

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

**Володимир Коцаба**

**2026**

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

Коцаба Володимир Дмитрович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:678.746.2  
(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи автоматизації процесу виробництва полістиролу  
(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(назва освітньої програми)

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(шифр і назва спеціальності)

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

### Нормоконтроль

доцент О.В. Кучмистенко  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### Рецензент

доцент І.І. Чигур  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1 В.Д. Коцаба  
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

доцент Л.І. Фешанич  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### Допущено до захисту Завідувач кафедри

доцент А.І. Лагойда  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри АКІТ**

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

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

**Коцабі Володимиру Дмитровичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації процесу виробництва полістиролу

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, к.т.н., доцент

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від « 29 » травня 2026 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 12.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики, методичні Вказівки, технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз технологічно процесу виробництва полістиролу.

2. Дослідження процесу виробництва полістиролу як об'єкта керування.

3. Розробка проектної складової системи автоматичного керування.

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

БР.АКП-09.00.00.001 – Схема технологічного процесу

БР.АКП-09.00.00.002 – Тепловий баланс

БР.АКП-09.00.00.003 – Ідентифікація об'єкта дослідження

БР.АКП-09.00.00.004 – Результати синтезу САК

БР.АКП-09.00.00.005 – Функціональна схема автоматизації



## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 67 сторінок друкованого тексту, 20 рисунків, 5 таблиць, 13 джерел у переліку посилань.

Тема: «Розроблення системи автоматизації процесу виробництва полістиролу».

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва полістиролу блоковим методом полімеризації стирола.

Предметом дослідження є система автоматичного регулювання температури реактора полімеризації в складі виробництва полістиролу.

Мета роботи: розроблення системи автоматизації процесу виробництва полістиролу із забезпеченням автоматичного регулювання температурного режиму реактора полімеризації.

Методи дослідження: методи теорії автоматичного керування, математичного моделювання динамічних об'єктів, методи розрахунку теплових балансів, структурного та параметричного синтезу систем автоматичного регулювання. Моделювання об'єкта керування та налаштування регулятора виконано із застосуванням програмного середовища MATLAB та пакета System Identification Toolbox.

Результати кваліфікаційної роботи: виконано аналіз технологічного процесу виробництва полістиролу та досліджено реактор полімеризації як об'єкт автоматизації. Проведено теплові розрахунки стадій нагрівання, полімеризації та охолодження реакційної маси. Виконано ідентифікацію параметрів об'єкта керування та отримано його передавальну функцію. Здійснено синтез системи автоматичного регулювання температури на базі ПІ-регулятора. Розроблено функціональну схему автоматизації технологічного процесу, обґрунтовано вибір сучасних технічних засобів автоматизації

Ключові слова: автоматизація, полістирол, полімеризація, реактор, температура

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis contains: 67 pages of printed text, 20 figures, 5 tables, and 13 references.

Title: "Development of an Automation System for the Polystyrene Production Process".

The object of research is the technological process of polystyrene production by the bulk polymerization of styrene.

The subject of research is the automatic temperature control system of the polymerization reactor within the polystyrene production process.

The purpose of the thesis is to develop an automation system for the polystyrene production process with automatic control of the temperature regime of the polymerization reactor.

Research methods: methods of automatic control theory, mathematical modeling of dynamic systems, thermal balance calculation methods, and methods of structural and parametric synthesis of automatic control systems. The control object modeling and controller tuning were carried out using the MATLAB software environment and the System Identification Toolbox.

Results of the qualification work: the technological process of polystyrene production was analyzed, and the polymerization reactor was investigated as an automation object. Thermal calculations for the heating, polymerization, and cooling stages of the reaction mixture were performed. The parameters of the control object were identified, and its transfer function was obtained. A temperature automatic control system based on a PI controller was synthesized. A functional automation diagram of the technological process was developed, and the selection of modern automation equipment was substantiated.

Keywords: automation, polystyrene, polymerization, reactor, temperature, control system.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	<b>8</b>
<b>1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІСТИРОЛУ</b> .....	<b>10</b>
1.1 Загальна характеристика полістиролу як об'єкта виробництва.....	10
1.2 Методи виробництва полістиролу.....	11
1.3 Класифікація промислових видів полістиролу та сфери їх застосування.....	13
1.4 Технологія виробництва полістиролу.....	16
1.4.1 Полімеризація в масі.....	18
1.4.2 Суспензійна полімеризація.....	19
1.4.3 Емульсійна полімеризація.....	20
1.5 Виробництво блокового полістиролу.....	22
Висновки до розділу.....	23
<b>2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІСТИРОЛУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ</b> .....	<b>25</b>
2.1 Теплові розрахунки.....	<b>25</b>
2.1.1 Тепловий баланс стадії нагрівання.....	26
2.1.2 Тепловий баланс синтезу.....	29
2.1.3 Тепловий баланс стадії охолодження.....	33
2.2 Регулювання температури реактора полімеризації.....	37
Висновки до розділу.....	42
<b>3 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК</b> .....	<b>45</b>
3.1. Розроблення функціональної схеми.....	45

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розроблення системи автоматизації процесу виробництва полістиролу	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Коцаба В.Д.				6	5	
Перевір.		Фешанич Л.І.						
Реценз.		Чигур І.І.				Група АКП-22-1 ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

3.2 Структура автоматизованої системи керування технологічним процесом.....	48
3.3 Обґрунтування вибору програмованого логічного контролера.....	51
3.4 Вибір операторської панелі .....	53
3.5 Модулі введення-виведення.....	55
3.6 Вибір вимірювальних перетворювачів .....	56
3.6.1 Вибір датчика температури.....	57
3.5.2 Вибір витратоміра.....	58
3.7 Вибір регулюючого клапана.....	62
Висновки до розділу.....	62
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>64</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....</b>	<b>66</b>

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

Сучасний розвиток хімічної промисловості характеризується постійним зростанням вимог до якості продукції, ефективності виробництва та рівня промислової безпеки. Одним із найважливіших напрямів підвищення конкурентоспроможності підприємств є впровадження сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами, які забезпечують стабільність технологічних режимів, зниження витрат сировини та енергоресурсів, а також підвищення продуктивності виробництва.

Полістирол належить до найбільш поширених полімерних матеріалів, які широко застосовуються в будівництві, машинобудуванні, електротехнічній, харчовій та пакувальній промисловості. Значний попит на продукцію з полістиролу обумовлює необхідність удосконалення технологій його виробництва та підвищення ефективності керування технологічними процесами.

Процес виробництва полістиролу характеризується складністю перебігу фізико-хімічних процесів, наявністю значних теплових ефектів під час полімеризації та необхідністю підтримання заданих значень температури, витрати та інших технологічних параметрів. Відхилення цих параметрів від установлених значень може призвести до погіршення якості готової продукції, збільшення витрат сировини та виникнення аварійних ситуацій. Саме тому особливого значення набуває розроблення сучасних автоматизованих систем контролю та керування процесом полімеризації.

Актуальність теми полягає в необхідності підвищення ефективності виробництва полістиролу шляхом впровадження сучасних засобів автоматизації, що забезпечують стабільне підтримання технологічних параметрів, підвищення якості продукції та зменшення впливу людського фактора на процес керування.

Метою бакалаврської роботи є розроблення системи автоматизації процесу виробництва полістиролу, яка забезпечує контроль та регулювання основних

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологічних параметрів, підвищення надійності роботи технологічного обладнання та ефективності виробничого процесу.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва полістиролу блоковим методом полімеризації стиролу.

Предметом дослідження є автоматизована система керування технологічним процесом виробництва полістиролу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз технологічного процесу виробництва полістиролу як об'єкта автоматизації;

– дослідити основні параметри технологічного процесу та визначити контури регулювання;

– виконати теплові розрахунки технологічного обладнання;

– розробити структуру автоматизованої системи керування технологічним процесом;

– обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації;

– виконати вибір контрольно-вимірювальних приладів і виконавчих механізмів;

– розробити функціональну схему автоматизації технологічного процесу;

– оцінити ефективність запропонованих технічних рішень.

Практичне значення роботи полягає у розробленні технічних рішень щодо автоматизації процесу виробництва полістиролу, які можуть бути використані для підвищення ефективності функціонування сучасних хімічних виробництв та покращення якості готової продукції.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІСТИРОЛУ

## 1.1 Загальна характеристика полістиролу як об'єкта виробництва

Полістирол є термопластичним полімером лінійної структури, який утворюється в результаті полімеризації стиролу. Його фізико-хімічні характеристики та експлуатаційні властивості визначаються способом синтезу, молекулярною масою, ступенем полідисперсності та іншими технологічними факторами. Переробка полістиролу здійснюється переважно методами лиття під тиском та екструзії за підвищених температур.

Завдяки комплексу цінних властивостей полістирол набув широкого застосування в різних галузях промисловості. Його використовують у цивільному та військовому виробництві, машинобудуванні, електротехніці, будівництві, приладобудуванні, медицині та харчовій промисловості. Крім того, матеріал широко застосовується для зовнішнього та внутрішнього оздоблення приміщень, а також для виготовлення різноманітних побутових виробів.

До основних переваг полістиролу належать:

- простота механічної обробки та формування виробів;
- висока стійкість до дії багатьох агресивних хімічних речовин;
- добрі діелектричні властивості;
- екологічна безпечність під час експлуатації;
- відсутність запаху.

Водночас полістирол має низку недоліків, серед яких варто відзначити горючість, підвищену крихкість, невисоку зносостійкість та обмежений діапазон робочих температур.

Для покращення фізико-механічних характеристик і розширення сфер застосування полістирол часто модифікують шляхом змішування з іншими

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

полімерами або введенням спеціальних добавок, що дозволяє підвищити його міцність, ударостійкість та термостійкість.

## 1.2 Методи виробництва полістиролу

Полістирол може бути отриманий різними методами полімеризації стиролу. Одні з них широко використовуються в сучасній промисловості, тоді як інші мають обмежене застосування. Основними способами виробництва полістиролу є емульсійний, суспензійний та блоковий (масовий) методи.

Емульсійний метод не набув такого широкого поширення, як інші способи виробництва. Він базується на полімеризації стиролу у водному лужному середовищі за наявності емульгатора та ініціатора полімеризації. Як вихідні компоненти використовують стирол, воду, емульгатор та ініціатор. Основною перевагою цього методу є можливість одержання полістиролу з високою молекулярною масою. Водночас складність очищення готового продукту та значні витрати на технологічний процес обмежують його промислове застосування.

Суспензійний метод нині вважається менш поширеним, проте він продовжує використовуватися для виробництва пінополістиролу та окремих видів співполімерів. Процес здійснюється шляхом полімеризації стиролу у водному середовищі з поступовим підвищенням температури та підтриманням необхідного тиску. У результаті утворюється полімерна суспензія, з якої готовий продукт виділяють методом центрифугування. Після цього полістирол промивають, висушують та направляють на подальшу переробку [1].

Найбільш сучасним і поширеним способом виробництва є блоковий (масовий) метод полімеризації. Саме він використовується на більшості сучасних хімічних підприємств завдяки високій продуктивності, безвідходності процесу та можливості отримання продукції високої якості. Залежно від ступеня перетворення мономеру застосовують схеми повної або неповної конверсії. Процес полімеризації здійснюється у декілька послідовних стадій із поступовим підвищенням

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

температури реакційної маси, що забезпечує стабільне протікання реакції та отримання полістиролу із заданими властивостями.

З огляду на високу економічну ефективність, простоту організації виробництва та можливість автоматизації технологічного процесу, блоковий метод є найбільш перспективним для сучасних підприємств з виробництва полістиролу.

### **1.3 Класифікація промислових видів полістиролу та сфери їх застосування**

Для покращення фізико-механічних властивостей полістиролу та розширення сфер його застосування використовують модифікацію шляхом змішування з іншими полімерами або синтезу співполімерів стиролу. У результаті отримують матеріали з підвищеною теплостійкістю, ударною міцністю та покращеними експлуатаційними характеристиками. Найбільше промислове значення мають блок-співполімери, прищеплені співполімери та статистичні співполімери стиролу.

Залежно від складу, способу отримання та експлуатаційних властивостей розрізняють три основні види промислового полістиролу: полістирол загального призначення, ударостійкий полістирол та екструдований полістирол.

Полістирол загального призначення (GPPS) являє собою прозорий термопластичний матеріал, який характеризується високою твердістю, жорсткістю та водночас підвищеною крихкістю. У технічній літературі та нормативній документації його позначають як PS, GPPS, PS-GP, Crystal PS або XPS. Матеріал отримують переважно блоковим або суспензійним методом полімеризації. Завдяки високій прозорості, добрим діелектричним властивостям і простоті переробки він широко використовується для виготовлення побутових виробів, одноразового посуду, харчової упаковки, дитячих іграшок, рекламної продукції, світлотехнічних виробів та декоративно-оздоблювальних елементів.

До основних фізико-хімічних властивостей полістиролу загального призначення належать [2]:

– висока прозорість;

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13



- довговічність;
- екологічна безпечність під час експлуатації.

Крім того, матеріал легко піддається механічній обробці та монтажу, що значно спрощує його використання в будівництві. Основним недоліком екструдованого полістиролу є його горючість, що потребує застосування відповідних протипожежних заходів під час експлуатації.



Рисунок 1.1 – Види продукції, що виготовляється з полістиролу

Полімер не має запаху та може контактувати з харчовими продуктами без шкоди для здоров'я людини. Саме завдяки високій екологічності та безпечності він використовується для виготовлення багатьох побутових виробів: одноразового посуду, упаковки та тари, дитячих іграшок, предметів інтер'єру, канцелярських товарів.

Матеріал широко використовується для теплоізоляції, виробництва сендвіч-панелей, а також як декоративний та оздоблювальний матеріал. З нього виготовляють стельові плитки, звукопоглинальні елементи, клейові основи тощо. Крім того, його часто застосовують у дорожньому будівництві та при спорудженні промислових будівель і споруд.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Пластик використовується для виготовлення різноманітних медичних інструментів і приладів. Зокрема, для виробництва систем переливання крові, одноразових інструментів, витратних матеріалів і чашок Петрі.

Завдяки хорошим діелектричним властивостям полістирол використовується для виготовлення антен, кабелів, тонких конденсаторних плівок. Також застосовується у виробництві корпусів побутової техніки та холодильного обладнання.

Використовується в цивільній промисловості для виготовлення різних конструкцій, агрегатів, турбін, будівель і споруд. Також застосовується у військовій промисловості для виробництва напалму та деяких вибухових речовин.

Полістирол є високотехнологічним і недорогим матеріалом із високими теплоізоляційними та звукоізоляційними властивостями. Екологічна безпечність і доступність забезпечують його широке застосування в різних сферах життя людини. На сьогодні практично не існує матеріалу, який міг би повністю його замінити. Матеріали, близькі за властивостями до полістиролу, або мають гірші експлуатаційні характеристики, або коштують значно дорожче. Ймовірно, він ще багато років залишатиметься затребуваним на українському та світовому ринках.

#### **1.4 Технологія виробництва полістиролу**

Ударостійкий полістирол отримують методом безперервної полімеризації стиролу в масі. Готовий продукт являє собою гранульований матеріал, який може випускатися як у забарвленому, так і в незабарвленому вигляді. За своєю структурою він є співполімером стиролу та полібутадієну. Сучасні технології виробництва ударостійкого полістиролу забезпечують високу однорідність матеріалу, відсутність гелевих включень і низький вміст залишкового мономера, що відповідає вимогам міжнародних стандартів якості.

Промислове виробництво полістиролу ґрунтується на процесі радикальної полімеризації стиролу. Залежно від умов проведення процесу, технологічної схеми та вимог до кінцевого продукту застосовують різні способи полімеризації. Вибір

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

технології значною мірою визначає фізико-механічні та експлуатаційні властивості отриманого полімеру.

Основними способами полімеризації стиролу є [3]:

- полімеризація в масі (блокова полімеризація);
- емульсійна полімеризація;
- суспензійна полімеризація;
- полімеризація в розчині.

Блокова полімеризація є найбільш поширеним методом виробництва полістиролу. Процес здійснюється безпосередньо в рідкому мономері без використання додаткових дисперсійних середовищ. Основними перевагами цього методу є висока чистота продукту, мінімальна кількість відходів та можливість організації безперервного виробництва.

Емульсійна полімеризація передбачає проведення процесу у водному середовищі за наявності емульгаторів та ініціаторів. Цей метод переважно використовується для виробництва акрилонітрил-бутадієн-стирольних пластиків та інших спеціальних полімерних матеріалів.

Суспензійна полімеризація здійснюється у водному середовищі, де мономер перебуває у вигляді дрібних крапель. Метод широко застосовується для виробництва пінополістиролу та окремих марок ударостійкого полістиролу.

Полімеризація в розчині використовується переважно для отримання блок-співполімерів стиролу та бутадієну, які характеризуються високими експлуатаційними властивостями та спеціальним призначенням.

Для виробництва каучуковмісних ударостійких співполімерів стиролу широко застосовують блоково-суспензійний метод. На першій стадії полімеризацію проводять у масі до досягнення ступеня конверсії 20–40 %. Після цього реакційну суміш переводять у водну дисперсію, де процес полімеризації завершується до отримання продукту із заданими характеристиками.

Сучасний розвиток технологій виробництва полістиролу спрямований на підвищення продуктивності обладнання, збільшення одиничної потужності

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

технологічних ліній та інтенсифікацію процесів синтезу. Важливими напрямками вдосконалення є зниження енергоспоживання, підвищення стабільності технологічних режимів та впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами. Потужність сучасних промислових установок з виробництва полістиролу може досягати десятків тисяч тонн продукції на рік.

Оскільки процес полімеризації стиролу супроводжується значними тепловими ефектами та потребує точного підтримання температури, тиску і витрат компонентів, ефективність виробництва значною мірою залежить від рівня автоматизації технологічного процесу. Саме тому розроблення систем автоматичного контролю та керування є одним із ключових завдань сучасного виробництва полістиролу.

#### **1.4.1 Полімеризація в масі**

Метод виробництва полістиролу шляхом полімеризації в масі з неповною конверсією мономерів нині є найбільш поширеним завдяки високим техніко-економічним показникам.

Цей метод має оптимальну схему технологічного процесу. Процес здійснюється за безперервною схемою в системі апаратів із 2–3 послідовно з'єднаними змішувачами; завершальна стадія процесу часто проводиться в апараті колонного типу. Початкова температура реакції становить 80–100 °С, кінцева — 200–220 °С. Полімеризацію зупиняють при ступені перетворення стиролу 80–90 %. Непрореагований мономер видаляють із розплаву полістиролу під вакуумом, а потім водяною парою до вмісту стиролу в полімері 0,01–0,05 %.

До полістиролу додають стабілізатори, барвники, антипірени та інші добавки, після чого його гранулюють. Блоковий полістирол відзначається високою чистотою. Ця технологія є більш економічною (відсутні операції промивання, зневоднення та сушіння дрібнодисперсного продукту) і практично безвідходною (непрореагований стирол повертається на полімеризацію). Проведення процесу до неповної конверсії

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

мономеру (80–90 %) дозволяє використовувати високу швидкість полімеризації, контролювати температурні параметри та забезпечувати допустиму в'язкість реакційного середовища.

При проведенні процесу до більш глибокого ступеня перетворення мономеру відведення тепла від високов'язкої реакційної маси ускладнюється, а проведення полімеризації в ізотермічному режимі стає неможливим. Ця особливість процесу полімеризації в масі зумовила підвищену увагу до інших способів виробництва, насамперед до суспензійного методу.

### 1.4.2 Суспензійна полімеризація

Полімеризація в суспензії є конкурентним технологічним процесом, що розвивався паралельно з полімеризацією в масі. Вона ґрунтується на низькій розчинності вінілових мономерів у воді та нейтральності останньої щодо реакцій радикальної полімеризації.

Процес використовується для отримання спеціальних марок продукції, переважно пінополістиролу. Суспензійний метод виробництва є напівбезперервним процесом, що характеризується наявністю додаткових технологічних стадій (створення реакційної системи, виділення отриманого полімеру) та періодичним використанням обладнання на стадії полімеризації.

Процес проводять у реакторах об'ємом 10–50 м<sup>3</sup>, обладнаних мішалками та сорочками.

Стирол суспендують у демінералізованій воді з використанням стабілізаторів емульсії; ініціатор полімеризації (органічні пероксиди) розчиняють у краплях мономеру, де й відбувається полімеризація.

У результаті утворюються великі гранули полімеру у вигляді суспензії у воді.

Полімеризацію проводять під тиском із поступовим підвищенням температури від 40 до 130 °С протягом 8–14 годин. Отриманий полімер виділяють із суспензії шляхом центрифугування, після чого його промивають і висушують.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Закономірності суспензійної полімеризації близькі до закономірностей полімеризації в масі, однак відведення тепла та перемішування компонентів системи значно полегшуються.

### 1.4.3 Емульсійна полімеризація

Емульсійний метод полімеризації у виробництві полістиролу не набув такого поширення, як полімеризація в масі або суспензії. При емульсійній полімеризації отримують продукт із дуже високою молекулярною масою. Найчастіше для подальшої переробки його молекулярну масу необхідно знижувати.

Основним напрямком застосування цього методу є отримання напівпродукту для подальшого виробництва пінополістиролу методом пресування.

Система емульсійної полімеризації включає стирол, воду як дисперсійне середовище, водорозчинний ініціатор (персульфат калію), іонний емульгатор та різні добавки, зокрема для регулювання рН середовища. Полімеризація відбувається в міцелях емульгатора, що містять мономер. Утворений полімер перебуває у вигляді нерозчинної у воді високодисперсної суспензії (латексу).

Система є багатокомпонентною, що ускладнює виділення полімеру в чистому вигляді. Тому застосовують різні способи його промивання. Використання цього методу поступово скорочується через утворення великої кількості стічних вод.

Полістирол є одним із найбільш широко застосовуваних полімерів. Його отримують шляхом полімеризації мономеру стиролу. Стирол (вінілбензол) виробляють з етилену та бензолу. На відміну від мономеру, полістирол не має запаху і смаку та є фізіологічно нешкідливим. Окремі марки полістиролу використовуються для виготовлення харчової упаковки та дитячих іграшок.

Ударостійкий полістирол випускається у вигляді білих і кольорових листів. Завдяки високій ударній міцності, легкості обробки, різноманітності та насиченості кольорів, глянцевої поверхні й можливості нанесення зображень (за допомогою

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

вінілових плівок або повноколірного друку) він широко використовується у виробництві рекламної продукції та POSM-матеріалів.

Висока міцність листів ударостійкого полістиролу, вологостійкість, мала вага, легкість очищення поверхні та декоративність роблять його популярним матеріалом для виготовлення підвісних стель, сендвіч-панелей, віконних укосів та інших конструкцій для внутрішнього оздоблення приміщень, а також торгового обладнання, елементів інтер'єру, оформлення концертних майданчиків і декорацій.

У виробництві сфери застосування ударостійкого полістиролу охоплюють значну частину продукції. Це панель-кронштейни та вивіски (у тому числі світлові), штендери, таблички та покажчики, інформаційні стенди та промостійки, шелфтокери, воблери, бокси для чеків та інші дрібні вироби, постери, термоформовані дисплеї та диспенсери, джамбі та мобайли. Для їх виготовлення переважно використовуються листи товщиною 2–4 мм.

Зовнішня реклама рідко обходиться без полістиролу. Вивіски, рекламні щити, об'ємні літери, штендери, покажчики, таблички — у більшості видів рекламної продукції полістирол використовується як основний матеріал.

Полістирол широко застосовується при виготовленні торгового та виставкового обладнання, різних непрозорих елементів акваріумів (кришок тощо). У поліграфії його використовують для виготовлення шелфтокерів, воблерів, засобів просування товарів та візитних карток.

У будівництві листи полістиролу використовуються як оздоблювальний матеріал для оформлення торговельних залів магазинів, офісних інтер'єрів та інших громадських приміщень.

Привабливий зовнішній вигляд, високі механічні властивості та широка кольорова гама цього пластику постійно привертають увагу дизайнерів під час оформлення різноманітних розважальних заходів.

Відповідність високим санітарно-гігієнічним вимогам, абсолютна вологостійкість і сумісність з матеріалами, що використовуються у виробництві

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

сучасних ванн, душових кабін, меблів та аксесуарів для ванних кімнат, дозволяють широко застосовувати полістирол як сантехнічний пластик.

Полістирол є екологічно чистим матеріалом, який відповідає всім вимогам до матеріалів для виробництва харчової упаковки. Плівки з «харчового» полістиролу товщиною від 0,25 до 1,8 мм на термоформувальному обладнанні перетворюють на стаканчики для йогуртів, упаковки для маргарину, майонезу, салатів, згущеного молока, меду, гірчиці, а також на упаковку для косметичної продукції.

Відповідність гігієнічним нормам, формостійкість і морозостійкість полістиролу стали причиною його широкого використання для виготовлення термоформованих внутрішніх деталей холодильників. Полістирол також є чудовим матеріалом для формування корпусів медичної апаратури та оргтехніки.

### 1.5 Виробництво блокового полістиролу

У даній бакалаврській роботі одержання полістиролу здійснюється блоковим методом. Процес реалізується у три стадії.

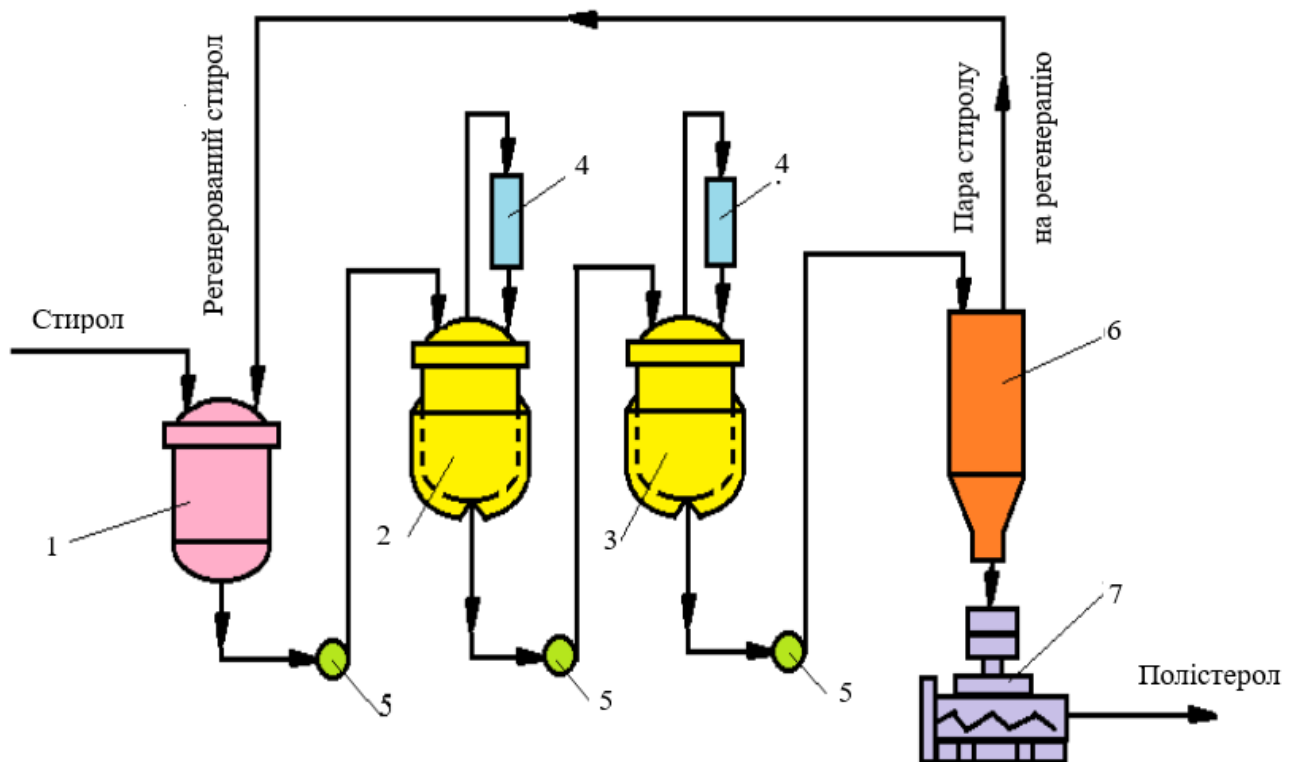
Технологічну схему одержання полістиролу наведено на рисунку 1.2.

Схема складається зі збірника (1), двох реакторів (2, 3) та вакуум-камери (6). У збірнику накопичується стирол, який надалі подається до полімеризаторів. У них ступінь полімеризації досягає відповідно 32–45 % та 75–88 %. Після цього полімеризований стирол надходить на завершальну стадію полімеризації — до вакуум-камери. У ній процес полімеризації здійснюється шляхом нагрівання стиролу водяною парою. У результаті ступінь полімеризації стиролу досягає 90 %.

До допоміжного обладнання належать насоси (5), холодильники (4) та гранулятори (7).

Неполімеризований стирол (близько 10 %) повертається до збірника (1), де змішується з основним потоком стиролу та знову подається на полімеризацію.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22



1 — збірник стиролу; 2, 3 — послідовно з'єднані реактори; 4 —  
холодильники; 5 — насоси; 6 — вакуум-камера; 7 — гранулятор.

Рисунок 1.2 – Схема процесу виробництва блокового полістиролу в каскаді апаратів із перемішуванням безперервним методом

### Висновки до розділу

У даному розділі було розглянуто основні фізико-хімічні властивості полістиролу, його переваги, недоліки та сфери застосування. Встановлено, що завдяки високим діелектричним властивостям, технологічності переробки, хімічній стійкості та відносно низькій вартості полістирол є одним із найбільш поширених полімерних матеріалів у різних галузях промисловості.

Проведено аналіз основних методів виробництва полістиролу, серед яких емульсійний, суспензійний та блоковий методи полімеризації. Визначено, що найбільш ефективним і поширеним у сучасній промисловості є блоковий метод, який забезпечує високу якість продукції, безперервність виробничого процесу та можливість широкого впровадження засобів автоматизації.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Також розглянуто основні види промислового полістиролу, їхні характеристики та сфери застосування. Особливу увагу приділено ударостійкому полістиролу, який завдяки покращеним механічним властивостям широко використовується у виробництві побутової техніки, приладобудуванні та інших галузях.

Виконано аналіз технологічної схеми виробництва полістиролу блоковим методом. Встановлено, що процес полімеризації відбувається у декілька стадій і потребує точного підтримання температурного режиму, тиску, рівня та витрат технологічних потоків. Наявність значних теплових ефектів під час реакції полімеризації обумовлює необхідність безперервного контролю та автоматичного регулювання основних технологічних параметрів.

Отже, досліджений технологічний процес є складним багатостадійним об'єктом керування, для якого доцільним є розроблення сучасної системи автоматизації, здатної забезпечити стабільність режимів роботи, підвищення якості готової продукції, зниження витрат сировини та енергоресурсів, а також підвищення ефективності виробництва загалом.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІСТИРОЛУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 2.1 Теплові розрахунки

Тепловий розрахунок є важливим етапом проектування технологічного обладнання та системи автоматизації процесу виробництва полістиролу. Його метою є визначення кількості теплоти, необхідної для забезпечення заданого температурного режиму полімеризації, а також оцінка теплових навантажень на теплообмінне обладнання.

Під час блокової полімеризації стирола тепловий баланс процесу складається з трьох основних стадій:

- а) нагрівання реакційної суміші до температури полімеризації;
- б) проведення реакції полімеризації, яка супроводжується виділенням теплоти;
- в) охолодження полімеризаційної маси та відведення надлишкової теплоти для підтримання необхідного технологічного режиму.

На стадії нагрівання теплота витрачається на підвищення температури вихідної сировини від початкової температури до температури початку полімеризації. Під час реакції полімеризації відбувається екзотермічний процес, унаслідок якого виділяється значна кількість теплоти. Для забезпечення стабільного перебігу процесу необхідно передбачити ефективне відведення тепла та підтримання заданої температури в реакторі. На завершальній стадії здійснюється охолодження реакційної маси до температури, необхідної для подальшої переробки або гранулювання готового продукту.

Тепловий баланс процесу визначається з урахуванням теплоти нагрівання сировини, теплового ефекту реакції полімеризації, втрат теплоти в навколишнє середовище та кількості теплоти, що відводиться охолоджувальними агентами.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

### 2.1.1 Тепловий баланс стадії нагрівання

Для стадії полімеризації полістиролу тепловий баланс можна подати у вигляді:

$$Q_1 + Q_2 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7. \quad (2.1)$$

Теплоту, що підводиться до апарата з теплоносієм, визначають за рівнянням:

$$Q_1 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 - Q_2. \quad (2.2)$$

$Q_2$  — теплота, що надходить до апарата разом із завантаженими речовинами:

$$Q_2 = \sum G_i \cdot C_i \cdot t, \quad (2.3)$$

де:

- $G_i$  — маса  $i$ -го компонента, завантаженого в реактор, кг;
- $C_i$  — теплоємність  $i$ -го компонента, кДж/(кг · град);
- $t$  — температура завантажуваних речовин, °С.

$$C_{\text{стир}} = 0,65 \text{ кДж/(кг · град)}$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 4,2 \text{ кДж/(кг · град)}$$

$$Q_2 = (2943,4 \cdot 0,65 + 3883,6 \cdot 4,2) \cdot 60 = 1092,51 \text{ кДж}$$

$Q_4$  — теплота, що відводиться з продуктами реакції:

$$Q_4 = \sum G_j \cdot C_j \cdot t, \quad (2.4)$$

де:

- $G_j$  — маса  $j$ -го компонента, отриманого в реакторі, кг;
- $C_j$  — теплоємність  $j$ -го компонента, кДж/(кг · град);
- $t$  — температура продукту, °С.

$$C_{nc} = 1,25 \text{ кДж/(кг · град)}$$

$$Q_4 = 7701,11 \cdot 1,25 \cdot 80 = 775038,71 \text{ Дж}$$

$Q_5$  — теплота, що витрачається на нагрівання реактора:

$$Q_5 = G_{\text{ап}} \cdot C \cdot (t_1 - t_2), \quad (2.5)$$

де:

- $G_{\text{ап}}$  — маса апарата, кг;
- $C$  — теплоємність матеріалу апарата, кДж/(кг · град).

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$t_1 = 80^\circ\text{C}; t_2 = 18^\circ\text{C};$$

$$G_{\text{ап}} = 12500 \text{ кг};$$

$$C = 0,51 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$Q_5 = 12500 \cdot 0,51 \cdot (80 - 18) = 386500 \text{ кДж}$$

$Q_7$  — теплота, що втрачається у навколишнє середовище.

Для її визначення розраховують товщину теплоізоляції. Температура поверхні, що ізолюється, дорівнює  $100^\circ\text{C}$ , а температура зовнішньої поверхні ізоляції не повинна перевищувати  $45^\circ\text{C}$ .

Коефіцієнт теплопровідності визначається за формулою:

$$\lambda^{100} = 0,0043 + 0,00022 \cdot t_{\text{ср}}, \quad (2.6)$$

Де

$\lambda_1 = 12,3 \text{ Вт/мс}$  — коефіцієнт теплопровідності,

$t_{\text{ср}} = \frac{(t_m + t_n)}{2}$  — середня температура між теплоносієм та поверхнею ізоляції,

$$t_{\text{ср}} = \frac{(100 + 45)}{2} = 72,5^\circ\text{C}.$$

$$\lambda^{100} = 0,0043 + 0,00022 \cdot 72,5 = 0,0591 \text{ Вт/мс}.$$

Для циліндричної поверхні діаметром  $1,5 \text{ м}$  і більше товщина ізоляції визначається:

$$\delta_{\text{із}} = \frac{\lambda(t_m + t_n)}{\alpha(t_n + t_{\text{нав}})}, \quad (2.7)$$

де:

- $\delta_{\text{із}}$  — товщина ізоляції, м;
- $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності  $\text{Вт/м}^2\text{с}$ ;
- $t_m$  — температура теплоносія  $^\circ\text{C}$ ;
- $t_n$  — температура поверхні ізоляції  $^\circ\text{C}$ ;
- $t_{\text{нав}}$  — температура навколишнього середовища  $^\circ\text{C}$ .

$$\delta_{\text{із}} = \frac{0,0591 \cdot (100 - 45)}{12,3 \cdot (45 - 18)} = 0,0099 \text{ м}.$$

Приймаємо товщину ізоляції  $10 \text{ мм}$ .

$$q_e = \frac{2 \cdot \Pi \cdot (t_m + t_n) \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{\delta_{\text{із}}}{d_{\text{зов}}}\right)}, \quad (2.8)$$

									Арк.
									27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

де:

$\delta_{із}$  — зовнішній діаметр сорочки з ізоляцією, мм;

$d_{зоб}$  — зовнішній діаметр сорочки без ізоляції, мм.

$d_{із} = 2247\text{мм}$ ,  $d_{зоб} = 2229\text{мм}$ .

$$q_e = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot (100 - 45) \cdot 0.0591}{\ln\left(\frac{2247}{2229}\right)} = 2280.41 \text{Вт/м}^2.$$

Питомі тепловтрати через ізоляцію визначаються за формулою:

$$F = \Pi \cdot 2 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{V}{\Pi \cdot H}} \text{м}^2, \quad (2.9)$$

де:

-  $H$  — висота циліндричної частини апарата, м;

-  $V$  — об'єм апарата, м<sup>3</sup>.

$$F = 3.14 \cdot 2 \cdot 3.629 \cdot \sqrt{\frac{12.5}{3.14 \cdot 3.629}} \text{м}^2.$$

Згідно з технологічним регламентом:

$$\tau_{оп} = 25\text{год}; \tau_{нагріву} = 1\text{год}$$

Теплові втрати в навколишнє середовище:

$$Q_7 = q_e \cdot F \cdot \tau_{нагріву}, \quad (2.10)$$

$$Q_7 = 2280,41 \cdot 23.87 \cdot 1 \cdot 3600 = 195958 \text{кДж}$$

$Q_6$  — теплота, що витрачається на нагрівання теплоізоляції:

$$Q_6 = C \cdot \gamma \cdot V \cdot (t_{ср} - t_{нав}), \quad (2.11)$$

де:

-  $C$  — теплоємність ізоляції, кДж/(кг · град);

-  $\gamma$  — густина ізоляції, кг/м<sup>3</sup>;

-  $V$  — об'єм ізоляційного шару, м<sup>3</sup>.

$$C = 0,83 \text{кДж/(кг · град)};$$

$$\gamma = 200 \text{кг/м}^3;$$

$$F = 23.871 \text{м}^2;$$

									Арк.
									28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$V = \delta_{i3} \cdot F, \quad (2.12)$$

$$V = 0.01 \cdot 23.871 = 0.2386 \text{ м}^3,$$

$$Q_6 = 0,84 \cdot 200 \cdot 0,2386 \cdot (72,5 - 18) = 2185,55 \text{ кДж}$$

Отже,

$$Q_1 = 775038,71 + 387500 + 2185,55 + 195958 - 1092,5 = 1359387,74 \text{ кДж}$$

Тепловий потік на стадії нагрівання:

$$q_1 = \frac{Q_1}{\tau_1} = \frac{1359387,74}{1 \cdot 3600} = 377,6 \text{ кВт},$$

де  $\tau_1$  — тривалість стадії нагрівання.

### 2.1.2 Тепловий баланс синтезу

Тепловий баланс можна подати у вигляді:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7. \quad (2.13)$$

Теплоту, що підводиться до апарата теплоносієм, визначають за рівнянням:

$$Q_1 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 - Q_2 - Q_3. \quad (2.14)$$

1.  $Q_2$  — теплота, що надходить до апарата разом із завантаженими речовинами:

$$Q_2 = \Sigma G_i \cdot C_i \cdot t, \quad (2.15)$$

де:

- $G_i$  — маса і-го компонента, завантаженого в реактор, кг;
- $C_i$  — теплоємність і-го компонента, кДж/(кг · град);
- $t$  — температура навколишнього середовища, °С.

$$C_{\text{стир}} = 0,65 \text{ кДж/(кг · град)},$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 4,18 \text{ кДж/(кг · град)},$$

$$Q_2 = (2943,4 \cdot 0,65 + 3883,6 \cdot 4,18) \cdot 60 = 1092,51 \text{ кДж}.$$

2.  $Q_4$  — теплота, що відводиться з продуктами реакції:

$$Q_4 = \Sigma G_j \cdot C_j \cdot t, \quad (2.16)$$

де:

- $G_j$  — маса j-го компонента, отриманого в реакторі, кг;

									Арк.
									29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ				

- $C_j$  — теплоємність j-го компонента, кДж/(кг · град);
- $t$  — температура процесу, °С.

$$C_{\text{пс}} = \frac{1,268 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}},$$

$$Q_4 = 7702,1 * 1,268 * 105 = 1017328 \text{ кДж.}$$

3.  $Q_3$  — теплота хімічної реакції, яку визначають на основі закону Гесса:

$$Q_3 = \Delta H_{\text{згор.298 прод}} - \Delta H_{\text{згор.298 вих}}, \quad (2.17)$$

$$\Delta H_{\text{згор.298 вих}} = -128,03 * 10^3 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{\text{згор.298 прод}} = -434 * 10^3 \text{ кДж/моль},$$

$$Q_3 = -128,03 \cdot 10^3 + 434 \cdot 10^3 = 305,86 \cdot 10^3 = 305860 \text{ кДж/моль.}$$

4.  $Q_5$  — теплота, що витрачається на нагрівання реактора:

$$Q_5 = G_{\text{ап}} \cdot C \cdot (t_1 - t_2), \quad (2.18)$$

де:

- $G_{\text{ап}}$  — маса апарата, кг;
- $C$  — теплоємність матеріалу апарата, кДж/(кг · град).

$$t_1 = 105^\circ\text{C}; t_2 = 18^\circ\text{C};$$

$$G_{\text{ап}} = 12500 \text{ кг};$$

$$C = 0,5 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)};$$

$$Q_5 = 12500 \cdot 0,5 \cdot (105 - 18) = 543650 \text{ кДж}$$

5.  $Q_7$  — теплота, що втрачається в навколишнє середовище.

Для її визначення розраховують товщину теплоізоляції. Температура поверхні, що ізолюється, становить 100 °С, а температура зовнішньої поверхні ізоляції не повинна перевищувати 45 °С.

Коефіцієнт теплопровідності визначається за формулою:

$$\lambda^{100} = 0,0043 + 0,00021 \cdot t_{\text{сер}}, \quad (2.19)$$

Де

$\lambda_{\text{із}} = 12,3 \text{ Вт/мс}$  — Коефіцієнт теплопровідності

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						30

$t_{\text{сер}} = \frac{(t_m + t_n)}{2}$  — середня температура між теплоносієм та поверхнею ізоляції.

$$t_{\text{сер}} = \frac{(100 + 45)}{2} = 73,5^{\circ}\text{C},$$

$$\lambda^{100} = 0,0043 + 0,00021 \cdot 73,5 = 0,058 \text{ Вт/мс.}$$

Для циліндричної поверхні діаметром 1,5 м і більше товщина ізоляції визначається:

$$\delta_{\text{із}} = \frac{\lambda(t_m + t_n)}{\alpha(t_n + t_{\text{нав}})} \quad (2.20)$$

де:

- $\delta_{\text{із}}$  — товщина ізоляції, м;
- $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · °С);
- $t_m$  — температура теплоносія, °С;
- $t_n$  — температура поверхні ізоляції, °С;
- $t_{\text{нав}}$  — температура навколишнього середовища, °С.

$$\delta_{\text{із}} = \frac{0,058 \cdot (100 - 45)}{12,31 \cdot (45 - 18)} = 0,0098 \text{ м.}$$

Приймаємо товщину ізоляції 10 мм.

$$q_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot (t_m + t_n) \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{\delta_{\text{із}}}{d_{\text{зов}}}\right)} \quad (2.21)$$

Де

$\delta_{\text{із}}$  — зовнішній діаметр сорочки з ізоляцією, мм;

$d_{\text{зов}}$  — зовнішній діаметр сорочки без ізоляції, мм.

$$d_{\text{із}} = 2249 \text{ мм}, d_{\text{нар}} = 2229 \text{ мм}$$

$$q_e = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot (100 - 45) \cdot 0,059}{\ln\left(\frac{2249}{2229}\right)} = 2280,41 \text{ Вт/м}^2.$$

Питомі тепловтрати через ізоляцію визначаються за формулою:

$$F = \pi \cdot 2 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot H}} \text{ м}^2, \quad (2.22)$$

де:

- $H$  — висота циліндричної частини апарата, м;

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

-  $V$  — об'єм апарата, м<sup>3</sup>.

$$F = 3.14 \cdot 2 \cdot 3.627 \cdot \sqrt{\frac{12.5}{3.14 \cdot 3.627}} = 23,67\text{м}^2,$$

Згідно з технологічним регламентом:

$$\tau_{\text{оп}} = 25\text{год}, \tau_{\text{нагріву}} = 3\text{год}.$$

Теплові втрати в навколишнє середовище:

$$Q_7 = q_e \cdot F \cdot \tau_{\text{нагріву}} \quad (2.23)$$

$$Q_7 = 2270,4 \cdot 23,78 \cdot 3 \cdot 3600 = 587879\text{кДж}.$$

$Q_6$  — теплота, що витрачається на нагрівання теплоізоляції:

$$Q_6 = C \cdot \gamma \cdot V \cdot (t_{\text{сер}} - t_{\text{нав}}), \quad (2.24)$$

де:

-  $C$  — теплоємність ізоляції, кДж/(кг · град);

-  $\gamma$  — густина ізоляції, кг/м<sup>3</sup>;

-  $V$  — об'єм ізоляційного шару, м<sup>3</sup>.

$$C = 0,84 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$\gamma = 200 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$F = 23,78\text{м}^2;$$

$$V = \delta_{\text{із}} \cdot F, \quad (2.25)$$

$$V = 0,01 - 23,87 = 0,2378\text{м}^3,$$

$$Q_6 = 0,84 \cdot 200 \cdot 0,2378 \cdot (72,5 - 18) = 2186,54\text{кДж}.$$

Отже,

$$Q_1 = 1017228 + 543760 + 2185,54 + 587678 - 1093,5 - 305960 = 1543998,04 \text{ кДж}.$$

Тепловий потік на стадії нагрівання:

$$\frac{Q}{\tau} = g = \frac{1543998,04}{3 \cdot 3600} = 142,95 \text{ кВт}.$$

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

### 2.1.3 Тепловий баланс стадії охолодження

Тепловий баланс стадії полімеризації полістиролу можна подати у такому вигляді:

$$Q_1 + Q_2 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7. \quad (2.26)$$

Теплоту, що підводиться до апарата теплоносієм, визначають за рівнянням:

$$Q_1 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 - Q_2. \quad (2.27)$$

1.  $Q_2$  — теплота, що надходить до апарата разом із завантаженими речовинами:

$$Q_2 = \Sigma G_i \cdot C_i \cdot t, \quad (2.28)$$

де:

- $G_i$  — маса і-го компонента, завантаженого в реактор, кг;
- $C_i$  — теплоємність і-го компонента, кДж/(кг · град);
- $t$  — температура навколишнього середовища, °С.

$$C_{\text{стиролу}} = 0,659 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град}),$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 4,191 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град}),$$

$$Q_2 = (2943,4 \cdot 0,659 + 3884,6 \cdot 4,191) \cdot 60 = 1093,5 \text{ кДж}.$$

2.  $Q_4$  — теплота, що відводиться з продуктами реакції:

$$Q_4 = \Sigma G_j \cdot C_j \cdot t, \quad (2.29)$$

де:

- $G_j$  — маса j-го компонента, отриманого в реакторі, кг;
- $C_j$  — теплоємність j-го компонента, кДж/(кг · град);
- $t$  — температура процесу, °С.

$$C_{\text{пс}} = \frac{1,2581 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}},$$

$$Q_4 = 7701,1 \cdot 1,259 \cdot 60 = 581288 \text{ Дж}.$$

3.  $Q_5$  — теплота, що витрачається на нагрівання реактора:

$$Q_5 = G_{\text{ап}} \cdot C \cdot (t_1 - t_2), \quad (2.30)$$

де:

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					33

- $G_{\text{ап}}$  — маса апарата, кг;
- $C$  — теплоємність матеріалу апарата, кДж/(кг · град).

$$t_1 = 60^{\circ}\text{C}; t_2 = 18^{\circ}\text{C};$$

$$G_{\text{ап}} = 12500 \text{ кг};$$

$$C = 0,5 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$Q_5 = 12500 \cdot 0,5 \cdot (60 - 18) = 262600 \text{ кДж}$$

4.  $Q_7$  — теплота, що втрачається в навколишнє середовище

Для цього визначимо товщину теплоізоляції. Температура поверхні, що ізолюється, становить  $100^{\circ}\text{C}$ , а температура зовнішньої поверхні ізоляції не повинна перевищувати  $45^{\circ}\text{C}$ .

Коефіцієнт теплопровідності визначається за формулою:

$$\lambda^{100} = 0,0043 + 0,00022 \cdot t_{\text{сер}}, \quad (2.31)$$

Де:

$\lambda_{\text{із}} = 12,3 \text{ Вт}/\text{мс}$  — коефіцієнт теплопровідності

$t_{\text{сер}} = \frac{(t_m + t_n)}{2}$  — середня температура між теплоносієм та поверхнею ізоляції.

$$t_{\text{сер}} = \frac{(100 + 45)}{2} = 72,53^{\circ}\text{C},$$

$$\lambda^{100} = 0,0043 + 0,00022 \cdot 72,53 = 0,0589 \text{ Вт}/\text{мс}.$$

Для циліндричної поверхні діаметром  $1,5 \text{ м}$  і більше товщина ізоляції визначається:

$$\delta_{\text{із}} = \frac{\lambda(t_m + t_n)}{\alpha(t_n + t_{\text{нав}})} \quad (2.32)$$

де:

- $\delta_{\text{із}}$  — товщина ізоляції, м;
- $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · °C);
- $t_m$  — температура теплоносія, °C;
- $t_n$  — температура поверхні ізоляції, °C;
- $t_{\text{нав}}$  — температура навколишнього середовища, °C.

$$\delta_{\text{із}} = \frac{0,0589 \cdot (100 - 45)}{12,31 \cdot (45 - 18)} = 0,0099 \text{ м}.$$

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						34

Приймаємо товщину ізоляції 10 мм.

$$q_e = \frac{2 \cdot \Pi \cdot (t_m + t_n) \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{\delta_{із}}{d_{зов}}\right)}, \quad (2.33)$$

де:

$\delta_{із}$  — зовнішній діаметр сорочки з ізоляцією, мм;

$d_{зов}$  — зовнішній діаметр сорочки без ізоляції, мм.

$d_{із} = 2249$ мм,  $d_{зов} = 2229$ мм;

$$q_e = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot (100 - 45) \cdot 0.0589}{\ln\left(\frac{2249}{2229}\right)} = 2280.43 \text{Вт/м}^2.$$

Питомі тепловтрати через ізоляцію визначаються за формулою:

$$F = \Pi \cdot 2 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{V}{\Pi \cdot H}} \text{м}^2, \quad (2.34)$$

де:

-  $H$  — висота циліндричної частини апарата, м;

-  $V$  — об'єм апарата, м.

$$F = 3.14 \cdot 2 \cdot 3.629 \cdot \sqrt{\frac{12.5}{3.14 \cdot 3.627}} = 23,876 \text{м}^2.$$

Згідно з технологічним регламентом:

$$\tau_{оп} = 25 \text{год}, \tau_{нагріву} = 3,5 \text{год}$$

Теплові втрати в навколишнє середовище:

$$Q_7 = q_e \cdot F \cdot \tau_{нагріву}; \quad (2.35)$$

$$Q_7 = 2280,43 \cdot 23,876 \cdot 3,5 \cdot 3600 = 685767,66 \text{кДж}.$$

5.  $Q_6$  — теплота, що витрачається на нагрівання теплоізоляції:

$$Q_6 = C \cdot \gamma \cdot V \cdot (t_{сер} - t_{нав}) \quad (2.36)$$

де:

-  $C$  — теплоємність ізоляції, кДж/(кг · град);

-  $\gamma$  — густина ізоляції, кг/м<sup>3</sup>;

-  $V$  — об'єм ізоляційного шару, м<sup>3</sup>.

$$C = 0,842 \text{кДж/(кг · град)};$$

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	35

$$\gamma = 200 \text{ кг/м}^3;$$

$$F = 23.88 \text{ м}^2;$$

$$V = \delta_{\text{із}} \cdot F, \quad (2.37)$$

$$V = 0.01 - 23.88 = 0.2378 \text{ м}^3,$$

$$Q_6 = 0,844 \cdot 200 \cdot 0,2378 \cdot (72,5 - 18) = 2175.45 \text{ кДж.}$$

Отже,

$$Q_1 = 581278 + 262600 + 2174,54 + 6848,66 - 1082,5 = 1530629,6 \text{ кДж}$$

Тепловий потік на стадії охолодження:

$$\frac{Q}{\tau} = g = \frac{1530629,6}{3.5 \cdot 3600} = 121,5 \text{ кВт.}$$

Отже виконано тепловий розрахунок процесу виробництва полістиролу для трьох основних стадій технологічного процесу: нагрівання реакційної суміші, перебігу реакції полімеризації та охолодження готового продукту. Для кожної стадії складено тепловий баланс, який враховує теплоту, що надходить із теплоносієм та сировиною, теплоту хімічної реакції, витрати на нагрівання апарата і теплоізоляції, а також втрати теплоти в навколишнє середовище.

У результаті розрахунків визначено необхідні теплові потоки для забезпечення заданих технологічних режимів. Для зменшення теплових втрат та підвищення енергоефективності установки прийнято теплоізоляцію товщиною 10 мм, що забезпечує допустимі втрати теплоти через поверхню реактора.

Встановлено, що найбільший вплив на тепловий режим процесу має стадія полімеризації, під час якої внаслідок екзотермічної реакції виділяється значна кількість теплоти. Розрахований тепловий потік на стадії реакції становить 142,96 кВт, тоді як на стадії охолодження необхідно відводити тепловий потік величиною 121,5 кВт. Отримані результати свідчать про необхідність ефективного керування подачею теплоносія та підтримання стабільного температурного режиму в реакторі.

Таким чином, виконані теплові розрахунки підтвердили доцільність застосування автоматичної системи регулювання температури, яка забезпечить стабільне протікання процесу полімеризації, підвищення якості готового полістиролу та безпечну експлуатацію технологічного обладнання.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					36

## 2.2 Регулювання температури реактора полімеризації

У процесі виробництва ударостійкого полістиролу до реактора надходять стирол і каучук, які утворюють реакційну суміш. Для забезпечення нормального перебігу процесу полімеризації необхідно підтримувати температуру реакційної маси на заданому рівні.

Нагрівання суміші здійснюється за допомогою гарячої води, яка подається до теплообмінної сорочки реактора. Залежно від температури стиролу та каучуку, що надходять до апарата, а також від теплового ефекту реакції полімеризації температура реакційної суміші постійно відхиляється від заданого значення.

Для підтримання температури на необхідному рівні застосовується система автоматичного регулювання. Тому як об'єкт керування розглядається реактор полімеризації разом із реакційною масою, що знаходиться в ньому.

Об'єктом регулювання є температура реакційної суміші в реакторі. Керуючим впливом виступає витрата гарячої води, яка через теплообмінну сорочку передає теплоту реакційній масі. Зміна положення регулюючого клапана призводить до зміни витрати теплоносія і, відповідно, температури реакційної суміші в реакторі.

Як об'єкт регулювання вибрано реактор. На основі його вхідних і вихідних параметрів визначається передавальна функція об'єкта. Для цього використовується аперіодична ланка другого порядку.

Оскільки температура змінюється плавно, часові характеристики такого об'єкта також мають плавний характер зміни. Для визначення передавальної функції аперіодичної ланки другого порядку враховуються вхідні та вихідні параметри об'єкта керування, наведені на рисунку 2.4, після чого ідентифікація виконується в середовищі System Identification [4].

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37







У вікні System Identification Tools у розділі Import Models відображається отримана модель. Після вибору пункту Model Output виконується порівняння графіка експериментальних даних із графіком отриманої передавальної функції другого порядку.

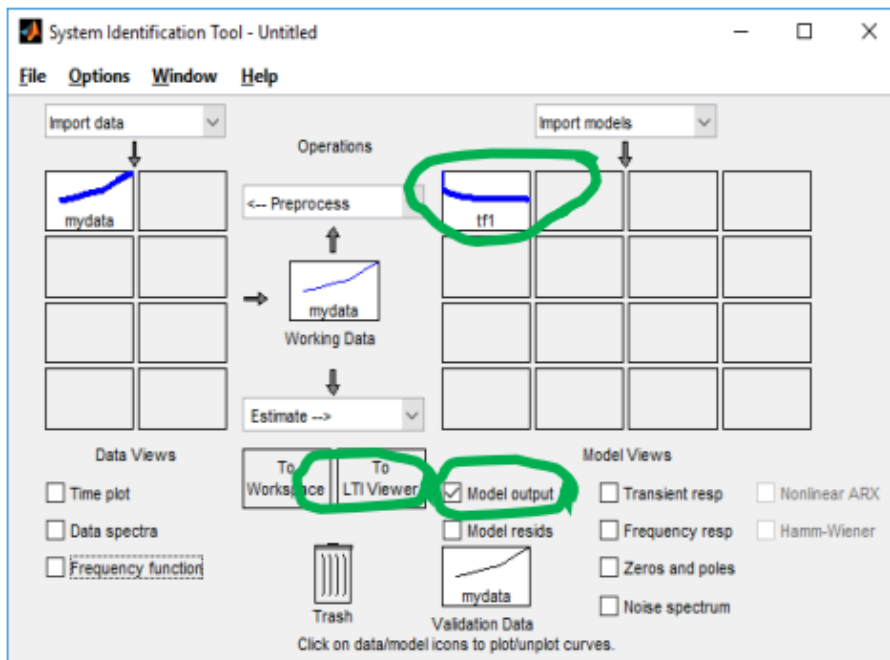


Рисунок 2.7 – Відображення моделі передавальної функції

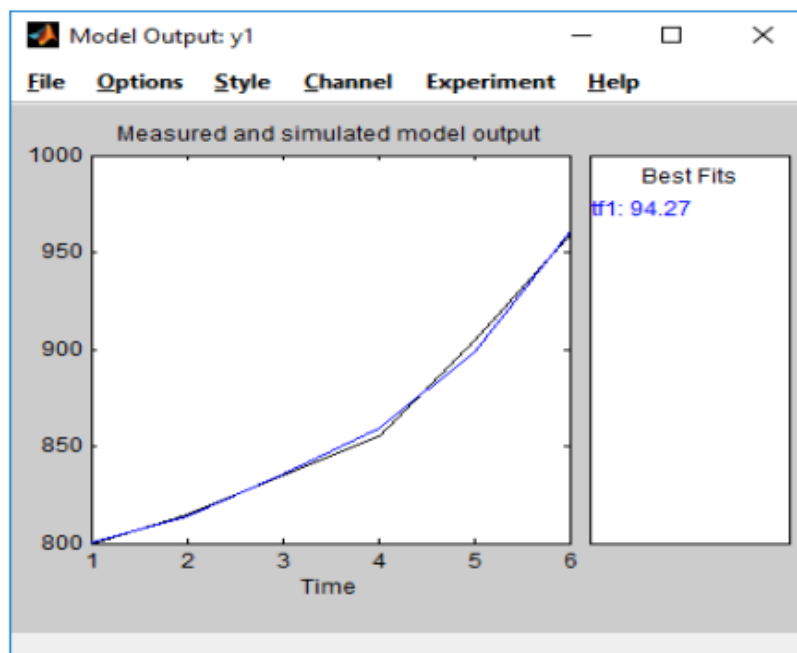


Рисунок 2.8 – Перевірка відповідності передавальної функції вхідним та вихідним даним



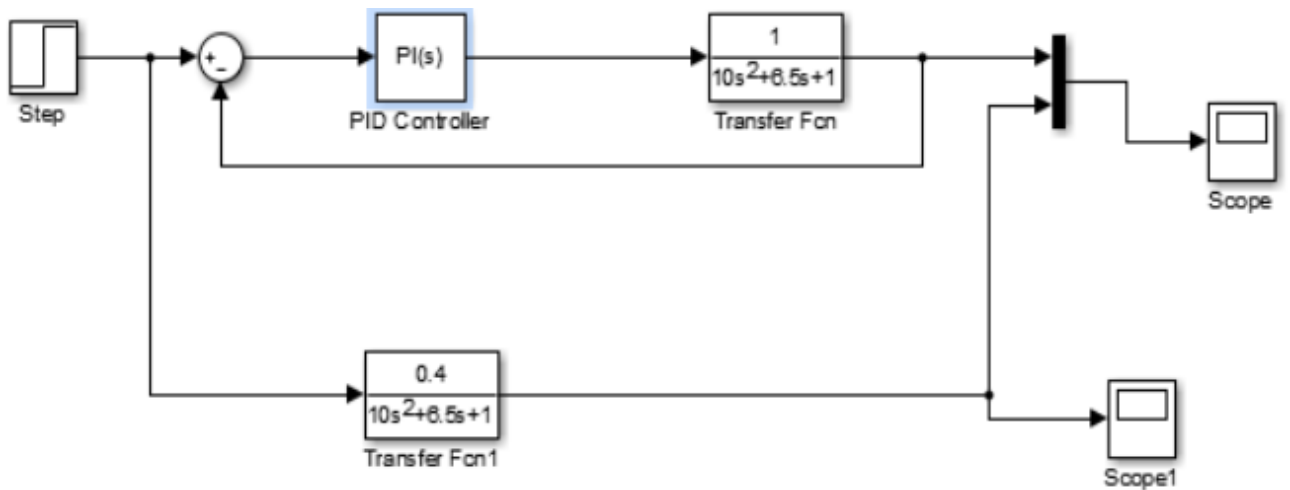


Рисунок 2.10 – Замкнена структура системи з ПІ-регулятором у середовищі Matlab

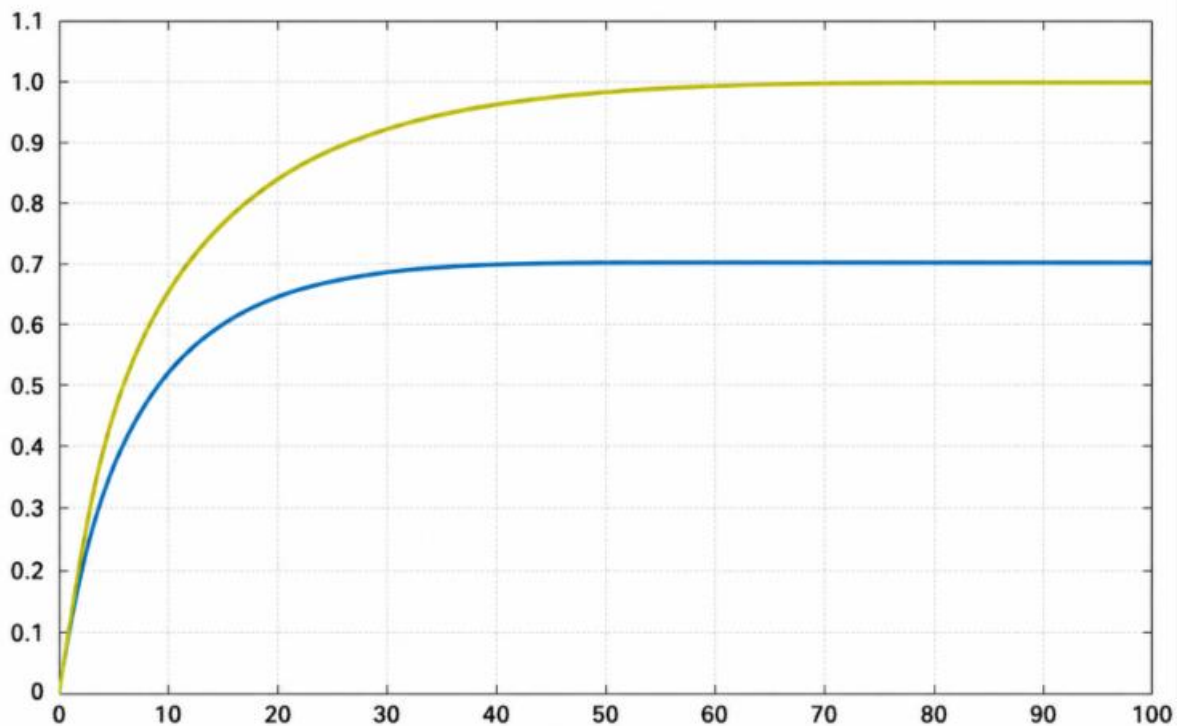


Рисунок 2.11 – Часові характеристики об'єкта керування та системи керування з ПІ-регулятором

### Висновки до розділу

У другому розділі виконано тепловий та математичний аналіз процесу виробництва ударостійкого полістиролу як об'єкта автоматичного керування. Проведено теплові розрахунки для основних стадій технологічного процесу:

										Арк.
										43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

нагрівання реакційної суміші, полімеризації та охолодження готового продукту. Для кожної стадії складено тепловий баланс з урахуванням теплоти, що надходить із теплоносієм і сировиною, теплового ефекту реакції, витрат на нагрівання апарата та теплоізоляції, а також втрат теплоти в навколишнє середовище.

У результаті розрахунків визначено теплові навантаження на систему нагрівання та охолодження реактора. Встановлено, що найбільш енергоємною є стадія полімеризації, під час якої внаслідок екзотермічної реакції виділяється значна кількість теплоти. Розрахований тепловий потік на стадії реакції становить 142,96 кВт, а на стадії охолодження необхідно відводити 121,5 кВт теплової енергії. Для зниження теплових втрат і підвищення енергоефективності установки прийнято теплоізоляцію товщиною 10 мм.

Виконано математичний опис реактора полімеризації як об'єкта автоматичного регулювання температури. Визначено основні вхідні та вихідні параметри об'єкта, а також обґрунтовано використання моделі аперіодичної ланки другого порядку для опису його динамічних властивостей.

За допомогою пакета System Identification Toolbox середовища MATLAB проведено ідентифікацію параметрів об'єкта керування на основі експериментальних даних. Отримана передавальна функція забезпечує достатню точність відтворення динамічних характеристик реактора та адекватно описує процес зміни температури реакційної суміші. Аналіз часових характеристик підтвердив відповідність моделі реальному об'єкту та можливість її використання для подальшого синтезу системи автоматичного керування.

На основі отриманої математичної моделі виконано налаштування ПІ-регулятора засобами MATLAB. Дослідження перехідних процесів показало, що розроблена система керування забезпечує стійку роботу, достатню швидкодію та плавний характер зміни температури без значних коливань. Це дозволяє підтримувати необхідний температурний режим полімеризації та забезпечувати стабільну якість готового полістиролу.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

## 3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЕКТНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ САК

### 3.1 Розроблення функціональної схеми автоматизації

Автоматизована система керування повинна забезпечувати ефективне виконання основних завдань керування технологічним процесом. У даній роботі розглядається функціональна схема автоматизації реактора, а також виконується вибір контрольно-вимірювальних приладів і програмованого логічного контролера.

Функціональну схему автоматизації реактора наведено на рисунку 3.1.

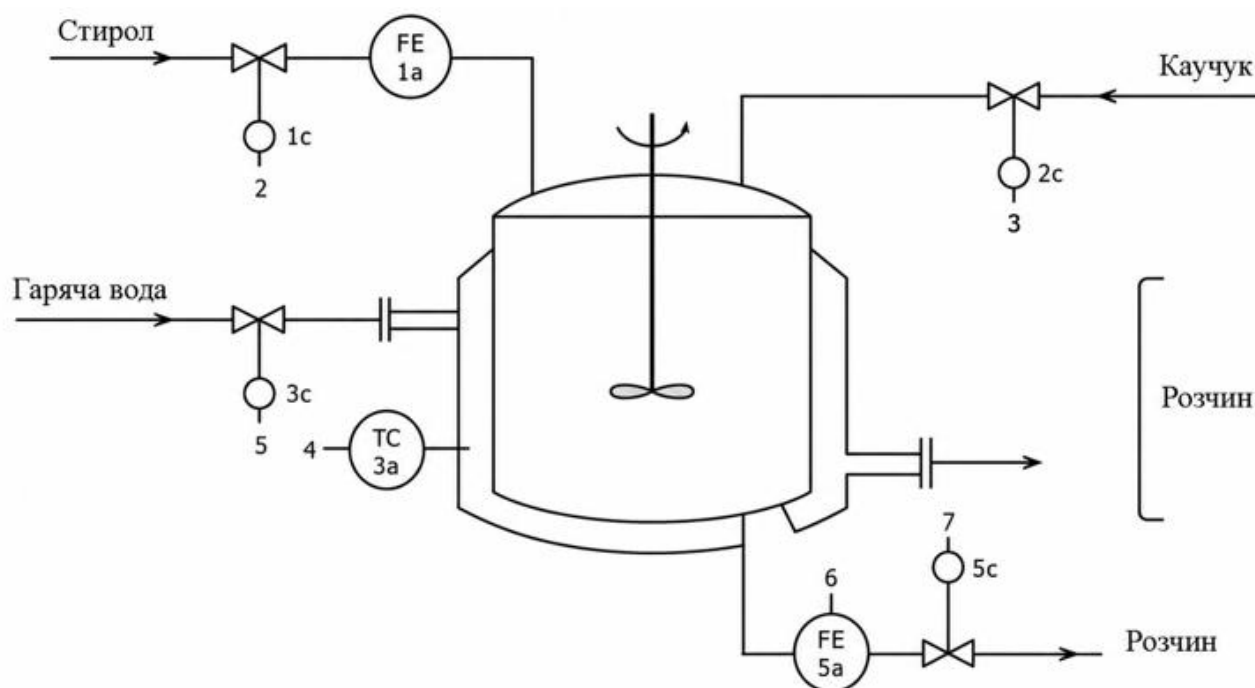


Рисунок 3.1 – Схема автоматизації реактора

Для забезпечення стабільного перебігу процесу полімеризації стиролу в реакторі передбачено систему автоматичного контролю та регулювання основних технологічних параметрів.

Основним параметром, що підлягає автоматичному регулюванню, є температура реакційної суміші. Підтримання температури на заданому рівні є необхідною умовою забезпечення стабільної швидкості полімеризації та отримання продукту з необхідними фізико-хімічними властивостями.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Для вимірювання температури в реакторі встановлено первинний перетворювач температури 4. Отриманий сигнал надходить до регулятора температури ТС 3а, який порівнює поточне значення температури із заданим значенням та формує керуючий вплив на регулюючий клапан 5, встановлений на лінії подачі гарячої води до сорочки реактора. У разі відхилення температури від заданого значення регулятор змінює витрату теплоносія, забезпечуючи стабілізацію температурного режиму.

Контроль подачі стиролу до реактора здійснюється за допомогою витратоміра FE 1а, встановленого на трубопроводі подачі сировини. Отримана інформація використовується для контролю технологічного режиму та підтримання необхідної продуктивності установки. Регулювання витрати стиролу здійснюється за допомогою регулюючого клапана 2.

Для подачі каучуку до реактора передбачено регулюючий клапан 3. Підтримання необхідного співвідношення стиролу та каучуку є важливим фактором, що визначає механічні властивості та ударну міцність готового полістиролу.

Контроль витрати полімеризованого розчину на виході з реактора здійснюється витратоміром FE 5а. Для регулювання відведення продукту з реактора використовується регулюючий клапан 7. Цей контур забезпечує підтримання необхідного матеріального балансу та безперервність технологічного процесу.

Таким чином, функціональна схема автоматизації реактора включає контур автоматичного регулювання температури та контури контролю витрат основних технологічних потоків. Реалізація зазначених контурів дозволяє забезпечити стабільність процесу полімеризації, підвищити якість готової продукції та покращити техніко-економічні показники роботи установки.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

### 3.2 Структура автоматизованої системи керування технологічним процесом

Відповідно до вимог сучасних систем автоматизації технологічних процесів та особливостей виробництва полістиролу доцільним є використання багаторівневої розподіленої системи керування (Distributed Control System, DCS). Така структура забезпечує високу надійність, гнучкість, масштабованість та ефективність керування технологічним процесом.

Розроблена автоматизована система керування технологічним процесом виконує такі основні функції:

1. Збір, обробку та передачу інформації про стан технологічного процесу.
2. Автоматичне керування технологічними параметрами відповідно до заданих алгоритмів регулювання.
3. Візуалізацію процесу та забезпечення операторського інтерфейсу.
4. Архівування технологічних параметрів та подій.
5. Формування аварійної та попереджувальної сигналізації.
6. Забезпечення функцій дистанційного моніторингу та діагностики.

Структурно система керування складається з трьох рівнів.

Нижній рівень утворюють первинні вимірювальні перетворювачі, виконавчі механізми та регулюючі органи.

На цьому рівні виконуються такі функції:

- безперервне вимірювання технологічних параметрів;
- первинне перетворення та передача сигналів;
- реалізація керуючих впливів на технологічне обладнання;
- контроль справності польових пристроїв.

Первинна обробка інформації включає:

- лінеаризацію сигналів вимірювальних перетворювачів;
- цифрову фільтрацію шумів;
- діагностику стану датчиків;
- компенсацію похибок вимірювання;

										Арк.
										47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

– формування стандартних аналогових сигналів 4–20 мА або цифрових сигналів.

Середній рівень представлений програмованим логічним контролером SIMATIC S7-1500 та модулями розподіленого введення-виведення ET 200MP.

Контролер працює в режимі реального часу та виконує такі функції:

- збір інформації від польових пристроїв;
- обробку вхідних сигналів;
- реалізацію алгоритмів автоматичного регулювання;
- керування виконавчими механізмами;
- формування аварійних та попереджувальних повідомлень;
- обмін інформацією з верхнім рівнем системи.

Програмування контролера здійснюється в інтегрованому середовищі розробки TIA Portal, яке забезпечує конфігурування апаратної частини, розроблення програм керування та налаштування операторського інтерфейсу.

Верхній рівень системи представлений операторською станцією та панеллю оператора SIMATIC HMI TP700 Comfort.

Основними функціями верхнього рівня є:

- збір та архівування технологічної інформації;
- відображення параметрів процесу в режимі реального часу;
- формування мнемосхем технологічного процесу;
- ведення журналів подій та аварій;
- зміна уставок регуляторів;
- аналіз ефективності роботи обладнання;
- формування звітів про роботу системи.

Обмін інформацією між контролером та операторською станцією здійснюється через промислову мережу PROFINET на базі технології Industrial Ethernet. Швидкодія мережі забезпечує передачу інформації між рівнями системи в реальному масштабі часу та своєчасне реагування на зміни технологічних параметрів.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Для інтеграції автоматизованої системи керування з інформаційною мережею підприємства використовується протокол Industrial Ethernet з підтримкою стандартів OPC UA, що забезпечує можливість подальшого підключення SCADA-систем та корпоративних інформаційних ресурсів.

Під час вибору програмованого логічного контролера враховувалися такі критерії:

- висока надійність роботи системи;
- висока швидкодія обробки інформації;
- модульна структура та можливість розширення;
- підтримка сучасних промислових мереж;
- можливість реалізації складних алгоритмів керування;
- підтримка великої кількості модулів введення-виведення;
- простота монтажу та технічного обслуговування;
- можливість інтеграції із системами диспетчеризації та аварійного захисту.

Для реалізації системи керування обрано контролер SIMATIC S7-1500 виробництва компанії Siemens, який повністю відповідає вимогам технологічного процесу виробництва полістиролу та забезпечує необхідний рівень надійності, функціональності й продуктивності.

При виборі DCS та ESD-систем також враховувалися такі вимоги:

1. Забезпечення необхідної надійності та швидкодії відповідно до особливостей технологічного процесу.
2. Збереження працездатності системи під час технічного обслуговування та ремонту обладнання.
3. Мінімізація ризику помилкових спрацьовувань через випадкові або короткочасні збурення.
4. Підтримка функціональної безпеки відповідно до вимог міжнародних стандартів.
5. Можливість подальшого розширення та модернізації системи автоматизації.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

### 3.3 Обґрунтування вибору програмованого логічного контролера

Як основу DCS-системи керування технологічним процесом виробництва полістиролу обрано програмований логічний контролер SIMATIC S7-1500 виробництва компанії Siemens [6]. Контролери цієї серії призначені для автоматизації технологічних процесів середньої та високої складності та широко використовуються в хімічній, нафтохімічній, енергетичній та переробній промисловості. Завдяки модульній архітектурі система може масштабуватися відповідно до вимог конкретного виробництва та забезпечувати інтеграцію з сучасними SCADA- і DCS-системами.



Рисунок 3.2 – Програмований логічний контролер SIMATIC S7-1500

Для реалізації функцій керування та збору технологічної інформації доцільно використовувати центральний процесор CPU 1511-1 PN, який забезпечує високу швидкодію, надійність та підтримку сучасних промислових протоколів зв'язку. Контролер має модульну конструкцію, що дозволяє підключати необхідну кількість

									Арк.
									50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



Для реалізації функцій аварійного захисту (ESD) може бути використана відмовостійка модифікація контролера SIMATIC S7-1500F. Контролери серії F підтримують функціональну безпеку до рівня SIL 3 відповідно до стандарту IEC 61508 та рівня PL e згідно зі стандартом ISO 13849. Це дозволяє використовувати їх для реалізації систем протиаварійного захисту технологічного обладнання, контролю аварійних параметрів та безпечного зупинення виробничого процесу.

Використання контролера SIMATIC S7-1500 у системі автоматизації виробництва полістиролу забезпечує високу точність керування технологічними параметрами, надійність функціонування системи, зручність обслуговування та можливість подальшої модернізації автоматизованого комплексу.

### **3.4 Вибір операторської панелі**

Як локальний операторський інтерфейс системи автоматизації обрано сенсорну панель оператора SIMATIC HMI TP700 Comfort виробництва компанії Siemens. Панель призначена для візуалізації технологічного процесу, відображення поточних параметрів роботи установки, введення уставок регуляторів та контролю стану технологічного обладнання [7].

Застосування панелі оператора дозволяє забезпечити ефективну взаємодію обслуговуючого персоналу із системою автоматизації, оперативно реагувати на зміну технологічних параметрів та своєчасно виявляти аварійні ситуації. Панель інтегрується з контролерами серії SIMATIC S7-1500 через мережу PROFINET та підтримує роботу в середовищі розробки TIA Portal.

До основних функцій панелі належать:

- відображення мнемосхем технологічного процесу;
- індикація поточних значень температури, витрати, тиску та рівня;
- зміна технологічних уставок;
- архівування технологічних параметрів;
- відображення аварійних та попереджувальних повідомлень;

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52





- функції аварійної та попереджувальної сигналізації;
- підтримка розширеної діагностики.

Для формування керуючих сигналів на виконавчі механізми використовується модуль аналогового виведення AQ 8xU/I HS.



Рисунок 3.5 – Модуль аналогового виведення AQ 8xU/I HS

Основні технічні характеристики модуля AQ 8xU/I HS:

- кількість аналогових каналів – 8;
- вихідні сигнали: 0–10 В,  $\pm 10$  В, 0–20 мА, 4–20 мА;
- розрядність цифро-аналогового перетворювача – 16 біт;
- похибка перетворення – не більше  $\pm 0,1$  %;
- контроль обриву навантаження;
- індивідуальне налаштування параметрів кожного каналу;
- підтримка діагностики несправностей;
- можливість роботи з електропневматичними позиціонерами регулюючих клапанів.

Використання модулів серії SIMATIC ET 200MP забезпечує високу точність вимірювання технологічних параметрів, надійність передачі даних та повну сумісність із контролером SIMATIC S7-1500, що підвищує ефективність функціонування системи автоматизації процесу виробництва полістиролу.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

### 3.6 Вибір вимірювальних перетворювачів

Під час вибору вимірювальних перетворювачів та контрольно-вимірювальних приладів для системи автоматизації виробництва полістиролу необхідно враховувати особливості технологічного процесу полімеризації стиролу. Процес супроводжується виділенням значної кількості теплоти, а також потребує підтримання заданих значень температури, витрати та тиску. Крім того, стирол належить до легкозаймистих речовин, що висуває підвищені вимоги до надійності та безпеки засобів вимірювання.

У зв'язку з цим вимірювальні перетворювачі повинні відповідати таким вимогам:

1. Можливість експлуатації у вибухонебезпечних зонах.
2. Наявність стандартного аналогового виходу 4–20 мА та підтримка цифрових протоколів зв'язку.
3. Висока надійність та довговічність роботи.
4. Можливість роботи в умовах підвищених температур і тисків.
5. Висока точність та стабільність метрологічних характеристик.
6. Наявність засобів самодіагностики та контролю справності.
7. Простота монтажу, налаштування та технічного обслуговування.

Для контролю температурного режиму полімеризації особливе значення має правильний вибір датчика температури, оскільки саме температура є основним параметром, що визначає швидкість перебігу реакції та якість готового продукту.

Під час вибору датчика температури враховувалися такі характеристики:

- діапазон вимірювання температури;
- основна приведена похибка вимірювання;
- швидкодія датчика;
- можливість експлуатації у вибухонебезпечних середовищах;
- надійність та довговічність;
- зручність монтажу, обслуговування та ремонту;
- сумісність із контролером SIMATIC S7-1500;

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

- наявність вихідного сигналу 4–20 мА;
- вартість обладнання.

З урахуванням зазначених вимог для вимірювання температури в реакторі полімеризації доцільно використовувати термометр опору Pt100 у комплекті з інтелектуальним температурним перетворювачем. Таке рішення забезпечує високу точність вимірювання, стійкість до промислових завад та можливість інтеграції в сучасні системи автоматизації.

### 3.6.1 Вибір датчика температури

Для вимірювання температури в реакторі полімеризації було розглянуто два промислові датчики температури: Siemens SITRANS TS500 [9] та Endress+Hauser Omnicard TR10 [10]. Обидва пристрої призначені для роботи в складних промислових умовах та можуть використовуватися в системах автоматизації хімічних виробництв.

Датчик температури Siemens SITRANS TS500 являє собою модульну систему вимірювання температури для трубопроводів, резервуарів та реакторів. Конструкція датчика дозволяє використовувати змінні вимірювальні вставки, виконувати технічне обслуговування без демонтажу всієї конструкції та забезпечує високу надійність роботи в складних промислових умовах. Датчик підтримує використання як термометрів опору Pt100, так і різних типів термопар, що дозволяє вимірювати температуру до 1250 °С. Крім того, передбачені вибухозахищені виконання для роботи на хімічних виробництвах.

Перевагою датчика Endress+Hauser Omnicard TR10 є висока точність вимірювання та якісне виконання, проте його максимальна робоча температура є меншою, а інтеграція з обладнанням Siemens потребує додаткового налаштування.

Основні технічні характеристики датчиків наведено в таблиці 2.3.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Таблиця 3.3 – Порівняння датчиків температури

Характеристика	Siemens SITRANS TS500	Endress+Hauser Omnigrad TR10
Тип датчика	RTD Pt100, термопари	RTD Pt100
Максимальна температура вимірювання	до 1250 °С (для термопар)	до 600 °С
Мінімальна температура вимірювання	-196 °С	-200 °С
Вибухозахищене виконання	Так	Так
Можливість встановлення перетворювача 4–20 мА/HART	Так	Так
Змінна вимірювальна вставка	Так	Так
Діагностика стану	Так	Так
Робота в агресивних середовищах	Так	Так
Інтеграція з SIMATIC S7-1500	Повна	Через стандартні інтерфейси

Зважаючи на те, що автоматизована система керування побудована на базі контролера SIMATIC S7-1500, модулів введення-виведення ET 200MP та операторської панелі SIMATIC HMI TP700 Comfort, для вимірювання температури реакційної маси доцільно обрати датчик Siemens SITRANS TS500 у комплекті з температурним перетворювачем SITRANS TH320. Таке рішення забезпечує повну сумісність із засобами автоматизації Siemens, високу надійність роботи, можливість експлуатації у вибухонебезпечних зонах та значний запас за діапазоном вимірювання температури.

### 3.6.2 Вибір витратоміра

Для вимірювання витрати стиролу в системі автоматизації виробництва полістиролу було проведено порівняльний аналіз двох сучасних електромагнітних

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58



Витратомір Siemens SITRANS F M MAG 5100W забезпечує високу точність вимірювання та підтримує широкий спектр промислових мереж. Його перевагою є повна сумісність із контролерами SIMATIC S7-1500 та можливість конфігурування в середовищі TIA Portal. Крім того, прилад підтримує розвинені функції самодіагностики та дистанційного моніторингу.



Рисунок 3.6 – Витратомір Siemens SITRANS F M MAG 5100W

Витратомір Endress+Hauser Proline Promag W 400 також характеризується високою точністю та надійністю. Прилад має сучасні функції діагностики та підтримує основні промислові протоколи зв'язку. Однак його інтеграція в систему автоматизації Siemens потребує додаткового налаштування комунікаційних параметрів.

З огляду на те, що розроблювана автоматизована система керування побудована на базі контролера SIMATIC S7-1500, модулів введення-виведення ET 200MP та операторської панелі SIMATIC HMI TP700 Comfort, для вимірювання витрати стиролу доцільно обрати витратомір Siemens SITRANS F M MAG 5100W. Використання обладнання одного виробника забезпечує максимальну сумісність компонентів системи, спрощує налаштування та підвищує надійність експлуатації автоматизованої системи керування.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

### 3.7 Вибір регулюючого клапана

Як регулюючий орган у системі автоматичного регулювання температури реактора полімеризації обрано регулюючий клапан серії RV103 виробництва компанії LDM. Даний клапан призначений для плавного регулювання витрати рідин та газоподібних середовищ і широко використовується в промислових системах автоматизації технологічних процесів [13].

Клапан RV103 являє собою двоходовий або триходовий регулюючий клапан із фланцевим приєднанням. Корпус клапана виготовлений із сірого чавуну, а регулюючий орган має лінійну або рівновідсоткову характеристику регулювання, що забезпечує високу якість керування технологічним процесом.

Основні технічні характеристики клапана RV103 наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики регулюючого клапана RV103

Параметр	Значення
Тип клапана	Двоходовий або триходовий
Номінальний діаметр	DN 15–50
Номінальний тиск	PN 16
Пропускна здатність Kvs	0,6–40 м <sup>3</sup> /год
Робоча температура середовища	від –5 до +150 °С
Матеріал корпусу	Сірий чавун
Тип характеристики	Лінійна або рівновідсоткова
Клас герметичності	Class III
Діапазон регулювання	50:1
Тип приєднання	Фланцеве

Клапан RV103 допускає встановлення електричних або електрогідравлічних приводів Siemens серій SKD, що забезпечує його повну сумісність із розробленою системою автоматизації на базі контролера SIMATIC S7-1500. Завдяки цьому керуючий сигнал 4–20 мА від модуля аналогового виведення контролера може безпосередньо використовуватися для позиціонування виконавчого механізму клапана.

Перевагами клапана RV103 є висока надійність, простота монтажу, широкий діапазон регулювання та можливість роботи в умовах безперервного технологічного процесу. Зазначені характеристики повністю задовольняють вимоги системи автоматичного регулювання процесу виробництва полістиролу.

Таким чином, для регулювання подачі теплоносія до реактора полімеризації обрано регулюючий клапан LDM RV103 з електроприводом Siemens, який забезпечує необхідну точність регулювання, надійність роботи та сумісність із засобами автоматизації, використаними в даному проєкті.



Рисунок 3.7 – Регулюючий клапан серії RV103

### **Висновки до розділу**

У третьому розділі виконано аналіз та обґрунтування технічних рішень щодо побудови автоматизованої системи керування процесом виробництва полістиролу. Розглянуто особливості технологічного процесу полімеризації стиролу та визначено основні параметри, що потребують контролю й автоматичного регулювання, зокрема температуру, витрату та стан технологічного обладнання.

Проведено аналіз контурів автоматичного регулювання та визначено структуру багаторівневої автоматизованої системи керування технологічним процесом. Запропонована система складається з трьох рівнів: польового рівня, рівня

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

програмованого логічного контролера та операторського рівня. Така структура забезпечує надійний збір, обробку та передачу інформації, а також ефективно керування технологічним процесом у режимі реального часу.

Для реалізації функцій керування обрано програмований логічний контролер SIMATIC S7-1500 виробництва компанії Siemens, який характеризується високою швидкістю, надійністю та широкими можливостями інтеграції з сучасними промисловими мережами. Для організації локального операторського інтерфейсу використано панель оператора SIMATIC HMI TP700 Comfort, що забезпечує візуалізацію технологічного процесу та зручну взаємодію оператора із системою.

Для підключення польових приладів обрано модулі аналогового введення та виведення серії ET 200MP, які забезпечують високу точність обробки сигналів та повну сумісність із контролером. На основі порівняльного аналізу температурних датчиків для вимірювання температури реакційної маси обрано датчик Siemens SITRANS TS500, який має широкий діапазон вимірювання, високу надійність та можливість роботи у вибухонебезпечних зонах. Як виконавчий механізм системи регулювання вибрано регулюючий клапан RV103 виробництва компанії LDM, що забезпечує необхідну точність керування витратою теплоносія.

Таким чином, виконаний вибір технічних засобів автоматизації повністю відповідає вимогам технологічного процесу виробництва полістиролу та створює основу для подальшої розробки програмного забезпечення, алгоритмів керування і системи візуалізації технологічного процесу.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розроблено систему автоматизації процесу виробництва полістиролу блоковим методом полімеризації стиролу. Проведено аналіз технологічного процесу та визначено основні параметри, що впливають на якість готової продукції та ефективність роботи виробництва.

У роботі розглянуто основні методи виробництва полістиролу, проаналізовано технологічну схему виробництва та обґрунтовано вибір блокового методу полімеризації як найбільш ефективного для сучасних промислових підприємств. Досліджено особливості технологічного процесу як об'єкта автоматизації та визначено основні контури контролю й регулювання.

Виконано теплові розрахунки процесу виробництва полістиролу для стадій нагрівання, полімеризації та охолодження. Визначено теплові навантаження на систему теплообміну та встановлено, що під час реакції полімеризації виділяється значна кількість теплоти, що потребує постійного автоматичного контролю та регулювання. Для зменшення теплових втрат обґрунтовано використання теплоізоляції реактора.

Проведено математичне моделювання реактора полімеризації як об'єкта автоматичного регулювання. За допомогою середовища MATLAB та пакета System Identification Toolbox виконано ідентифікацію параметрів об'єкта та отримано його передавальну функцію. На основі побудованої математичної моделі здійснено синтез ПІ-регулятора та досліджено характеристики замкненої системи керування. Отримані результати підтвердили стійкість системи та її здатність забезпечувати підтримання температури на заданому рівні.

Для реалізації автоматизованої системи керування обґрунтовано вибір сучасних технічних засобів автоматизації. Як центральний елемент системи обрано програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1500, який забезпечує високу швидкодію, надійність та можливість інтеграції з сучасними промисловими мережами. Для організації операторського інтерфейсу використано панель

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

SIMATIC HMI TP700 Comfort. Для збору та обробки інформації обрано модулі введення-виведення ET 200MP.

На основі порівняльного аналізу контрольно-вимірювальних приладів для контролю температури обрано датчик Siemens SITRANS TS500, а для вимірювання витрати технологічних потоків — витратомір Siemens SITRANS F M MAG 5100W. Як виконавчий механізм системи регулювання використано регулюючий клапан RV103 виробництва компанії LDM.

Розроблена система автоматизації забезпечує підтримання заданого температурного режиму полімеризації, підвищує стабільність технологічного процесу, покращує якість готової продукції, зменшує вплив людського фактора та підвищує безпеку експлуатації технологічного обладнання.

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Хімія полімерів : конспект лекцій / упоряд.: Л. П. Марушко. Луцьк : П «Зоря-плюс» ВОО ВОІ СОІУ, 2021. 133 с.
2. Мельник Л.І. Хімія і фізика полімерів: Навч. посібник – Київ: НТУУ ”КПІ” 2016. – 161 с.
3. Основи хімічної технології органічних речовин : підручник / За ред. В. П. Сахненка. – Харків : НТУ «ХП», 2018. – 464 с.
4. MathWorks. System Identification Toolbox Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/products/sysid.html> (дата звернення: 02.05.2026).
5. MathWorks. Control System Toolbox Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/products/control.html> (дата звернення: 05.05.2026).
6. Siemens AG. SIMATIC S7-1500 Automation System. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/simatic-s7-1500.html> (дата звернення: 10.05.2026).
7. Siemens AG. SIMATIC HMI Comfort Panels. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/human-machine-interface/hmi-comfort-panels.html> (дата звернення: 14.05.2026).
8. Siemens AG. ET 200MP Distributed I/O System. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/io-systems/et-200mp.html> (дата звернення: 20.05.2026).
9. Siemens AG. SITRANS TS500 Temperature Sensors. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/process-instrumentation/temperature-measurement/sitrans-ts500.html> (дата звернення: 25.05.2026).
10. Endress+Hauser. Omnicard TR10 Industrial Thermometer. URL: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/temperature-measurement/omnicard-tr10> (дата звернення: 30.05.2026).

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

11. Siemens AG. SITRANS F M Electromagnetic Flowmeters. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/process-instrumentation/flow-measurement/electromagnetic.html> (дата звернення: 03.06.2026).

12. Endress+Hauser. Proline Promag Flowmeters. URL: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/flow-measurement-product-overview/promag-electromagnetic-flowmeters> (дата звернення: 07.06.2026).

13. LDM, spol. s r.o. Control Valves RV102/RV103. URL: <https://www.ldmvalves.com/en/products/control-valves/rv102-rv103> (дата звернення: 10.06.2026).

					БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67