоматизації технологічного процесу виробництва поліефірів			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Зімакін М.Г						7	7	85
Перевір.		Лагойда А.І.						ІФНТУНГ, АКП-21-1		
Реценз.										
Н. Контр.		Кучмистенко О.В								
Затверд.		Лагойда А.І.								

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

САК – система автоматичного керування

АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом

П – пропорційний

П і ЗА – прилади й засоби автоматизації

ПІ – пропорційно-інтегральний

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний

ДЕГ – діетиленгліколь

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку промисловості та зростання вимог до якості продукції, енергоефективності, екологічної безпеки і технічної надійності особливого значення набуває автоматизація виробничих процесів. Застосування автоматизованих систем управління дає змогу досягти високої точності контролю параметрів технологічних операцій, підвищити ефективність використання ресурсів, зменшити вплив людського чинника та забезпечити стабільність якості продукції.

Одним із перспективних напрямів хімічного виробництва є синтез полієфірів — складних полімерних сполук, які широко використовуються в текстильній промисловості (наприклад, полієфірні волокна), у виробництві пластмас (поліетилентерефталат), упаковки, лакофарбових матеріалів, клеїв, композиційних матеріалів та інших виробів. Виробництво полієфірів включає складні процеси, такі як поліетерифікація, поліконденсація, контролювання температурних режимів, тиску, витрати реагентів та інших параметрів, які мають суттєвий вплив на кінцеві властивості продукту.

Автоматизація технологічного процесу виробництва полієфірів є необхідною умовою для досягнення стабільного та економічно ефективного виробництва, яке відповідатиме сучасним стандартам якості та безпеки. Застосування сучасних методів регулювання — таких як каскадне керування, ПІД-регулятори, логічні алгоритми та адаптивні системи — дозволяє гнучко реагувати на зміну умов процесу та досягати оптимального режиму роботи обладнання.

Мета цієї бакалаврської роботи полягає в розробці системи автоматизації технологічного процесу виробництва полієфірів, яка забезпечуватиме ефективне керування основними параметрами синтезу з урахуванням динамічних змін у процесі. У межах роботи передбачено аналіз діючих схем керування, розробку структурної та функціональної схем системи, вибір оптимальних засобів автоматизації, а також моделювання системи у середовищі MATLAB Simulink.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		9

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІЕФІРІВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ

1.1 Призначення установки та суть процесу

Синтез поліефірів — це складний процес із кількома етапами, що базується на реакції поліконденсації між дикарбоновими кислотами (або їх ангідридами) та двоатомними спиртами. У результаті цього процесу утворюються макромолекули з періодично впорядкованими естерними групами. Ця реакція — це тільки початок великої технологічної схеми виробництва поліефірів.

Тут якість сировини має першочергове значення. Реагенти мають бути дуже чистими, бо навіть трохи домішок можуть негативно вплинути на кінетику реакції, змінити хімічну рівновагу, викликати побічні процеси або призвести до неконтрольованого зшивання полімерного ланцюга. Це особливо важливо для термочутливих систем, де синтез відбувається при максимально допустимих температурах стабільності вихідних сполук.

Поліконденсація зазвичай здійснюється в реакційних об'ємах, оснащених мішалками, системами температурного і тискового регулювання, а також вакуумним обладнанням для видалення побічних летких продуктів. Введення каталізаторів — найчастіше солей металів або органічних кислот — дозволяє керувати швидкістю та напрямком перебігу полімеризації. Температурний режим має критичне значення: за низьких температур швидкість реакції знижується, у той час як підвищення температури понад оптимальні межі може викликати термічну деструкцію полімеру.

Контроль тиску в реакційній системі також відіграє важливу роль. Як правило, використовуються атмосферний або знижений тиск з метою ефективного видалення побічних продуктів, зокрема води або спиртів, що, у свою чергу, сприяє зсуву рівноваги в бік утворення полімерного продукту.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		10

Тривалість реакції може варіюватися від кількох годин до декількох діб залежно від складу системи та заданих параметрів процесу.

Отриманий після реакції полімерний розчин зазвичай містить залишки мономерів, низькомолекулярні фрагменти та побічні речовини. Їх наявність може зумовлювати погіршення як фізико-механічних, так і експлуатаційних характеристик матеріалу. З цією метою здійснюється багатоступенева очистка, що включає фільтрацію (для видалення механічних домішок), промивання (для усунення розчинних залишків), дистиляцію (для вилучення летких речовин). У складніших випадках застосовуються комбіновані методи з додатковими стадіями нейтралізації або адсорбції.

Заключним етапом первинної обробки є сушка. Наявність вологи, навіть у незначних кількостях, здатна порушити термостабільність полімеру, погіршити його адгезійні властивості, а також спричинити появу дефектів у вигляді бульбашок при подальшій переробці. У промисловій практиці для цього зазвичай застосовується вакуумне сушіння при контрольованому підвищенні температури.

Наступний етап — фізико-механічна трансформація полімеру у готову форму. До основних методів переробки належать екструзія (для формування гранул або стрічкових виробів), лиття або роздування плівок, витягування волокон з подальшою термообробкою. Вибір конкретної технології обумовлюється вимогами до морфології та функціональних характеристик кінцевого продукту.

Області застосування полієфірів є надзвичайно різноманітними. Вони включають виробництво полієфірних волокон (зокрема поліетилентерефталату — ПЕТ), поліуретанів, синтетичних смол для лакофарбових матеріалів і клеїв, а також біорозкладних полімерів, придатних до використання в умовах природного середовища.

Таким чином, ефективний синтез полієфірів — це складно організований технологічний процес, в якому кожен параметр (температура, тиск,

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

співвідношення компонентів, час реакції, тип каталізатора) має вузькі межі допуску.

Відхилення від них може призвести до зниження якості продукту, зміни фазового стану чи погіршення функціональних властивостей. У разі дотримання всіх технологічних вимог можливе отримання стабільного полімеру з прогнозованими характеристиками, що дозволяє його успішне застосування в широкому спектрі галузей промисловості.

1.2 Характеристика продукції, сировини та реагентів

Полієфіри є важливою групою полімерних матеріалів, які широко використовуються у різних галузях промисловості завдяки своїм унікальним властивостям. Характеристики вхідної сировини є дуже важливим у виробництві якісної готової продукції. Гліцерин, який є триатомним спиртом, забезпечує утворення розгалужених полімерних зв'язків, використовується для підвищення механічної стійкості і та термостійкості готового полієфіру.

Розгалужені полімери, що містять гліцерин, демонструють покращену в'язкість і хімічну стійкість, проте їхня пластичність може бути значно зниженою через зменшену кристалічність. Полієфіри з гліцерином використовуються у виробництві високоякісних лаків та фарб, композитів та біорозкладних полімерів. Додавання діетиленгліколю сприяє формуванню більш гнучких та еластичних полімерів. Він робить матеріал м'якшим, додає йому стійкості до розтріскування.

Продукти на основі ДЕГ широко використовуються у текстильній промисловості для виготовлення волокон, у виробництві пляшок, плівок та технічних пластмас. Адипінова та себацінова кислоти визначають довжину та жорсткість полімерного ланцюга. Адипінова кислота допомагає отримувати міцні і стійкі до тепла матеріали, які використовують для плівок, лаків та пластику. Себацінова кислота робить полієфіри більш гнучкими і стійкими до

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

ударів – їх застосовують для виробництва мастил, гідравлічних олій, ізоляції та біорозкладних пластмас.

1.3 Аналіз технологічної схеми установки по виробництву поліефірів

Процес виробництва поліефірів за наведеною схемою включає кілька основних послідовних етапів, що забезпечують якісне отримання матеріалу з оптимальними властивостями. Сировиною для синтезу поліефірів служать діетиленгліколь та гліцерин – основні спиртові компоненти, а також дикарбонові кислоти. Діетиленгліколь зберігається у сховищі (1) і надходить у перегінний апарат (2), де проходить попереднє очищення та випаровування домішок під дією пари. Цей етап критично важливий для забезпечення чистоти сировини, що позитивно впливає на стабільність реакції та якість кінцевого продукту.

Одночасно гліцерин із резервуара (6) підігрівається в підігрівнику, що дозволяє підтримувати його температуру на рівні, необхідному для прискорення хімічної реакції в подальшому.

Основна реакція відбувається в реакторі (7), куди через окремі входні патрубки подаються фталевий ангідрид, адипінова кислота, себацінова кислота, діетиленгліколь та гліцерин. У реакторі під впливом температури та каталізаторів відбувається реакція поліконденсації, в результаті якої утворюються ефірні зв'язки між спиртовими та карбоксильними групами. Цей процес супроводжується виділенням молекул води, які необхідно своєчасно видаляти, щоб зсунути рівновагу реакції в бік утворення полімери.

Вода, що утворюється під час реакції, відводиться та конденсується у холодильнику (9). Збирач води (10) накопичує конденсат, а система циркуляції азоту забезпечує стабільність тиску і виконує функцію бар'єру проти проникнення кисню.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.4 Технічна характеристика технологічного обладнання

Резервуари для рідин використовуються в різних галузях: в промисловості для зберігання хімічних речовин, нафти, газу, у харчовій промисловості для зберігання напоїв, молока, води, у будівельній галузі для зберігання технічних рідин, а також у сільському господарстві, комунальному господарстві та інших сферах. Ефективна робота резервуарів залежить від дотримання вимог безпеки, герметичності, стійкості до корозії та можливості швидкого доступу до рідини для обслуговування. Вони можуть бути стаціонарними або мобільними, залежно від завдань і умов експлуатації.

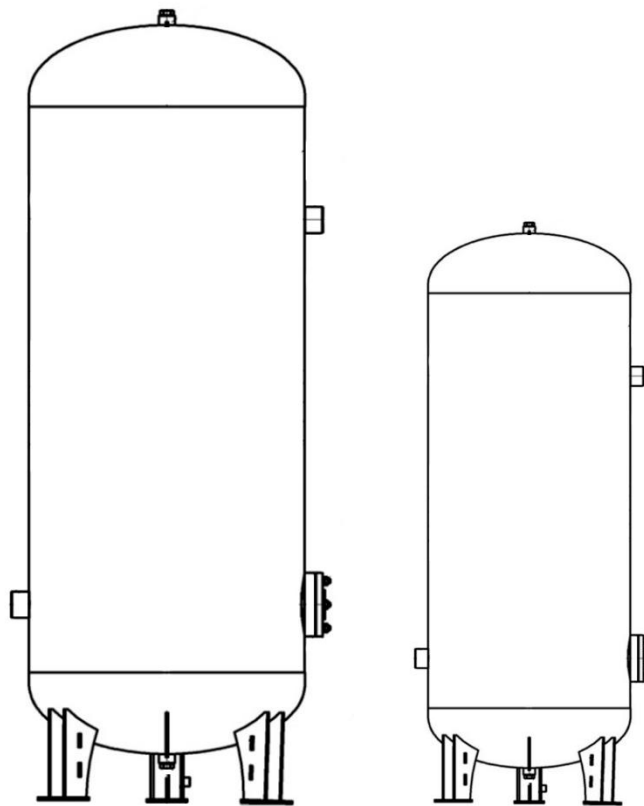


Рисунок 1.2 – Технологічна схема виробництва полієфірів

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		15

Перегонний апарат складається з кількох основних елементів: ректифікаційної колони, конденсатора, підігрівача, приймальних ємностей та системи контролю. Процес перегонки здійснюється шляхом нагріву діетиленгліколю до його робочої температури кипіння, після чого пара піднімається по колоні, конденсується в конденсаторі, а чистий продукт збирається в спеціальних ємностях.

Перегонний апарат забезпечує високу ефективність очищення, видаляючи з діетиленгліколю домішки, непрореаговані компоненти та інші забруднення, що дозволяє отримати продукт з необхідними технічними характеристиками. Апарат працює при точно контрольованих умовах температури та тиску, що забезпечують оптимальну ефективність дистиляції.

Перегонні апарати для діетиленгліколю можуть бути різних типів залежно від масштабів виробництва та завдань: лабораторні установки, промислові установки великої потужності або мобільні системи. Вони оснащуються сучасними системами безпеки, що запобігають витіканню парів та забезпечують ефективний збір кінцевого продукту.

Кожухотрубний холодильник: тип теплообмінника, що використовується для охолодження рідин, газів або парів в промислових та комерційних системах. Його основним завданням є ефективний теплоперенесення між робочим середовищем та охолоджувальним середовищем.

Пристрій складається з двох основних частин: внутрішніх трубок, по яких рухається робоче середовище, та зовнішнього кожуха, що забезпечує герметичність і допомагає в теплообміні. Робоче середовище проходить через внутрішні труби, де віддає теплоту зовнішньому середовищу через стінки труб та кожух.

Кожухотрубні холодильники відзначаються високою ефективністю, надійністю та універсальністю. Вони застосовуються в нафтовій, газовій, хімічній, харчовій промисловості, а також у системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Завдяки простоті конструкції та мінімальним витратам

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		16

середовища та умов використання. Ці пристрої широко застосовуються у хімічній, медичній, лабораторній, нафтовій та інших галузях.



Рисунок 1.4 – Вакуумний-приймач

Мірник: прилад, призначений для визначення кількісних характеристик фізичних параметрів, таких як об'єм, рівень рідини, тиск, температура, витрати газу або рідини тощо. Мірники використовуються в промисловості, лабораторіях, медичних установах, будівельних роботах та інших сферах для точного контролю технологічних процесів, вимірювання параметрів середовища та забезпечення ефективності виробничих систем.



Рисунок 1.5 – Мірник

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18

Реакційний апарат – це спеціалізоване обладнання, призначене для проведення хімічних реакцій в контрольованих умовах. Він забезпечує необхідні параметри, такі як температура, тиск, концентрація та перемішування, для ефективного здійснення хімічних процесів. Реакційні апарати застосовуються в хімічній, фармацевтичній, нафтохімічній, харчовій та інших галузях промисловості для синтезу, обробки та перетворення речовин.

Основу реакційного апарату складають резервуар для реагентів, система підігріву або охолодження, система перемішування, датчики контролю та система збору кінцевого продукту. Ці апарати забезпечують оптимальні умови для хімічних реакцій, підвищують ефективність процесу та дозволяють автоматично контролювати параметри середовища.



Рисунок 1.6 – Реакційний апарат

Ректифікаційна колона – це обладнання, призначене для розділення сумішей рідин або парів на окремі компоненти за допомогою процесу дистиляції. Вона працює на основі різниці температур кипіння компонентів суміші, що дозволяє ефективно відділяти їх один від одного. Ректифікаційні колони застосовуються у хімічній, нафтовій, фармацевтичній, харчовій промисловості, а також для виробництва спирту та очищення різних розчинів.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		19

Ректифікаційна колона складається з вертикальної циліндричної структури, в якій розташовані тарілки або пакувальні елементи для забезпечення ефективного теплообміну між паром та рідиною. Завдяки конденсації та випаруванню на різних рівнях колони відбувається розділення суміші на окремі фракції.



Рисунок 1.7 – Ректифікаційна колона

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		20

1.4 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання

Процес виробництва полієфірів, складається з декількох ключових етапів, таких як етерифікація та поліконденсація. Це хімічні реакції, які потребують чіткого дотримання умов, щоб забезпечити стабільну якість кінцевого продукту. Будь-яке відхилення від заданих параметрів може призвести до погіршення кінцевих властивостей полімеру.

Температура є одним із головних параметрів, які впливають на перебіг реакції. Для етерифікації та поліконденсації необхідно підтримувати досить високий температурний режим (180-280 °С). Якщо температура буде нижчою – реакція сповільниться, вищою – може початися побічна реакція у вигляді розкладання компонентів. Температура може контролюватися за допомогою термопар або термометрів опору, а регулюватися за допомогою подачі нагрівної рідини (денілу).

На стадії поліконденсації вкрай важливо знижувати тиск до вакуумного рівня. Потрібно це для того, щоб виводити побічні продукти реакції – воду або метанол – і таким зміщувати рівновагу реакції у бік утворення полімеру. Якщо ж цього не робити, то побічні продукти накопичуватимуться і процес буде малоефективним.

Щоб забезпечити стабільність процесу, потрібно контролювати рівень сировини та продукту у реакторі. Якщо рівень занадто низький – це загрожує “сухим ходом” обладнання, а якщо високий – можливе переповнення або викид сировини через запобіжні клапани.

У випадках, коли в процесі використовуються кислотні або лужні каталізатори, важливим є контролювання кислотності середовища. Її зміна може вказувати на неправильне дозування реагентів або на наявність небажаних реакцій.

В'язкість – це непрямий показник ступеня полімеризації. Якщо вона виходить за межі допустимих значень, це може свідчити про неправильну температуру, недостатній вакуум або неправильне співвідношення сировини.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		21

Таблиця 1.1 – Вхідні та фізичні величини

№ по порядку	Параметр	Значення параметру	Одиниця виміру
1	V	500	л
2	$V_{\text{хл}}$	290	л
3	$C_A^{\text{ВХ}}$	19.74	МОЛЬ/Л
4	$C_B^{\text{ВХ}}$	10.93	МОЛЬ/Л
5	$C_D^{\text{ВХ}}$	12.54	МОЛЬ/Л
6	v_1	1.5	л/хв
7	v_2	3.5	л/хв
8	v_3	2	л/хв
9	v	7	л/хв
10	t_1	180	°С
11	t_2	190	°С
12	t_3	200	°С
13	K_T	12	м ² /хв * К
14	F_T	2.9	м ²
15	ρ	0.9	кг/л
16	C_T	2	кДж/кг * К
17	$\rho_{\text{хл}}$	1	кг/л
18	$C_{\text{хл}}$	4.18	кДж/кг * К
19	ΔH_1	80	кДж/моль
20	E_1	48635	Дж/моль
21	k_1^0	109860	л/моль*хв

Таблиця 1.2 – Параметри контролю і регулювання

№ по порядку	Параметри	Значення параметру	Діапазон змін
1	Витрата діетиленгліколю	150 м3/год	140-180 м3/год
2	Витрата гліцерину	80 м3/год	70-110 м3/год
3	Витрата фталевого ангідриду	50 м3/год	40-60 м3/год
4	Витрата адипінової кислоти	40 м3/год	30-50 м3/год
5	Витрата себацінової кислоти	30 м3/год	20-40 м3/год
6	Витрата азоту	200 м3/год	180-220 м3/год
7	Температура в реакторі	150-180 С	140-190 С
8	Тиск в реакторі	50 кПа	30 – 60 кПа
9	В'язкість поліефіру	260 дПа/с	260 дПа/с
10	Кислотність поліефіру	2 – 5 КОН/гр	2 – 5 КОН/гр
11	Температура на виході перегінного апарату діетиленгліколю	100 С	80 - 100 С
12	Рівень в перегінному апараті	3 м	3,3 – 2,8 м
13	Температура в перегінному апараті гліцерину	100 С	80 - 100 С
14	Співвідношення діетиленгліколю до гліцерину	150 м3/год 80 м3/год	150 м3/год 80 м3/год
15	Рівень в ємності з гліцеином	3 м	3,3 – 2,8 м
16	Температура в прямому холодильнику	5 С	3 - 8 С
17	Температура в зворотньому холодильнику	70 С	60 - 80 С

Висновки до розділу

У першому розділі було проведено аналіз технологічного процесу виробництва полієфірів. Встановлені ключові параметри, такі як, тиск, витрата реагентів та рівень у реакторі, що впливають на якість кінцевого продукту.

Сформульовано вимоги до автоматизації з урахуванням фізико-хімічних особливостей процесу, обґрунтовано вибір контрольованих параметрів і визначено місця встановлення датчиків і виконавчих механізмів.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		24

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Опис математичної моделі

Повний математичний опис (детермінована математична модель) процесу представлений покомпонентним матеріальним балансом і тепловим балансом всього реактора. Параметри потоку однакові по всьому об'єму апарату малого проміжку часу dt . На виході з апарату ідеального змішування параметри ті самі, що й в об'єму. В апараті протікає бімолекулярна екзотермічна реакція:



де A, B, D - вихідні речовини; P - продукт реакції; k_1 - константа швидкості.

Вихідні реагенти A, B і D подаються в апарат роздільними потоками. Речовину D вибирає оператор з трьох можливих варіантів. Суміш із реактора забирається насосом. Для відведення тепла і стабілізації температури в реакторі апарат забезпечений сорочкою, в яку надходить теплоносіє.

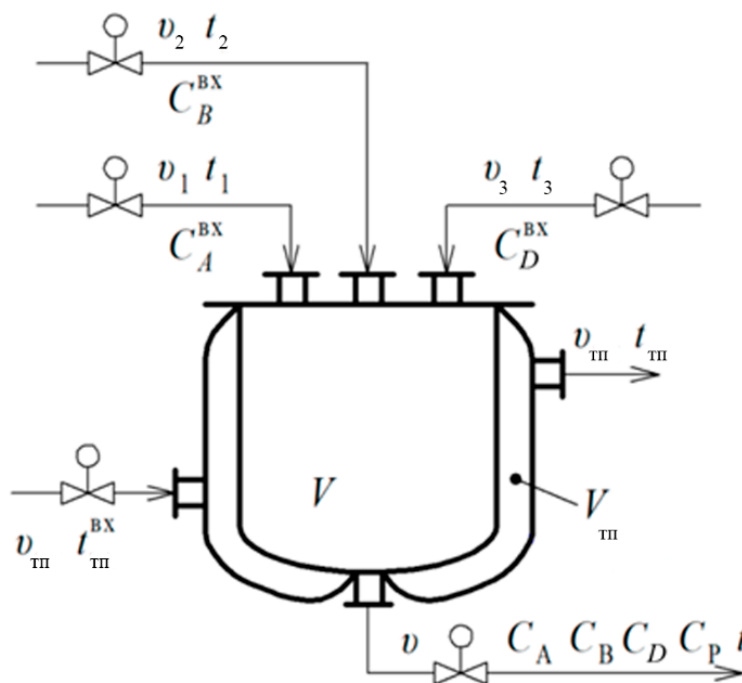


Рисунок 2.1 – Принципова схема хімічного реактора

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		25

На рис. 2.1 введени позначення: $C_A^{BX}, C_B^{BX}, C_D^{BX}$ – концентрації вихідних реагентів; U_1, U_2, U_3 – витрата вихідних реагентів; t_1, t_2, t_3 – температура потоку вихідних реагентів; t_{TP}^{BX}, t_{TP} – температура теплоносія на вході і виході з апарату; U_{TP} – витрата теплоносія на вході і виході з апарату; t – температура реакційної суміші в апараті; U – витрата реакційної суміші на виході з апарату; C_A, C_B, C_D, C_P – концентрації компонентів А, В, D, Р в реакторі; V – об'єм реакційної суміші в апараті; V_{TP} – об'єм теплоносія в сорочці.

Матеріальний баланс реактора ідеального перемішування:

Матеріальний баланс – є математичним відображенням співвідношення між кількістю використаної сировини, і кількістю фактично отриманої готової продукції, враховуючи відходи та витрати, проміжні продукти реакції.

Розпишемо рівняння матеріального балансу для речовини А:

$$V \frac{dC_A}{d\tau} = v_1 C_A^{BX} - (v_1 + v_2) C_A - V k_1 C_A C_B,$$

де $k_1 = k_2 = k_1^0 \cdot \exp(-E_1 / R(t + 273))$ – константа швидкості;

k_1^0 – постійний множник константи швидкості;

E_1 – енергія активації;

R – універсальна газова стала;

Розпишемо матеріальний баланс для решти речовин:

$$V \frac{dC_B}{d\tau} = v_2 C_B^{BX} - (v_1 + v_2) C_B - V k_1 C_A C_B,$$

$$V \frac{dC_P}{d\tau} = V k_1 C_A C_B - (v_1 + v_2) C_P - V k_1 C_P C_D,$$

$$V \frac{dC_D}{d\tau} = v_3 C_D^{BX} - (v_1 + v_2 + v_3) C_D - V k_1 C_P C_D.$$

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		26

Опишемо зміну температури в реакторі з урахуванням:

- теплових потоків, що надходять разом з реагентами.
- теплових ефектів хімічних реакцій (екзо-/ендотермічних)
- втрат або надходжень тепла через теплообмінник

$$V \frac{dt}{d\tau} = v_1 t_1 + v_2 t_2 + \frac{\Delta H_1 k_1 C_A C_B + \Delta H_2 k_1 C_P C_D}{\rho C_T} - (v_1 + v_2) t - \frac{K_T F_T (t - t_{\text{ТП}})}{\rho C_T},$$

де ΔH – тепловий ефект реакції;

ρ, C_T – густина та теплоємність реакційної суміші;

K_T – коефіцієнт теплопередачі;

F_T – поверхня теплообміну.

Опишемо рівняння теплового балансу теплоносія:

$$V_{\text{ТП}} \frac{dt_{\text{ТП}}}{d\tau} = v_{\text{ТП}} (t_{\text{ТП}}^{\text{ВХ}} - t_{\text{ТП}}) + \frac{K_T F_T (t - t_{\text{ТП}})}{\rho_{\text{ТП}} C_{\text{ТП}}},$$

де $\rho_{\text{ТП}} C_{\text{ТП}}$ – густина та теплоємність теплоносія;

Математична модель реактора матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} V \frac{dC_A}{d\tau} = v_1 C_A^{\text{ВХ}} - (v_1 + v_2) C_A - V k_1 C_A C_B, \\ V \frac{dC_B}{d\tau} = v_2 C_B^{\text{ВХ}} - (v_1 + v_2) C_B - V k_1 C_A C_B, \\ V \frac{dC_D}{d\tau} = v_3 C_D^{\text{ВХ}} - (v_2 + v_3) C_D - V k_1 C_A C_B C_D, \\ V \frac{dC_P}{d\tau} = V k_1 C_A C_B C_D - (v_1 + v_2 + v_3) C_P - V k_1 C_P, \\ V \frac{dt}{d\tau} = v_1 t_1 + v_2 t_2 + v_3 t_3 + \frac{\Delta H_1 k_1 C_A C_B C_D}{\rho C_T} - (v_1 + v_2 + v_3) t - \frac{K_T F_T (t - t_{\text{ТП}})}{\rho C_T}, \\ V_{\text{ТП}} \frac{dt_{\text{ТП}}}{d\tau} = v_{\text{ТП}} (t_{\text{ТП}}^{\text{ВХ}} - t_{\text{ТП}}) + \frac{K_T F_T (t - t_{\text{ТП}})}{\rho_{\text{ТП}} C_{\text{ТП}}}. \end{array} \right.$$

Головним завданням керування хімічним реактором полягає в стабілізації температури суміші в апараті на заданому рівні t в умовах діючих збурень.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		27

Керуючим впливом є витрата теплоносія, що подається в сорочку. Конструктивні та технологічні особливості хімічного реактора, особливості реалізації складного технологічного процесу і, відповідно, структурні особливості математичної моделі дозволяють провести декомпозицію системи на дві підсистеми. Перша підсистема – рівняння матеріального балансу по компонентам і рівняння теплового балансу реакційної суміші.

В якості керування температурним режимом ємності виступає температура хладагенту в сорочці.

Друга підсистема – сорочка реактора, функціонування якої описується рівнянням теплового балансу, стан характеризується температурою $t_{\text{ТП}}$. Керуванням для $t_{\text{ТП}}$ є витрата теплоносія $U_{\text{ТП}}$.

Структурна схема об'єкту представлена на рисунку 2.2

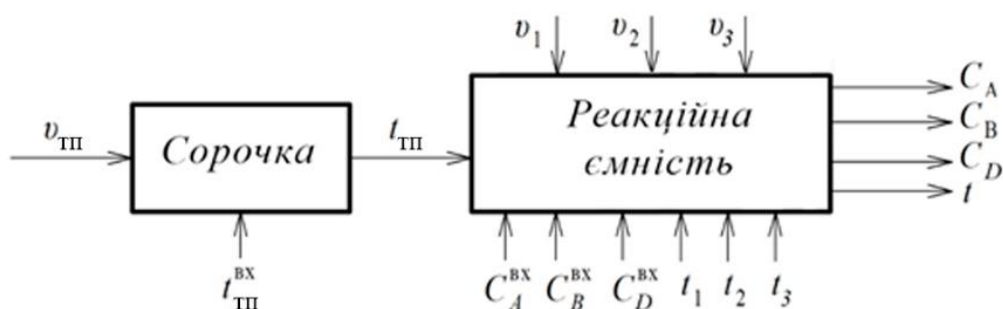


Рисунок 2.2 – Структурна схема об'єкта керування

2.2 Отримання динамічної та статичної характеристик

Для проведення ідентифікації об'єкта керування (реактора) потрібно отримати його динамічну та статичну характеристики. Процес виробництва полієфірів є безперервним, отже перед нами постає питання в корегуванні температури, яку необхідно утримувати на рівні 210 С для чіткого дотримання технічного регламенту.

Всі необхідні дані для проведення експерименту були взяті з таблиці 1.1.

```
%% 1. Параметри
V_xl = 290;           % об'єм сорочки, л (залишаємо як є)
rho_xl = 860;        % густина теплоносія, кг/м³
C_xl = 4180;         % теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К)
K_T = 12000;        % коефіцієнт теплопередачі, Дж/(хв·К)
F_T = 2.9;          % площа теплообміну, м²
t_reactor = 20;     % температура реактора, °C

% Вхідна температура теплоносія (постійна гаряча)
function_Tin = @(tau) 280;
t_in = @(tau) function_Tin(tau);

% Ступінчаста зміна витрати теплоносія (input сигнал)
function_vxl = @(tau) 1*(tau < 100) + 5*(tau >= 100); % змінюємо з 1 до 5 л/хв

%% 2. Початкові умови
t_xl0 = 30;          % початкова температура сорочки, °C

%% 3. ОДУ (тепло від сорочки до реактора) з динамічною витратою v_xl
odefun = @(tau, t_xl) ...
    ( function_vxl(tau) * (t_in(tau) - t_xl) + ...
    (K_T * F_T * (t_xl - t_reactor)) / (rho_xl * C_xl) ) / V_xl;

%% 4. Інтегруємо
tspan = [0 500];    % час моделювання, хвилини
opts = odeset('RelTol',1e-6,'AbsTol',1e-8);
[TAU, TXL] = ode45(odefun, tspan, t_xl0, opts);

%% 5. Формуємо вхідний сигнал для iddata – витрата теплоносія (input)
input_signal = zeros(length(TAU),1);
for i = 1:length(TAU)
    input_signal(i) = function_vxl(TAU(i));
end

%% 6. Вихідний сигнал (output) – температура сорочки
output_signal = TXL;

%% 7. Крок дискретизації (у хвилинах)
Ts = mean(diff(TAU));

%% 8. Створюємо iddata об'єкт
data = iddata(output_signal, input_signal, Ts);

%% 9. Графік
figure;
plot(TAU, TXL, 'Linewidth', 1.5);
grid on;
xlabel('\tau, хв');
ylabel('t_{xl}(\tau), °C');
title('Нагрів температури сорочки реактора з ступінчастою зміною витрати теплоносія');
```

Рисунок 2.3 – Програма для знаходження динамічної характеристики сорочки реактора

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		29

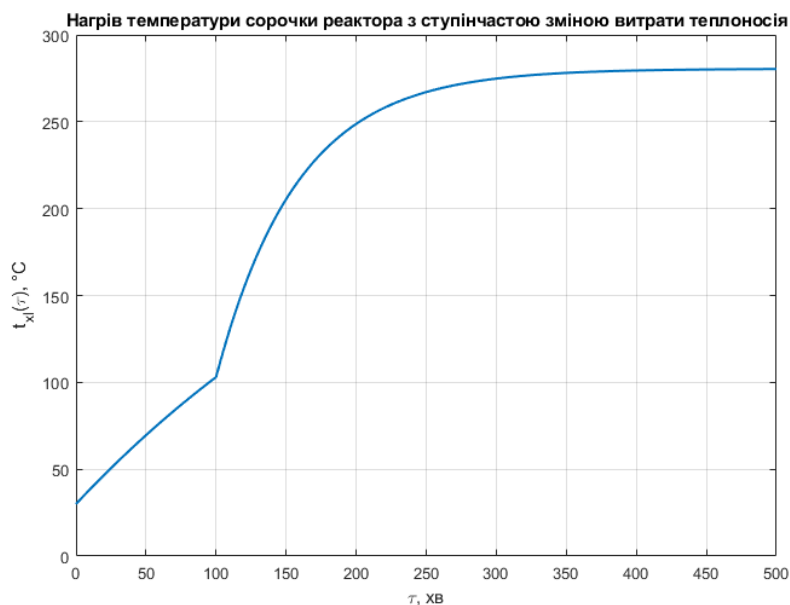


Рисунок 2.4 – Динамічна характеристика сорочки реактора

```

% Параметри (одиниці СИ)
V = 500; % м³
v1 = 1.5; % м³/с
v2 = 2.5; % м³/с
v3 = 2; % м³/с
t1 = 180; % °C
t2 = 190; % °C
t3 = 190; % °C
deltaH1 = 96000; % Дж/моль
k1 = 1.26; % 1/с
C_A = 19.74; % кг/м³
C_B = 10.93; % кг/м³
C_D = 12.54; % кг/м³
rho = 900; % кг/м³
C_T = 2000; % Дж/(кг·K)
K_T_orig = 12000; % Дж/(хв·K)
F_T = 2.9; % м²

V_xl = 290; % літри -> м³
v_xl_lpm = 3.84; % л/хв
rho_xl = 860; % кг/м³
C_xl = 4180; % Дж/(кг·K)

t_reactor = 20; % °C

% Перетворення в СИ
v_xl = v_xl_lpm; % л/хв -> м³/с
K_T = K_T_orig; % Дж/(хв·K) -> Дж/(с·K)

% Плавна ступінчаста зміна температури сорочки
t_in = @(tau) smooth_step_temp(tau);

% Початкові умови
y0 = [30; 20];

% Час моделювання (с)
tspan = [0 1000];

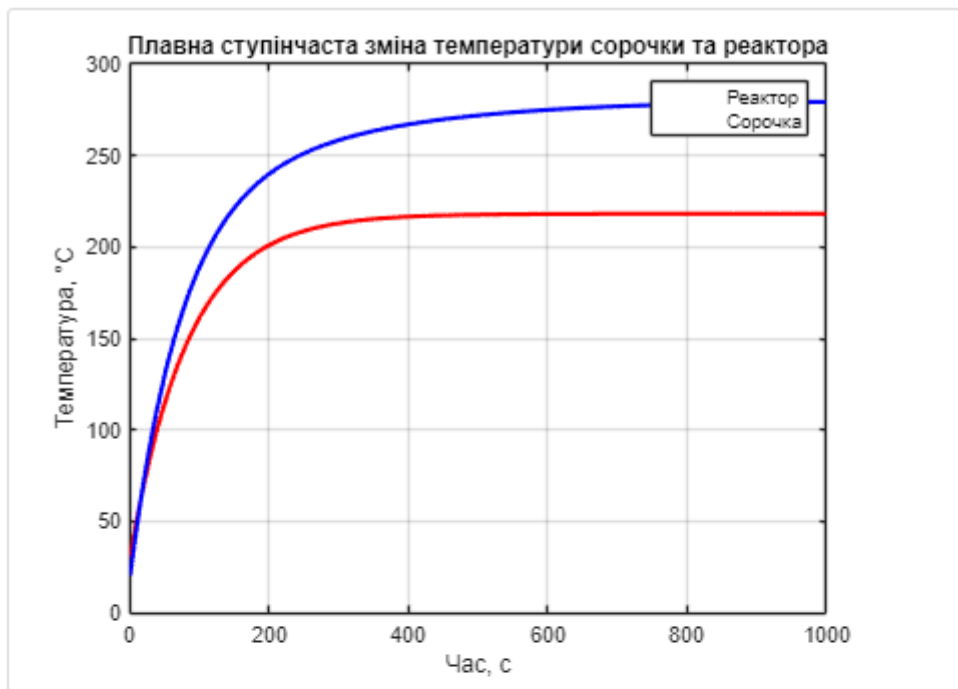
% Опції інтегратора
opts = odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-10);

% Інтегруємо жорсткий ODE
[t, y] = ode15s(@reactor_temperature_ode, tspan, y0, opts);

% Побудова графіків
figure;
plot(t, y(:,1), 'r', 'Linewidth', 2); hold on;
plot(t, y(:,2), 'b', 'Linewidth', 2);
xlabel('Час, с');
ylabel('Температура, °C');
legend('Реактор', 'Сорочка');
title('Плавна ступінчаста зміна температури сорочки та реактора');
grid on;

```

Рисунок 2.5 – Програма для знаходження динамічної характеристики теплового режиму реактора



ИДДАТА: Вхідна температура сорочки та вихідна температура реактора

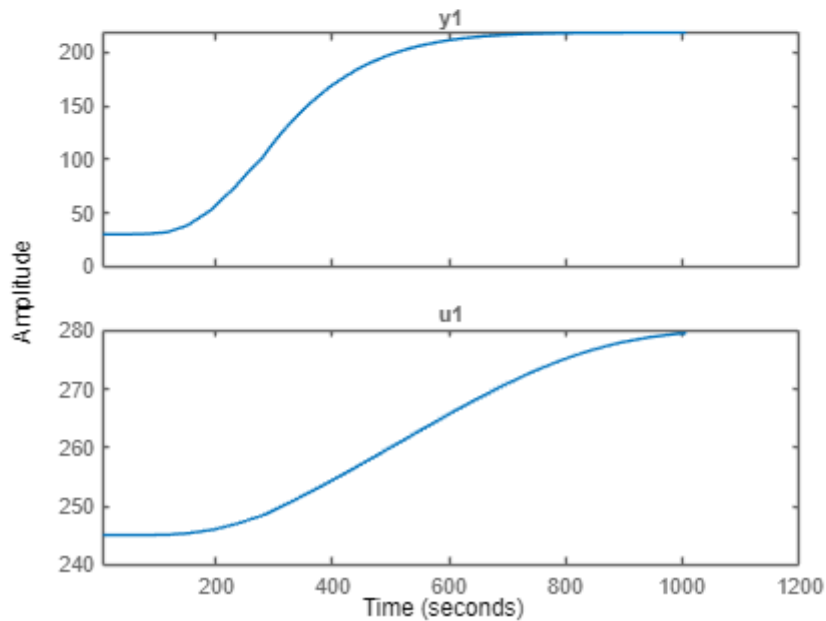


Рисунок 2.6 – Динамічна характеристика теплового режиму реактора

2.3 Ідентифікація реактора

Ідентифікація параметрів здійснювала за допомогою додатку System Identification Toolbox, що входить до складу математичного програмного забезпечення Matlab. Запуск додатку відбувається за допомогою команди “ident”, яка вводиться командне вікно.

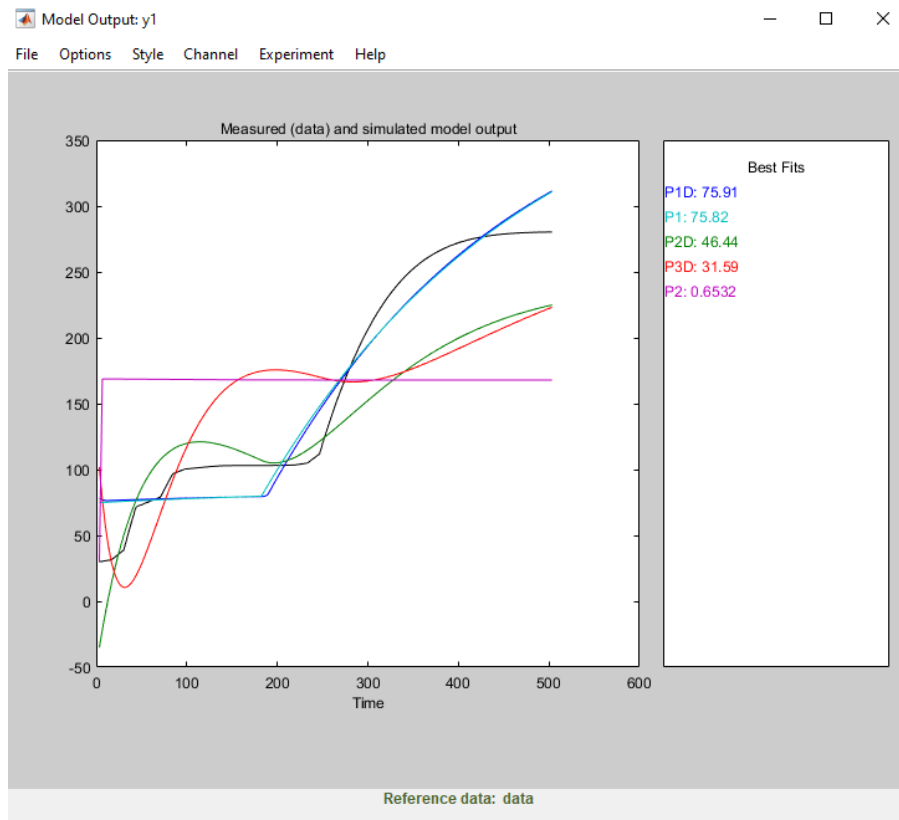


Рисунок 2.9 – Графік результатів сорочки

Отримані результати для P1D:

$$G(s) = \frac{Kp}{1 + T_{p1} \cdot s} \cdot \exp(-Td \cdot s), \quad (2.1)$$

$$Kp = 83$$

$$Tp1 = 268.08$$

$$Td = 5.1922$$

Fit to estimation data: 75.91%

Отримані результати для P1:

$$G(s) = \frac{Kp}{1 + T_{p1} \cdot s}, \quad (2.2)$$

$$Kp = 85.624$$

$$Tp1 = 294.74$$

Fit to estimation data: 75.82%

Значення Fit to estimation data для P1D та P1 оцінює ступінь відповідності моделі об'єкту до даних, які ми імпортуємо в систему. Чим більше значення, тим краще

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		33

модель відповідає вхідним даним. Порівнюючи два отриманих значення, можемо сказати, що модель з одним запізненням (P1D) та модель без запізнення P1 відрізняються несуттєво. Робимо висновок, що модель з одним запізненням краще підходить для опису динаміки системи.

Отримаємо перелік основних характеристик вибраної моделі за допомогою “LTI viewer”, налаштувавши вивід необхідних графіків.

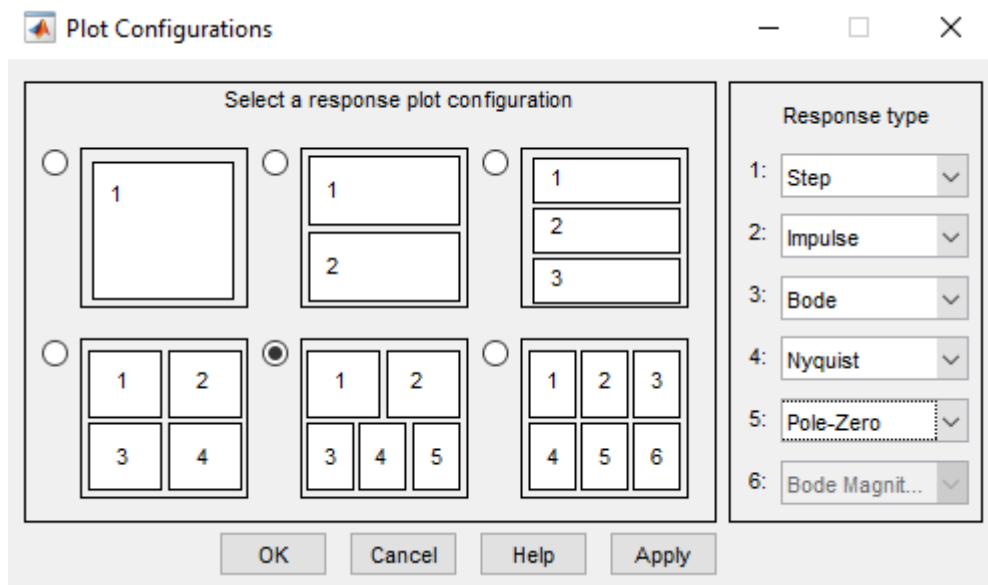


Рисунок 2.10 – Інтерфейс LTI viewer

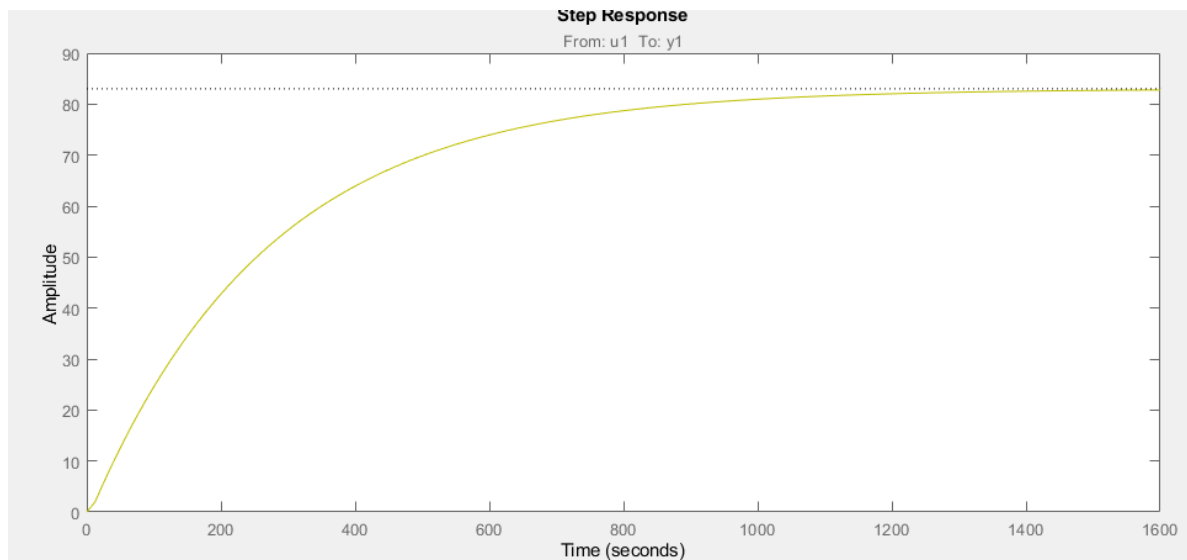


Рисунок 2.11 – Перехідна характеристика

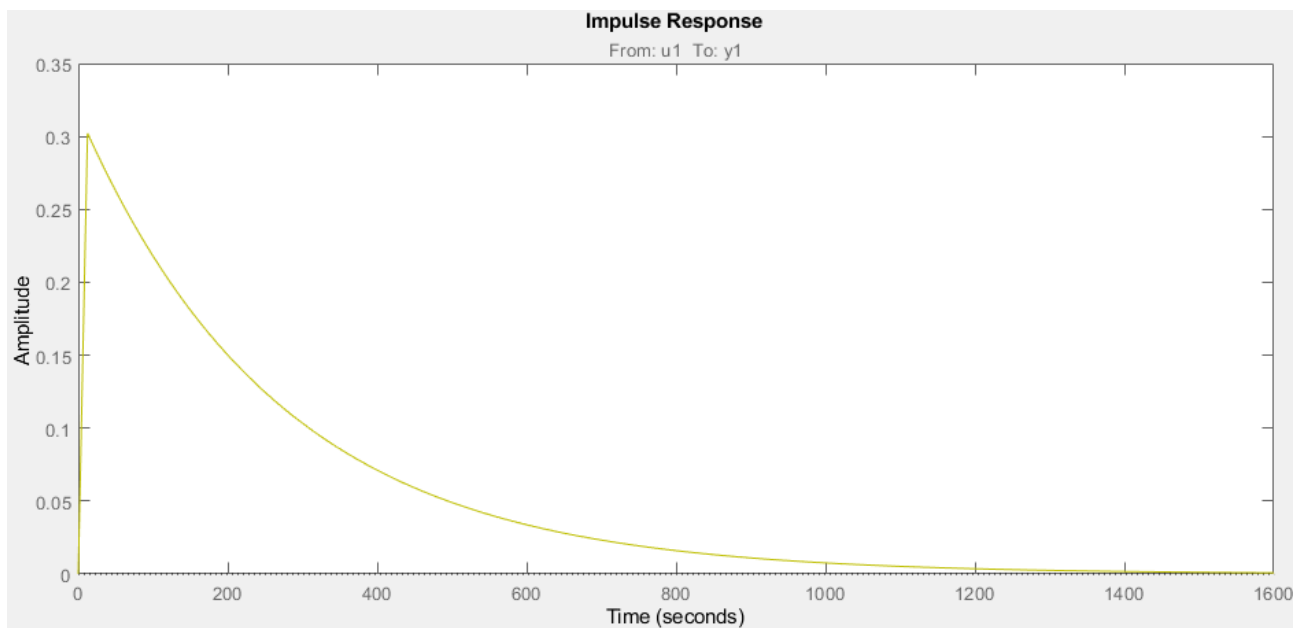


Рисунок 2.12 – Імпульсно-перехідна характеристика

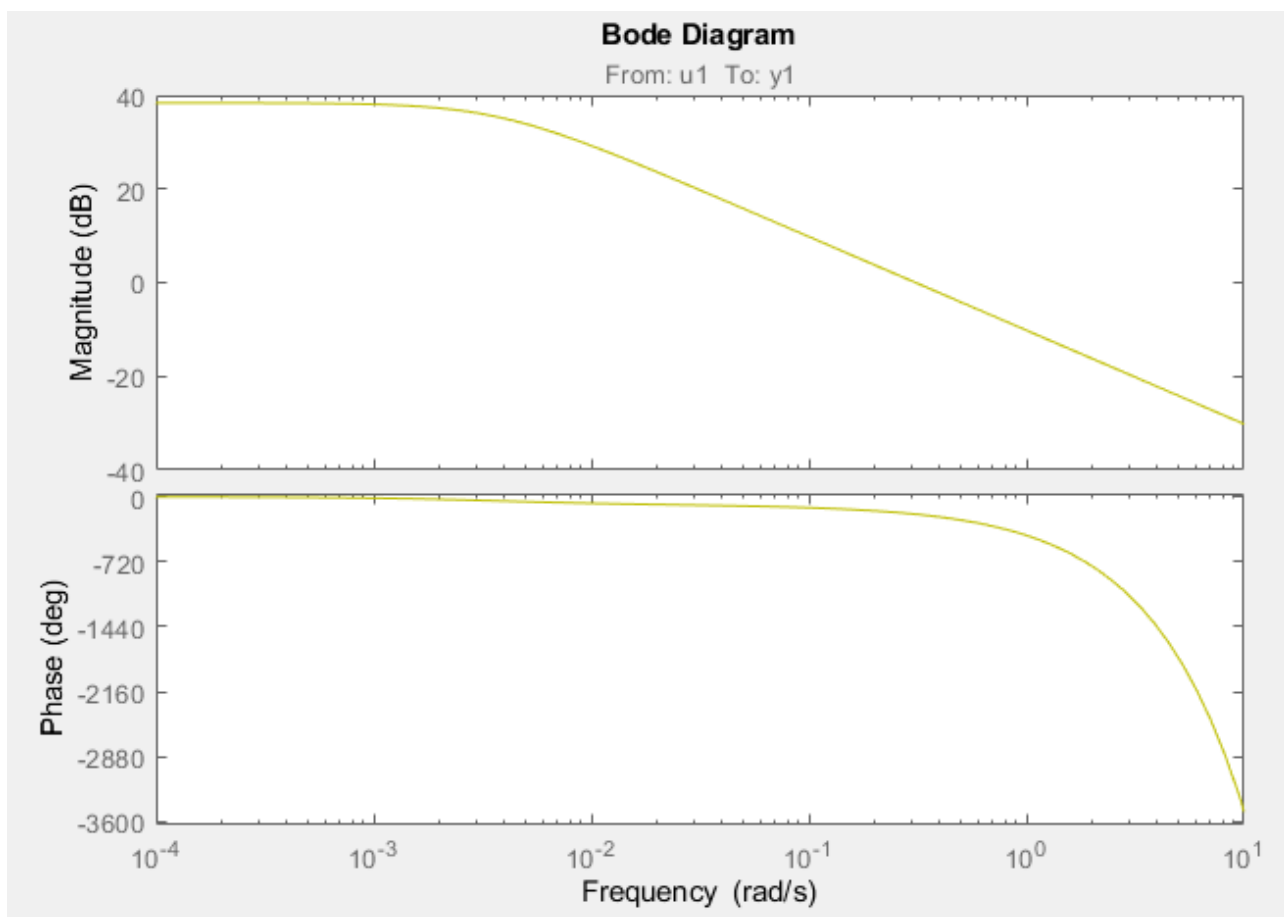


Рисунок 2.13 – Діаграма Бode

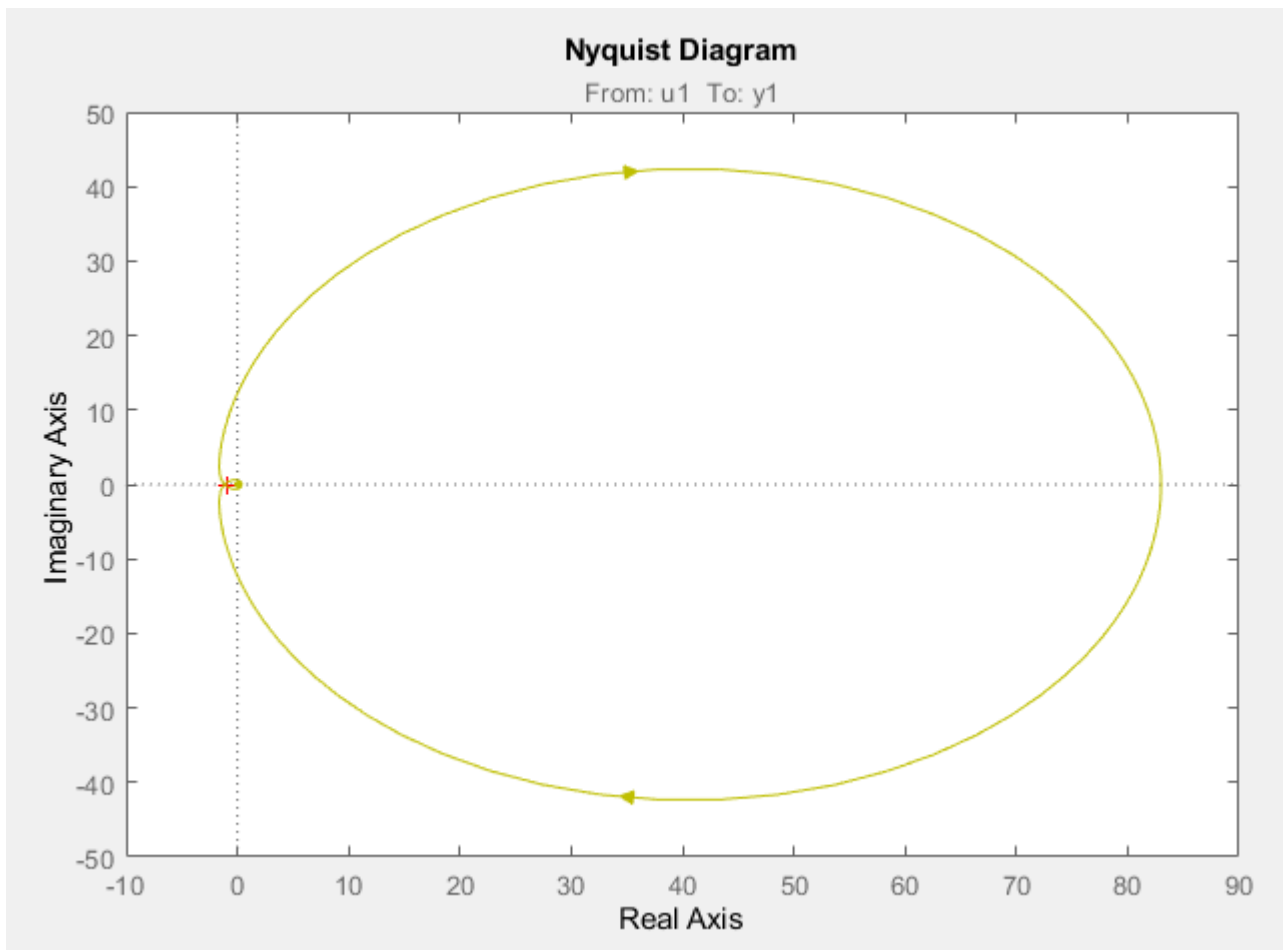


Рисунок 2.14 – Діаграма Найквіста

Амплітуда показує зміну керованої величини (зміна потоку теплоносія в сорочці реактора)

Результатом роботи є модель PID у формі передавальної функції:

$$W(s) = \frac{83}{268.08s + 1} \cdot \exp(-5.1922), \quad (2.3)$$

Аналогічні маніпуляції проведемо і для самого реактора:

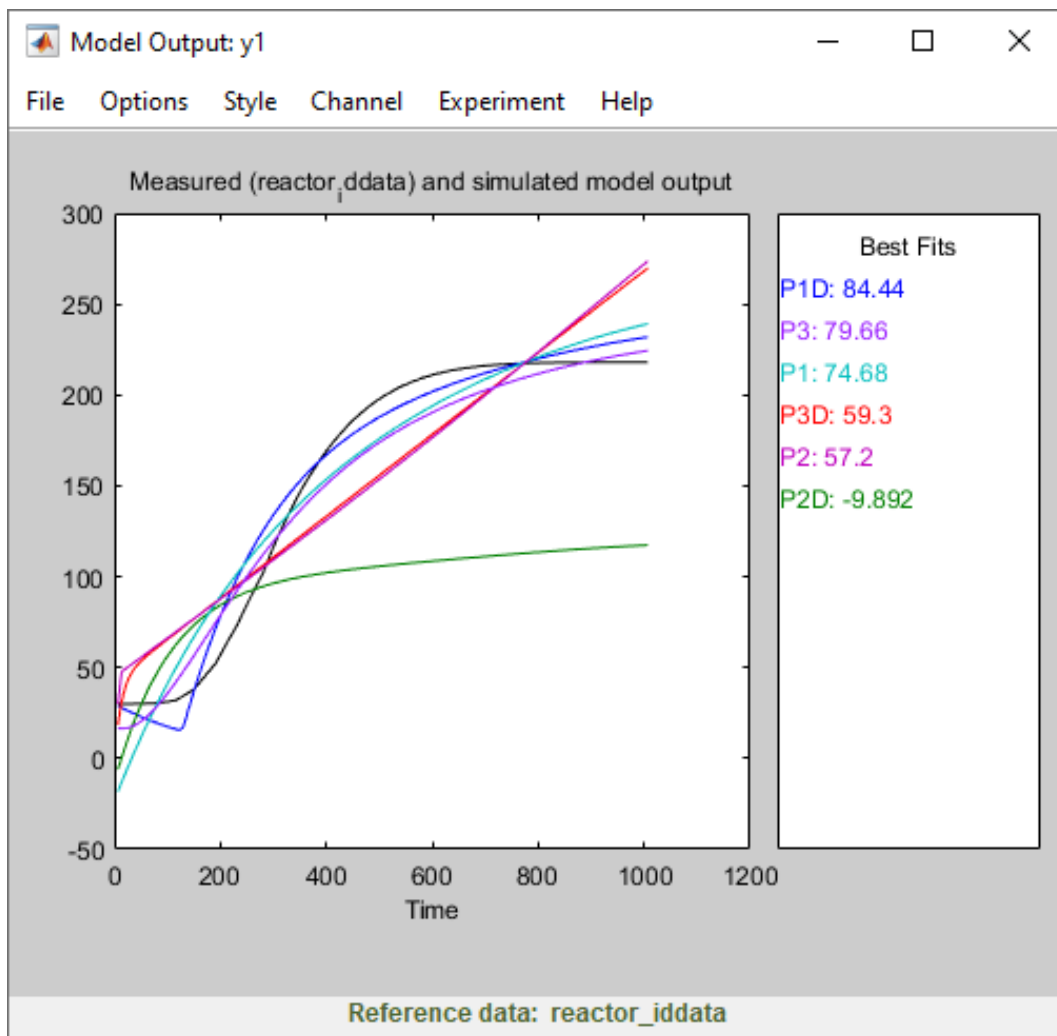


Рисунок 2.15 – Графік результатів реактора

З результатів бачимо, що найкраще для нашої системи підійде модель з одним запізненням P1D, оскільки показник Best Fits дорівнює 84.44, котрий є найкращим серед всіх досліджених.

Отримані результати для P1D:

$$G_{(s)} = \frac{Kp}{1 + T_{p1} \cdot s} \cdot \exp(-Td \cdot s).$$

$$Kp = 0.86434$$

$$T_{p1} = 185.66$$

$$Td = 121.42$$

Fit to estimation data: 84.44%

Знайдемо графіки перехідних характеристик через “LTI viewer”:

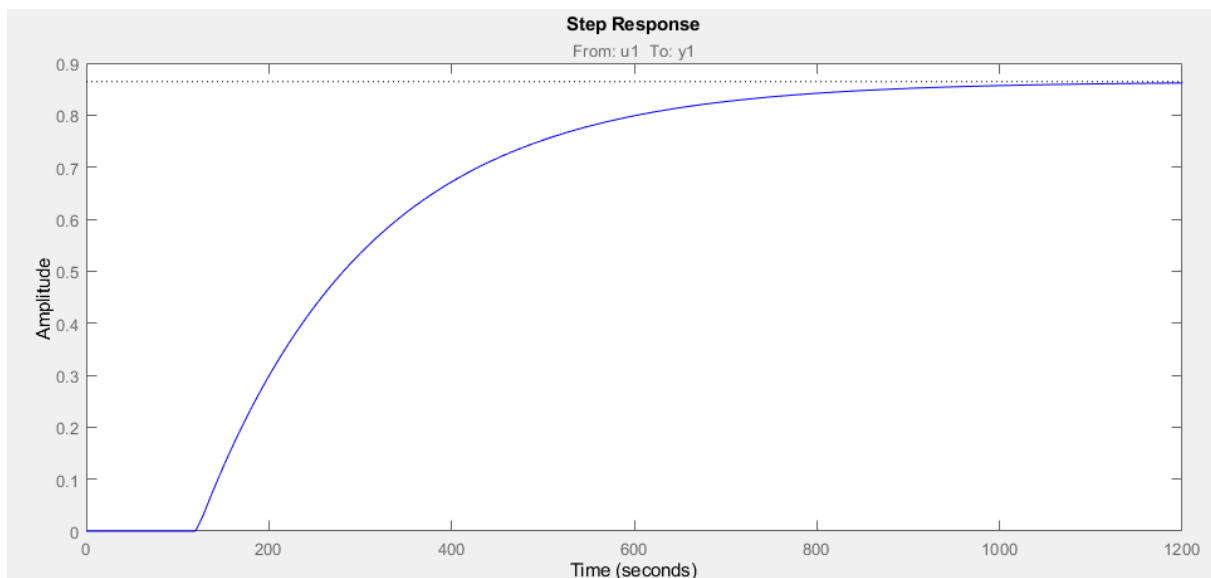


Рисунок 2.16 – Перехідна характеристика

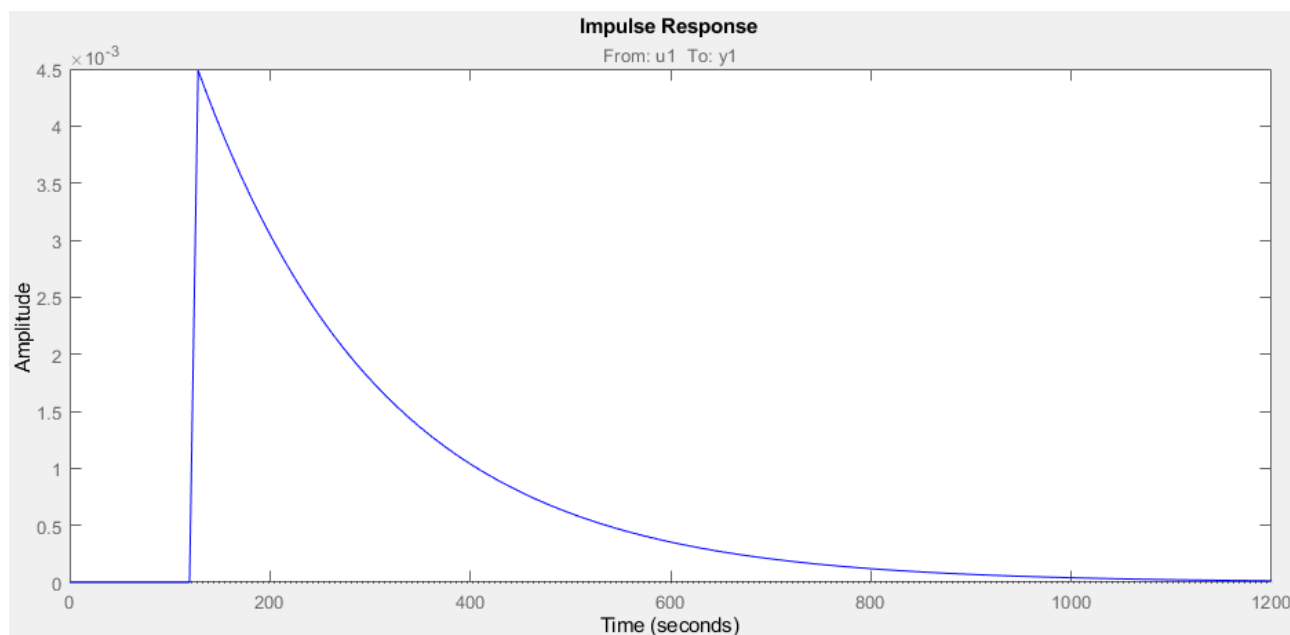


Рисунок 2.17 – Імпульсно-перехідна характеристика

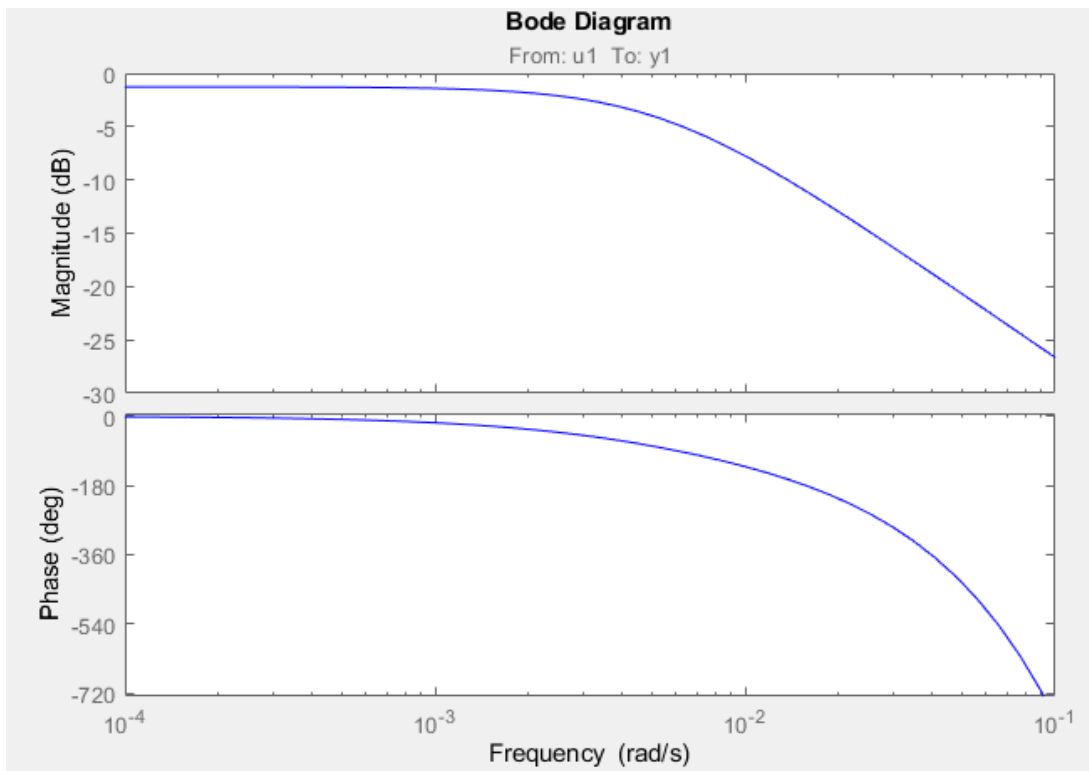


Рисунок 2.18 – Діаграма Боде

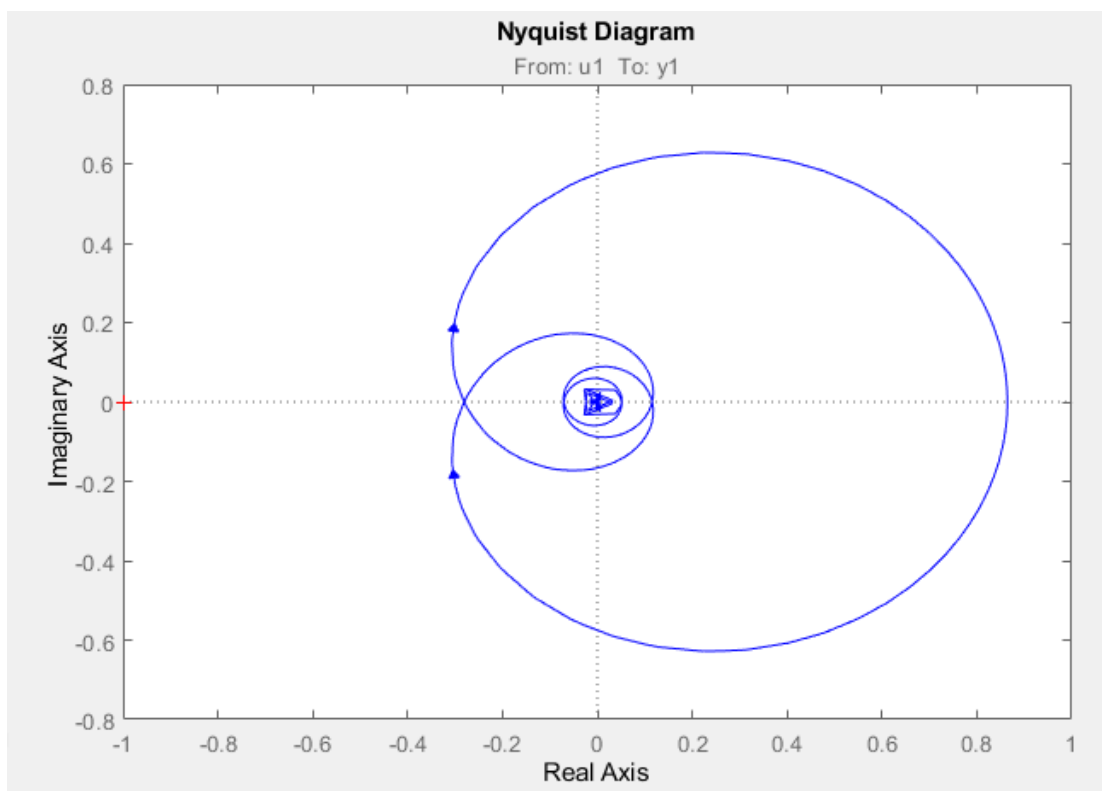


Рисунок 2.19 – Діаграма Боде

2.4 Перевірка отриманої моделі на адекватність

2.4.1 Створення моделі об'єкта в Matlab Simulink

На основі передавальної функції сорочки та реактора, що були знайдені раніше, була отримані перехідні характеристики для подальшого вибору регулятора. Моделювання проводилося в програмному забезпеченні Matlab Simulink.

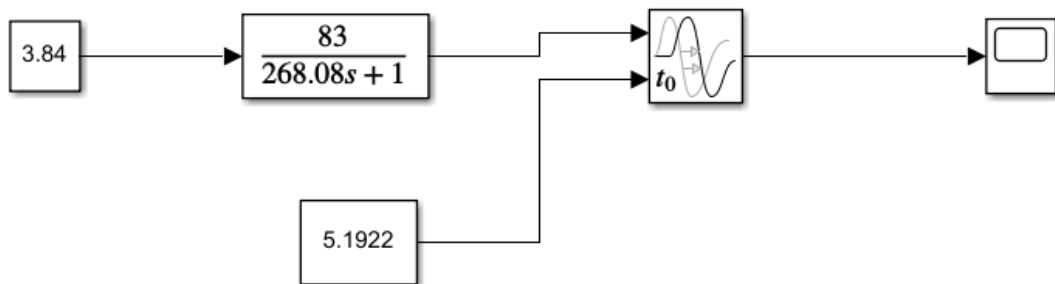


Рисунок 2.20 – Модель сорочки реактора в Simulink

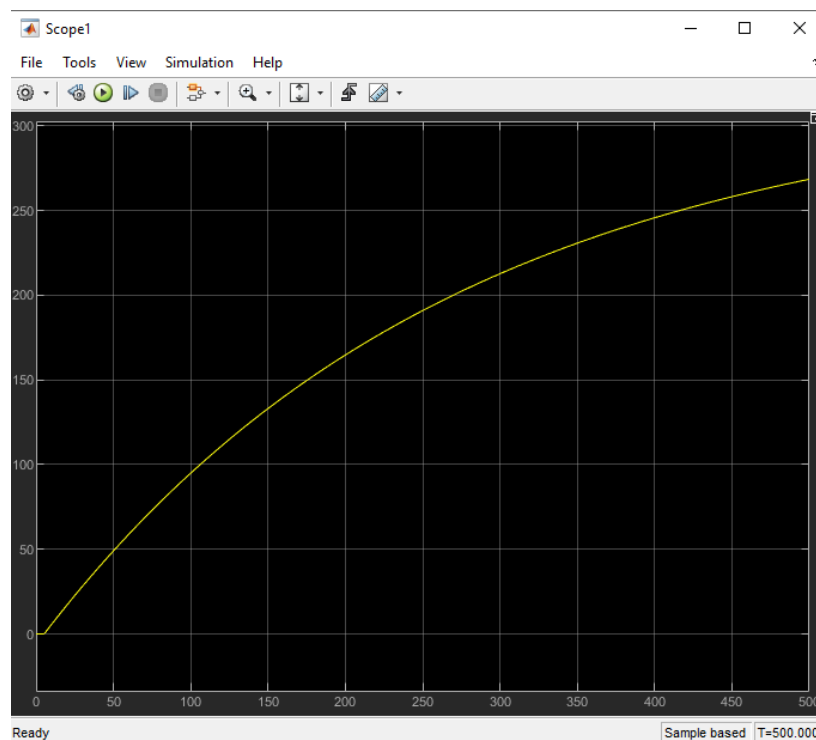


Рисунок 2.21 – Перехідна характеристика сорочки реактора

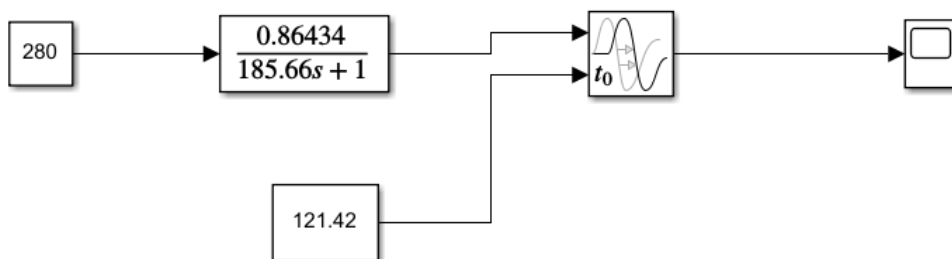


Рисунок 2.22 – Модель реактора в Simulink

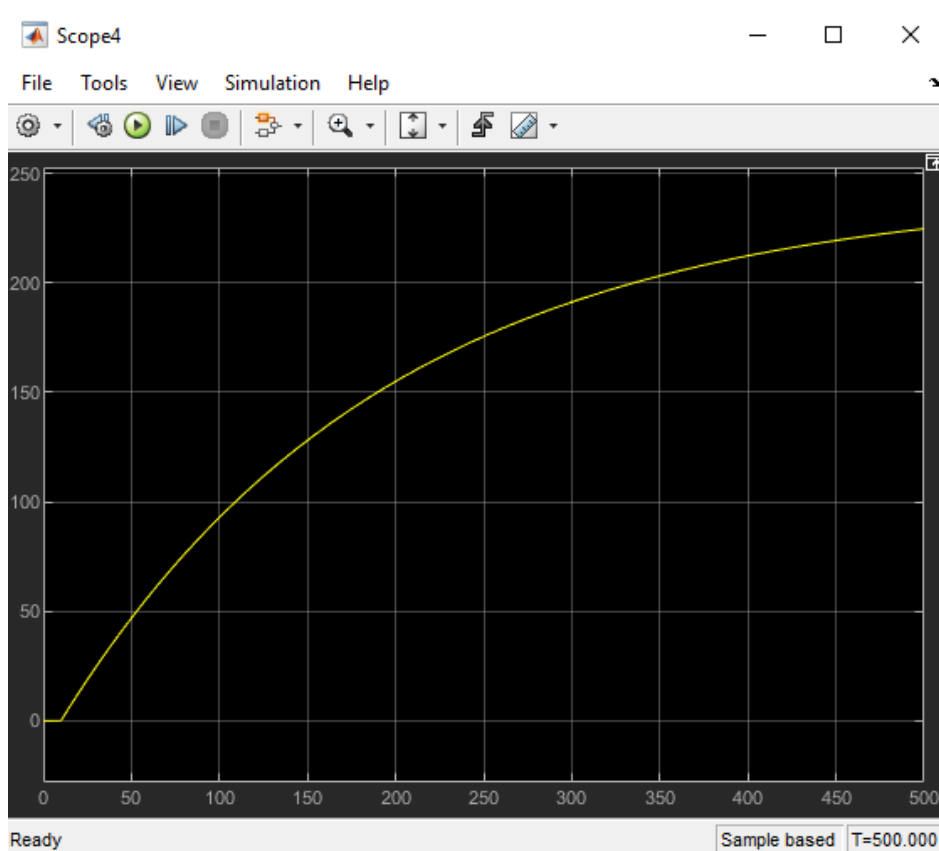


Рисунок 2.23– Перехідна характеристика реактора

2.4.2 Перевірка на адекватність

Для оцінки якості побудованої моделі системи широко застосовується метод аналізу залишків – різниці між експериментальними даними та результатами моделювання. Адекватність моделі визначається за відсутністю систематичних закономірностей у залишках.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		41

Залишки мають бути випадковими, не корелювати між собою (автокореляція) та з вхідним сигналом системи (крос-кореляція). Якщо залишки є випадковим шумом, це свідчить про те, що модель адекватно відображає динаміку системи і враховує вплив усіх суттєвих факторів.

Аналіз залишків є важливою частиною процесу ідентифікації системи, що допомагає підтвердити або спростувати якість отриманої моделі.

Отримуємо дані з модельованої та експериментальної систем:

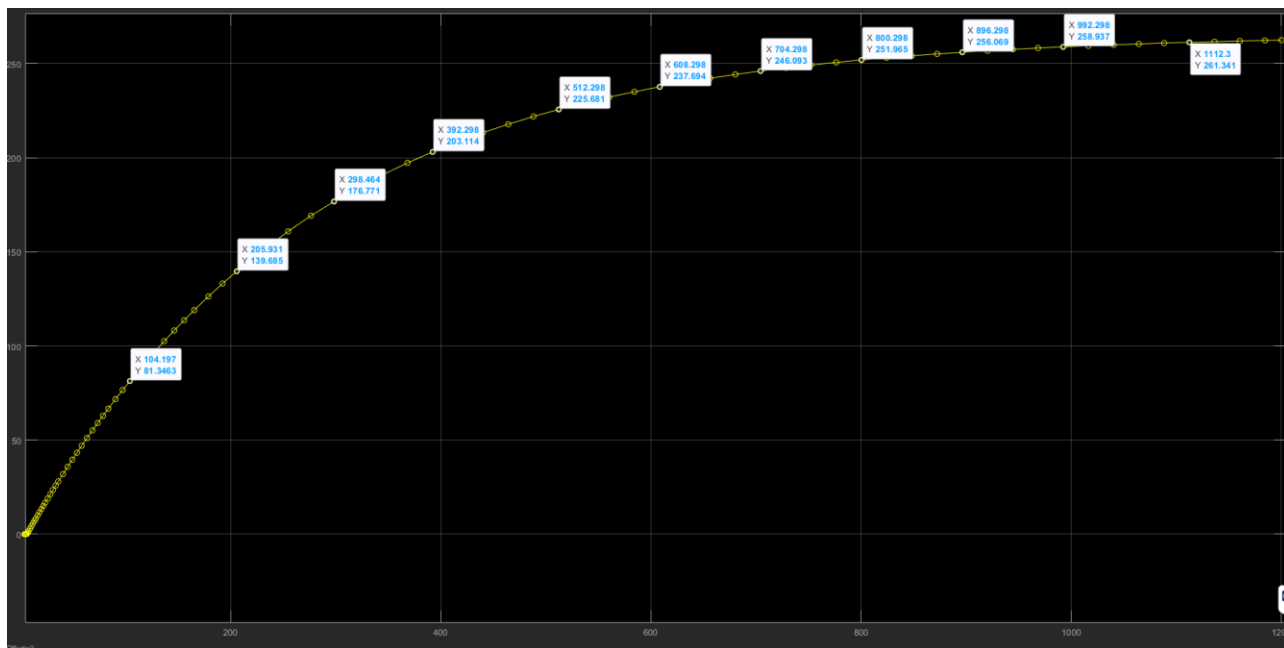


Рисунок 2.24 – Дані модельованої системи

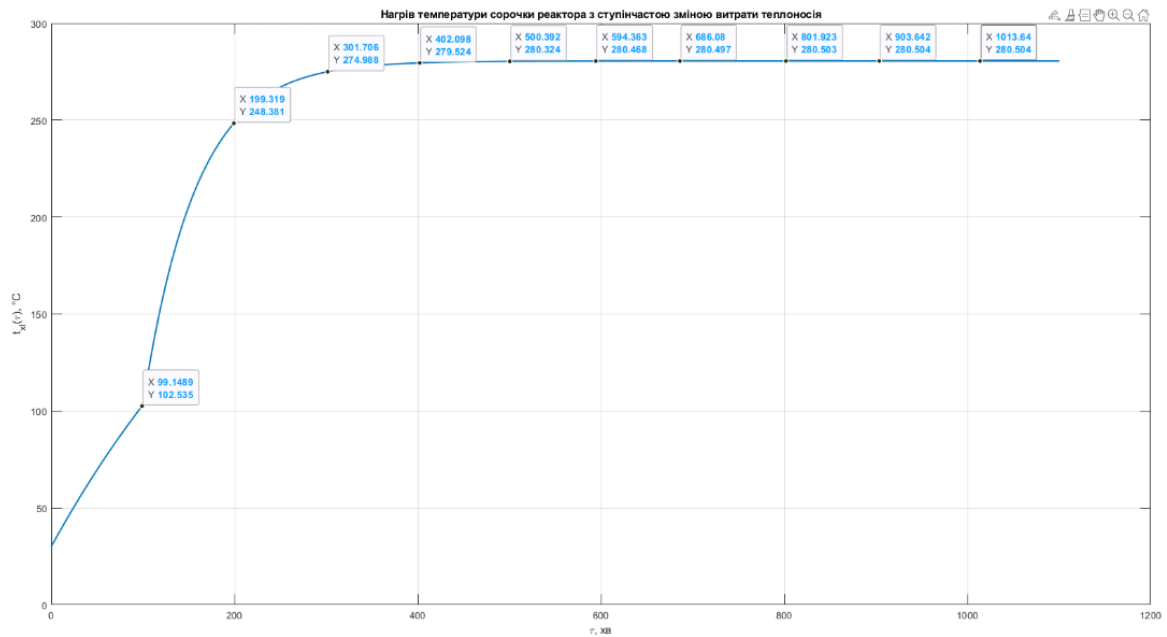


Рисунок 2.25 – Дані експериментальної системи

Вносимо ці дані в окремі таблиці:

```

% Час (хв)
time_min = [0, 99.149, 199.319, 301.706, 402.098, 500.392, 594.363, 686.08, 801.923, 903.642, 1013.64];

% Температура сорочки (°C)
temp_C = [27.834, 102.535, 248.381, 274.988, 279.524, 280.324, 280.468, 280.497, 280.503, 280.504, 280.504];

% Створення таблиці
experiment_data = table(time_min', temp_C', 'VariableNames', {'Time_min', 'Temperature_C'});

% Відображення таблиці
disp(experiment_data);

```

Time_min	Temperature_C
0	27.834
99.149	102.53
199.32	248.38
301.71	274.99
402.1	279.52
500.39	280.32
594.36	280.47
686.08	280.5
801.92	280.5
903.64	280.5
1013.6	280.5

Рисунок 2.26 – Таблиця експериментальних даних

```

>> % Дані часу (хв)
time_min = [0, 99.149, 199.319, 301.706, 402.098, 500.392, ...
            594.363, 686.08, 801.923, 903.642, 1013.64];

% Відповідні температури сорочки (°C)
temp_C = [27.985, 102.535, 248.381, 274.988, 279.524, 280.324, ...
          280.468, 280.497, 280.503, 280.504, 280.504];

% Створюємо таблицю model
model = table(time_min', temp_C', 'VariableNames', {'Time_min', 'Temp_C'});

% Виведення таблиці
disp(model);

```

Time_min	Temp_C
0	27.985
99.149	102.53
199.32	248.38
301.71	274.99
402.1	279.52
500.39	280.32
594.36	280.47
686.08	280.5
801.92	280.5
903.64	280.5
1013.6	280.5

Рисунок 2.27 – Таблиця змодельованих даних

Була написана програма, яка порівнює два масиви величин та буде графіки шумів та кореляції:

```

% Обчислення залишків
residuals = experiment_data.Temperature_C - model.Temperature_C;
t = [0;
     99.1490;
     199.3190;
     301.7060;
     392.2980;
     500.3920;
     594.3630;
     801.9230;
     903.6420;
     1013.660;
     1112.300];

% Побудова графіку залишків
figure;
plot(t, residuals, '-o');
xlabel('Час, с');
ylabel('Залишки');
title('Графік залишків (експеримент - модель)');
grid on;

% Автокореляція залишків
figure;
autocorr(residuals);
title('Автокореляція залишків');

% Крос-кореляція (за наявності input_signal)
if exist('input_signal', 'var')
    figure;
    crosscorr(input_signal, residuals);
    title('Крос-кореляція залишків з вхідним сигналом');
else
    disp('Вхідний сигнал input_signal не знайдено - пропускаємо крос-кореляцію.');
```

Рисунок 2.28 – Програма для розрахунку кореляції

Отримуємо графіки:

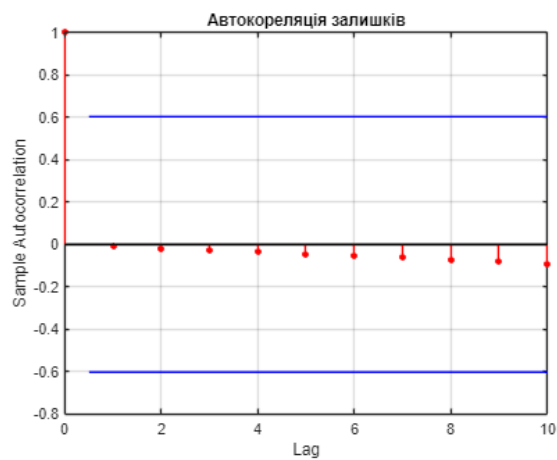
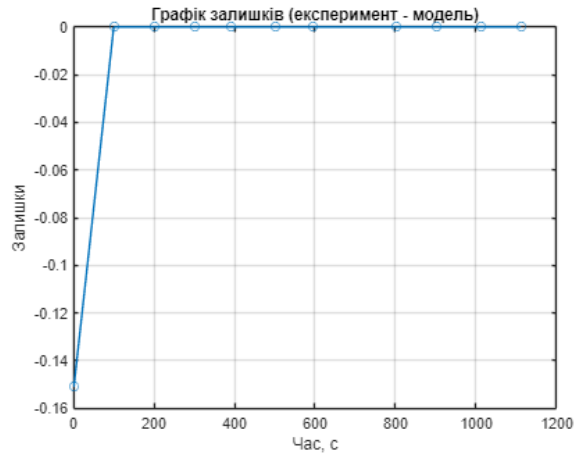


Рисунок 2.29 (а) – Графіки залишків

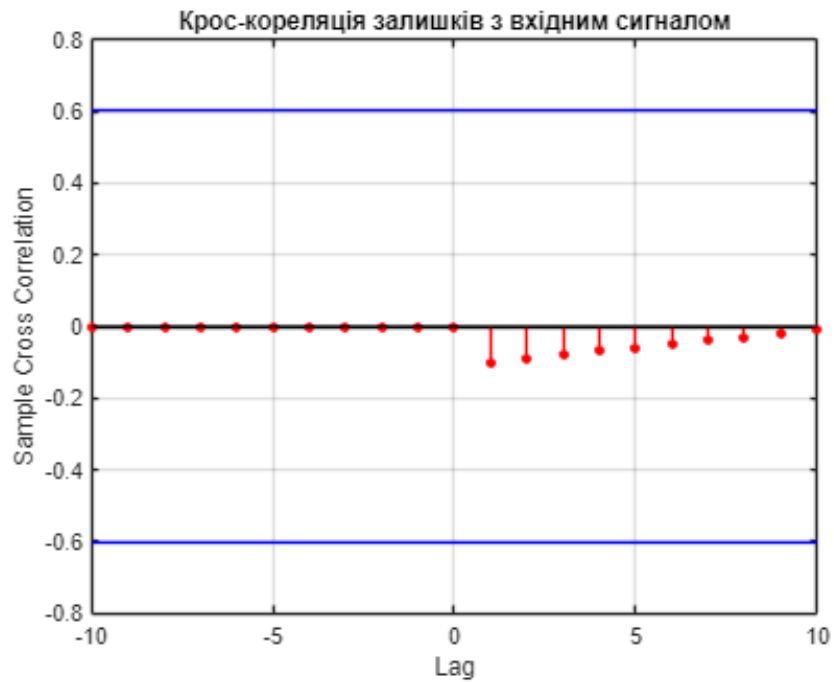


Рисунок 2.29 (b) – Графіки залишків

Залишки дуже маленькі (біля нуля) для більшості точок, є один відхил, який помітно відрізняється. Це свідчить про те, що система добре описує експериментальні дані, але для деяких точок є відхилення. Значення автокореляції на запізненнях майже лежать в межах довірчих інтервалів (сині лінії).

Це означає, що залишки не мають вираженої залежності від самих себе з часом – їх можна вважати випадковими. Відсутність автокореляції – гарний показник, що модель не пропускає якісь систематичні тренди. Крос-кореляція близька до нуля у більшості випадків, і теж лежить в межах довірчих інтервалів.

Це означає, що залишки не корелюються з вхідним сигналом. Відсутність кореляції вказує на те, що модель адекватно враховує вплив вхідного сигналу.

У висновку можемо сказати, що модель є адекватною, оскільки залишки не демонструють систематичних залежностей – вони майже випадкові, без автокореляції та без кореляції з входом.

Висновки до розділу

У другому розділі було побудовано математичну модель хімічного реактора з урахуванням теплового та матеріального балансу. На основі експериментальних даних виконано ідентифікацію моделі за допомогою інструментів Matlab.

Перевірка адекватності моделі підтвердила відповідність модель реальному об'єкту керування. Отримано передавальні функції як для реактора, так і для сорочки нагріву, що стало підґрунтям для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання температури.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		46

3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Синтез одноконтурної системи керування та підбір регулятора

Оскільки в роботі планується синтезувати каскадну систему керування, то необхідно провести синтез кожного контуру окремо, провести налаштування відповідних регуляторів.

Проведемо синтез одноконтурної системи керування сорочкою реактора, попередньо отримавши її передавальну функцію:

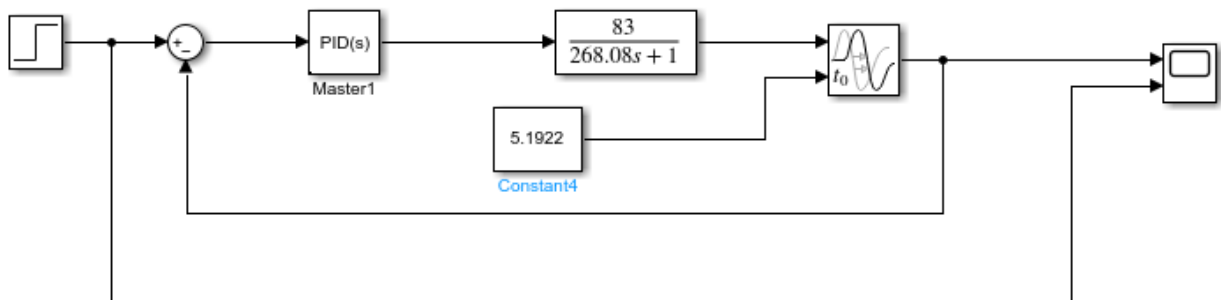


Рисунок 3.1 – Одноконтурна система сорочки реактора

Отримуємо результат попереднього моделювання:

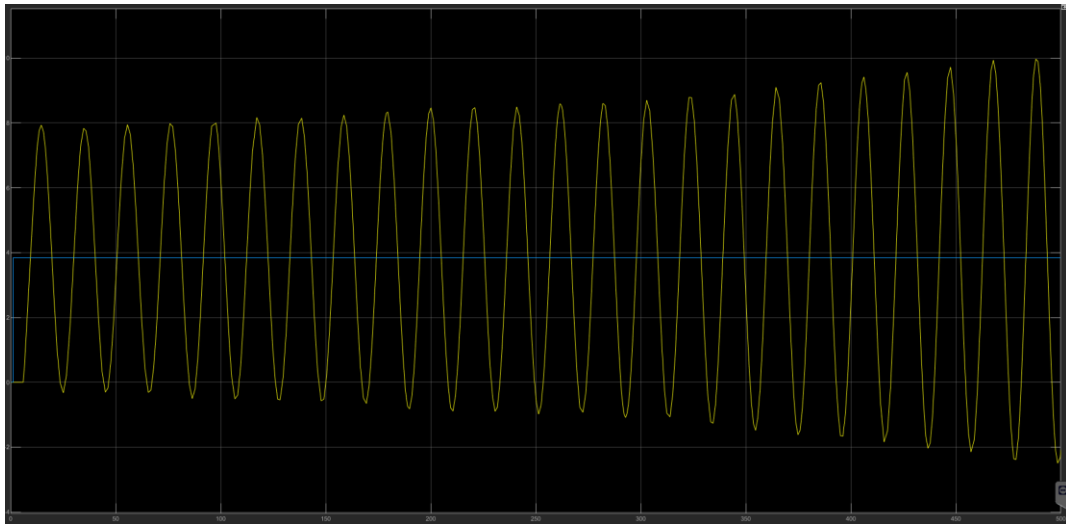


Рисунок 3.2 – Результат попереднього моделювання

На графіку помітні значні автоколивання. Позбудемось їх шляхом налаштування регулятора. Вибір регулятора буде проводитись між P, PI та PID, та можливими їх модифікаціями. Проаналізуємо всі отримані дані, сформуємо таблиця результатів 3.1 та виберемо найкращий.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		47

1) Паралельний Р-регулятор

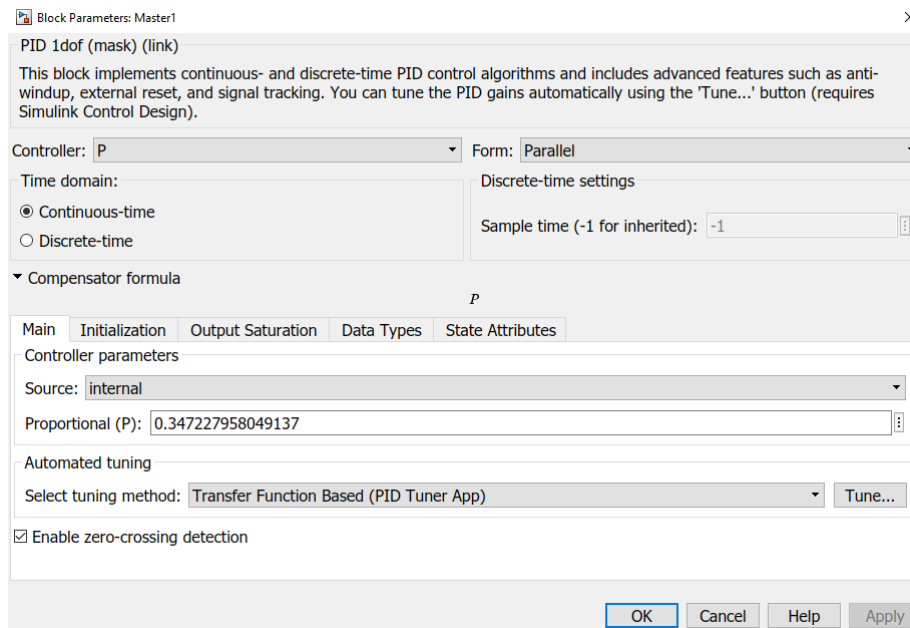


Рисунок 3.3 – Налаштування регулятора

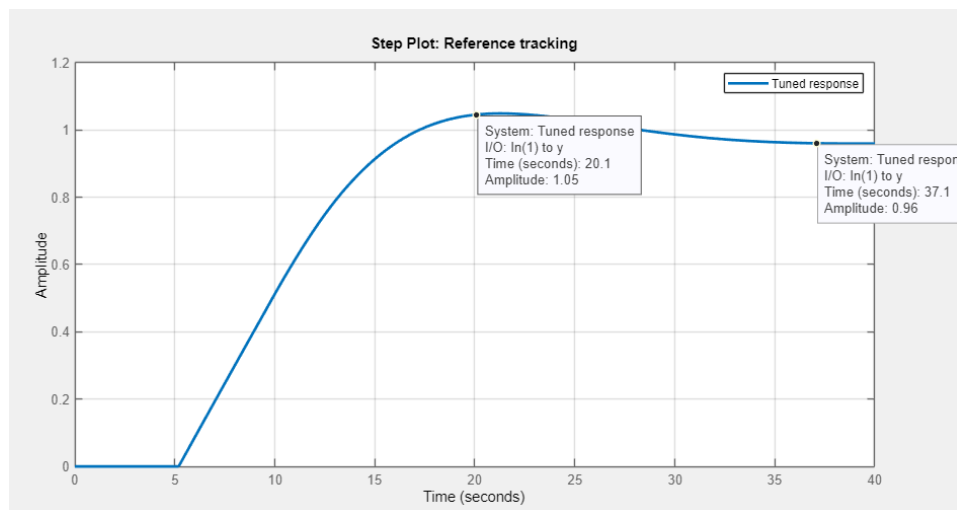


Рисунок 3.4 – Результат попереднього моделювання

Отримано дані такі:

- коефіцієнт підсилення – 0.34;
- час регулювання – 30.1 с;
- перерегулювання – 8.53%;

2) Паралельний PI-регулятор

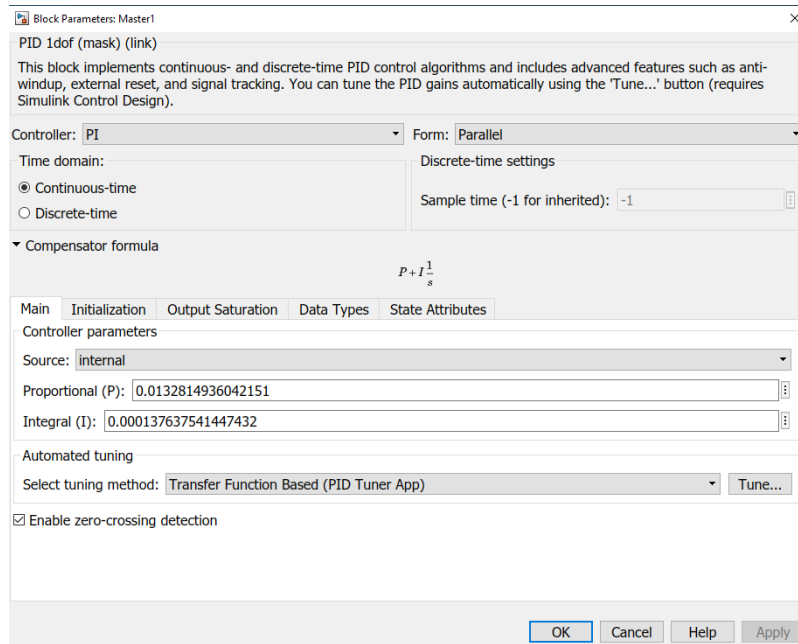


Рисунок 3.5 – Налаштування регулятора

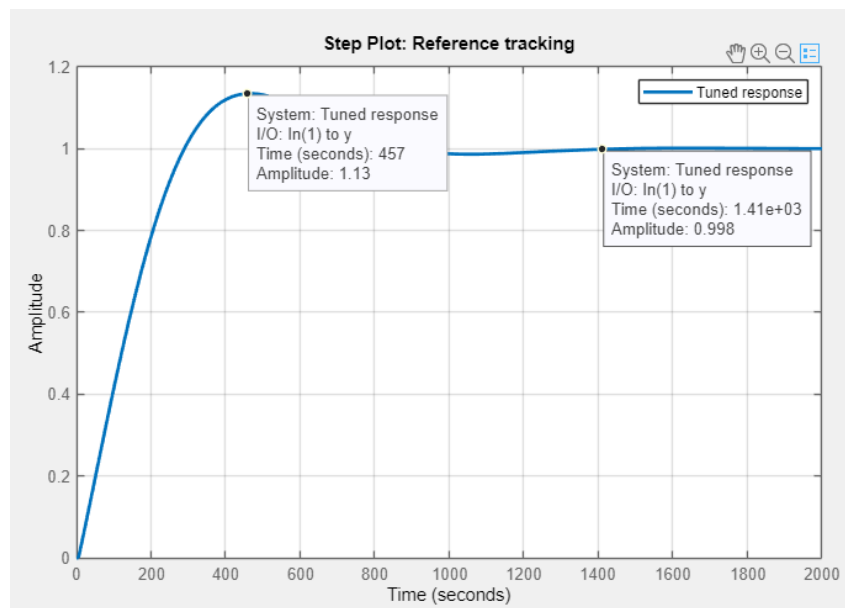


Рисунок 3.6 – Результат попереднього моделювання

Отримано дані такі:

- коефіцієнт підсилення – 0.013;
- час регулювання – 793 с;
- перерегулювання – 13.5%;

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		49

3) Паралельний PID-регулятор

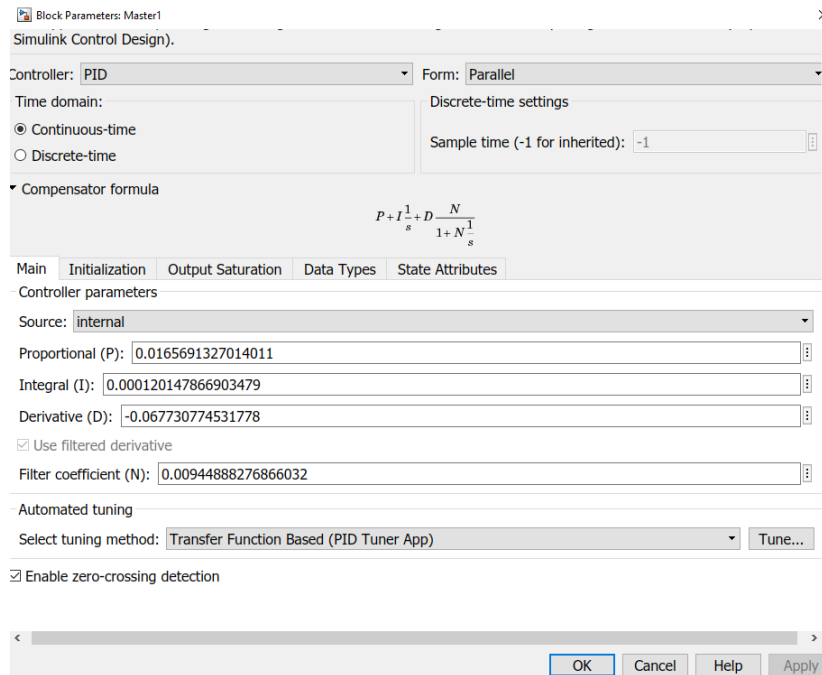


Рисунок 3.7 – Налаштування регулятора

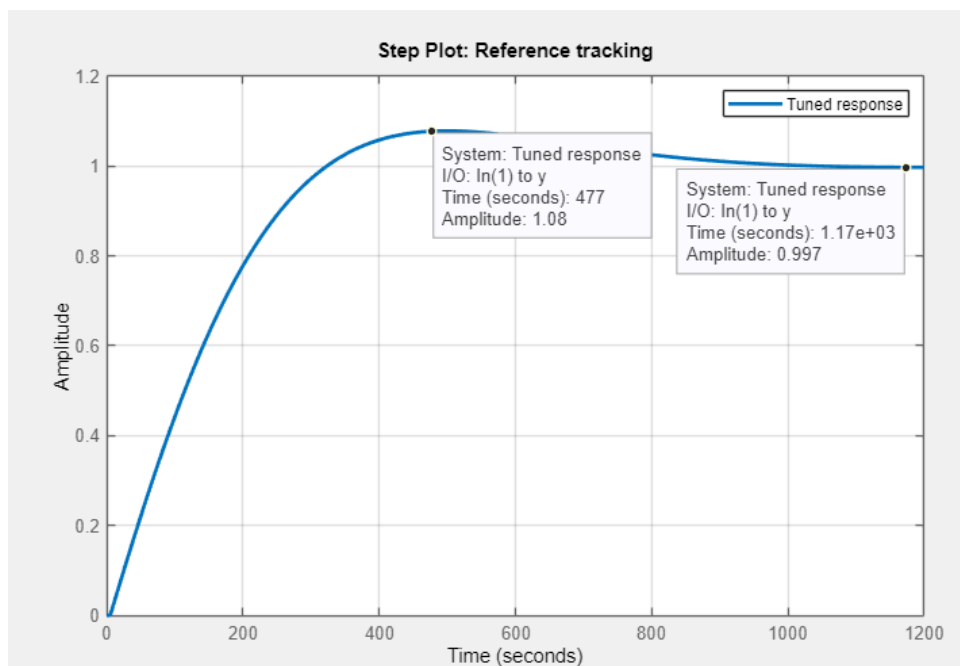


Рисунок 3.8 – Результат попереднього моделювання

Отримано дані такі:

- коефіцієнт підсилення – 0.016;
- час регулювання – 830 с;
- перерегулювання – 7.83%;

4) Ідеальний PI-регулятор

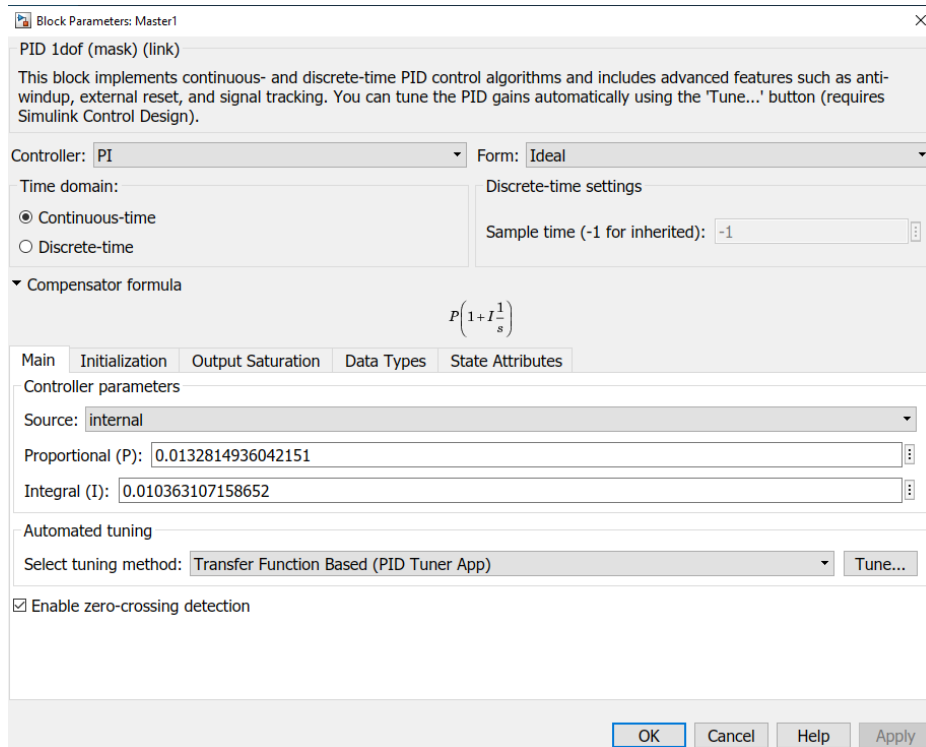


Рисунок 3.9 – Налаштування регулятора

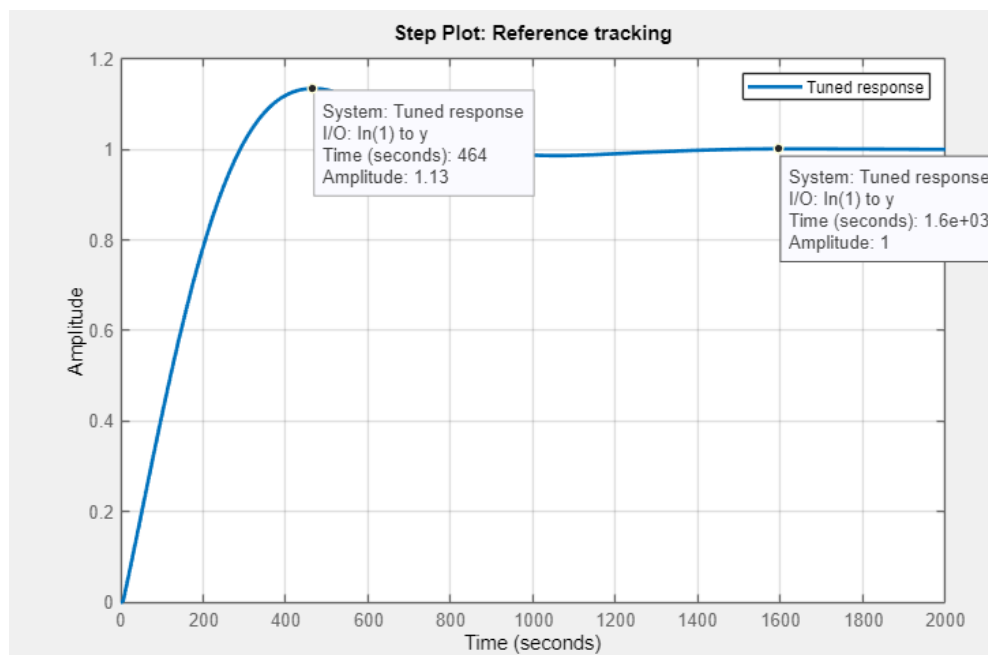


Рисунок 3.10 – Результат попереднього моделювання

Отримано дані такі:

- коефіцієнт підсилення – 0.013;
- час регулювання – 793 с;
- перерегулювання – 13.5%;

						БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			51

5) Ідеальний PID-регулятор

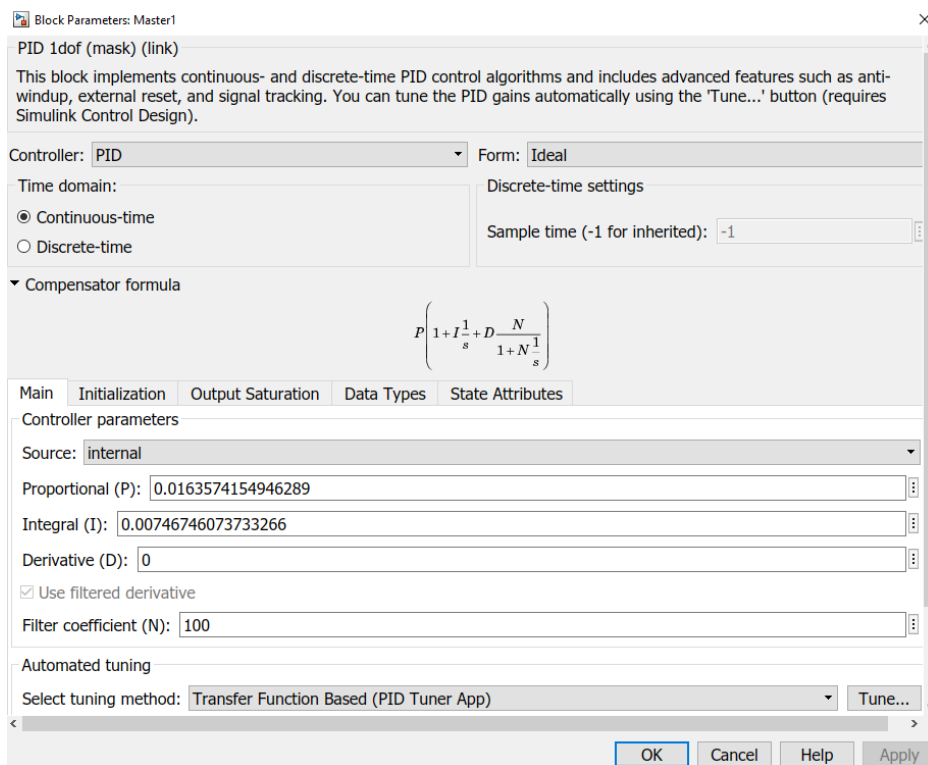


Рисунок 3.11 – Налаштування регулятора

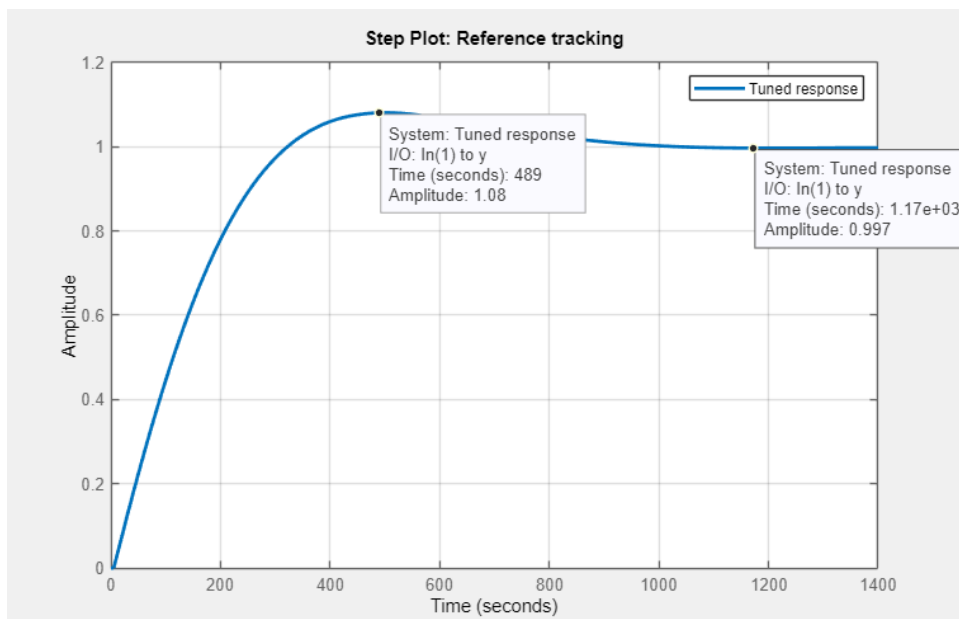


Рисунок 3.12 – Результат попереднього моделювання

Отримано дані такі:

- коефіцієнт підсилення – 0.016;
- час регулювання – 834 с;
- перерегулювання – 8.07%;

									Лист
									52
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ				

Таблиця 3.1 – Результати підбору регуляторів для сорочки реактора

Регулятор	P	I	D	Час регулювання, сек	Пере-регулювання, %
Безперервний паралельний PID регулятор	0.016	0.0001	-0.067	830	7.83
Безперервний паралельний PI регулятор	0.013	0.0001	-	793	13.5
Безперервний паралельний P регулятор	0.34	-	-	30.1	8.53
Безперервний ідеальний PID регулятор	0.016	0.007	0	834	8.07
Безперервний ідеальний PI регулятор	0.013	0.01	-	793	13.5

Проаналізувавши дані з таблиці 3.1, можемо сказати, що найбільш оптимальним варіантом є безперервний паралельний P-регулятор, час регулювання якого становить 30.1 секунди, а перерегулювання 8.53%.

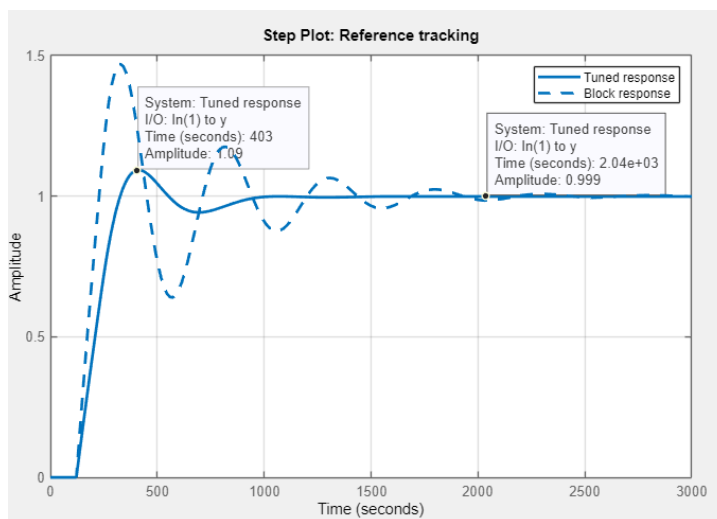


Рисунок 3.18 – Результат попереднього моделювання

Отримано дані такі:

- коефіцієнт підсилення – 1.284;
- час регулювання – 880 с;
- перерегулювання – 9.23%;

3) Паралельний PID-регулятор

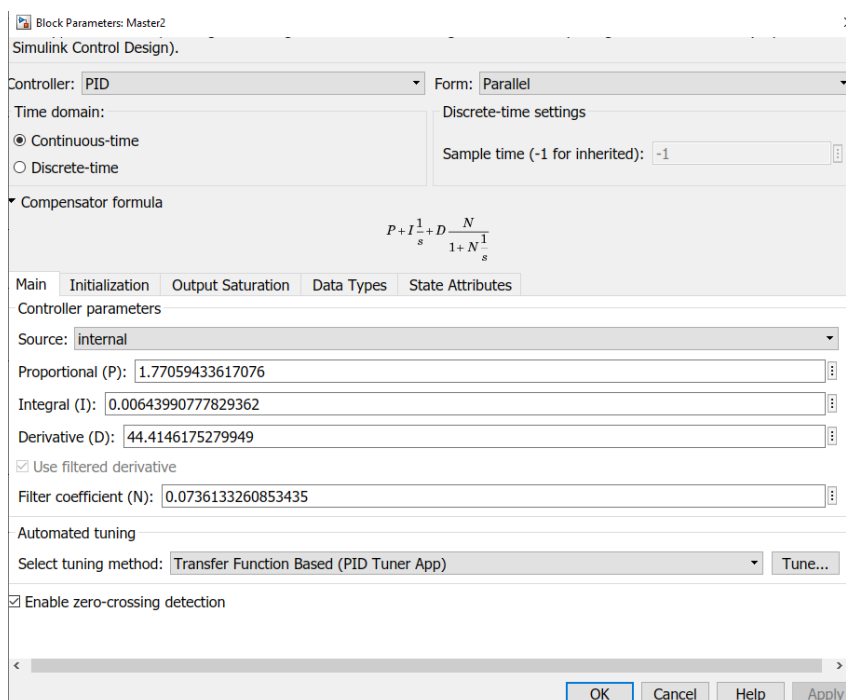


Рисунок 3.19 – Налаштування регулятора

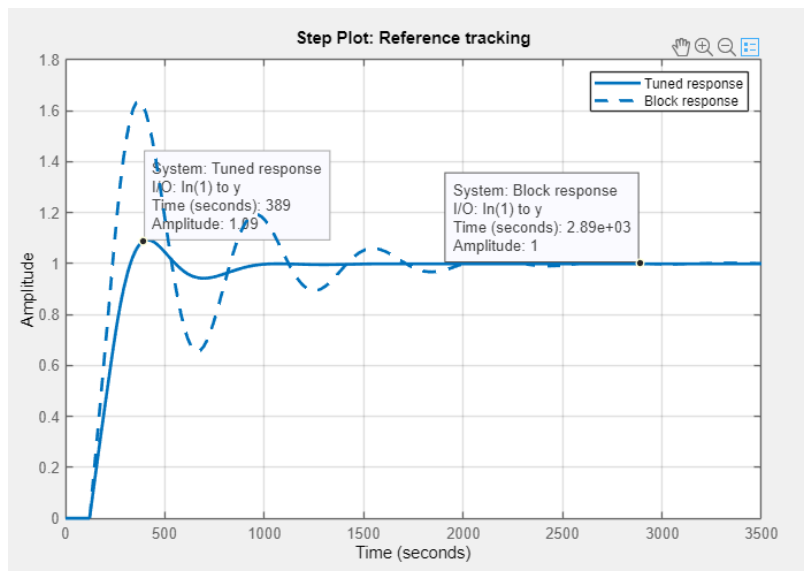


Рисунок 3.22 – Результат попереднього моделювання

Отримано дані такі:

- коефіцієнт підсилення – 1.284;
- час регулювання – 880 с;
- перерегулювання – 9.23%;

5) Ідеальний PID-регулятор

Block Parameters: Master2

Controller: PID Form: Ideal

Time domain:
 Continuous-time
 Discrete-time

Discrete-time settings
 Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P \left(1 + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \right)$$

Main Initialization Output Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 1.77059433617076

Integral (I): 0.00363714468454763

Derivative (D): 25.0845812734552

Use filtered derivative

Filter coefficient (N): 0.0736133260853435

Automated tuning

Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

Enable zero-crossing detection

Рисунок 3.23 – Налаштування регулятора

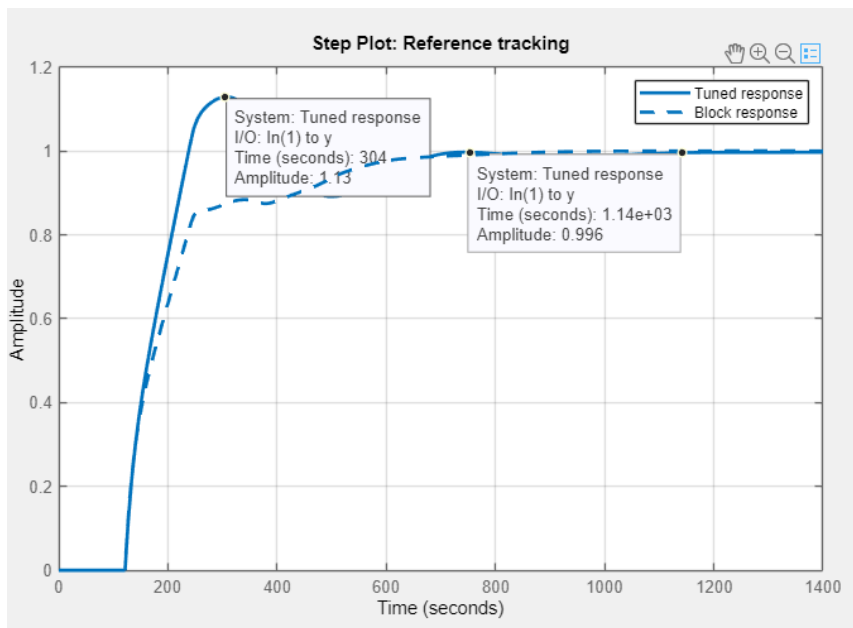


Рисунок 3.24 – Результат попереднього моделювання

Отримано дані такі:

- коефіцієнт підсилення – 1.771;
- час регулювання – 663 с;
- перерегулювання – 12.9%;

Таблиця 3.2 (а) – Результати підбору регуляторів для реактора

Регулятор	P	I	D	Час регулювання, сек	Пере-регулювання, %
Безперервний паралельний PID регулятор	1.770	0.0006	44.21	663	12.9
Безперервний паралельний PI регулятор	1.283	0.0005	-	880	9.23

Таблиця 3.2 (б) – Результати підбору регуляторів для реактора

Безперервний паралельний Р регулятор	2.19	-	-	61.9	58.8
Безперервний ідеальний PID регулятор	1.771	0.003	25.08	663	12.09
Безперервний ідеальний PI регулятор	1.284	0.004	-	880	9.23

Проаналізувавши дані з таблиці 3.2, можемо сказати, що найбільш оптимальним варіантом є безперервний паралельний PI-регулятор, час регулювання якого становить 880 секунд, а перерегулювання 9.23%.

3.2 Синтез каскадної системи керування

На рисунку 3.25 представлена каскадна система автоматичного керування температурою хімічного реактора, яка є типовим прикладом сучасного підходу до управління складними теплофізичними об'єктами. Такий підхід дозволяє підвищити точність регулювання за рахунок введення додаткового внутрішнього (вторинного) контуру керування, що забезпечує швидке реагування на збурення в системі теплопередачі через сорочку охолодження.

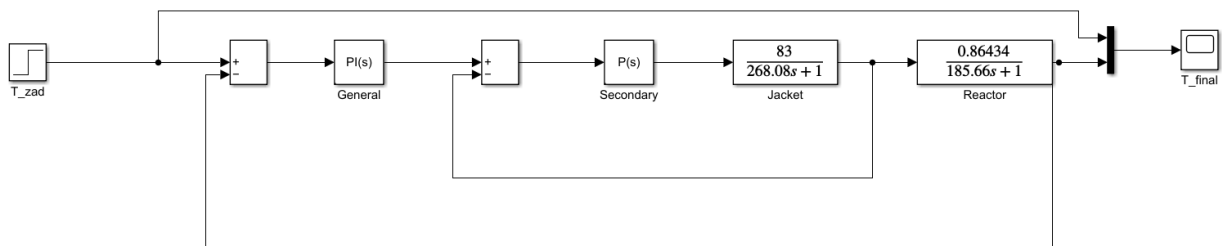


Рисунок 3.25 – Каскадна система реактора

Система складається з двох регуляторів:

- Основний (головний) PI-регулятор — призначений для підтримання заданої температури реактора (T_{zad}) шляхом формування керуючого сигналу до вторинного контуру.
- Вторинний P-регулятор — здійснює безпосереднє регулювання температури теплоносія в сорочці (Jacket), формуючи сигнал на виконавчий механізм, наприклад, клапан подачі охолоджувача.

Динаміка об'єктів регулювання представлена у вигляді передавальних функцій:

- **Сорочка охолодження** моделюється передавальною функцією:

$$G(s) = \frac{83}{268.08s + 1};$$

- **Реактор** описується передавальною функцією:

$$G(s) = \frac{0.86434}{185.66s + 1}.$$

Зворотні зв'язки з обох об'єктів дозволяють оцінювати відхилення від бажаних значень температури та коригувати вплив вхідного сигналу відповідно до заданої стратегії управління.

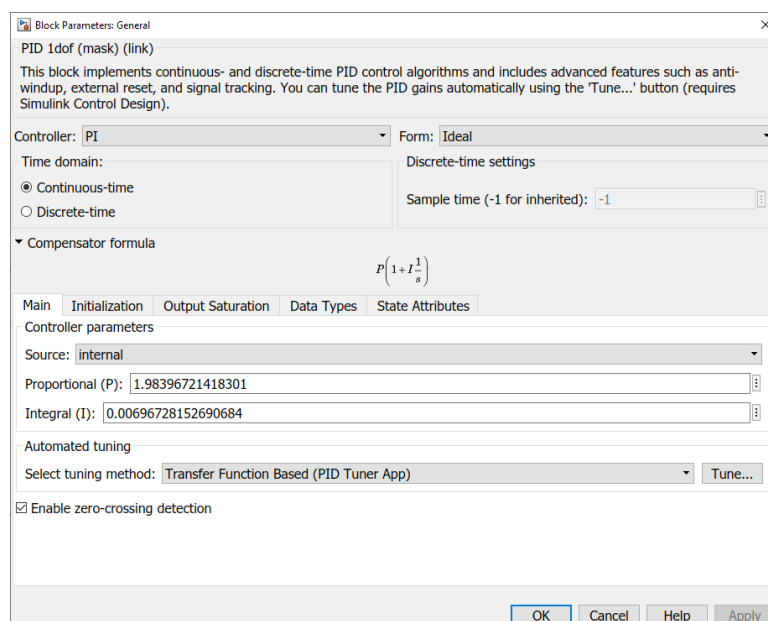


Рисунок 3.26 – Вікно налаштування PI-регулятора

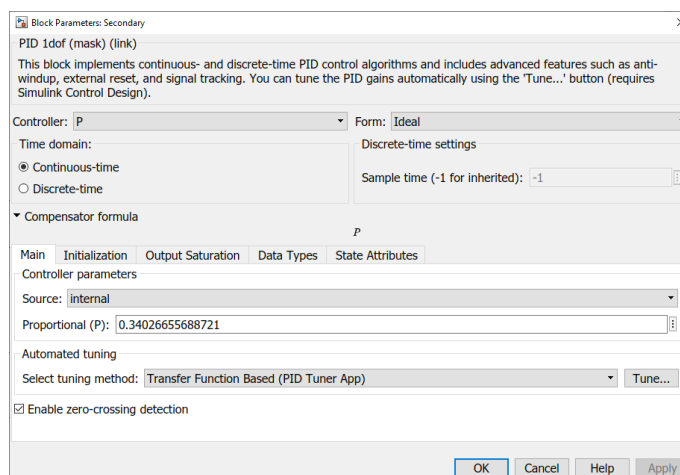


Рисунок 3.27 – Вікно налаштування P-регулятора

Загалом схема ілюструє ефективну реалізацію каскадної структури керування з використанням ПІ- та П-регуляторів для забезпечення стабільності та точності температурного режиму в умовах інерційного і багатоланкового теплового процесу.

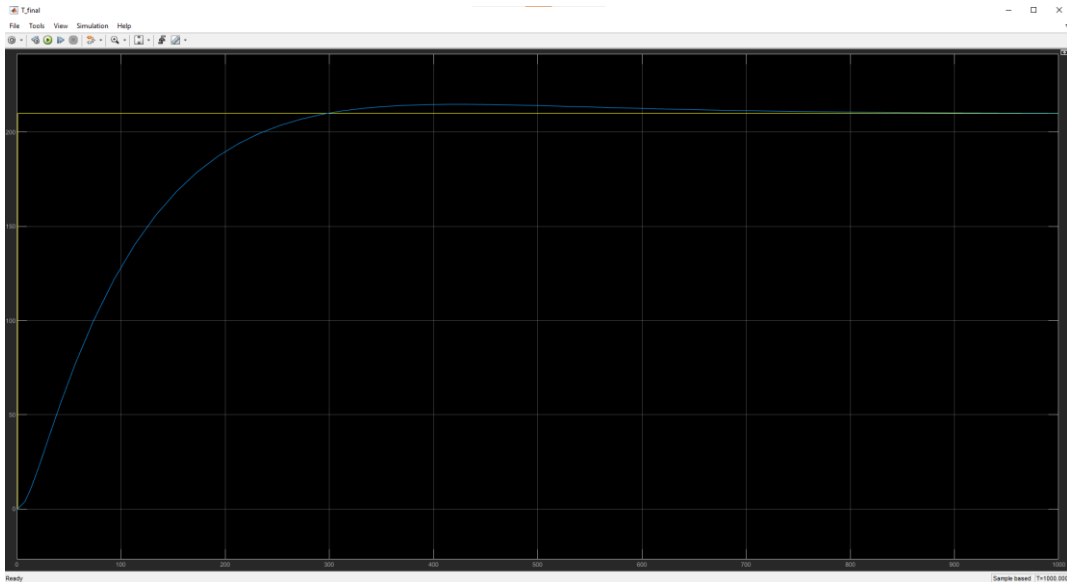


Рисунок 3.28 – Результат моделювання

- Пікове значення температури (T_1) ≈ 213.7 °C;
- Значення через 139.5 с (T_2) ≈ 211.7 °C;
- Задане значення ($T_{\text{зад}}$) ≈ 210 °C.

Перерегулювання:

$$OS = \frac{213.7 - 210}{210} \cdot 100\% \approx 1.76\%;$$

Це дуже мале перерегулювання – абсолютно прийнятне для більшості технологічних процесів.

Висновок до розділу

У третьому розділі було виконано синтез одноконтурної та каскадної систем керування температурою в реакторі. Проаналізовано характеристики різних типів регуляторів з точки зору часу регулювання та перерегулювання.

Доведено, що використання каскадної структури з PI-регулятором на зовнішньому контурі і P-регулятором на внутрішньому забезпечує високу точність регулювання і швидке реагування на збурення, що робить її найкращим вибором для даного технологічного процесу.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		63

4 РОЗРОБКА ОСНОВНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ПО АВТОМАТИЗАЦІЇ

4.1 Вибір технічних засобів автоматизації

Електромагнітний витратомір Rosemount 8750W знижує витрати протягом усього життєвого циклу, а також знижує виникнення незапланованих зупинок завдяки точному виміру витрати у різних застосуваннях.

Витратоміри 8750W оснащені функціями інтелектуальної діагностики, надаючи користувачеві вигоди просунутих методик встановлення, обслуговування та управління процесами. Завдяки повністю звареній конструкції датчика та ізольованій, замінній клемній колодці, витратомір 8750W є найнадійнішим приладом.



Рисунок 4.1 – Витратомір Rosemount 8750W

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		64

Поплавкові рівнеміри ОВЕН ПДУ-І є перетворювачем рівня рідини з вихідним сигналом 4...20 мА. Датчики призначені для систем регулювання та управління на об'єктах водоканалів, харчової та хімічної промисловості, використовуються у складі систем контролю рівня рідини у різних резервуарах та в чистих природних водоймах. Арматура датчика виготовляється з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т та AISI 316L.



Рисунок 4.2 – Поплавковий датчик рівня ПДУ-И.3500.10.CL65

Серія датчиків тиску Сафір М 5xxx має високі метрологічні та експлуатаційні характеристики. Завдяки процесору в основі електронного модуля, датчик здатний виконувати такі функції як: демпфування вихідного сигналу, кореневилучення, індикацію тиску і похідної фізичної величини.

Датчики абсолютного тиску Сафір М 5xxx широко застосовується в атомній і тепловій енергетиці, металургії, газо- і нафтовидобувній промисловості.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		65

Налаштування функцій датчика задаються за допомогою кнопочного управління, або за допомогою виносного пульта.



Рисунок 4.3 – Датчик тиску Сафір-М

Термометри опору - температурні датчики, що працюють за принципом зміна електричного опору металу як функція температури. Стандарти DIN EN 60751. Його використання в промисловості забезпечує точність, стабільність і чутливість. При вимірі температури з 3-провідним термометром опору відстань може бути близько 30 м. мм. Кабельне введення G ½ ”. процесу: G ½ ”зовнішня різьба” (S.S.316) Матеріал оболонки: нержавіюча сталь 316. Внутрішній знімний елемент діаметром 4 мм.



Рисунок 4.4 – Датчик температури GENE BRE 8051 250

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		66

Fisher GX – це триходові регулюючі клапани та приводи, призначені для точного керування параметрами потоку текучих середовищ (води, олій, пари та ін.). Надійний та компактний клапан GX найкраще підходить для вирішення проблем, пов'язаних з обмеженим простором, особливо це актуально для виробників оригінального обладнання.

Внутрішній затвор клапана спроектований так, щоб забезпечити тривалий термін експлуатації та мінімізувати витрати на обслуговування.



Рисунок 4.5 – Регулювальний клапан з приводом Fisher GX

SITRANS TH200 – це компактний і високотехнологічний температурний перетворювач від Siemens, призначений для точного вимірювання та передачі даних температури у промислових процесах.



Рисунок 4.6 – Перетворювач температури SITRANS TH200

Цей пристрій встановлюється безпосередньо в термоперетворювачі і забезпечує перетворення аналогових сигналів від термометрів опору (RTD) або термопар у стандартизовані цифрові сигнали для інтеграції в системи автоматизації.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		67

У датчиках тиску YOKOGAWA реалізована технологія DPharp, що дозволяє одночасно вимірювати диференціальне та статичний тиск. Дана технологія виключає необхідність у використанні додаткових датчиків тиску.

Прилади серії DPharp представлені широким розмаїттям моделей, включаючи датчики надлишкового тиску і датчики диференціального тиску з виносними розділовими мембранами, датчики надлишкового тиску



Рисунок 4.7 – Перетворювач тиску YOKOGAWA EJX-A

L-Vis 510 є ін-лайн віскозиметром, який занурюється прямо у виробничу рідину. Він безперервно показує в'язкість та температуру мастильних матеріалів, крохмальних клеючих речовин, суспензій та багатьох інших технологічних рідин, забезпечуючи цілодобове спостереження за продуктивністю.

Переваги:

- Падіння тиску чи швидкості потоку не впливають на результат вимірювання
- Забезпечує постійну якість продукції та зменшує кількість шлюбу
- Покриває діапазон в'язкості від 1 до 50 000 мПа.с



Рисунок 4.8 – Віскозиметр ANTON PAAR L-Vis 510

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		68

Мікропроцесорний регулятор МІК-322-К7

Призначений для вимірювання двох вхідних фізичних параметрів (температура, тиск, витрата, рівень тощо), обробка, перетворення, інтегрування та відображення на двох вбудованих чотирирозрядних цифрових дисплея.

- Вимірювання двох вхідних фізичних параметрів (температура, тиск, витрата, рівень тощо), обробка, перетворення, інтегрування та відображення на двох вбудованих чотирирозрядних цифрових дисплеях;
- Сигналізація виходу вимірюваних величин за уставки сигналізації; Індикація технологічного параметра одержуваного за інтерфейсом від зовнішніх пристроїв та передача вимірюваної величини за інтерфейсом іншим пристроям або верхній рівень (ПК).
- Наявність аналогового виходу для ретрансмісії аналогових сигналів;
- Використання чотирьох дискретних виходів для сигналізації, регулювання за 2-х позиційним законом з можливістю оперативної зміни завдання, блокування та захисту технологічного обладнання;
- Можливість обчислення інтегрованого значення вимірюваної величини;



Рисунок 4.9 – Мікропроцесорний регулятор МІК-322-К7

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		69

МТЛ-32Н

Сім незалежних режимів:

- однопороговий лічильник;
- підсумовуючий однопороговий лічильник;
- підсумовуючий двопороговий лічильник;
- Лічильник пакетів;
- таймер;
- тахометр;
- Дозатор-витратомір.

3 DI:

- Частота до 50 кГц
- логічний "0" - 0-7В;
- логічна "1" - 18-30В.

Інтерфейс/протокол:

- RS-485/ModBus.

1 АО:

- 0-5 мА ($R_H \leq 2 \text{кОм}$);
- 0-20 мА ($R_H \leq 500 \text{ Ом}$);
- 4-20 мА ($R_H \leq 500 \text{ Ом}$).

2 DO:

- Транзистор ОК: до 40В, 100мА;
- Реле: до 220В, 8А;
- твердотільне реле: до 40В, 0.5ААС/АDС.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		70



Рисунок 4.10 - Мікропроцесорний таймер-лічильник МТЛ-32Н

- багатофункціональний мікропроцесорний прилад, у якому програмним шляхом може бути обраний один із семи незалежних режимів:

- однопороговий лічильник;
- підсумовуючий однопороговий лічильник;
- підсумовуючий двопороговий лічильник;
- лічильник пакетів;
- таймер;
- тахометр;
- дозатор-витратомір.

ІТМ-100

Призначений для вимірювання одного контрольованого вхідного фізичного параметра (температура, тиск, витрати, рівень тощо), обробки та відображення його поточного значення на вбудованому чотирьохрозрядному цифровому дисплеї.



Рисунок 4.11 - ІТМ-100

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		71

МІК-127

МІК-127 – це регулятор, який дозволяє користувачеві використовувати всю потужність програмованого контролера за мінімальної кількості вхідних та вихідних сигналів та мінімальної вартості. Вбудовані засоби самодіагностики: сигналізація та ідентифікація несправностей, про вихід сигналів за допустимі межі, про збої в ОЗП, порушення обміну через мережу тощо.

Програмування регулятора виконується за допомогою клавіш передньої панелі або за інтерфейсом за допомогою спеціального програмного забезпечення – візуального редактора FBD-програм АЛЬФА.

Регулятор МІК-127 містить бібліотеку функціональних блоків, достатню для того, щоб вирішувати порівняно складні завдання автоматичного регулювання та логіко-програмного керування, дискретне введення-виведення, імпульсне введення

- Математичні функціональні блоки
множення, підсумовування з масштабуванням, поділ, корінь квадратний, абсолютне значення, інтегрування, диференціювання з затримкою, регістр, виділення фронту.
- Функціональні блоки управління програмою: мінімум, максимум, ковзне середнє, затримка, екстремум, обмеження, обмеження швидкості, перемикач за номером, компаратор, таймер, лічильник, мультівібратор, одновібратор, імпульсатор.



Рисунок - 4.12 МІК-127

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		72

4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональні схеми автоматизації — це важливий технічний інструмент, що використовується для відображення логічної структури та принципу роботи систем автоматизованого управління. Ці схеми дозволяють зрозуміти, як взаємодіють між собою різні елементи системи, які функції вони виконують, та як передається інформація, сигнали або енергія між компонентами.

Основна мета функціональних схем — забезпечити наочність, що сприяє аналізу системи, її проектуванню, впровадженню та подальшому обслуговуванню. Вони є ключовим елементом під час розробки автоматизованих систем управління, забезпечуючи чітке розуміння структури та роботи всіх елементів, які беруть участь у процесі.

На функціональних схемах відображаються об'єкти управління, прилади, засоби автоматизації та зв'язки між ними. До об'єктів управління відносяться технологічні процеси або обладнання, що потребують контролю, моніторингу або регулювання. Прилади та засоби автоматизації включають датчики, виконавчі механізми, контролери, регулятори та інші пристрої, які забезпечують виконання функцій системи.

Взаємозв'язки між елементами системи позначаються умовними лініями та символами, що вказують на характер передачі сигналів, інформації або енергії. Важливим аспектом є стандартизація позначень, що дозволяє створювати уніфіковані схеми, зрозумілі для інженерів та технічного персоналу.

Функціональні схеми класифікуються за різними типами залежно від мети використання. Принципові схеми відображають основну ідею роботи системи та її загальну структуру. Структурні схеми деталізують зв'язки між підсистемами та елементами, а специфікації містять інформацію про конкретні технічні характеристики обладнання. Також існують монтажні схеми, які допомагають реалізувати фізичне з'єднання компонентів. Кожен тип схеми використовується на певних етапах розробки та експлуатації системи.

Після запуску установки, діетиленгліколь з резервуару Є-1 поступає в

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		73

перегінний апарат ПР-1, в якому проходить реєстрація рівня за допомогою поплавкового датчика рівня ПДУ-И.3500, який передає уніфікований сигнал до мікропроцесорного регулятора МІК-311-К4, який в свою чергу подає сигнал на клапан подачі пари, що використовується для нагріву.

Після завершення очищення сировини, та досягнення необхідної температури, що вимірюється за допомогою датчика температури GENEBRE 8051, сигнал з регулятора передається на клапан, встановлений над резервуаром. Згодом, речовина поступає в кожухотрубний холодильник Х-1 для охолодження до заданої температури.

Контроль температура на виході холодильника здійснюється за допомогою аналогічного датчика, сигнал з якого передається на регулятор, що подає керуючий сигнал на клапан, котрий розташований знизу холодильної установки. Після охолодження, сировина передається в вакуумний приймай ВП-1, та паралельно починається підготовка наступної необхідної речовини – гліцерину.

Процес підготовки аналогічний попередньому, з різницею тільки в заданому температурному режимі. Підігрітий гліцерин паралельно діетиленгліколю поступає до мірника М-1. На кожній з ліній передачі встановлено датчики витрати Rosemount 8750W, необхідні для вимірювання та регулювання витрати.

Датчики витрати передають уніфікований сигнал на мікропроцесорний регулятор МІК-22, який подає керуючий сигнал на клапани, що встановлені на вході до мірника на кожній з ліній, відповідно. Отримана суміш передається до реактора Р-1, до якого підведені ліній з окремими реагентами, котрі необхідні для виготовлення конкретного полієфіру.

Витрата реагентів виконується за допомогою датчиків витрат Rosemount 8750W, котрі під'єднані та передають уніфікований сигнал 4...20 мА до багатоканального мікропроцесорного регулятора МТР-8Н, що подає керуючий сигнал на відповідні клапани подачі сировини.

Для індикації та регулювання тиску використовується датчик тиску WІКА

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		74

PGS11, котрий передає уніфікований сигнал 4...20 мА до мікропроцесорного регулятора МТР-8Н, до якого також під'єднаний датчик температури GENEБRE 8051, віскозиметр ANTON PAAR L-Vis 510, та датчик кислотності рН-103.

На виході зворотнього холодильника вставлено датчик температури GENEБRE 8051, що передає уніфікований сигнал 4...20 мА до регулятора МІК-311-К4, до якого, в свою чергу, також приєднано поверхневий рівнемір в резервуарі для води Є-2.

4.3 Розробка принципової електричної схеми сигналізації

Представлена схема є прикладом релейної системи керування виконавчими механізмами, яка може бути використана для автоматизації процесу обігріву реактора за допомогою теплоносія (динілу). Схема реалізує покрокове вмикання п'яти виконавчих пристроїв, кожен з яких керується окремим реле (контактором) із відповідною індикацією стану.

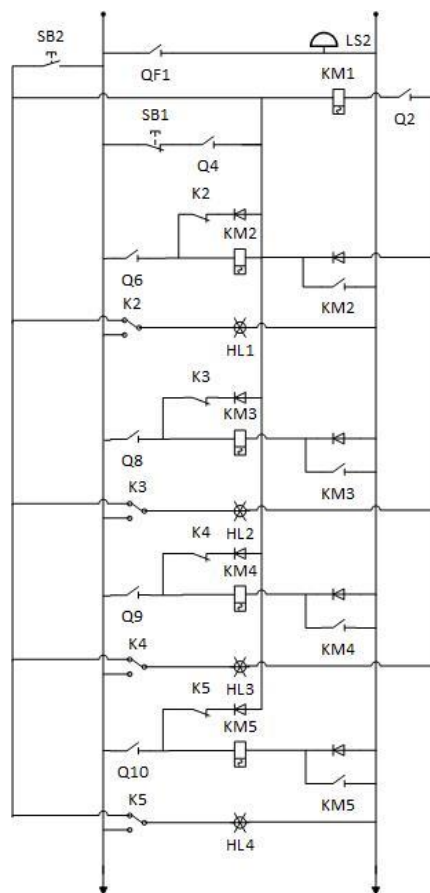


Рисунок 4.14 – Принципова електрична схема сигналізації

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		75

Після подачі живлення через автоматичний вимикач QF1 схема переходить у стан готовності. Контактор КМ1 вмикається, що підтверджується загальною сигнальною лампою LS2.

При натисканні кнопки «Пуск» SB1 подається напруга на котушку реле К2, яке замикає свої контакти і активує контактор КМ2. Одночасно через лампу HL1 відбувається індикація увімкнення першого виконавчого пристрою, наприклад, нагрівача динілу. Реле К2 утримується у увімкненому стані за допомогою перемикача Q6, що забезпечує самопідтримку кола.

Далі, за умови увімкнення перемикача Q8, активується реле К3, яке подає напругу на контактор КМ3. Це вмикає другий виконавчий механізм, наприклад, насос циркуляції теплоносія. Вмикається також індикатор HL2. Аналогічно, коли перемикач Q9 замкнений, активується реле К4, яке керує контактором КМ4. Це дозволяє подати диніл до сорочки реактора через електроклапан, а лампа HL3 сигналізує про цей етап. Нарешті, перемикач Q10 дозволяє активувати реле К5, яке замикає контактор КМ5, відповідаючи за запуск мішалки. При цьому загоряється лампа HL4, яка сигналізує про активність останнього рівня.

У випадку необхідності аварійної зупинки, натискання кнопки SB2 розмикає коло живлення всіх реле, і всі виконавчі механізми одночасно знеструмлюються. Система повертається в початковий безпечний стан очікування.

4.4 Розробка принципової електричної схеми керування двигуном

На рисунку представлено принципову електричну схему керування електродвигуном насоса подачі динілу, яка є частиною системи автоматизації обігріву реактора. Схема забезпечує запуск, зупинку, а також захист двигуна за допомогою комплексу елементів силового й керуючого кола. Така структура є типовою для локального (місцевого) керування виконавчим механізмом із можливістю зовнішнього контролю через логічний елемент (контакт контролера).

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		76

Система побудована на базі магнітного пускача (контактора), теплового реле, кнопок "Пуск" і "Стоп", автоматичного вимикача, запобіжників та контролера, що формує дозвіл на ввімкнення.

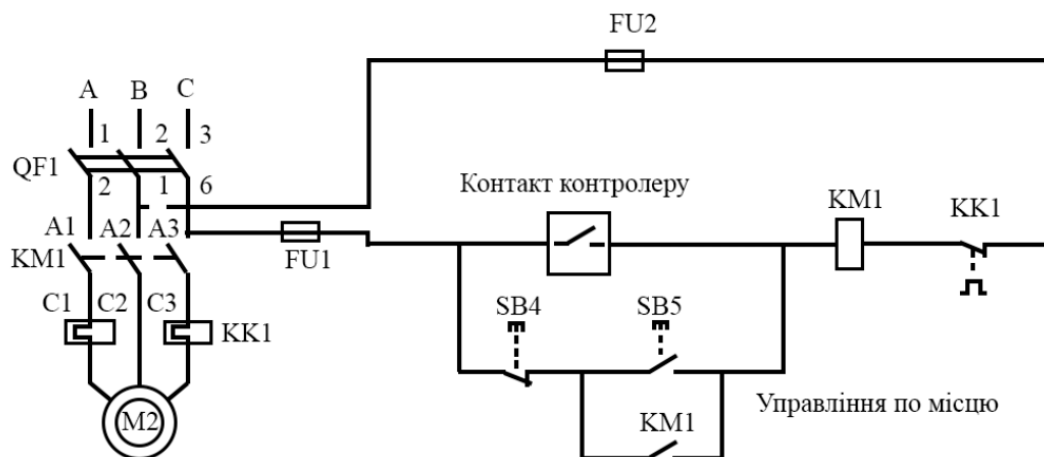


Рисунок 4.15 – Принципова електрична схема керування двигуном

Схема дозволяє безпечно й ефективно керувати подачею теплоносія до сорочки реактора. У разі перевищення навантаження або заборони на запуск від контролера, двигун буде автоматично знеструмлений, що підвищує надійність і безпечність експлуатації.

Після подачі трифазного живлення через автоматичний вимикач **QF1**, напруга надходить до силового кола двигуна **M2**, проте сам двигун залишається вимкненим доти, доки не замкнеться керувальне коло.

У керувальному колі встановлено два запобіжники: **FU1** (захищає керувальний ланцюг) і **FU2** (може використовуватись для індикації або допоміжних ланцюгів). Для запуску двигуна необхідно, щоб був замкнений **контакт контролера** — це може бути контакт терморегулятора, ПЛК або іншого пристрою, який дає дозвіл на ввімкнення подачі динілу за технологічними умовами (наприклад, коли потрібно обігрівати реактор).

Після цього оператор натискає кнопку **SB5** («Пуск»), і на котушку **KM1** подається живлення. Контактор спрацьовує, замикаючи свої силові контакти

A1–C1, A2–C2, A3–C3, подаючи напругу на трифазний двигун **M2**. Одночасно замикається контакт самопідтримки (паралельно кнопці **SB5**), завдяки чому після відпускання кнопки двигун продовжує працювати.

Для зупинки подачі динілу оператор натискає кнопку **SB4** («Стоп»), яка розриває ланцюг живлення котушки контактора **KM1**, і той повертається у вихідний стан. Крім того, у схемі передбачено **теплове реле KK1**, яке розмикає коло у разі перевантаження двигуна, тим самим зупиняючи роботу насоса.

Висновок до розділу

У четвертому розділі було підібрано сучасні засоби автоматизації для вимірювання температури, тиску, рівня та в'язкості, а також для регулювання потоків. Розроблено функціональні та принципові схеми автоматизації, які забезпечують надійну та ефективну роботу системи.

Використання високоточних приладів дозволяє підвищити точність вимірювання і стабільність процесу, а розроблені схеми сприяють зменшенню ризику аварійних ситуацій і полегшують обслуговування обладнання.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		78

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У межах виконаної бакалаврської роботи було розроблено комплексне рішення з автоматизації процесу виробництва полієфірів, що дало змогу підвищити точність, стабільність і безпечність керування основним технологічним об'єктом — реактором синтезу.

На першому етапі виконано ґрунтовний аналіз технологічного процесу виробництва полієфірів, розглянуто основні реагенти, обладнання та схеми подачі сировини і теплоносіїв. Проведено структурний аналіз схеми установки, визначено зони автоматизації та основні параметри, що підлягають контролю й регулюванню.

Далі здійснено побудову математичної моделі об'єкта керування з урахуванням його динамічних властивостей. На основі експериментальних даних проведено ідентифікацію реактора, побудовано динамічні та статичні характеристики. Отриману модель перевірено на адекватність за допомогою середовища MATLAB Simulink.

На основі аналізу моделі здійснено синтез автоматичної системи керування. Було розглянуто два варіанти: одноконтурну та каскадну структури регулювання температури. Проведено порівняльний аналіз варіантів, в результаті чого обґрунтовано доцільність використання каскадного регулювання для забезпечення більшої точності керування температурою в реакторі.

У фінальній частині роботи розроблено основні проектні рішення з автоматизації: функціональну, принципову схему сигналізації, а також принципову електричну схему керування двигуном подачі динілу. У схемах реалізовано локальне керування з можливістю автоматичного ввімкнення за сигналом контролера та захисту від аварійних режимів.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		79

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

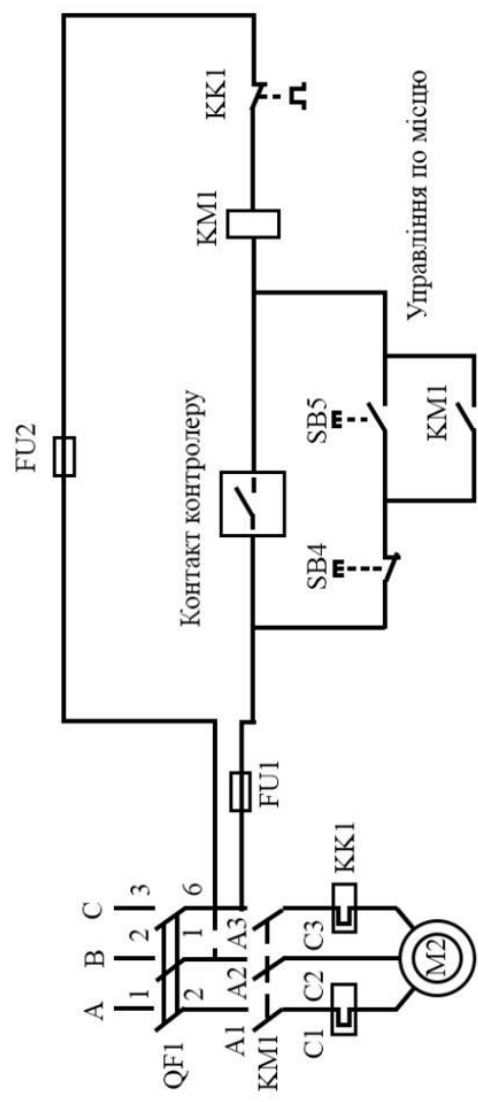
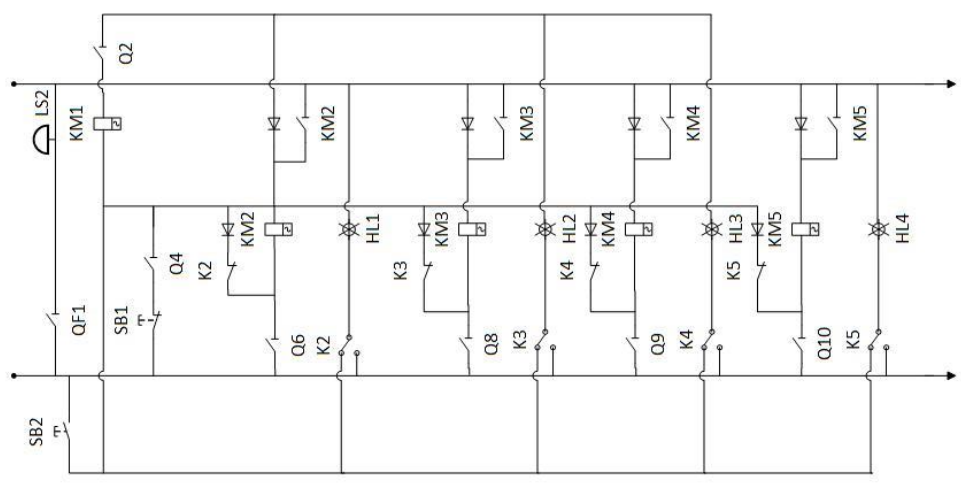
1. Бекетт, Б. В. Process Control: Modeling, Design, and Simulation / Б. В. Бекетт. – Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, 2003. – 420 с. – ISBN 0-13-353640-8.
2. Бішоп, Р. Г. Modern Control Systems Analysis and Design Using MATLAB and SIMULINK / Р. Г. Бішоп. – Boston : Addison-Wesley, 1997. – 672 с. – ISBN 0-201-49846-4.
3. Грін, Д. В. Perry's Chemical Engineers' Handbook : довід. / ред. Д. В. Грін, М. З. Саутард. – 9-е вид. – New York : McGraw-Hill, 2018. – 2640 с. – ISBN 978-0-07-142294-0.
4. Ельперін, І. В. Автоматизація виробничих процесів : підручник / І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед. – Київ : Ліра-К, 2015. – 400 с.
5. Кірк, Ф. W. Instrumentation and Process Control / Ф. Кірк, П. Кірк. – 4-е вид. – Albany : Delmar Cengage Learning, 2005. – 512 с.
6. Ліптак, Б. G. Instrumentation and Automation Engineer's Handbook / Б. Ліптак. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 984 с. – ISBN 978-1-4665-3418-3.
7. Лоренс, Н. Automatic Control of Chemical Processes / Н. Лоренс Пікер. – Dordrecht : Springer, 1984. – 248 с. – (NATO ASI Series) – ISBN 978-94-017-1026-8.
8. Лі Сун, Лян Фей, Цуй Вутай. Artificial Neural Network and Its Application Research Progress in Chemical Process [Електронний ресурс] // arXiv. – 2021. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2105.08674>.
9. Мак-Кейб, У., Сміт, Дж., Гарріотт, П. Unit Operations of Chemical Engineering / У. Мак-Кейб, Дж. Сміт, П. Гарріотт. – 7-е вид. – New York : McGraw-Hill, 2004. – 1024 с.
10. Пікер, Ф. J. Automatic Control of Chemical Processes / Ф. Дж. Пікер. – Dordrecht : Springer, 1984. – 254 с.
11. Роффел, Б. Advanced Practical Process Control / Б. Роффел, Б. Бетлем. – Berlin : Springer-Verlag, 2004. – 355 с. – ISBN 978-3-642-18258-7.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		80

12. Себорг, Д. Е. Process Dynamics and Control / Д. Е. Себорг, Т. Едгар, Д. Меллічамп. – 4-е вид. – Hoboken : Wiley, 2016. – 672 с. – ISBN 978-1-119-28591-5.
13. Стенцель, Й. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв : підручник / Й. І. Стенцель, О. В. Поркуян. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2010. – 368 с.
14. Хоссейн, Е. MATLAB and Simulink Crash Course for Engineers / Е. Хоссейн. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – 232 с. – ISBN 978-3-030-89761-1.
15. Шінські, Ф. Г. Process Control Systems / Ф. Шінські. – 4-е вид. – New York : McGraw-Hill, 1996. – 640 с. – ISBN 978-0-07-041099-3.

					БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ	Лист
						81
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

БР.АКП-06.00.00.0001



№ в. ор.	Підп. і дата	Зам. інв. №	Інв. № в/дл.	Підп. і дата	Лобковий №	Первинне застосування
----------	--------------	-------------	--------------	--------------	------------	-----------------------

БР.АКП-06.00.00.0002		Лист	Маса	Матеріал
Розробка системи автоматизації технологічного процесу виробництва поліфрідів				
Принципові електричні схеми		Арк.	Аркшів	1
Категорія		АКП-21-1 ЮНТУНГ		
Формат		А3		
Зм.	Арк.	№ док-мт.	Підпис	Дата
Розроб.	Знакін.	М.І.		
Перев.	Лазарда.	А.І.		
Т.контр.	Кучиштанко.	О.В.		
Реценз.	Кучиштанко.	О.В.		
Н.контр.	Лазарда.	А.І.		
Зміст.				