

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКП – 24.00.00.000 ПЗ

Група АКП – 21 – 1

**Олександр Чесалов**

**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**

Чесалов Олександр Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК \_\_\_\_\_ 681.53  
(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація технологічного процесу доконцентрації каустичної соди

(назва роботи)

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

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

### Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1 \_\_\_\_\_ О.Д. Чесалов  
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### Рецензент

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

### Науковий керівник

доцент \_\_\_\_\_ В.С. Борин  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### Допущено до захисту Завідувач кафедри

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 АКІТ.**

\_\_\_\_\_/Лагойда А.І./

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р

**З А В Д А Н Н Я**

**НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

**Чесалову Олександрю Дмитровичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація технологічного процесу доконцентрації каустичної соди

керівник роботи Борин Василь Степанович, кандидат технічних наук, доцент

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від « 07 » травня 20 25 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 року

3. Вихідні дані до роботи Технологічний регламент, літературні джерела

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1 Аналіз технологічного процесу доконцентрації каустичної соди. 2 Аналіз технологічного процесу як об'єкту керування. 3 Аналіз та синтез автоматичної системи керування. 4 Технічна реалізація системи керування. 5 Розробка програми функціонування. 6 Розвиток САК на основі інтелектуальних технологій.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Лист 1 – Технологічна схема процесу - БР.АКП – 24.00.00.000 01

## 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 доконцентрації каустичної соди	15.05.2025	
2	Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування	17.05.2025	
3	Аналіз та синтез автоматичної системи керування	20.05.2025	
4	Технічна реалізація системи керування	25.05.2025	
5	Розробка програми функціонування	27.05.2025	
6	Розвиток САК на основі інтелектуальних технологій	30.05.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

О.Д. Чесалов  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

В.С. Борин  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 90 сторінок друкованого тексту, 48 рисунків, 11 таблиць, 7 посилань на джерела.

Тема: «Автоматизація технологічного процесу доконцентрації каустичної соди»

Об'єкт дослідження: тепловий режим випарного апарата в процесі доконцентрації каустичної соди

Мета роботи: розробка автоматичної системи керування тепловим режимом випарної установки

Методи дослідження: структурно-функціональний аналіз технологічної системи, математичне моделювання, ідентифікація динамічних характеристик об'єкта, синтез одноконтурних і каскадних систем керування, імітаційне моделювання

Результати бакалаврської роботи. У межах дослідження було проаналізовано технологічний процес доконцентрації каустичної соди, розглянуто принцип роботи випарної установки та її конструктивні особливості. Проведено вибір основних параметрів контролю та регулювання, зокрема температури та тиску в апараті. Побудовано математичну модель об'єкта керування, на основі якої реалізовано імітаційне моделювання автоматизованої системи керування витратою гріючого теплоносія. За допомогою програмного забезпечення Matlab виконано налаштування параметрів регуляторів у складі одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування.

**Ключові слова:** каустична сода, випарний апарат, автоматична система керування, каскадне регулювання, тепловий режим, передавальна функція, моделювання

## ABSTRACT

The bachelor's thesis contains 90 pages of printed text, 48 figures, 11 tables, 7 references.

Title: Automation of the Technological Process of Caustic Soda Reconcentration

Object of study: thermal regime of the evaporator during the caustic soda reconcentration process

Purpose of the work: development of an automatic control system for the thermal regime of the evaporation unit

Research methods: structural and functional analysis of the technological system, mathematical modeling, identification of the dynamic characteristics of the object, synthesis of single-loop and cascade control systems, simulation modeling

Bachelor's thesis results. The study analyzes the technological process of caustic soda reconcentration, including the operating principles and design features of the evaporator unit. Key process parameters for monitoring and control—such as temperature and pressure—were identified. A mathematical model of the control object was developed and used to implement a simulation model of the automated control system for the heating medium flow rate. Using Matlab software, controller parameters were tuned within both single-loop and cascade automatic control systems.

Keywords: caustic soda, evaporator, automatic control system, cascade control, thermal regime, transfer function, modeling

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....		<b>8</b>
<b>1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДОКОНЦЕНТРАЦІЇ КАУСТИЧНОЇ СОДИ</b> .....		<b>10</b>
1.1 Призначення та суть процесу.....		10
1.2 Характеристики сировини та готової продукції .....		11
1.3 Опис технологічного процесу.....		14
1.4 Технічна характеристика технологічного обладнання... ..		17
1.5 Вибір параметрів індикації, реєстрації, контролю, регулювання, сигналізації.....		19
1.6 Постановка задачі дослідження.....		21
Висновки до розділу .....		21
<b>2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ</b> .....		<b>24</b>
2.1 Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами об'єкту .....		24
2.2 Матеріальний та тепловий баланси випарної установи .....		26
Висновки до розділу .....		30
<b>3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ</b> .....		<b>32</b>
3.1 Складання та розрахунок параметрів математичної моделі об'єкта регулювання.....		33
3.2 Розрахунок параметрів налаштування автоматичного регулятора		35
3.3 Дослідження перехідних процесів розрахованої системи автоматичного регулювання.....		41
Висновки до розділу .....		43
<b>4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ</b> .....		<b>45</b>

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Чесалов О. Д.			Автоматизація технологічного процесу доконцентрації каустичної соди	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Борин В. С.					6	
Реценз.		Чигур І. І.				АКП-21-1 ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А. І.						

4.1	Опис функціональної схеми автоматизації.....	45
4.2	Опис функціональної схеми автоматизації.....	49
	Висновки до розділу .....	52
<b>5</b>	<b>РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ.....</b>	<b>53</b>
5.1	Розробка програми функціонування для мікропроцесорного контролера Siemens Simatic S7-300.....	53
5.2	Розробка принципів електричних схем зовнішніх з'єднань мікропроцесорних засобів.....	69
	Висновки до розділу .....	72
<b>6</b>	<b>РОЗВИТОК САК НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....</b>	<b>74</b>
6.1	Розробка SCADA-системи на основі GE iFIX.....	74
	Висновки до розділу .....	85
	<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>87</b>
	<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....</b>	<b>89</b>
	<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>90</b>

## ВСТУП

На даний час розвитку промисловості автоматизація технологічних процесів є ключовим чинником підвищення ефективності виробництва, оптимізації ресурсів та забезпечення стабільної якості продукції. Вона охоплює комплекс технічних і організаційних заходів, спрямованих на зменшення участі людини в рутинних або потенційно небезпечних операціях, підвищення точності регулювання параметрів процесу та забезпечення безперебійного функціонування обладнання.

Одним із важливих напрямів автоматизації у хімічній промисловості є удосконалення процесів, пов'язаних із концентруванням лугів, зокрема каустичної соди. Випарні установки, що застосовуються для доконцентрації каустику, потребують постійного контролю технологічних параметрів, таких як рівень католіту у випарному апараті та концентрація розчину в сепараційній частині. Відхилення цих показників може призвести до зниження якості продукту, перевитрати енергії або навіть зупинки виробництва.

З огляду на вищезазначене, автоматизація випарного процесу з використанням установок з падаючою плівкою й організацією протиточного руху гріючої пари є технічно обґрунтованим і економічно доцільним рішенням. Такий підхід дозволяє досягти високого коефіцієнта тепловіддачі, зменшити втрати енергії та забезпечити більш рівномірне випаровування.

Крім того, автоматизація сприяє підвищенню рівня безпеки на виробництві. Зменшення навантаження на обслуговуючий персонал, усунення монотонних і фізично важких операцій позитивно впливає на умови праці та знижує ризики виникнення аварійних ситуацій. Надійна система автоматичного регулювання та контролю дозволяє оперативно реагувати на зміни в процесі, запобігаючи виходу за допустимі межі.

Отже, впровадження системи автоматизації у процесі доконцентрації каустичної соди є не лише засобом підвищення продуктивності, а й важливою

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складовою у досягненні загальної стабільності, безпеки й економічності технологічного процесу. Саме ці питання розглядаються в даній бакалаврській роботі.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДОКОНЦЕНТРАЦІЇ КАУСТИЧНОЇ СОДИ

## 1.1 Призначення та суть процесу

Установка для доконцентрації каустичної соди є ключовим елементом у виробничому процесі отримання гідроксиду натрію. Її головна функція полягає в доведенні концентрації водного розчину NaOH до необхідного технологічного рівня, що забезпечує зручність подальшого транспортування, зберігання та застосування у різних галузях промисловості. Доконцентрація здійснюється шляхом термічного видалення надлишкової вологи зі слаболужного розчину, що утворюється після етапу електролізу.

Принцип роботи установки ґрунтується на багатоетапному випаровуванні, яке реалізується у каскаді випарних апаратів, де як джерело тепла використовується вторинна пара. Така схема дозволяє значно скоротити енергоспоживання і забезпечити високу продуктивність при коливаннях навантаження. Крім того, система оснащена засобами автоматичного керування, які підтримують необхідні параметри технологічного процесу у заданих межах.

Типова установка включає такі основні компоненти:

1. Блок приймання та підготовки розчину – забезпечує накопичення, очищення та попереднє нагрівання сировини з використанням фільтраційного обладнання та теплообмінників.

2. Випарна секція – складається з кількох випарних ступенів, які можуть працювати за прямоточним або протиточним принципом. Кожен етап містить випарник, паровий сепаратор та насосну установку для рециркуляції.

3. Теплопостачання – включає джерело первинної водяної пари (часто – пара з парових котлів), систему трубопроводів для подачі тепла та відведення конденсату, а також теплообмінне обладнання.

4. Гідравлічна система – здійснює циркуляцію розчину між корпусами за допомогою насосів, регулюючих пристроїв та мережі трубопроводів.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Система конденсації – включає вакуумне устаткування (ежектори, вакуумні насоси), конденсатори, резервуари, які підтримують знижений тиск у випарниках для зменшення температури кипіння.

6. Вузол збору кінцевого продукту – забезпечує збереження концентрованого NaOH, охолодження та транспортування до наступних етапів або на зберігання.

7. Автоматизована система керування – передбачає використання вимірювальних сенсорів, контролерів, програмованих логічних пристроїв (PLC), систем візуалізації та диспетчерського контролю.

Крім основного обладнання, установка включає додаткові елементи: трубопровідну арматуру, запобіжні механізми, прилади моніторингу температури, тиску та витрат, а також систему обігріву комунікацій. Особливу увагу приділено безпеці експлуатації – система аварійного захисту забезпечує зупинку роботи у випадку виходу параметрів за критичні межі.

У цілому, установка доконцентрації є складним технічним об'єктом, що функціонує в умовах високих температур і агресивного хімічного середовища. Від її надійної роботи залежить не лише стабільність виробництва, а й енергетична ефективність усієї технологічної лінії.

## 1.2 Характеристика сировини й готової продукції

Сировинним матеріалом для установки доконцентрації служить водний розчин гідроксиду натрію низької концентрації, який утворюється після електролізу натрій хлориду. Найчастіше в промисловому виробництві застосовується мембранний тип електролізу, що дозволяє отримати розчин з високою чистотою та мінімальним вмістом небажаних домішок. На виході з електролізера концентрація NaOH зазвичай становить 30 – 33 мас. %.

Основні фізико-хімічні властивості вихідного розчину:

Масова частка NaOH: 30 – 33 %;

Температура: 40 – 60 °C;

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Щільність: приблизно 1,33 – 1,38 г/см<sup>3</sup>;

Зовнішній вигляд: прозора або злегка опалесцентна рідина.

Домішки:

хлорид натрію (NaCl) – залишковий продукт електролізу;

карбонат натрію (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) – утворюється при контакті з CO<sub>2</sub> з повітря;

сліди металів (Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>, SiO<sub>2</sub>) – можуть походити з електродів або устаткування.

Наявність сторонніх домішок може негативно позначатися на якості концентрату та спричиняти утворення осадів на внутрішніх стінках обладнання. Тому перед стадією доконцентрації можуть застосовуватись додаткові методи очищення, як-от фільтрація чи відстоювання.

У результаті доконцентрації отримується розчин з підвищеним вмістом NaOH — 49 – 50 %, який відповідає вимогам промислової логістики та подальшого використання.

Основні характеристики готового продукту:

Концентрація NaOH: 49 – 50 %;

Щільність: 1,53 – 1,55 г/см<sup>3</sup> при 20 °С;

Температура кристалізації: 12 – 15 °С;

В'язкість: вища, ніж у менш концентрованих розчинах;

Колір: безбарвний або з жовтуватим відтінком;

Стабільність: висока за умови дотримання правил зберігання.

У ході електролізу розкладаються молекули солі та води, внаслідок чого утворюються гідроксид натрію (у розчині), хлор (у газоподібній формі) та водень. Отриманий хлор є побічним, але цінним продуктом, що широко застосовується у виробництві полімерів, дезінфікуючих засобів, синтетичних матеріалів. Водень, своєю чергою, може слугувати як джерело енергії або реагент у хімічних синтезах.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика сировини та готового продукту

Параметр	Сировина	Готовий продукт
1	2	3
Концентрація NaOH, %	30 – 33	49 – 50
Температура, °С	40 – 60	70 – 90
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,33 – 1,38	1,53 – 1,55
Вміст домішок	NaCl, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Fe <sup>3+</sup>	Мінімальний
Колір	Прозорий або злегка мутний	Безбарвний або жовтуватий
Температура кристалізації, °С	Не визначена	12 – 15
Стабільність	Схильна до змін	Висока

Готовий продукт має відповідати встановленим технічним стандартам підприємства, що контролюються згідно з типовими нормами.

Таблиця 1.2 – Типові норми

Показник	Норма
1	2
Масова частка NaOH, %	не менше 49
Масова частка NaCl, %	не більше 0,1
Масова частка Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , %	не більше 0,2
Залишок після випарювання	не більше 0,2%
Масова частка механічних домішок	відсутні

Для досягнення вищої якості готового продукту на завершальній стадії можуть бути використані процеси доочищення — наприклад, відстоювання, фільтрація або деаерація, які запобігають захопленню повітряних бульбашок та домішок.

Застосування готового продукту. Концентрований гідроксид натрію знаходить широке застосування в різноманітних галузях промисловості:

1. Хімічна промисловість – як базовий реагент при виробництві барвників, синтетичних мийних засобів, полімерів.
2. Целюлозно-паперове виробництво – для обробки деревини у процесі варіння целюлози.
3. Нафтопереробка – для очищення фракцій нафтопродуктів.
4. Металургія та гальваніка – у процесах підготовки та очищення металів.

5. Харчова промисловість – використовується як харчова добавка E524 (регулятор кислотності).

6. Текстильна промисловість – у процесі мерсеризації тканин.

7. Виробництво побутової хімії – компоненти мила, засобів для очищення каналізації.

Крім того, цей розчин може бути сировиною для отримання твердої форми каустичної соди шляхом сушіння або грануляції.

Зберігання та транспортування. Концентрований розчин NaOH транспортується в спеціальних резервуарах або автоцистернах, які виготовляються з матеріалів, стійких до корозії (нержавіюча сталь, пластики). Під час перевезення та зберігання слід уникати температур нижчих за температуру кристалізації, аби запобігти утворенню осаду гідроксиду натрію.

Основні вимоги до зберігання:

Підтримання температури не нижче +15 °C.

Герметичність тари, захист від вологи та атмосферного CO<sub>2</sub>.

Уникнення прямих сонячних променів.

Дотримання інструкцій з техніки безпеки відповідно до паспорта безпеки речовини (MSDS).

### 1.3 Опис технологічного процесу

Процес згущення 32%-го розчину каустичної соди до масової частки 50% NaOH відбувається у трикорпусній випарній установці фірми **\*\*Vertrams\*\*** (Швейцарія) з випарниками з падаючою плівкою. Використання зустрічно-протиточної схеми подачі гріючої пари та вихідного розчину забезпечує максимальну ефективність теплового використання. Для зниження температури кипіння у перших двох корпусах по ходу подачі розчину створюється вакуум.

Продуктивність установки – 200 000 т/рік у перерахунку на 100% NaOH<sup>[1]</sup>.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

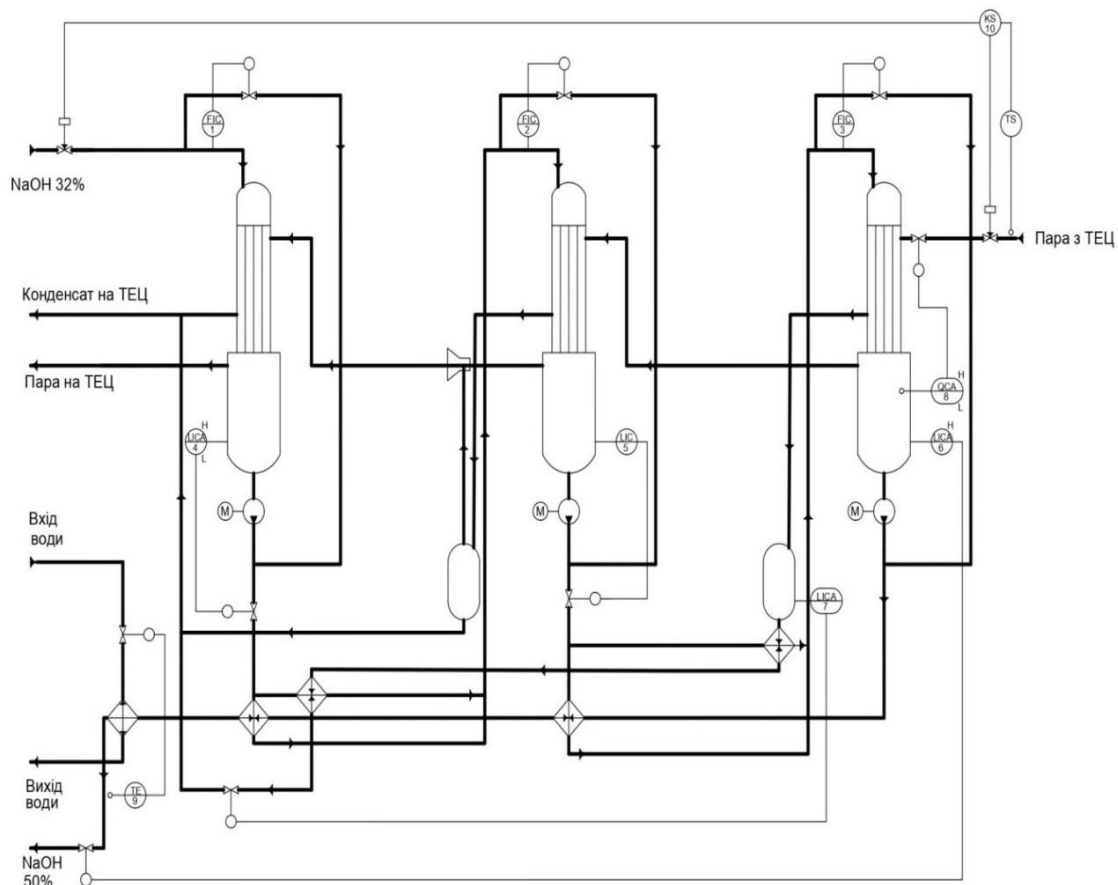


Рисунок 1.1 – Функціональна схема автоматизації процесу доконцентрації каустичної соди

Опис технологічного процесу:

*Перший випарник.* Із резервуару католіту 32%-ний розчин каустичної соди з температурою 88 °С за допомогою насоса подається у верхню частину нагрівальної камери першого випарника. У цьому апараті розчин тонкою плівкою стікає по трубах і нагрівається за рахунок вторинної пари, що надходить із сепаратора другого випарника.

Після випаровування частини води, розчин з концентрацією 36,5% NaOH надходить у сепаратор, де розділяється на пару і рідку фазу. Сокова пара направляється далі по схемі, а рідкий залишок відкачується насосом.

*Другий випарник.* 36,5%-ний розчин попередньо підігрівається у пластинчастих теплообмінниках (використовуються як 50%-ний NaOH, так і конденсат пари середнього тиску), після чого надходить у верхню частину другого випарника. Тут концентрація підвищується до 41,7% NaOH.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			15



Таблиця 1.4 – Фізико-хімічні властивості

Назва властивості (константи) та одиниці вимірювання	Значення фізичної величини з граничними відхиленнями
Запах	без запаху
Агрегатний стан	Рідина
Колір	Безбарвний
pH (100 г/л H <sub>2</sub> O) при 20°C	~ 14
Динамічна в'язкість (при 30°C), 10 <sup>-3</sup> Па·с	49
Температура плавлення, °C	12
Розчинність у воді (при 20°C), %	52,1
Парціальний тиск водяної пари (при 25°C), Па	386
Густина (при 20°C), кг/дм <sup>3</sup>	1,53
Температура кипіння, °C	172

#### 1.4 Технічна характеристика технологічного обладнання

Процес доконцентрації каустичної соди полягає у видаленні надлишкової води з вихідного слабкоконтрованого розчину з метою досягнення вмісту гідроксиду натрію на рівні 49–50%. Для цього застосовуються спеціалізовані випарні установки, що працюють у режимі безперервного випарювання. Суть процесу полягає у багаторазовому випаровуванні води в умовах підвищеної температури, зниженого або атмосферного тиску, що дозволяє ефективно концентрувати продукт без погіршення його якості.

Найчастіше застосовуються вертикальні корпусні випарні апарати з природною або вимушеною циркуляцією.

Типи випарників:

одно- або багатокорпусні;

з рециркуляцією або без неї;

плівкові або трубчасті (зовнішній нагрів через трубки);

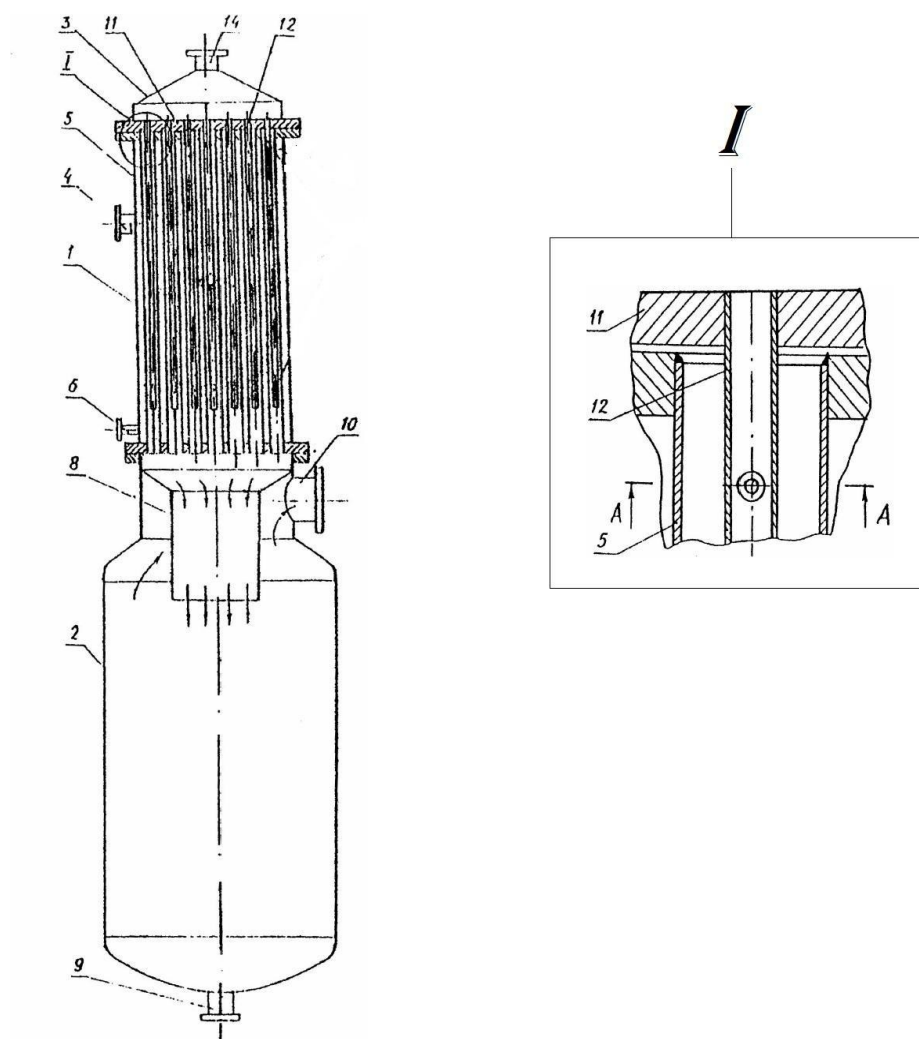
з горизонтальним або вертикальним розташуванням.

У багатокорпусних установках (зазвичай три- або п'ятиступінчасті) використовується вторинна пара з попереднього ступеня для економії енергії, що значно знижує витрати пари.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики типового випарного апарата

Параметр	Значення
1	2
Продуктивність за NaOH	8 – 15 т/год
Кількість корпусів	3 – 5
Температура кипіння	110 – 140 °С
Тиск пари	0,5 – 1,2 МПа
Матеріал виготовлення	Нержавіюча сталь, титанові сплави
Тип циркуляції	Природна або примусова



2 – резервуар концентрованої розчину; 1 – грійоча камера, 3 – кришка випарника, 5 – грійочі труби; 4 – фланець підводу грійочної пари, 6 – фланець відводу конденсату; 9 – фланець відводу продукту; 8 – сепаратор; 10 – фланець відводу соковитої пари, 12 – зрошувальні трубки; 11 – розподільча тарілка

Рисунок 1.2 – Схема випарника з падаючою плівкою

										Арк.
										18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ					

Випарники з падаючою плівкою — це спеціалізовані апарати, що поєднують вертикальну нагрівальну камеру та сепаратор (кубову частину), розташований під нею. У верхній частині гріючої камери розташовані щілинні втулки, через які розчин гідроксиду натрію рівномірно подається на трубний пучок і, покриваючи внутрішні стінки труб, стікає у вигляді суцільної плівки.

Для забезпечення рівномірного розподілу розчину по всій площині трубної решітки у верхній частині камери встановлюється спеціальна розподільча тарілка. У процесі руху розчин нагрівається до температури кипіння і надходить у сепаратор, де через знижений парціальний тиск відбувається інтенсивне випаровування.

Вторинна пара, що утворюється в процесі кипіння, піднімається у верхню частину сепаратора, проходячи через систему жалюзі, яка ефективно затримує мікрокраплі розчину. За необхідності випарник може працювати в режимі примусової циркуляції, що особливо важливо при низькій витраті розчину — це дозволяє підтримувати належне зволоження труб і забезпечує формування стабільної плівки по всій довжині трубок.

### 1.5 Вибір параметрів індикації, реєстрації, контролю, регулювання та сигналізації

Під час вибору параметрів важливо враховувати конкретні особливості системи, її функціональність та безпеку. Параметри контролю виробництва наведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Параметри контролю виробництва

Параметр	Номінальне значення	Допустимі відхилення
Витрата католіту, м <sup>3</sup> /год	58 / 48 / 39	±5%
Рівень католіту у випарнику, %	50	±2
Температура каустику, °С	50	±3
Концентрація NaOH у сепараторі, %	50	±1
Температура гріючої пари, °С	172	±5

Ідентифікація та оцінка чинників, що впливають на перебіг технологічного процесу, є ключовим етапом під час оптимізації доконцентрації каустику. Основним контрольованим показником у цьому процесі є кінцева масова частка NaOH після проходження через випарну установку.

Серед численних змінних процесу виділяються ті, що піддаються регулюванню та дозволяють цілеспрямовано впливати на перебіг концентрації. Визначення таких параметрів здійснюється з урахуванням функціонального призначення процесу, що дозволяє сформулювати відповідний критерій керування, встановити його цільове значення та підібрати релевантні технологічні змінні.

Цей підхід базується на вивченні як статичних, так і динамічних характеристик системи, які дають змогу виявити взаємозв'язки між окремими параметрами та зрозуміти, як зміни одного з них впливають на загальний процес.

Чинники, що знижують ефективність роботи випарної системи, та обґрунтування режимних параметрів

Ефективність роботи випарної установки визначається стабільністю отримання каустичної соди із заданими параметрами температури та концентрації на виході. На цей результат впливають зовнішні та внутрішні збурення, зокрема:

- коливання рівня розчину в апаратах,
- нестабільність температури гріючої пари,
- зміни витрати розчину NaOH на вході в установку,
- варіації подачі охолоджувальної води до готового продукту.

Для забезпечення стабільної роботи системи та досягнення необхідних характеристик кінцевого продукту необхідно дотримуватися встановлених режимних параметрів, які розраховані на основі технологічних вимог та теплогідрравлічних характеристик:

Подача католіту: 58 м<sup>3</sup>/год — до першого корпусу; 48 м<sup>3</sup>/год — до другого; 39 м<sup>3</sup>/год — до третього.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.7 – Технологічна карта об'єкту

Назва параметру	Одиниця вимірювання	Номінальне значення	Допустимі відхилення
Витрата розчину на вході в перший корпус	м <sup>3</sup> /год	58	5
Витрата розчину на вході в другий корпус	м <sup>3</sup> /год	48	5
Витрата розчину на вході в третій корпус	м <sup>3</sup> /год	39	4
Рівень в першому корпусі	%	50	10
Рівень в другому корпусі	%	50	10
Рівень в третьому корпусі	%	50	10
Рівень в конденсатозбірнику	%	50	10
Концентрація в третьому корпусі	°C	50	1
Температура каустику на виході з установки	°C	50	3
Температура грючої пари	°C	172	3

### 1.6 Постановка задачі дослідження

Основною метою цього дипломного проекту є підвищення ефективності виробництва та покращення якості готової продукції шляхом розробки автоматизованої системи керування процесом доконцентрації каустичної соди у хіміко-технологічному середовищі.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання наступних завдань:

1. Розробка математичної моделі динаміки технологічного процесу.
2. Визначення динамічних характеристик каналів керування та збурення.
3. Синтез системи автоматичного керування.
4. Розробка проєктної документації, зокрема:
  - функціональної схеми автоматизації;
  - схеми розміщення засобів автоматизації;
  - специфікації та переліку елементів.

## Висновки до розділу

У результаті проведеного аналізу технологічного процесу доконцентрації каустичної соди та розробки елементів автоматизації зроблено такі висновки:

Процес доконцентрації каустичної соди є важливою стадією у виробництві гідроксиду натрію та полягає у видаленні надлишкової води з 32%-ного розчину до досягнення концентрації 50%. Для цього використовуються трикорпусні випарні установки з падаючою плівкою, що працюють у протитечійному режимі з використанням вторинної пари, що дозволяє значно підвищити енергоефективність процесу.

Технологічна схема установки передбачає поступове концентрування розчину NaOH у трьох випарниках:

з 32% до 36,5% – у першому випарнику;

з 36,5% до 41,7% – у другому;

з 41,7% до 50% – у третьому.

При цьому передбачено багатоступінчасте теплообмінне підігрівання розчину з використанням конденсату пари та готового продукту, що підвищує енергоефективність системи.

Основними керованими параметрами процесу є:

- витрата католіту на кожному ступені;
- рівень розчину у випарниках;
- температура гріючої пари;
- температура та концентрація кінцевого продукту.

Було визначено основні збурення, що впливають на процес:

- коливання температури пари;
- зміни витрати вихідного розчину;
- нестабільність рівня в апаратах;
- неефективне охолодження кінцевого продукту.

На основі аналізу динаміки процесу та впливу основних параметрів розроблено технологічну карту номінальних значень параметрів, що дозволяє

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечити стабільну роботу установки та отримання продукту відповідної якості.

Мета роботи – оптимізація економічних показників і підвищення якості продукції, яка реалізується через створення схеми автоматизації технологічного процесу, що включає:

математичне моделювання динаміки;

визначення динамічних характеристик каналів;

синтез системи керування;

розробку повного комплексу проектної документації.

Таким чином, впровадження автоматизованої системи керування процесом доконцентрації дозволить зменшити енерговитрати, підвищити стабільність якості продукції та загальну ефективність виробництва.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

### 2.1 Структурна схема зв'язків між технологічними параметрами об'єкту

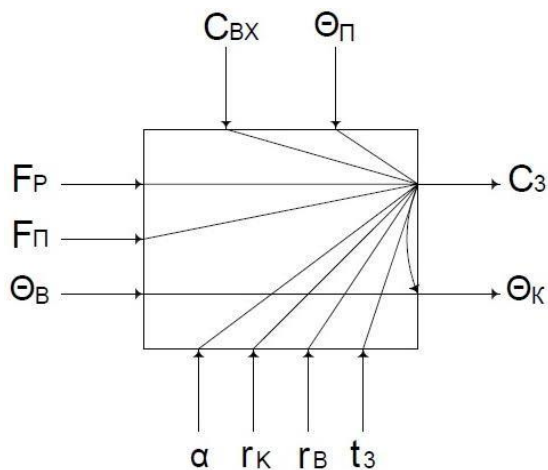


Рисунок 2.1 – Схема взаємозв'язків між технологічними параметрами

У процесі доконцентрації каустичної соди ключовими контрольованими параметрами є:

*Вихідні величини:*

Температура готового продукту на виході з установки –  $\Theta_k$ .

Концентрація гідроксиду натрію в третьому випарнику –  $C_3$ ;

*Вхідні величини (керуючі дії):*

Витрата пари, що подається для нагрівання –  $F_p$ ;

Витрата вхідного розчину –  $F_{\text{п}}$ ;

Температура води для охолодження кінцевого продукту –  $\Theta_{\text{в}}$ .

*Контрольовані збурення:*

Початкова концентрація розчину на вході –  $C_{\text{вх}}$ ;

Температура гріючої пари –  $\Theta_{\text{п}}$ .

*Неконтрольовані збурюючі фактори:*

Зовнішня температура повітря –  $t_3$ ;

Коефіцієнт тепловіддачі –  $\alpha$ ;

Питома теплота конденсації пари –  $r_{\text{п}}$ ;

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Питома теплота випаровування води – гв (при відповідному тиску в сепараторі).

Основна мета автоматизації – підтримання стабільних вихідних показників системи, зокрема концентрації розчину та температури готового продукту. Ці параметри регулюються шляхом впливу на вхідні величини. Оскільки збурення не завжди піддаються прямому впливу, необхідно забезпечити корекцію процесу з урахуванням їх змін.

*Алгоритм регулювання:*

Концентрацію NaOH на виході регулюємо шляхом зміни витрати пари;

Температура готового продукту підтримується регулюванням витрати охолоджувальної води.

*Вибір параметрів для вимірювання, сигналізації, контролю, дистанційного управління, захисту та блокування.* Для забезпечення безпечного та ефективного функціонування випарної установки, визначено перелік ключових параметрів, що потребують постійного моніторингу:

*Контрольовані параметри:*

Витрати розчину, що подаються на кожен випарник;

Рівні розчину в усіх випарних корпусах;

Рівень у конденсатозбірнику;

Концентрація у третьому корпусі;

Температура на виході з установки.

*Пояснення впливу параметрів:*

Збільшення витрати розчину → зниження концентрації на виході;

Надмірна температура пари → можливі пошкодження обладнання, небажане підвищення концентрації;

Перевищення рівня в корпусі → небезпека переливу у сепаратор і потрапляння розчину у конденсат.

*Параметри, що підлягають сигналізації:*

Критичні рівні в корпусах (нижче/вище норми);

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відхилення концентрації (зниження або перевищення допустимих меж);  
Занадто висока або низька температура пари;  
Відхилення температури готового продукту.

*Захист системи реалізується шляхом:*

Автоматичного відключення подачі пари та розчину при виході контрольованих параметрів за межі безпечного діапазону, зокрема при:

Зниженні температури гріючої пари;

Критичних коливаннях концентрації;

Загрозі перегріву продукту.

Таким чином, система автоматизації забезпечує стабільність та безпечність процесу, своєчасно реагуючи на всі значущі зміни технологічного середовища та попереджаючи аварійні ситуації.

## **2.2 Матеріальний та тепловий баланси випарної установки**

Припустимо, що у випарний апарат подається початковий розчин масовою витратою  $G_H$  (кг/с) з концентрацією  $x_H$  (масова частка). Теплоємність цього розчину позначимо  $C_H$ , а температура –  $t_H$ . Концентрація розчину, як функція температури кипіння, визначається наступною залежністю:

$$C = \frac{\sqrt{T - 100}}{0,17}$$

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

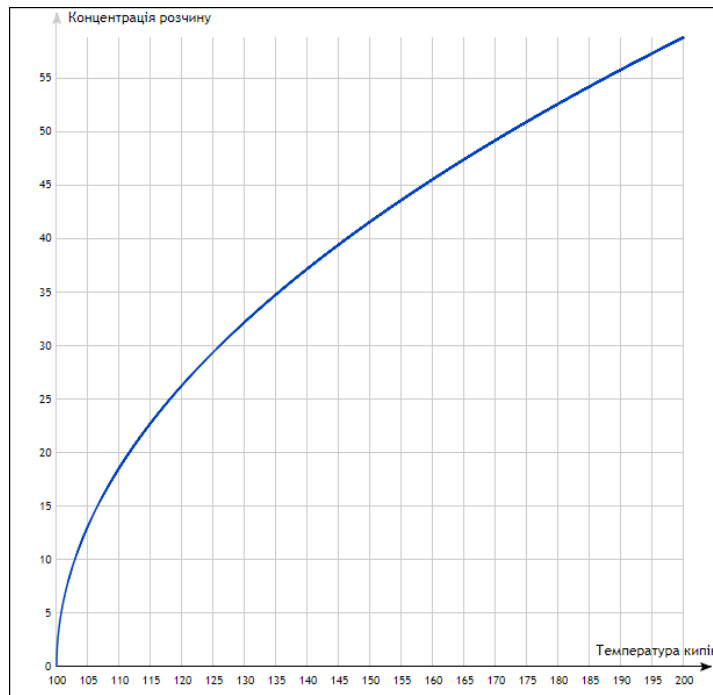


Рисунок 2.2 – Графік залежності концентрації від температури кипіння

На виході з апарата одержується розчин кінцевої концентрації  $x_K$ , із масовою витратою  $G_K$  при температурі  $t_K$  і теплоємності  $C_K$ . Крім того, із сепараційної частини установки виводиться випарена пара з витратою  $W$  (кг/с).

Оскільки при видаленні води маса розчиненої речовини не змінюється, кількість цієї речовини залишається сталою.

Матеріальний баланс для одноапаратного процесу випарювання включає наступні співвідношення:

1. Загальний баланс масових потоків:

$$G_H = G_K + W. \quad (2.1)$$

2. Баланс за розчинником (водою):

$$G_W = G_H \cdot (1 - x_H) = G_K \cdot (1 - x_K) + W. \quad (2.1.1)$$

3. Баланс розчиненої речовини:

$$G_C = G_K \cdot x_K = G_H \cdot x_H = \text{Const}, \quad (2.2)$$

де  $G_C$  – масова витрата розчиненої речовини у вихідному і випареному розчинах відповідно, кг/с;

$G_W$  – масова витрата розчинника у вихідному розчині і в отриманих продуктах, кг/с;

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставивши (2.1) в (2.1.1), отримуємо рівняння для розрахунку кількості випареної води:

$$W = G_H \left(1 - \frac{x_H}{x_K}\right). \quad (2.3)$$

або

$$W = G_H \left(\frac{x_K}{x_H} - 1\right). \quad (2.3.1)$$

Концентрацію випареного розчину знайдено з наступного рівняння:

$$x_K = \frac{G_H + x_H}{G_K} = \frac{G_K + x_K}{x_H - W}. \quad (2.4)$$

Як впливає з рівняння (2.4), зі зростанням об'єму випареної води у випарному апараті збільшується й кінцева концентрація солі в розчині. Для розрахунку витрати пари, що використовується для нагрівання, складають тепловий баланс випарної установки.

Розглянемо основні джерела надходження тепла під час процесу випарювання:

– тепло, яке надходить разом із вихідним розчином:

$$Q_{пр} = G_H \cdot c_H \cdot t_H. \quad (2.5)$$

– тепло, яке надходить разом із гріючою парою:

$$Q_{гп} = D_{гп} \cdot H_{гп}, \quad (2.6)$$

де  $H_{гп}$  – ентальпія гріючої пари, Дж/кг.

$D_{гп}$  – витрата гріючої пари, кг/с;

Теплота, що надходить в процесі концентрування розчину, дорівнює

$$Q_{нс} = G_H (x_K - x_H) \cdot \Delta q_p, \quad (2.7)$$

де  $\Delta q_p$  - питома теплота розчинення солі, Дж/кг.

Витрата тепла в процесі випарювання:

– витрата тепла з випареним розчином, що відводиться із апарата

$$Q_{пр} = G_K \cdot c_K \cdot t_K = (Q_H - W) \cdot c_K \cdot t_K. \quad (2.8)$$

– витрата тепла із соковитою парою

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{\text{сп}} = W \cdot H_{\text{сп}}. \quad (2.9)$$

– витрата тепла із конденсатом

$$Q_{\text{кгп}} = D_{\text{гп}} \cdot H_{\text{кгп}}. \quad (2.10)$$

Окрім основних джерел тепла, в процесі випарювання в апараті також спостерігаються теплові втрати  $Q_{\text{п}}$ , які зазвичай становлять від 5 до 7 % від загальної кількості тепла, корисно використаного у технологічному процесі.

Аналізуючи всі джерела надходження тепла та його витрати, можна сформулювати рівняння теплового балансу для випарного процесу

$$G_{\text{H}}c_{\text{H}}t_{\text{H}} + D_{\text{гп}}H_{\text{гп}} + G_{\text{H}}(x_{\text{K}} - x_{\text{H}})\Delta q_{\text{p}} = (G_{\text{K}} - W)c_{\text{K}}t_{\text{K}} + WH_{\text{сп}} + D_{\text{гп}}H_{\text{кгп}} + Q_{\text{п}}. \quad (2.11)$$

Після розв'язання рівняння (2.11) відносно витрати гріючої пари отримують такий результат:

$$D_{\text{гп}} = \frac{G_{\text{K}}[(c_{\text{K}}t_{\text{K}} - c_{\text{H}}t_{\text{H}}) + (x_{\text{K}} - x_{\text{H}})\Delta q_{\text{p}}]}{H_{\text{гп}} - H_{\text{кгп}}} + \frac{W(H_{\text{сп}} - c_{\text{K}}t_{\text{K}})}{H_{\text{гп}} - H_{\text{кгп}}} + \frac{Q_{\text{п}}}{H_{\text{гп}} - H_{\text{кгп}}}. \quad (2.12)$$

З аналізу отриманого виразу випливає, що загальна витрата пари для процесу випарювання складається з трьох основних компонентів: перша складова відображає зміну ентальпії розчину під час нагрівання, друга – враховує теплову енергію, необхідну для випаровування розчинника (води), а третя – компенсує втрати тепла. Припускаючи, що теплові втрати становлять близько 5 % від ефективно використаної теплоти, витрату гріючої пари для здійснення випарного процесу в однокорпусній установці можна розрахувати за наступною формулою:

$$D_{\text{гп}} = 1,05 \left\{ \frac{G_{\text{K}}[(c_{\text{K}}t_{\text{K}} - c_{\text{H}}t_{\text{H}}) + (x_{\text{K}} - x_{\text{H}})\Delta q_{\text{p}}]}{H_{\text{гп}} - H_{\text{кгп}}} + \frac{W(H_{\text{сп}} - c_{\text{K}}t_{\text{K}})}{H_{\text{гп}} - H_{\text{кгп}}} \right\}. \quad (2.13)$$

Теплота, що витрачається на підвищення концентрації розчину, є відносно незначною, тому зазвичай її не враховують у теплотехнічних розрахунках. Оскільки конденсат гріючої пари, як правило, відводиться з нагрівальної камери при температурі, що відповідає температурі її конденсації, різниця ентальпій між

гріючою парою та її конденсатом ( $H_{гп} - H_{кп}$ ) дорівнює питомій теплоті конденсації.

У свою чергу, для випареної (сокової) пари ентальпійна різниця ( $H_{сп} - c_{тк}$ ) приблизно відповідає питомій теплоті пароутворення при робочому тиску в апараті.

З огляду на це, рівняння (2.13) можна подати у спрощеній формі:

$$D_{гп} = \frac{1.05 [G_K(c_{ктК} - c_{нтН}) + W r_{и}]}{r_K}, \quad (2.14)$$

$r_K$  – питома теплота конденсації гріючої пари (при тиску гріючої пари);

$r_{и}$  – питома теплота випаровування води при відповідному тиску в сепараційній камері випарного апарата, Дж/кг.

Щоб зменшити споживання гріючої пари під час випарювання розчину, рекомендується якісно термоізулювати випарний апарат. Крім того, доцільно попередньо нагрівати вихідний розчин перед його подачею до апарата, використовуючи для цього теплоту, що вивільняється під час конденсації сокової пари.

*Питома витрата гріючої пари.* Для оцінки енергетичної та економічної ефективності функціонування випарних установок застосовують показник питомої витрати гріючої пари. Він визначає кількість пари, необхідної для випарювання одного кілограма води з розчину:

$$d_{гп} = \frac{D_{гп}}{W}.$$

У випарних установках питомі витрати гріючої пари зазвичай перебувають у межах 1,1 – 1,15 кг пари на кожен кілограм випареної води.

### **Висновки до розділу**

У даному розділі розглянуто основні параметри та фактори, що впливають на ефективність і стабільність роботи випарної установки для концентрації розчинів NaOH. Ключовими вихідними параметрами є концентрація NaOH у третьому випарнику та температура розчину на виході з установки. Управління

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесом здійснюється за допомогою регулювання витрат гріючої пари та охолоджувальної води, що дозволяє підтримувати необхідні параметри на оптимальному рівні.

Вхідні параметри, такі як витрати пари, розчину та охолоджувальної води, безпосередньо впливають на технологічний процес, тоді як збурюючі фактори (концентрація та температура гріючої пари, теплотні характеристики, температура зовнішнього середовища) не піддаються контролю, але суттєво впливають на хід процесу.

Для забезпечення надійної роботи установки необхідно контролювати витрати та рівні розчину в випарниках, концентрацію розчину, температуру та рівні конденсатозбірника. Особлива увага приділяється сигналізації параметрів, відхилення яких може призвести до аварійних ситуацій чи порушення технологічного режиму. Впровадження автоматичного захисту, що припиняє подачу пари та розчину при відхиленнях температури гріючої пари чи інших критичних параметрів, є важливим заходом безпеки.

Загалом, правильне регулювання і моніторинг основних параметрів забезпечують стабільність технологічного процесу, оптимізацію енергоспоживання і підвищення якості кінцевого продукту.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

## 3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

У цьому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розглянуто процес дослідження системи автоматичного керування концентрацією каустичного розчину в третьому корпусі випарної установки. Керувальним впливом у системі є регулювання витрати гріючої пари, тоді як контрольованим параметром виступає концентрація розчину в сепараторі.

Побудова математичної моделі процесу здійснюється на основі аналізу експериментальної реакції системи на зміну положення регулювального органу в паропроводі на 30 %, що дозволяє оцінити динаміку об'єкта керування та сформулювати основу для подальшого синтезу системи автоматизації.

Таблиця 3.1 – Крива розгону, отримана стрибкоподібною зміною регулюючої на 30%.

t, c	C, %
1	2
0	50,0
10	50.010
20	50.060
30	50.20
40	50.40
50	50.620
60	50.90
70	51.180
80	51.540
90	51.880
100	52.120
110	52.30

t, c	C, %
1	2
120	52.460
130	52.560
140	52.620
150	52.70
170	52.780
190	52.840
220	52.940
240	52.980
260	53,0
270	53,0
300	53,0

Задане значення регульованої величини – 50%.

Для даної системи автоматичного регулювання встановлені наступні вимоги до якості регулювання:

1. Допустима точність регулювання  $\Delta_{\text{доп}} - 0,2\%$ ;
2. Допустима максимальна динамічна похибка  $X_{\text{max}} - 3\%$ ;
3. Допустимий час регулювання  $t_p - 300$  секунд.

### 3.1 Складання та розрахунок параметрів математичної моделі об'єкта регулювання

З метою побудови експериментальної кривої розгону використаємо середовище Matlab:

```
clc; clear;  
t=[0 10 20,0 30 40 50,0 60 70 80 90 100 110 120,0 130 140 150 170 190 220 240 260  
270 300];  
C=[50,0 50.010 50.060 50.2 50.440 50.7 51 51.30 51.54 51.880 52.08 52.280 52.44  
52.540 52.6 52.7 52.780 52.84 52.940 52.98 53 53,0];  
figure(1); plot(t,C,'-b','ok');title('Крива розгону');  
grid; xlabel('t, c'); ylabel('C, %');
```

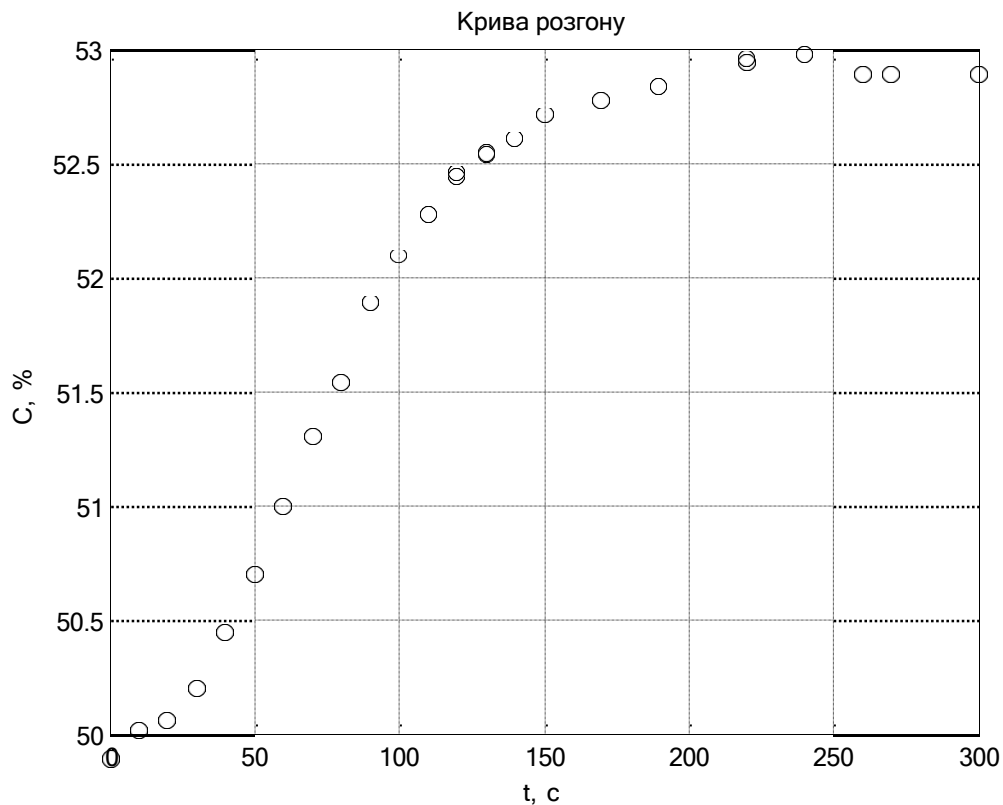


Рисунок 3.1 – Експериментальна крива розгону об'єкта регулювання при стрибкоподібній зміні положення РО на 30%

На основі кривої розгону, робимо припущення, що перехідна функція складається з двох аперіодичних ланок першого порядку та ланки запізнення.

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{(Tp + 1)^2},$$

де  $k$  – коефіцієнт передачі аперіодичної ланки,

$\tau$  – час запізнення;

$T$  – стала часу,

параметри які визначили за допомогою Matlab функції *fminsearch* (див. Додаток Б).

Результатом програми є числові значення параметрів САР та графік порівняння експериментальної та розрахованої кривих розгону:

$K = 0,2$ ;  $T_1 = 38,4913$ ;  $T_2 = 38,4913$ ;  $\text{sig} = 0,0591$  – середньоквадратичне відхилення,  $\text{del} = 2,72\%$  – зведена похибка.

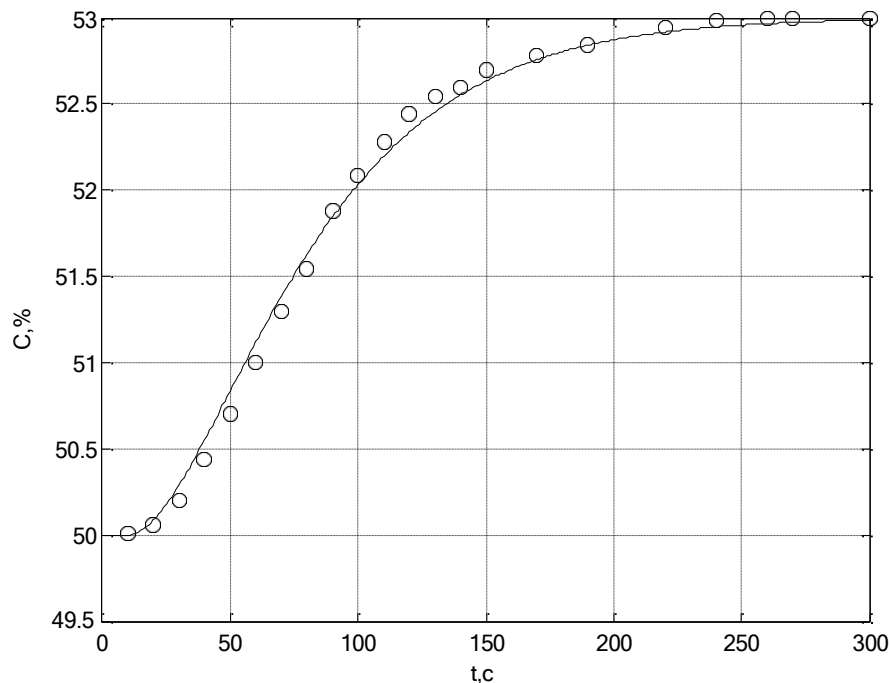


Рисунок 3.2 – Експериментальна («o») та розрахована за моделлю («-») криві розгону, отримані зміною положення РО на 30%

Точність апроксимації для об'єктів із самовирівнюванням вважається задовільною, якщо зведена похибка  $\delta$  не перевищує 3%, тому функція передачі об'єкта регулювання буде наступною:

$$W(p) = \frac{0.2}{(38.491p + 1)^2} \cdot e^{-10p}.$$

### 3.2 Розрахунок параметрів налаштування автоматичного регулятора

Важливою характеристикою будь-якої системи автоматичного регулювання (САР) є якість її роботи. Ефективність функціонування САР безпосередньо впливає на економічність, надійність та довговічність експлуатації технологічного обладнання. При цьому забезпечення високої якості регулювання повинно здійснюватися в межах гарантованої стійкості системи.

Поняття якості САР пов'язане з особливостями перехідних процесів, що виникають у відповідь на зміну зовнішніх впливів. Зазвичай виділяють два типи таких впливів: зміна збуджуючого сигналу  $z$  та зміна заданого значення регульованої величини  $x_{\text{зад}}$ . Аналіз якості САР, як правило, проводиться за перехідними характеристиками (кривими розгону).

До основних показників якості системи регулювання належать:

– Максимальна динамічна похибка  $X_{\text{max}}$  – найбільше відхилення регульованої величини від заданого значення протягом перехідного процесу.

– Статична похибка регулювання  $\Delta_{\text{ст}}$  – залишкове відхилення регульованої величини від її встановленого значення після завершення процесу регулювання.

– Час регулювання  $t_p$  – інтервал часу, протягом якого регульована величина входить у заданий діапазон допустимої похибки  $\Delta_{\text{доп}}$  і надалі його не покидає.

– Коефіцієнт загасання  $\psi$  обчислюється за відповідною формулою (наводиться нижче) і характеризує ступінь затухання коливань у системі при переході до нового режиму:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1},$$

де  $A_1$  – перша та  $A_3$  – третя амплітуди коливань регульованої величини під час перехідного процесу.

Пропорційні регулятори не здатні забезпечити високу точність регулювання, оскільки після завершення перехідного процесу залишається статична похибка.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтегральні регулятори, хоча й усувають цю похибку, мають суттєвий недолік – тривалий час регулювання та значні динамічні відхилення на початкових етапах процесу.

Застосування пропорційно-інтегральних (ПІ) регуляторів дозволяє компенсувати недоліки як пропорційного, так і інтегрального регулювання, поєднуючи їх переваги.

Пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори забезпечують прийнятну якість регулювання для більшості технологічних об'єктів, особливо тих, які характеризуються високою інерційністю.

Оскільки об'єкт регулювання в цьому випадку є інерційним та характеризується наявністю запізнення, доцільно обрати ПІД-регулятор із наступною передавальною функцією:

$$W(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) + T_D p,$$

де  $k_p$  – коефіцієнт передачі регулятора;

$T_i$  – час ізодрому;

$T_D$  – час диференціювання.

Оптимальні значення параметрів регулятора будуть визначатися за методом розширених частотних характеристик. Цей підхід ґрунтується на амплітудно-фазовому критерії стійкості, який можна трактувати як критерій запасу стійкості, за умови використання розширених частотних характеристик замість класичних частотних залежностей об'єкта та регулятора.

Розширені частотні характеристики для елемента з відомою передавальною функцією отримують шляхом заміни оператора Лапласа  $s$  на  $j\omega$  – уявну змінну, що відповідає гармонічному збуренню. Це дозволяє отримати уявлення про поведінку системи в частотній області та визначити параметри регулятора таким чином, щоб забезпечити необхідний запас стійкості і бажані динамічні характеристики:

$$p = -m\omega + i\omega \quad (3.1)$$

де  $\omega$  – кругова частота;

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$m = \alpha/\omega$  – ступінь коливальності, який характеризує запас стійкості;

$\alpha$  – абсолютне значення дійсної частини комплексного кореня характеристичного рівняння,

$m$  – ступінь коливальності.

Амплітудно-фазовий критерій стійкості Найквіста, застосований до розширених частотних характеристик розімкненої системи автоматичного регулювання, виступає умовою для забезпечення необхідного запасу стійкості системи:

$$W_{pc}(m, i\omega) = W_{op}(m, i\omega) \cdot W_p(m, i\omega) = -1, \quad (3.2)$$

де  $W_{op}(m, i\omega)$  – розширена амплітудно-фазова характеристика (АФХ) об'єкта регулювання,  $W_p(m, i\omega)$  – розширена АФХ регулятора.

У загальному випадку границя забезпечення заданого запасу стійкості для системи автоматичного регулювання з ПІД-регулятором є просторовою поверхнею в тривимірному просторі параметрів настроювання:  $k_p, k_D, T_D$ . Для спрощення розрахунків часто фіксують одне з трьох значень, що дозволяє звести задачу до визначення двох інших параметрів.

При фіксованих значеннях коефіцієнта демпфірування  $m$  та диференціального часу  $T_D$ , у площині параметрів  $k_p, k_D$  будують границю області допустимого запасу стійкості. Оптимальні параметри регулятора  $(k_p)_{opt}, (k_D)_{opt}$  визначаються саме на цій межі – за аналогією з процедурою налаштування ПІ-регулятора.

Для деяких типів аналогових ПІД-регуляторів, отримані оптимальні значення параметрів повинні також задовольняти додаткову умову, яка формується залежно від конструктивних обмежень або заданих технічних вимог.

$$0 \leq \frac{T_D}{k_p T_{i3}} \leq 0,5.$$

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У випадку, якщо останню умову не виконано, необхідно зменшити значення часу диференціювання  $T_D$  та повторити процедуру розрахунку параметрів регулятора.

Було розроблено програму, яка дозволяє визначати оптимальні параметри настроювання ПД-регулятора. При цьому значення часу диференціювання фіксується на визначеному рівні, що спрощує задачу і дає можливість шукати коефіцієнти  $k_p$ ,  $k_{T_{із}}$  за аналогією до методу налаштування ПІ-регулятора.

Таким чином, зафіксувавши значення  $T_D$ , параметри ПД-регулятора визначаються на основі таких формул:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{k_p}{T_{із}} &= \frac{\sqrt{m^2 + 1} [m \cos \gamma(m, \omega) - \sin \gamma(m, \omega)]}{A_{op}(m, \omega)} + \omega^2(1 + m^2)T_{\partial} \\ k_p &= \frac{\sqrt{m^2 + 1} \cos \gamma(m, \omega)}{A_{op}(m, \omega)} + 2T_{\partial}m\omega \end{aligned} \right. , \quad (3.3)$$

де  $\gamma(m, \omega) = ABS [\varphi_{op}(m, \omega)] + \arctg m - \pi$

Прийmemo час диференціювання  $T_D$  рівним 20 секунд.

На основі розширеної фазо-частотної характеристики визначаємо частоти:

$\omega^*$  – частота, що відповідає параметру настроювання І-складової;  $\omega^{**}$  – частота, що відповідає параметру настроювання ПІ-складової автоматичного регулятора.

Частоти  $\omega^*$ ,  $\omega^{**}$  визначаємо з розширеної фазо-частотної характеристики об'єкту регулювання, яку знаходимо з наведеної нижче програми (див. Додаток В).

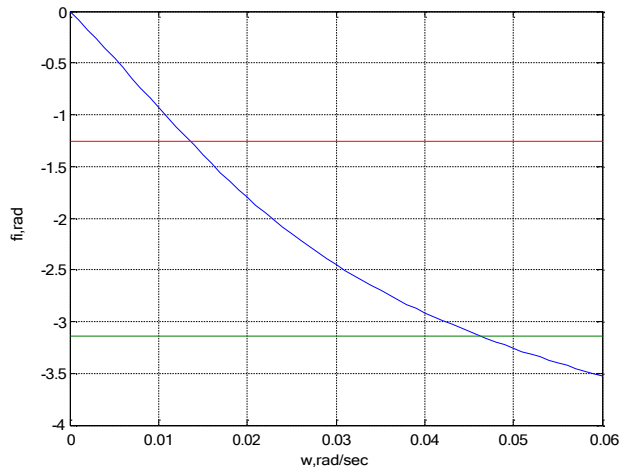


Рисунок 3.3 – Графік розширеної фазо-частотної характеристики об'єкта регулювання

Оптимальні параметри настроювання визначаються шляхом мінімізації другої інтегральної оцінки якості перехідного процесу при зміні положення регулювального органа (РО) на 30%. Використовуючи розроблену програму для розрахунку параметрів регулятора, отримують графік області запасу стійкості, залежність інтегральної квадратичної оцінки від параметра налаштування  $k_p$ , а також значення оптимальних параметрів настроювання автоматичного регулятора (див. Додаток Г).

Результатом роботи програми є побудова графіка границі запасу стійкості системи автоматичного регулювання з ПІД-регулятором, графіка залежності другої інтегральної оцінки від коефіцієнта передачі регулятора, а також визначення оптимальних параметрів його настроювання.

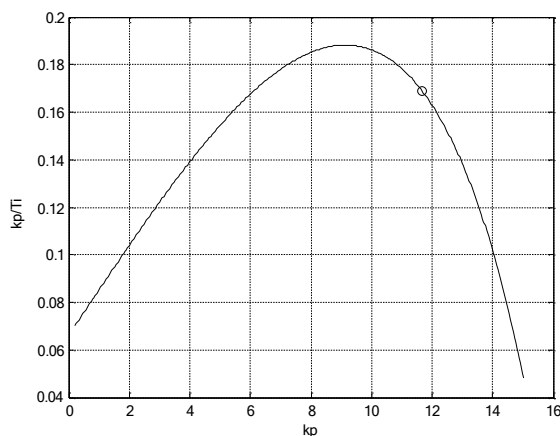


Рисунок 3.4 – Графік границі запасу стійкості САР з ПІД-регулятором

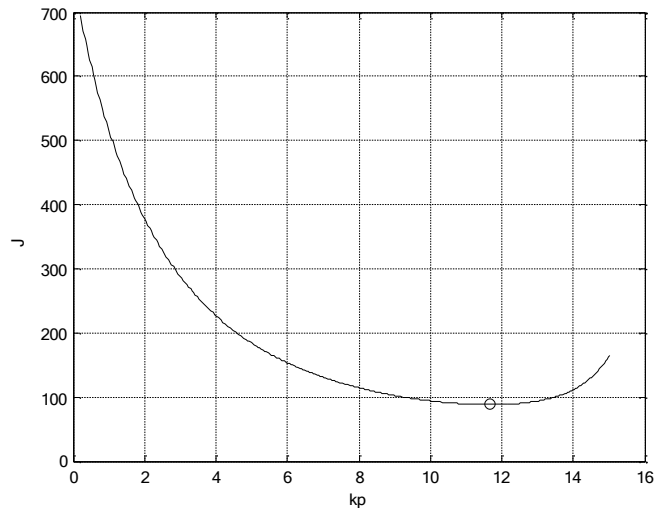


Рисунок 3.5 – Графік залежності другої інтегральної оцінки від коефіцієнта передачі регулятора

$K_{popt} = 11,67$  – оптимальне значення  $K_p$ ;

$k_p T_{iopt} = 0,1689$  – оптимальне значення  $\frac{K_p}{T_{із}}$ ;

$J_{min} = 88 (\%^2) \cdot c$

Отже, функція передачі ПІД-регулятора має вигляд:

$$W_{ap}(p) = 11,67 + \frac{0,1689}{p} + 20p.$$

З отриманих значень знайдемо  $T_{із}$ , який буде рівний  $T_{із} = \frac{11,67}{0,1689} = 69,09$ .

Перевірка на виконання умови для параметрів ПІД-регулятора:

$$\frac{T_D}{k_p T_{із}} = \frac{20}{11,67 \cdot 69,09} = 0,024.$$

Оскільки виконується умова  $0 < 0,024 < 0,5$ , можна зробити висновок, що знайдена функція передачі автоматичного ПІД-регулятора з оптимальними параметрами настроювання є адекватною. Це підтверджує можливість її використання для подальшого моделювання перехідних процесів системи.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.3 Дослідження перехідних процесів розрахованої системи автоматичного регулювання

На основі попередньо визначених параметрів математичної моделі та налаштувань системи керування в середовищі Simulink було розроблено модель автоматичного регулювання концентрації каустичної соди з використанням ПІД-регулятора (рис. 3.6).

Аналіз динаміки моделі здійснювався за кількох сценаріїв: при різкій зміні положення регульовального елемента на 30% (рис. 3.7); у разі збурення, викликаного зміною концентрації вхідного потоку на 2% (рис. 3.8); за умов коригування заданого значення концентрації на 3% (рис. 3.9).

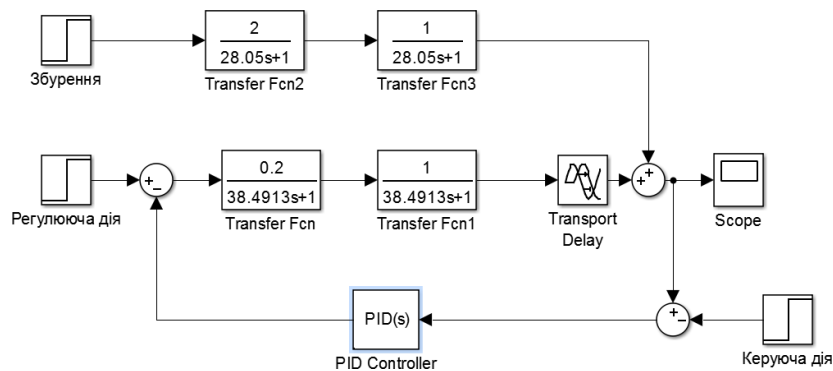


Рисунок 3.6 – Структурна схема одноконтурної САК концентрації каустичної соди із ПІД-регулятором розроблена у середовищі Simulink

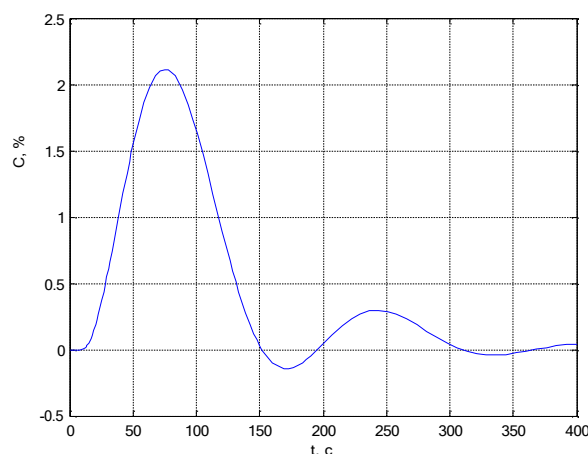


Рисунок 3.7 – Перехідна характеристика САК із ПІД-регулятором, при стрибкоподібному закритті регулюючого клапана подачі гріючої пари на 30%

З графіку визначаємо показники якості перехідного процесу:

– коефіцієнт зникання  $\psi = 0,86$ ;

									Арк.
									41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ				

- час регулювання  $t_p$  – 271 секунд;
- максимальне динамічне відхилення  $x_{\max}$  – 2,11 %.

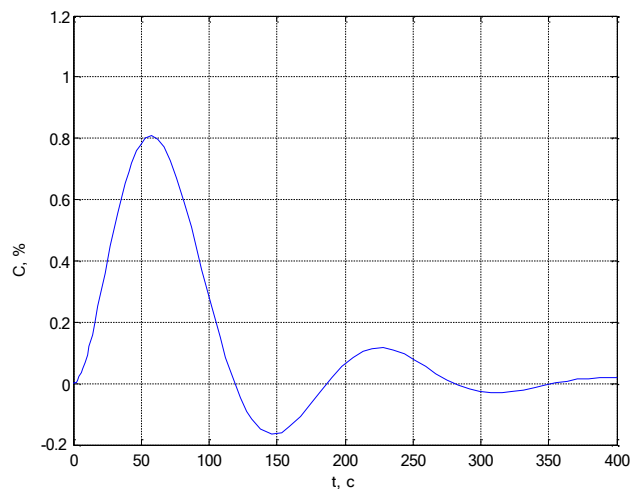


Рисунок 3.8 – Графік перехідного процесу САР із ПІД-регулятором, при стрибкоподібній зміні концентрації розчину на вході у випарник на 2%

З графіку визначаємо показники якості перехідного процесу:

- максимальне динамічне відхилення  $A = 0,81\%$ ;
- час регулювання  $t_p = 105$  с;
- коефіцієнт зникання  $\psi = 0,85$ ;

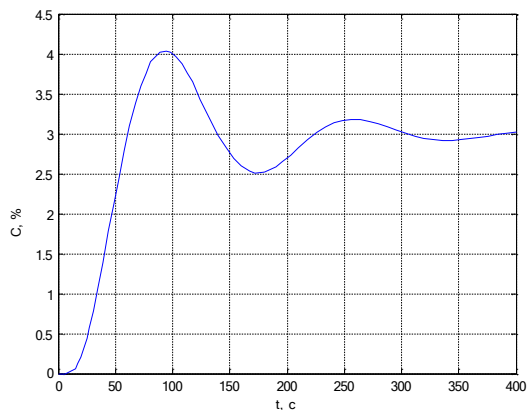


Рисунок. 3.9 – Графік перехідного процесу САР із ПІД-регулятором при зміні заданого значення концентрації на 3%

З графіку визначаємо показники перехідного процесу:

- коефіцієнт зникання  $\psi = 0,82$ ;
- максимальне динамічне відхилення  $A = 1,04\%$ ;
- час регулювання  $t_p = 208$  с.

## Висновки до розділу

У цьому розділі бакалаврської роботи на основі експериментальної кривої розгону концентрації каустичної соди в сепараторі випарника, отриманої шляхом зміни положення регулюючого клапана подачі гріючої пари на 30%, визначено функцію передачі об'єкта регулювання:

$$W(p) = \frac{0.2e^{-10}}{(38.4913p + 1)^2}$$

Оскільки приведена похибка апроксимації кривої розгону становить  $\delta = 2,72\%$ , отриману математичну модель вважаємо адекватною. На її основі, методом розширених частотних характеристик, визначено оптимальні параметри налаштування автоматичного регулятора, які забезпечують мінімум другої інтегральної оцінки перехідного процесу за регулюючою дією.

Функція передачі ПІД-регулятора з оптимальними параметрами настроювання має вигляд:

$$W_{ap}(p) = 11.67 + \frac{0.1689}{p} + 20p.$$

Дослідження системи автоматичного регулювання (САР) концентрації каустичної соди виконано за трьома типами впливів:

- регулююча дія у вигляді стрибкоподібної зміни положення регулюючого органу (РО) на лінії подачі гріючої пари на 30%,
- збурююча дія у вигляді стрибкоподібної зміни концентрації на вході в випарник на 2%,
- керуюча дія у вигляді стрибкоподібної зміни заданого значення концентрації на 3%.

Результати досліджень наведені в таблиці 3.2.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 – Показники якості

Показники якості	Допустиме значення	Регулююча дія	Збурююча дія	Керуюча дія
Максимальне динамічне відхилення	3%	2,11%	1.81	1.04%
Час регулювання	300 с.	271 с.	246	208

З аналізу даних таблиці 3.2 можна зробити висновок, що досліджувана система з автоматичним пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором відповідає вимогам щодо якості регулювання.

## 4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### 4.1 Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації

У якості основного елемента системи автоматичного керування обрано програмований логічний контролер **\*\*SIEMENS SIMATIC S7-317-2DP\*\***, який повністю задовольняє вимоги щодо надійності та обчислювальної потужності для обробки заданого обсягу інформаційних та керуючих сигналів.

Програмовані логічні контролери (ПЛК) — це цифрові пристрої, що працюють у режимі реального часу й призначені для автоматизації промислових процесів. Вони забезпечують безперервне зчитування даних із сенсорів, обробку інформації згідно із закладеним алгоритмом та формування команд на виконавчі пристрої.

Особливістю моделі **\*\*S7-314-2DP\*\*** є відсутність фіксованої конфігурації входів/виходів, оскільки модулі введення-виведення інтегровані безпосередньо до корпусу процесорного модуля. На рисунку 4.1 зображено основні складові ПЛК серії S7-300. Контролер виконує цикл: зчитує сигнали з підключених пристроїв, обробляє їх відповідно до програми, збереженої в центральному процесорі (CPU), і генерує керуючі дії на своїх виходах для впливу на об'єкти керування.

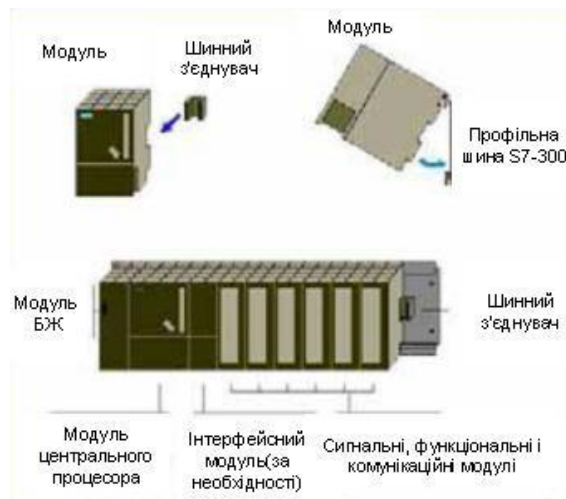


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд SIMATIC S7-300

Завантажувальна пам'ять використовується для збереження програми користувача без символів і коментарів. Є можливість виконання у вигляді RAM або FLASH EPROM.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робоча пам'ять (вбудована RAM) зберігає ту частину програми, яка необхідна для її виконання. Програма виконується виключно в цій пам'яті.

Область вводу-виводу забезпечує прямий доступ до відповідних модулів вводу та виводу.

Системна пам'ять (RAM) містить області для відображення вхідних та вихідних процесів, маркери, таймери, лічильники, а також локальні стеки (блоків, переривань).

#### Робочі режими ПЛК SIMATIC S7-300

1. Одиночний режим — використовується для побудови автономної системи керування, яка функціонує з визначеним набором модулів вводу/виводу або додатковими модулями типу A120.

2. Головний режим — забезпечує керування декількома ПЛК через комунікаційну лінію, дозволяючи отримувати доступ до вводу/виводу інших контролерів.

3. Підлеглий режим — передбачає роботу ПЛК як вторинного пристрою в мережі, що дозволяє головному контролеру керувати його модулями вводу/виводу.

#### Конфігурація модулів введення/виведення

Для реалізації автоматизованої системи керування процесом доконцентрації каустичної соди, відповідно до спрощеної функціональної схеми, передбачено використання наступної кількості каналів: Аналогові входи — 9; Аналогові виходи — 9; Дискретні входи — 1; Дискретні виходи — 13.

З урахуванням цих вимог було обрано таку апаратну конфігурацію:

Центральний процесор CPU 314C-2DP\*\* (6ES7 314-6CF00-0AB0): має вбудовані 5 аналогових входів, 2 аналогові виходи, 24 дискретних входи та 16 дискретних виходів.

Модуль аналогових входів SM 331\*\* (6ES7 331-7KF00-0AB0): надає додаткові 8 аналогових входів для забезпечення повного охоплення вимірювальних сигналів.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– модуль аналогових виходів SM 332 (6ES7 332-5HF00-0AB0): 8 аналогових виходів.

Даний модуль передбачає 8 аналогових виходів.

Slot	Module	Order number	Firmware	MPI address	I address	Q address
1	PS 307 2A	6ES7 307-1BA00-0AA0				
2	<b>CPU 314C-2 DP</b>	<b>6ES7 314-6CF00-0AB0</b>	<b>V1.0</b>	<b>2</b>		
X2	DP				1023*	
2.2	DI24/DO16				0..2	0..1
2.3	AI5/AO2				10..19	10..13
2.4	Count				768..783	768..783
2.5	Position				784..799	784..799
3						
4	AI8x12Bit	6ES7 331-7KF00-0AB0			20...35	
5	AO8x12Bit	6ES7 332-5HF00-0AB0				14...29
6						

Рисунок 4.2 – Конфігурація CPU

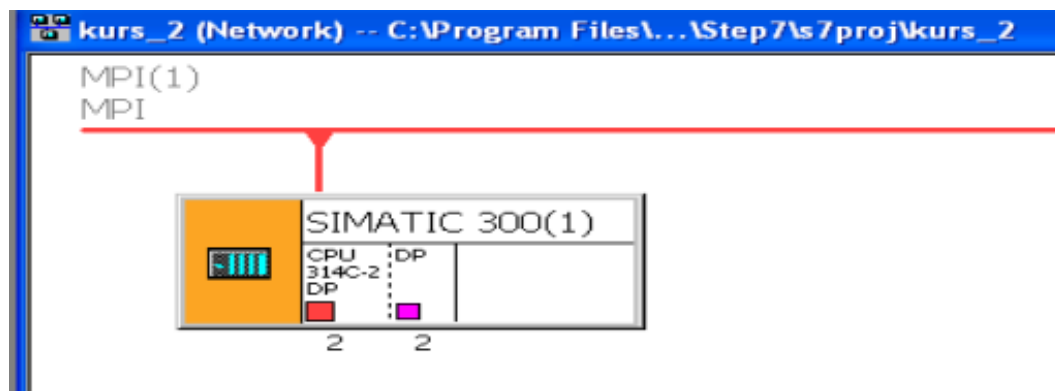


Рисунок 4.3 – Мережева конфігурація

У цьому підпункті також здійснено вибір давачів (сенсорів) та виконався підбір технічних засобів автоматизації для обраного контуру з метою реалізації заданих вимог до контролю параметрів та здійснення відповідного регулювання.

### Витратомір SITRANS FM MAG 3100:

1. Витратомір розроблений відповідно до основних вимог хімічної промисловості.
2. Має повністю зварну конструкцію, що забезпечує високу міцність і надійність при роботі в агресивних середовищах.
3. Оснащений електродами для екстремальних умов вимірювання.
4. Вихідний сигнал: 4 – 20 мА та підтримка протоколу HART для інтеграції в системи автоматизації.



Рисунок 4.4 – Вигляд витратоміра SITRANS FM MAG 3100

### Термометр опору SITRANS TH100:

1. Економічне рішення для вимірювання температури за допомогою термометрів опору Pt100.
2. Забезпечує надійні вимірювання при низьких експлуатаційних витратах.
3. Проста і швидка настройка за допомогою модему та програмного забезпечення SIPROM T.
4. Конфігураційне програмне забезпечення доступне безкоштовно.

### Електропневматичний позиціонер SAMSON тип 3767:

1. Складається з електропневматичного перетворювача сигналу (I/p перетворювач) та пневматичної системи управління.
2. Оснащений важелем, який відслідковує переміщення, вимірювальною мембраною та пневматичною системою управління, включаючи сопло і відбивну систему.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Діапазон ходу заслінки:

Кут повороту: від 30° до 120° (залежить від кулачкового диска).

Монтаж за стандартом DIN IEC 60534-6: 7,5 – 120 мм.

Прямий монтаж: 7,5 – 30 мм;

Вхідний сигнал:

Розширений інтервал: – 8 ... 20 мА;

Опір котушки при 20°C: 200 Ом.

Стандартний діапазон: 4 (9) ... 20 мА;

Керуючий тиск (Pst): можливість обмеження між 2,5 ... 6,0 бар (38 ... 90 psi).

Позиціонер управляє заслінкою через підсилювач.



Рисунок 4.5 – Вигляд позиціонера SAMSON тип 3767

#### 4.2 Опис функціональної схеми автоматизації

На основі підібраних засобів технічної автоматизації (див. Додаток А) розробляємо загальну функціональну схему автоматизації (ФСА) процесу концентрації каустичної соди. Ця схема є важливою частиною дипломного проекту та входить до складу технічної документації, яка розробляється на всіх етапах проектування.

Розгорнута ФСА процесу полімеризації етилену, яка наведена на аркуші формату А1 (див. аркуш 1), є графічною частиною курсової роботи.

Схему автоматизації допускається суміщати зі схемою з'єднань (монтажною), яка виконується в складі основного комплексу документації, або з іншими схемами інженерних систем.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

*Виконання функціональних схем.* Функціональна схема автоматизації – це основний проєктний документ, що визначає структуру і рівень автоматизації технологічного процесу об'єкта.

На ФСА за допомогою умовних графічних позначень відображають:

- технологічне обладнання;
- комунікації;
- органи керування;
- прилади і засоби автоматизації;
- зв'язки між ними;
- таблиці умовних позначень та пояснення.

На основі ФСА розробляють всі інші схеми проєкту.

ФСА відображає основні технічні рівняння та рішення, що приймаються під час проєктування систем автоматизації технологічних процесів. Вона визначає структуру і рівень оснащення об'єкта засобами обчислювальної техніки та автоматизації.

На схемі показуються лінії функціонального зв'язку між обладнанням та засобами автоматизації відповідно до їх ролі у системі.

*Опис контурів регулювання.*

Контур регулювання витрати розчину NaOH на вході в перший випарник  
Витрату вимірює електромагнітний витратомір (поз. 1-1), який подає вихідний сигнал 4 – 20 мА на контролер. Контролер формує вихідний аналоговий сигнал і подає його на електропневматичний позиціонер (поз. 1-2). Через пневматичний виконавчий механізм (поз. 1-3) і регулюючий клапан (поз. 1 – 4) відбувається байпасування і регулювання витрати.

Контур регулювання витрати розчину NaOH на вході в другий випарник  
Вимірювання здійснюється електромагнітним витратоміром (поз. 2-1). Сигнали обробляються контролером і подаються на позиціонер (поз. 2-2), виконавчий механізм (поз. 2-3) та регулюючий клапан (поз. 2-4) для коригування витрати.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контур регулювання витрати розчину NaOH на вході в третій випарник  
Аналогічно попереднім контурам: витратомір (поз. 3-1), контролер, позиціонер (поз. 3-2), виконавчий механізм (поз. 3-3) та клапан (поз. 3-4).

Контур регулювання рівня розчину в першому випарнику

Рівень вимірюється буйковим рівнеміром (поз. 4-1), сигнал 4 – 20 мА надходить на контролер. Контролер керує позиціонером (поз. 4-2), виконавчим механізмом (поз. 4-3) та регулюючим клапаном (поз. 4-4), що змінює витрату на виході випарника.

Дискретні виходи контролера подають сигнали на лампи сигналізації перевищення максимального та мінімального рівня.

Контур регулювання рівня розчину в другому випарнику

Вимірювання та регулювання аналогічні першому випарнику (поз. 5-1 ... 5-4).

Контур регулювання рівня розчину в третьому випарнику

Аналогічна система (поз. 6-1 ... 6-4). Дискретний вихід подає сигнал на лампочку перевищення максимального рівня.

Контур регулювання рівня в ємності для збору конденсату

Вимір рівня буйковим рівнеміром (поз. 7-1), керування позиціонером (поз. 7-2), виконавчим механізмом (поз. 7-3) та клапаном (поз. 7-4). Сигнали аварійної сигналізації від контролера подаються на лампи.

Контур регулювання температури в сепараторі третього випарника

Температуру вимірюють термометри опору (поз. 8-1, 8-2), сигнал подається на контролер. Контролер керує позиціонером (поз. 8-3), виконавчим механізмом (поз. 8-4) і регулюючим клапаном (поз. 8-5), які змінюють витрату пари.

З дискретних виходів контролера подаються сигнали аварійної сигналізації за максимальним і мінімальним значенням температури.

Контур регулювання температури розчину на виході з установки

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Температура вимірюється термометром опору (поз. 9-1). Контролер формує сигнал для позиціонера (поз. 9-2), виконавчого механізму (поз. 9-3) і регулюючого клапана (поз. 9-4), що регулює витрату охолоджуючої води.

Захист системи при мінімальній температурі гріючої пари

Сигнал з манометричного термометра (поз. 10-1) надходить на аналоговий вхід контролера. Контролер формує два дискретних вихідних сигнали, які подаються на електропневматичні перетворювачі (поз. 10-2, 10-4), а потім на відсічні клапани (поз. 10-3, 10-5), блокуючи подачу розчину та пари.

Дискретне керування електродвигунами

Дискретні виходи контролера подають сигнали на безконтактні пускачі (поз. 11-1, 11-3, 11-5), які комутують силові кола електродвигунів.

### **Висновки до розділу**

У результаті виконаного проектування функціональної схеми автоматизації (ФСА) процесу концентрації каустичної соди було визначено структуру та рівень автоматизації технологічного процесу. На основі вибраних засобів технічної автоматизації було розроблено інтегровану систему контролю та регулювання основних параметрів — витрати, рівня та температури розчину на різних етапах випарної установки.

Запропоновані контури регулювання забезпечують точне вимірювання параметрів за допомогою електромагнітних витратомірів, буйкових рівнемірів та термометрів опору, а також оперативне керування виконавчими механізмами через електропневматичні позиціонери та регулюючі клапани.

Впровадження дискретного керування електродвигунами і захисних механізмів гарантує надійність роботи системи та безпеку технологічного процесу. Загальна ФСА сприяє підвищенню ефективності, стабільності та безпеки роботи установки, що є важливим кроком для подальшої автоматизації виробництва.

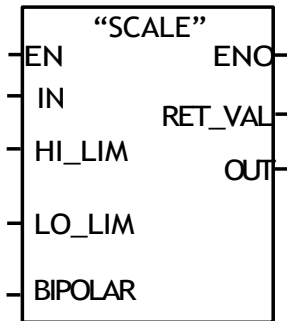
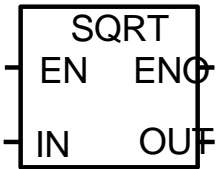
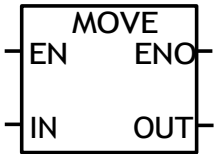
					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

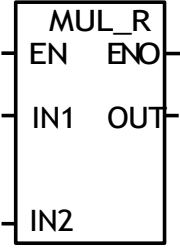
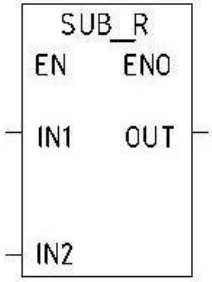
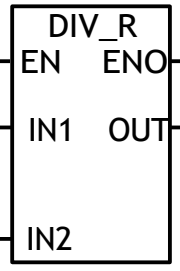
## 5 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ

### 5.1 Розробка програми функціонування для мікропроцесорного контролера Siemens Simatic S7-300

Програма для системи керування процесом доконцентрації каустичної соди, створена за допомогою пакету програмного забезпечення SIMATIC Step 7.

Таблиця 5.1 – Блоки, які використовуються у програмі

Назва блоку 1	Опис 2
<p>Блок масштабування</p> 	<p>IN (INT) – вхідне значення  HI_LIM (REAL) – верхня границя масштабування  LO_LIM (REAL) – нижня границя масштабування  BIPOLAR (BOOL) – вхідний діапазон:  «1» – від -27648 до 27648 (0-10 В)  «0» – від 0 до 27648 (4-20 мА)  RET_VAL (INT) – результат успішності масштабування:  1) «16#0» – успішно 2) «16#8» – не в діапазоні  OUT (REAL) – вихідне значення</p>
<p>Блок операції взяття квадратного кореня</p> 	<p>IN – вхідне значення  OUT – вихідне значення</p>
<p>Блок присвоєння</p> 	<p>IN – початкове значення  OUT – адреса призначення</p>

1	2
<p>Блок операції множення</p> 	<p>IN1 (REAL) – вхідне значення (перший множник)                      IN2 (REAL) – вхідне значення (другий множник)                      OUT (REAL) – вихідне значення</p>
<p>Блок операції віднімання</p> 	<p>IN1 (REAL) – вхідне значення (від якого віднімаємо)                      IN2 (REAL) – вхідне значення (яке віднімаємо від IN1)                      OUT (REAL) – вихідне значення</p>
<p>Блок операції ділення</p> 	<p>IN1 (REAL) – вхідне значення (ділене)                      IN2 (REAL) – вхідне значення (дільник)                      OUT (REAL) – вихідне значення</p>

1	2																																																								
<p style="text-align: center;">Аналоговий ПІД-регулятор</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">"CONT_C"</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>EN</td><td>ENO</td></tr> <tr><td>COM_RST</td><td>LMN</td></tr> <tr><td>MAN_ON</td><td>LMN_PER</td></tr> <tr><td>PVPER_ON</td><td>QLMN_HLM</td></tr> <tr><td>P_SEL</td><td>QLMN_LLM</td></tr> <tr><td>I_SEL</td><td>LMN_P</td></tr> <tr><td>INT_HOLD</td><td>LMN_I</td></tr> <tr><td>I_ITL_ON</td><td>LMN_D</td></tr> <tr><td>D_SEL</td><td>PV</td></tr> <tr><td>CYCLE</td><td>ER</td></tr> <tr><td>SP_INT</td><td></td></tr> <tr><td>PV_IN</td><td></td></tr> <tr><td>PV_PER</td><td></td></tr> <tr><td>MAN</td><td></td></tr> <tr><td>GAIN</td><td></td></tr> <tr><td>TI</td><td></td></tr> <tr><td>TD</td><td></td></tr> <tr><td>TM_LAG</td><td></td></tr> <tr><td>DEADB_W</td><td></td></tr> <tr><td>LMN_HLM</td><td></td></tr> <tr><td>LMN_LLM</td><td></td></tr> <tr><td>PV_FAC</td><td></td></tr> <tr><td>PV_OFF</td><td></td></tr> <tr><td>LMN_FAC</td><td></td></tr> <tr><td>LMN_OFF</td><td></td></tr> <tr><td>I_ITLVAL</td><td></td></tr> <tr><td>DISV</td><td></td></tr> </tbody> </table>	"CONT_C"		EN	ENO	COM_RST	LMN	MAN_ON	LMN_PER	PVPER_ON	QLMN_HLM	P_SEL	QLMN_LLM	I_SEL	LMN_P	INT_HOLD	LMN_I	I_ITL_ON	LMN_D	D_SEL	PV	CYCLE	ER	SP_INT		PV_IN		PV_PER		MAN		GAIN		TI		TD		TM_LAG		DEADB_W		LMN_HLM		LMN_LLM		PV_FAC		PV_OFF		LMN_FAC		LMN_OFF		I_ITLVAL		DISV		<p>COM_RST (BOOL) – рестарт регулятора</p> <p>MAN_ON (BOOL) – включення ручного режиму (за замовчуванням «1»)</p> <p>P_SEL – активація або деактивація пропорційної складової.</p> <p>I_SEL - активація або деактивація інтегральної складової.</p> <p>D_SEL - активація або деактивація диференційної складової.</p> <p>SP_INT (REAL) – внутрішнє завдання регулятора (за замовчуванням «0.0»)</p> <p>PV_IN (REAL) – регульована величина (за замовчуванням «0.0»)</p> <p>MAN (REAL) – регулююча дія в ручному режимі (за замовчуванням «0.0»)</p> <p>PVPER_IN – використання периферійного входу. TI – час інтегрування. TD – час диференціювання.</p> <p>PV_FAC – коефіцієнт масштабування.</p> <p>LMN_HLM (REAL) – верхня границя вихідного сигналу</p> <p>LMN_LLM (REAL) – нижня границя вихідного сигналу</p> <p>PV_FAC – коефіцієнт масштабування.</p> <p>PV_OFF – зсув</p> <p>LMN_OFF (REAL) – коефіцієнт корекції вхідної змінної</p> <p>I_ITLVAL (REAL) – початкове значення інтегральної складової</p> <p>DISV (REAL) – збурення</p> <p>LMN_PER (WORD) – регулююча дія у форматі периферії (за замовчуванням «W#16#0000»)</p> <p>LMN (REAL) – регулююча дія (за замовчуванням «0.0»)</p> <p>QLMN_HLM (BOOL) – верхня границя</p> <p>LMN_P (REAL) – пропорційна складова</p> <p>QLMN_LLM (BOOL) – нижня границя</p> <p>LMN_I (REAL) – інтегральна складова</p> <p>ER (REAL) – сигнал розузгодження</p> <p>LMN_D (REAL) – диференційна складова</p> <p>PV (REAL) – оброблений вхідний сигнал</p>
"CONT_C"																																																									
EN	ENO																																																								
COM_RST	LMN																																																								
MAN_ON	LMN_PER																																																								
PVPER_ON	QLMN_HLM																																																								
P_SEL	QLMN_LLM																																																								
I_SEL	LMN_P																																																								
INT_HOLD	LMN_I																																																								
I_ITL_ON	LMN_D																																																								
D_SEL	PV																																																								
CYCLE	ER																																																								
SP_INT																																																									
PV_IN																																																									
PV_PER																																																									
MAN																																																									
GAIN																																																									
TI																																																									
TD																																																									
TM_LAG																																																									
DEADB_W																																																									
LMN_HLM																																																									
LMN_LLM																																																									
PV_FAC																																																									
PV_OFF																																																									
LMN_FAC																																																									
LMN_OFF																																																									
I_ITLVAL																																																									
DISV																																																									

На базі мікропроцесорного контролера Siemens Simatic S7-300 реалізовано програмне керування такими контурами регулювання:

Контур регулювання подачі розчину NaOH у перший випарник

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55



Контур автоматичного регулювання подачі розчину NaOH до другого випарника

Значення сигналу, що надходить від витратоміра, спочатку перетворюється у відповідні одиниці вимірювання за допомогою функціонального блоку "SCALE". Далі цей сигнал, що відображає фактичну витрату на вході до другого випарника, подається на вхід PV\_IN ПІД-регулятора "CONT\_C", де відбувається його порівняння з внутрішнім заданим значенням SP\_INT. Для забезпечення плавного перемикання між автоматичним і ручним режимами використовується блок "MOVE", що виключає різкі зміни в системі. Керуючий сигнал з виходу LMN\_PER передається на виконавчий механізм, який шляхом зміни положення регулюючого клапана змінює об'єм подачі розчину через байпасний трубопровід.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

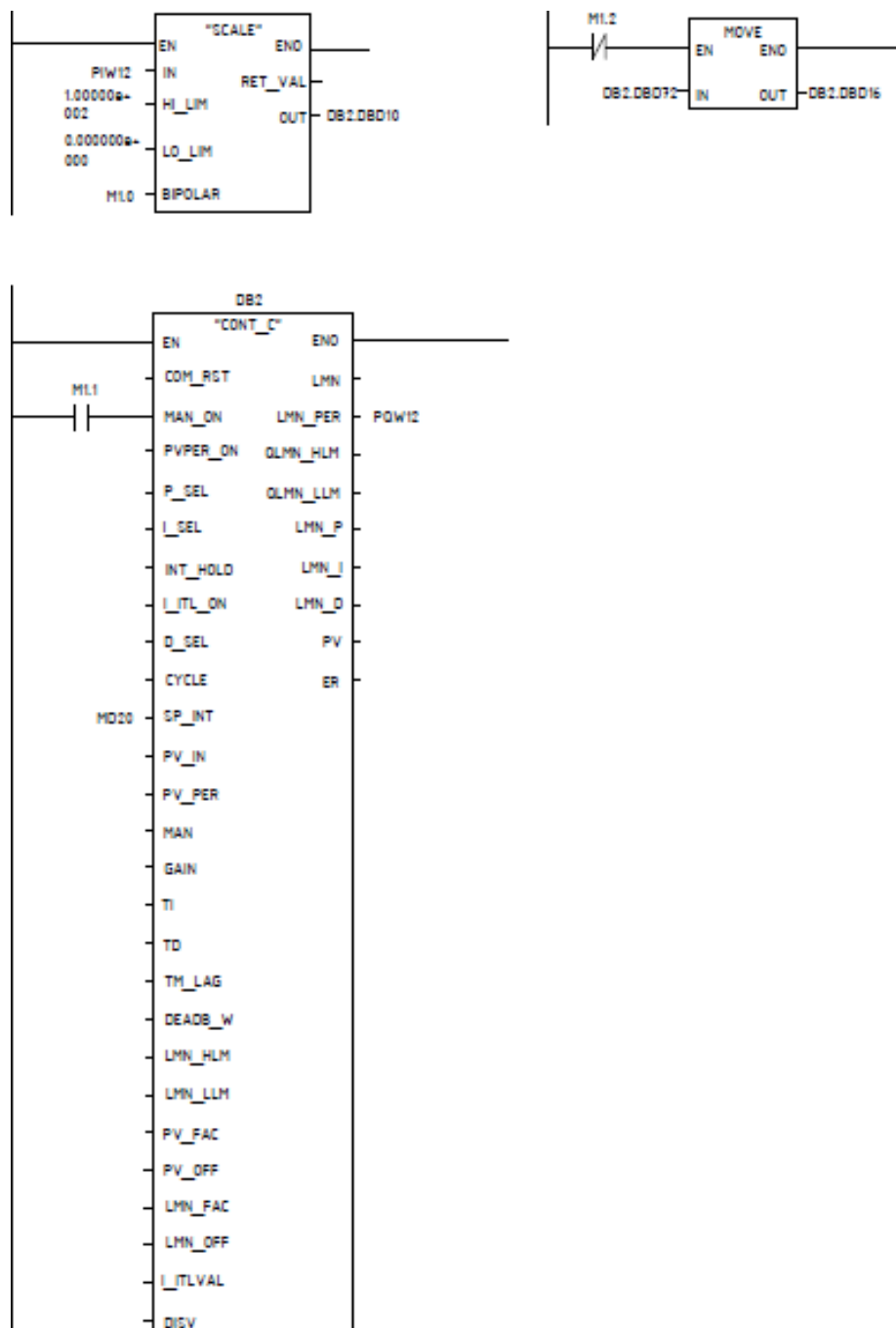


Рисунок 5.2 – Контур регулювання витрати на вході в другий випарник

Контур автоматичного регулювання подачі розчину NaOH до третього випарника

Сигнал, зчитаний електромагнітним витратоміром, спочатку обробляється в блоці “SCALE”, де він перетворюється у масштабоване значення, відповідне реальній витраті. Отримане значення надходить на вхід PV\_IN функціонального блоку ПІД-регулятора “CONT\_C”, де відбувається його порівняння з внутрішньо заданою уставкою SP\_INT. Перемикання між автоматичним та ручним

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керуванням здійснюється плавно, без стрибків, завдяки застосуванню блоку "MOVE". Сформований вихідний сигнал LMN\_PER передається на електропневматичний привід, який, змінюючи положення регулюючого клапана, керує подачею розчину по байпасній лінії.

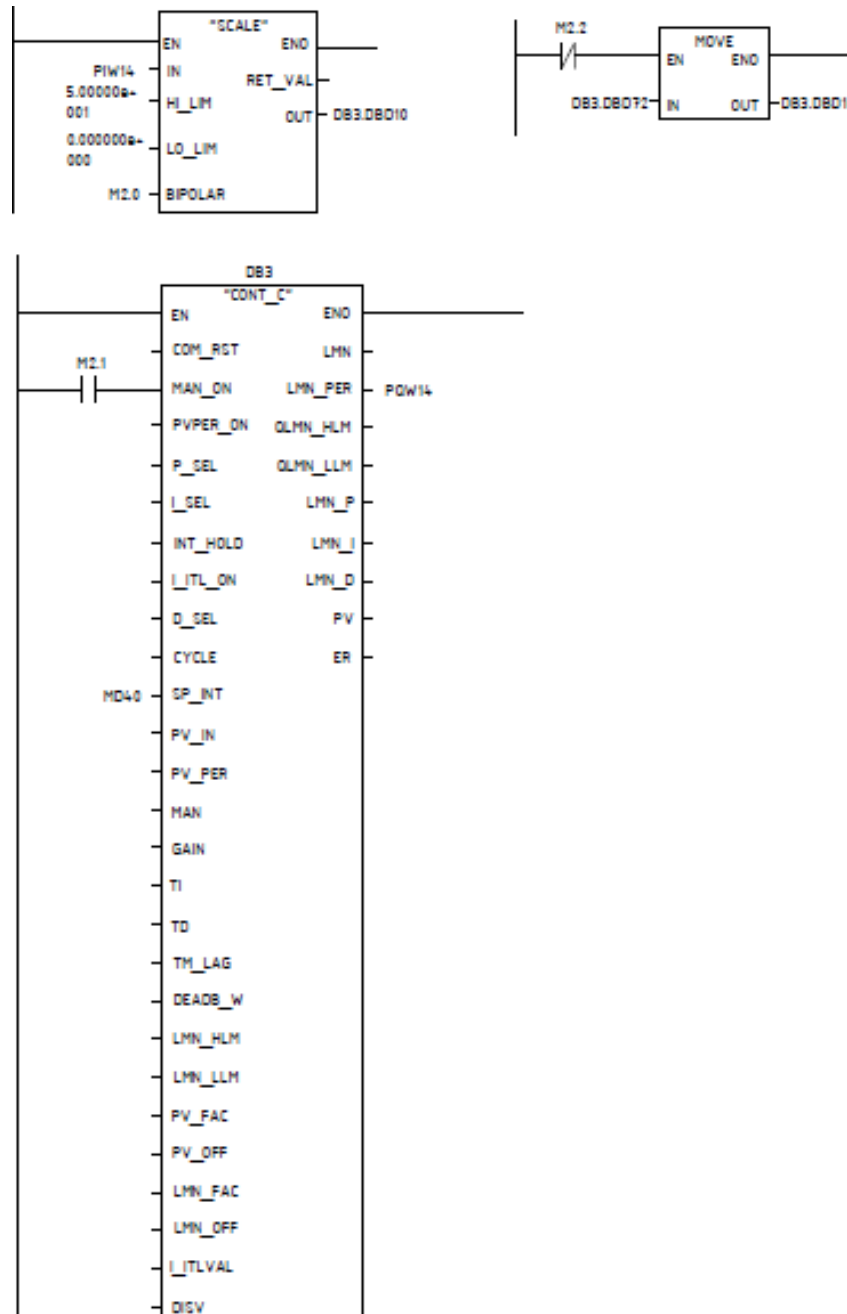


Рисунок 5.3 – Контур регулювання витрати на вході в третій випарник

Контур стабілізації рівня та аварійної сигналізації в сепараторі першого ступеня випарювання

Інформація про рівень рідини, отримана з буйкового рівнеміра, масштабовується через блок “SCALE” для приведення до стандартного інженерного діапазону. Далі значення передається на вхід регулятора “CONT\_C”, де здійснюється порівняння з заданою уставкою. Плавне перемикання між режимами керування (ручним та автоматичним) забезпечується функціональним блоком “MOVE”, який запобігає різким переходам. Вихід регулятора LMN\_PER подається на пневматичний виконавчий механізм, що керує положенням клапана, змінюючи витрату розчину на виході з сепаратора.

Для реалізації аварійної сигналізації по критичним рівням використано чотири блоки порівняння: два “CMP<=R” — для контролю нижньої межі, та два “CMP>=R” — для виявлення перевищення верхнього допустимого рівня. Передбачено "мертву зону" нечутливості  $\pm 1\%$ , що дозволяє уникнути хибних спрацювань через короткочасні коливання рівня.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Формований регулятором керуючий сигнал з виходу LMN\_PER подається на електропневматичний привід, який змінює ступінь відкриття регулюючого клапану. Таким чином, здійснюється контроль витрати розчину на виході з сепаратора, забезпечуючи стабільне підтримання рівня в межах допустимих значень.

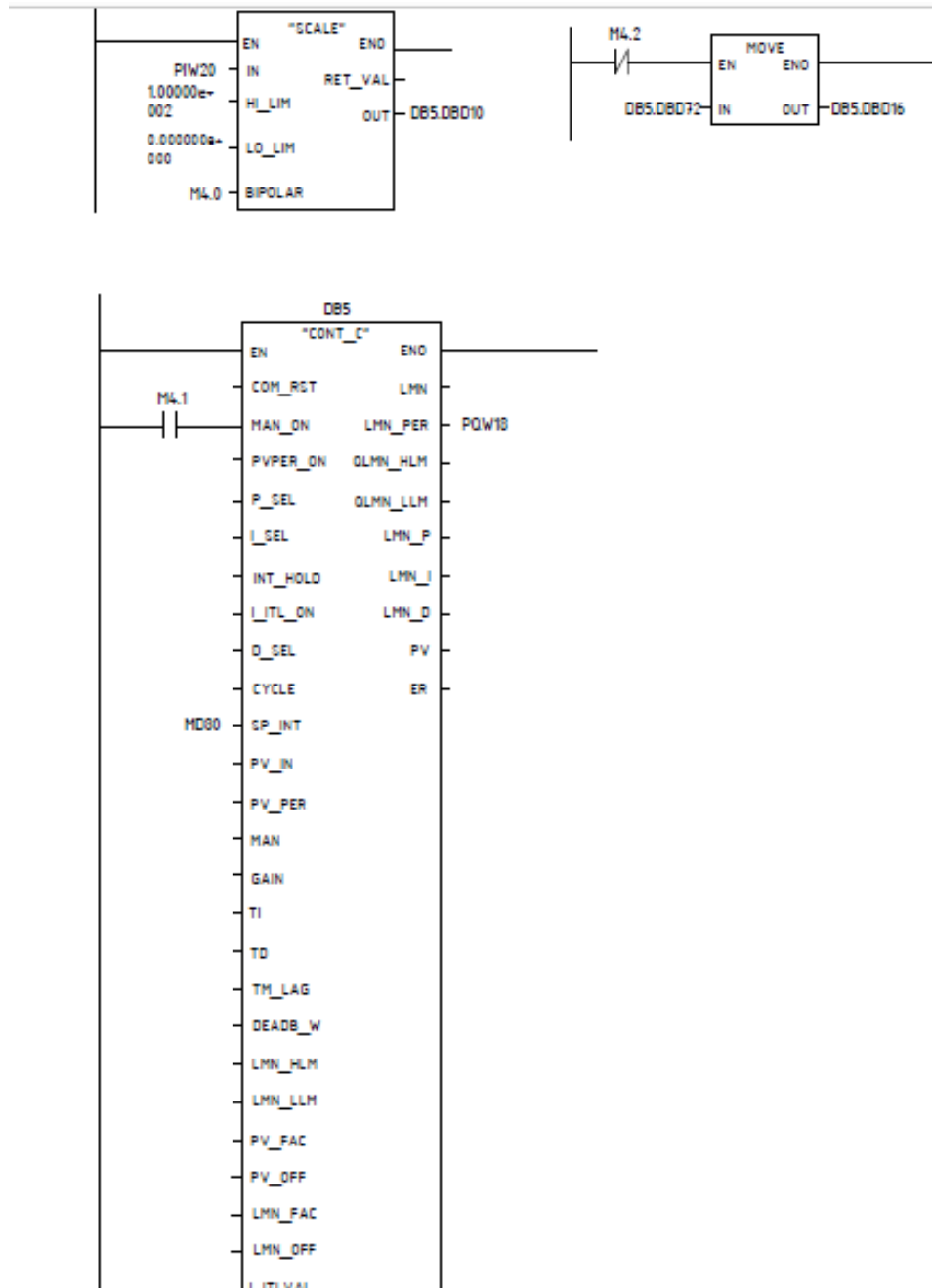


Рисунок 5.5 – Контур регулювання рівня в сепараторі другого випарника

Контур автоматичного регулювання рівня та сигналізації у сепараторі третього випарника

Інформація про поточний рівень розчину надходить з датчика рівня і проходить масштабування у функціональному блоці “SCALE”, після чого нормалізований сигнал передається на вхід PV\_IN ПІД-регулятора “CONT\_C”. У цьому блоці виконується порівняння фактичного рівня з внутрішньо заданим значенням SP\_INT, що забезпечує підтримання рівня в заданому діапазоні.

Для забезпечення плавного перемикання між режимами керування (ручним та автоматичним), використовується блок “MOVE”, що виключає появу переходних збурень у регуляторі. Вихідний сигнал регулятора LMN\_PER подається на виконавчий пристрій, який змінює положення регулюючого клапана, відповідно змінюючи витрату розчину на виході із сепаратора.

Додатково, для забезпечення аварійної сигналізації, застосовуються два блоки порівняння “CMP>=R”, які активують сигнал тривоги при перевищенні встановленого порогу верхнього рівня з урахуванням зони нечутливості  $\pm 1\%$ .

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

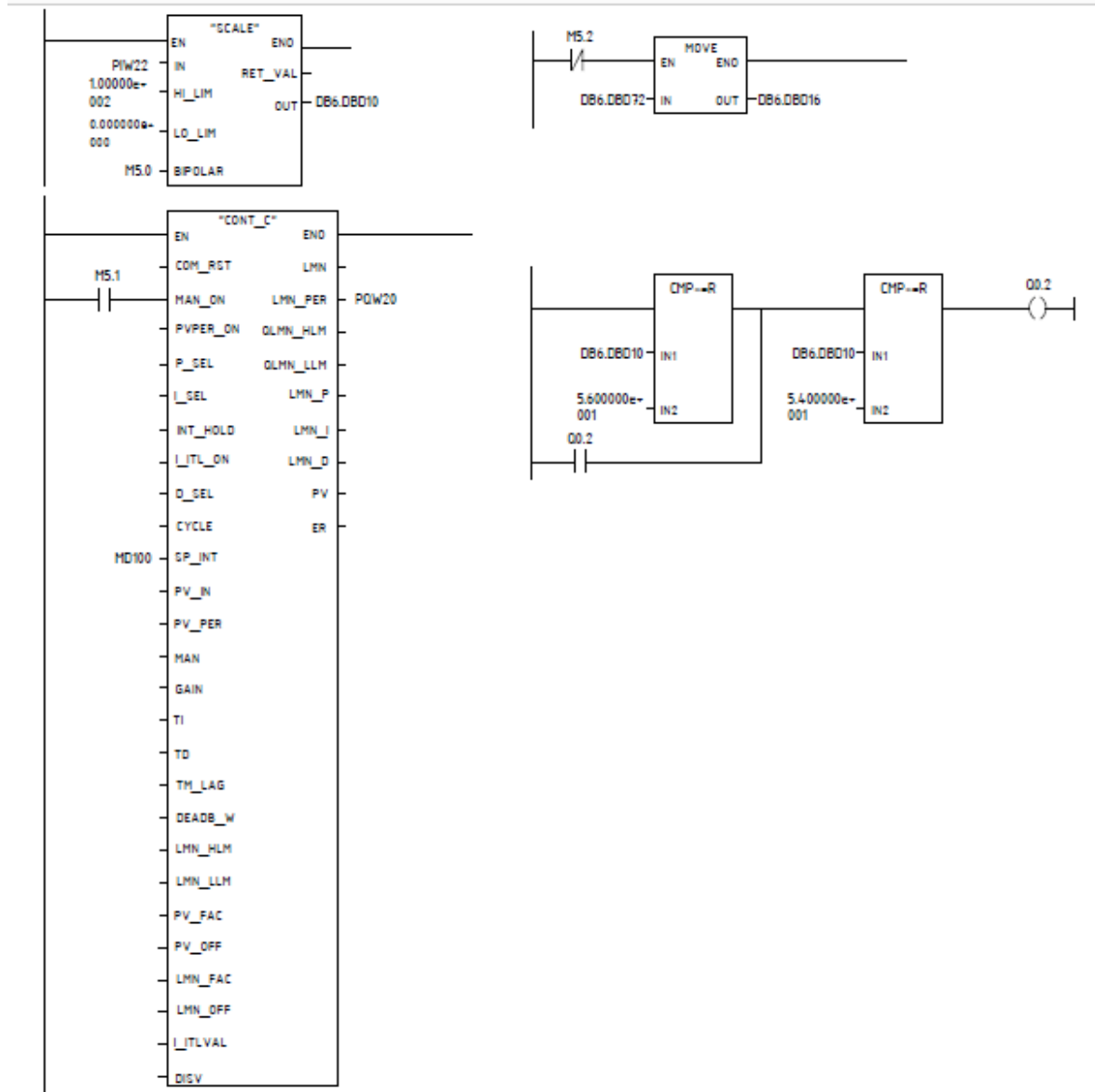


Рисунок 5.6 – Контур регулювання та сигналізація рівня в сепараторі третього випарника

Контур автоматичного керування рівнем у ємності збору конденсату та його сигналізація

Дані про рівень конденсату, отримані з рівнеміра, масштабуються через функціональний блок “SCALE”, після чого нормалізований сигнал надходить до входу PV\_IN регулюючого блоку “CONT\_C”. У ньому виконується порівняння поточного рівня з заданим значенням SP\_INT, що забезпечує підтримання рівня в оптимальних межах.

Для плавного переходу між автоматичним та ручним режимами керування використовується блок “MOVE”, який дозволяє уникнути різких змін в роботі системи. Вихідний сигнал з блоку регулятора LMN\_PER передається на виконавчий механізм, який регулює положення клапана на виході з ємності, змінюючи відповідно витрату конденсату.

Контроль перевищення критичних меж рівня реалізується за допомогою чотирьох логічних блоків порівняння: двох “CMP>=R” для сигналізації перевищення верхнього рівня та двох “CMP<=R” — для нижнього. При цьому враховується зона нечутливості  $\pm 1\%$ , що дозволяє уникнути помилкових спрацювань сигналізації.

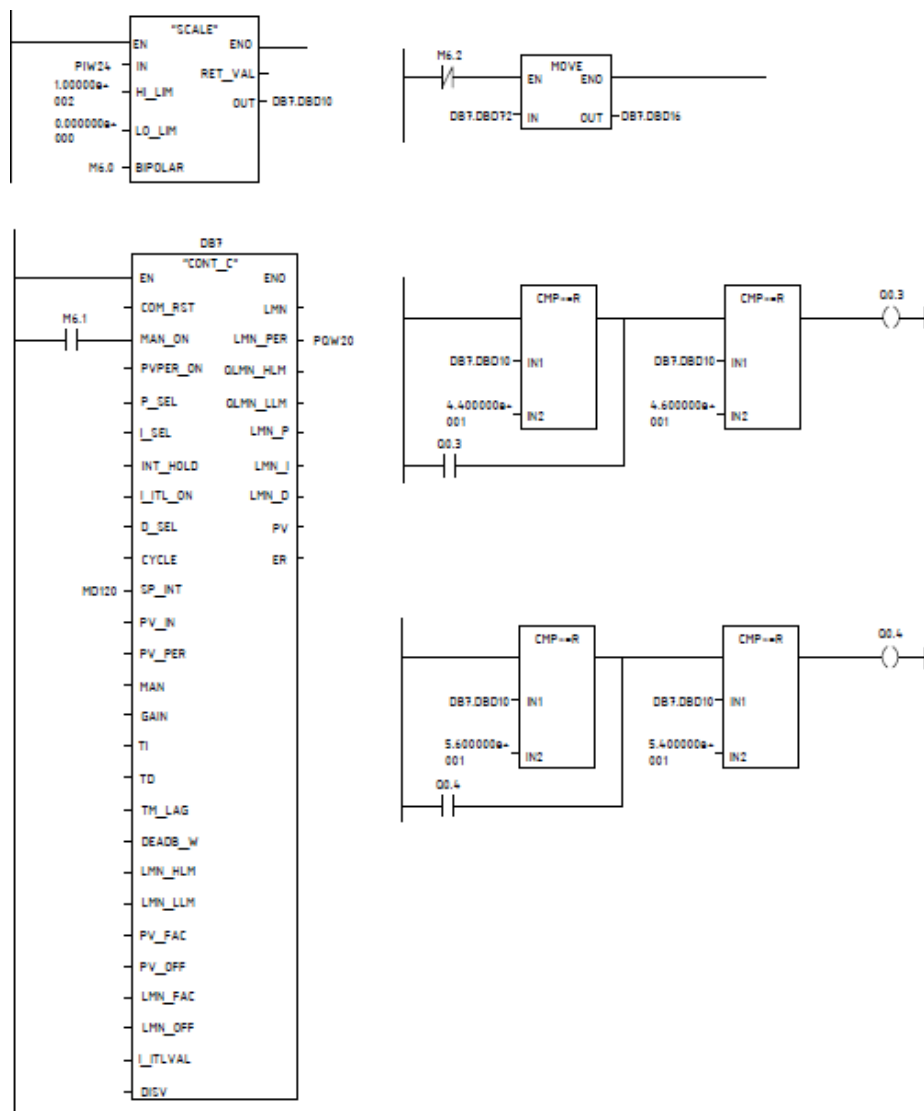


Рисунок 5.7 – Контур регулювання та сигналізація рівня в ємності для збору конденсату

Контур автоматичного регулювання концентрації розчину в третьому випарнику та система її сигналізації

Інформація про температуру в апараті надходить від термометра і проходить обробку в блоці "SCALE", де сигнал масштабується відповідно до заданих параметрів. Потім температура перераховується у значення концентрації за допомогою функціональної залежності. Отримане значення, що відповідає концентрації розчину, подається на вхід PV\_IN регулятора "CONT\_C", де здійснюється порівняння з внутрішньо заданим значенням SP\_INT.

Для забезпечення плавного перемикання між автоматичним і ручним режимами керування застосовується блок "MOVE", який виключає різкі зміни в дії регулятора. Результуючий сигнал з виходу LMN\_PER блоку ПІД-регулятора надходить на виконавчий пристрій, який змінює положення парового клапана, регулюючи подачу гріючої пари в третій випарник.

Крім того, система передбачає контроль допустимих меж концентрації розчину. Для цього використовуються чотири логічні блоки порівняння: два "CMP>=R" для верхньої межі та два "CMP<=R" для нижньої. Передбачена зона нечутливості  $\pm 1\%$  запобігає хибним спрацюванням сигналізації при незначних коливаннях.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

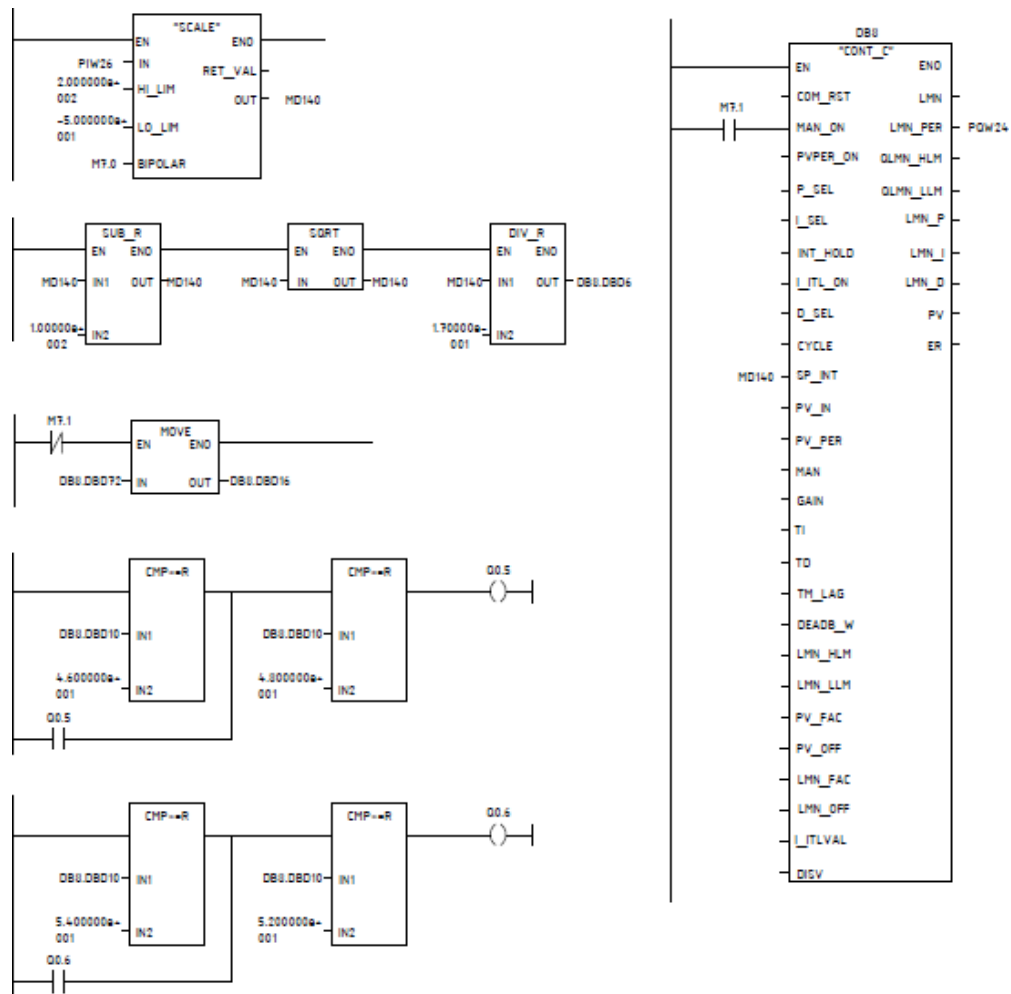


Рисунок 5.8 – Контур регулювання та сигналізація концентрації в третьому випарнику

Контур автоматичного регулювання температури розчину на виході установки

Сигнал від термометра спочатку проходить масштабування в блоці “SCALE”, після чого відкоригований сигнал, що відображає поточну температуру, подається на вхід ПІД-регулятора “CONT\_C”. Тут він порівнюється з заданим внутрішнім параметром регулювання. Для плавного перемикання між автоматичним і ручним режимами керування використовується блок “MOVE”, який забезпечує безударний перехід. Вихідний сигнал із ПІД-регулятора направляється на виконавчий механізм, який через клапан регулює витрату розчину на виході з установки.

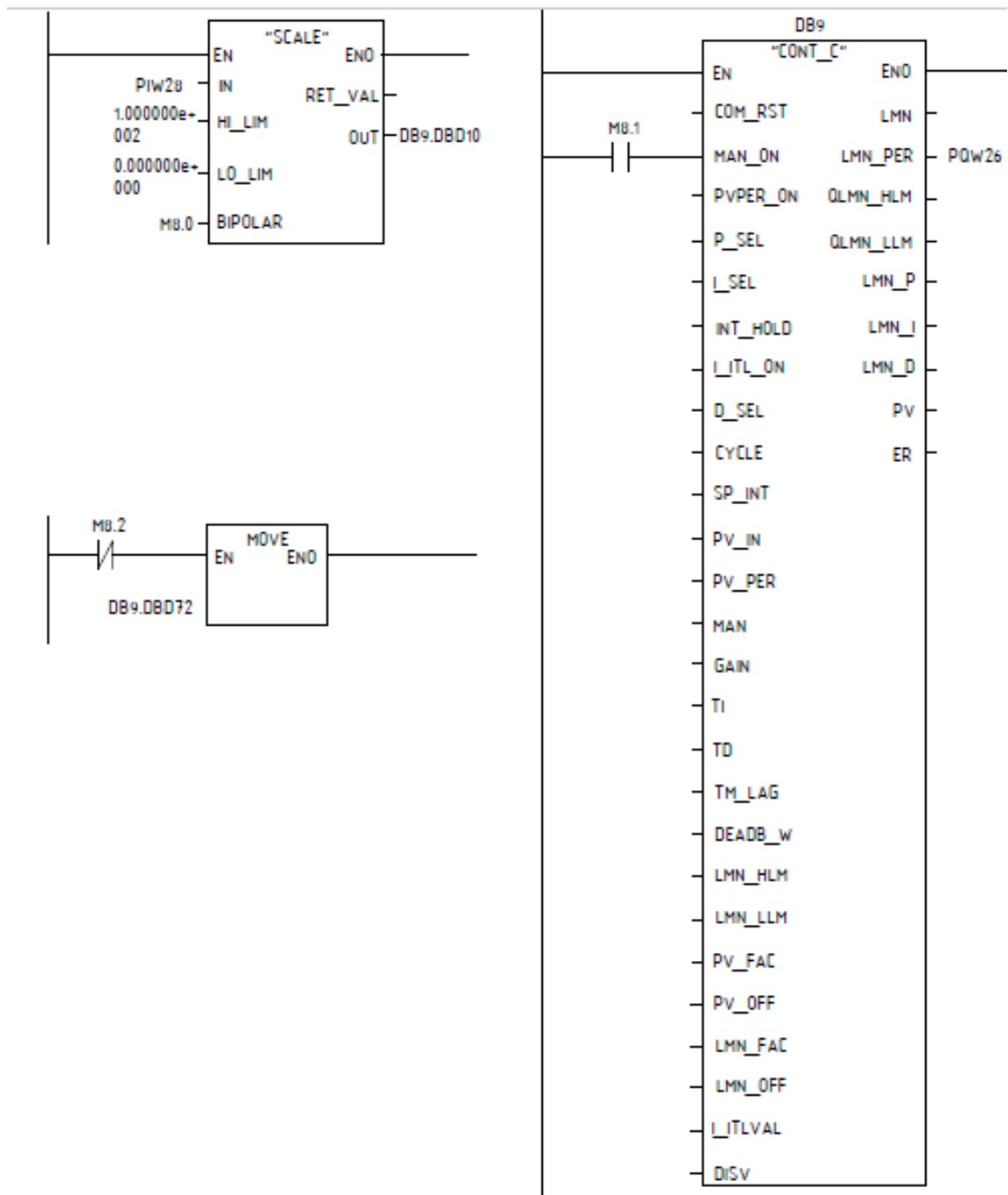


Рисунок 5.9 – Контур регулювання температури розчину на виході з установки *Контур захисту та блокування*. Сигнал від термометра спочатку проходить масштабування в блоці “SCALE”, після чого відкоригований сигнал, що відображає температуру гріючої пари, надходить на блок порівняння “CMP<=R”, де він порівнюється із заданим мінімальним допустимим значенням температури. Якщо температура падає нижче встановленого порогу, з дискретних виходів контролера (DO1.0 та DO1.1) формуються сигнали керування, які подаються на запірні клапани для перекриття подачі пари та





## Манометричний термометр Wika TGT73

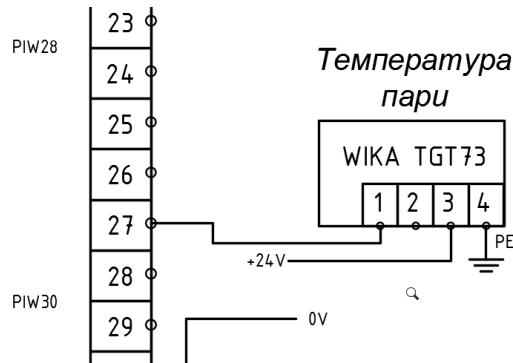


Рисунок 5.14 – Схема підключення манометричного термометра WIKА TGT73

### 2. Аналогові виходи:

Електропневматичний позиціонер Samson 3767;

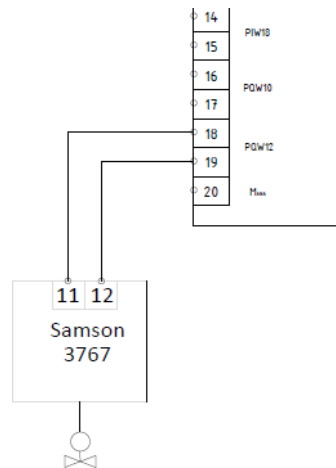


Рисунок 5.15 – Схема підключення електропневматичного позиціонера Samson 3767

### 3. Дискретні виходи:

Пневморозподільник BURKET 5470

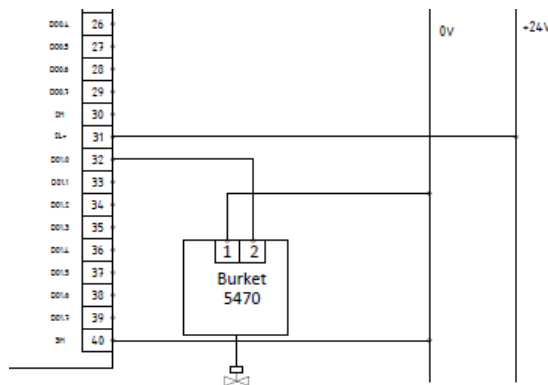


Рисунок 5.16 – Схема підключення пневморозподільника Burket 5470

### Контактор двигуна АВВ АF80

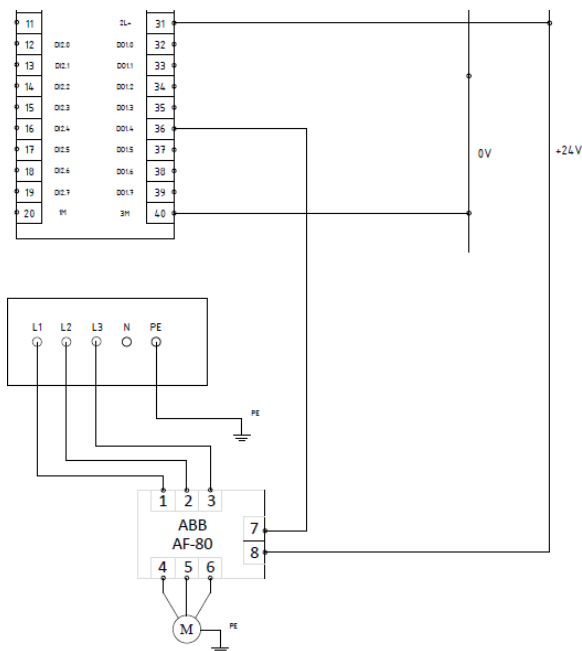


Рисунок 5.17 – Схема підключення контактора двигуна АВВ АF80

### Висновки до розділу

У цьому розділі бакалаврської роботи було розроблено програмне забезпечення для мікропроцесорного контролера Siemens Simatic S7-300, яке забезпечує ефективне управління усіма контурами регулювання технологічного процесу концентрації каустичної соди. Для кожного контуру регулювання реалізовано алгоритми, що включають масштабування вхідних сигналів, порівняння з внутрішніми завданнями за допомогою ПІД-регуляторів та плавний безударний перехід між автоматичним і ручним режимами роботи. Програма

забезпечує формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів, що регулюють положення клапанів, та реалізує функції сигналізації, включно з контролем граничних значень параметрів процесу.

Також у роботі було створено принципову електричну схему зовнішніх з'єднань контролера Siemens Simatic S7-300 з модулями розширення SM 331, SM 332 та блоком живлення PS 307 2A, яка представлена на аркуші формату A1. Схема включає підключення вимірювальних приладів — електромагнітних витратомірів, буйкових рівнемірів, термометрів опору, а також виконавчих пристроїв: електропневматичних позиціонерів, пневматичних виконавчих механізмів і регулюючих клапанів.

Розроблене програмне та апаратне забезпечення забезпечує надійний та точний контроль технологічних параметрів, що є важливим для стабільної роботи випарної установки та підвищення ефективності процесу концентрації каустичної соди. Запропоновані рішення враховують вимоги безпеки, зокрема, реалізацію контурів захисту та блокування, що дозволяють оперативно припинити подачу пари та розчину при критичних значеннях температури.

Таким чином, виконана робота становить основу для подальшої автоматизації виробничого процесу та є важливою частиною дипломного проекту, спрямованого на підвищення надійності і якості управління технологічними процесами на підприємстві.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

## 6 РОЗВИТОК САК НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

### 6.1 Розробка SCADA-системи на основі GE iFIX

Програмне забезпечення GE iFIX забезпечує створення багаторівневої SCADA-системи для автоматизованого управління виробництвом, що дозволяє в реальному часі здійснювати візуалізацію та моніторинг технологічних процесів. Завдяки цьому користувачі мають можливість оперативно відслідковувати стан обладнання, контролювати хід виробництва і швидко реагувати на зміни чи аварійні ситуації.

Проектування SCADA-систем для автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) включає широкий спектр задач – від збору, зберігання і обробки технологічних даних до їх візуалізації та аналізу. Особливо важливим є забезпечення зручного доступу до інформації через внутрішньовиробничі веб-портали та мобільні пристрої, що підвищує мобільність персоналу і прискорює прийняття рішень.

Оперативно-диспетчерське управління в GE iFIX охоплює контроль роботи обладнання, ведення виробничого обліку та аналіз ефективності процесів, що дозволяє своєчасно виявляти та усувати неполадки. Превентивна діагностика на основі моніторингу стану техніки дозволяє попереджувати аварії і знижувати простої.

Основний функціонал системи включає візуалізацію процесів, збір і керування даними, відображення поточних та історичних трендів, підтримку розподіленої мережевої архітектури та багаторівневу систему захисту. GE iFIX підтримує інтеграцію з різними драйверами і сторонніми додатками, а також забезпечує безперервність роботи завдяки резервуванню серверів.

Центральним елементом інформаційної інфраструктури є GE Historian, який відповідає за централізоване зберігання і обробку як актуальних, так і архівних виробничих даних. Це дозволяє забезпечити глибокий аналітичний огляд і оптимізацію виробничих процесів на основі достовірної інформації.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі налаштування проекту створюються об'єкти, що моделюють технологічне обладнання, такі як випарні апарати, трубопроводи, клапани та засувки. Для зручності операторів реалізується візуальне відображення потоків сировини, інтеграція засобів керування — кнопок, сигнальних ламп, а також вивід ключових параметрів та трендів, що відображають, наприклад, зміну концентрації розчину в випарнику. Це дозволяє забезпечити повний контроль і аналіз технологічного процесу в режимі реального часу (див. рисунок 6.1).

Таким чином, реалізована SCADA-система на базі GE iFIX і GE Historian підвищує рівень автоматизації виробництва, сприяє підвищенню надійності, ефективності та безпеки роботи підприємства.

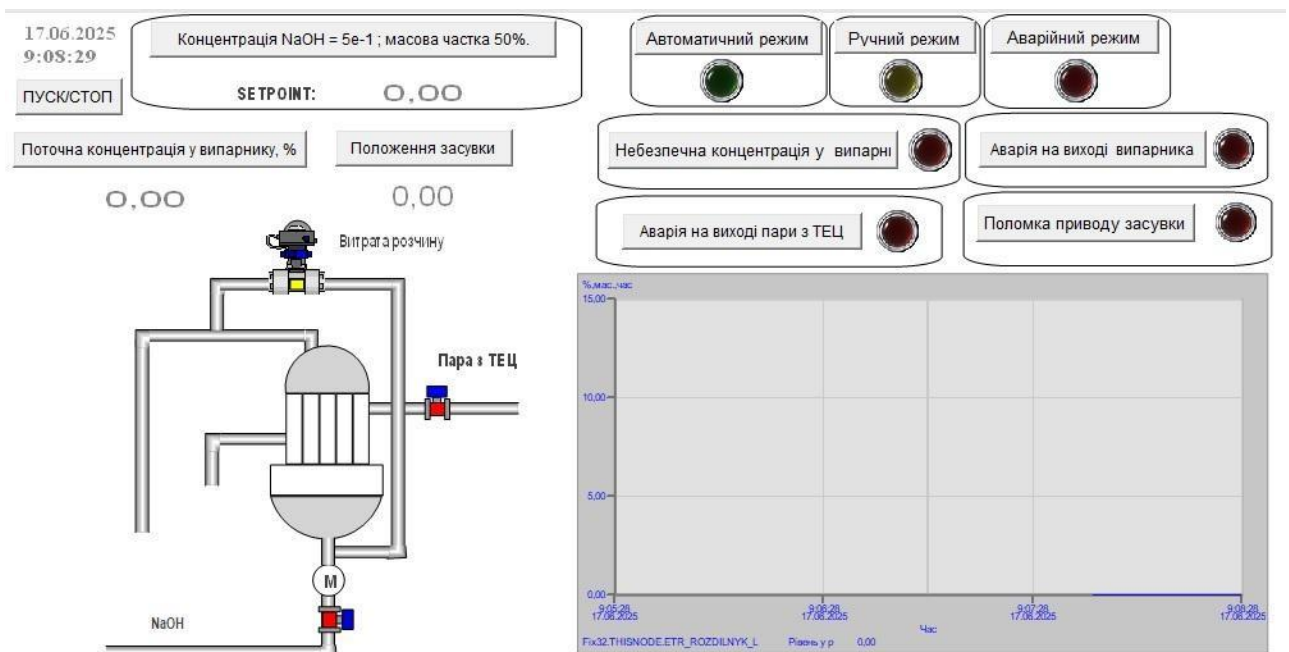


Рисунок 6.1 – Розроблений проект у режимі створення

У даному розділі варто зазначити, що концентрація каустичної соди (наприклад, «50%») подається у ступеневій формі – науковому записі. Розглянемо основні варіанти подання цієї величини у таблиці 6.1.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Таблиця 6.1 – Подання величини

Формат	Вигляд
1	2
Відсотки	50%
Десятковий дріб	0.5
Степенева форма	$5 \times 10^{-1}$
Безрозмірна частка	або $5 \times 10^{-1}$ (одиниць немає)

Оскільки в роботі для розрахунків моделювання використовується масова частка, найдоцільніше записувати її у вигляді десяткового дробу або наукового запису, а саме:

- 0.5 (безрозмірно),
- або  $5 \times 10^{-1}$  (науковий запис).

У процесі моделювання доконцентрації каустичної соди за допомогою програмного забезпечення GE iFIX було обрано саме науковий запис для подачі масової частки концентрації каустичної соди. Приклад текстового запису у програмі:

$w_{\text{NaOH}} = 5e^{-1}$ ; % масова частка 50%

*SCADA-система в режимі виконання.* Проєкт у режимі запуску показаний на рисунку 6.2.

Після натискання кнопки «Пуск/Стоп» процес регулювання концентрації у випарнику переходить в автоматичний режим – про це свідчить загорання зеленої лампи (рисунок 6.3). Одночасно відкриваються клапани для подачі сировини до випарника та для витрати пари з ТЕЦ. Засувка на каналі подачі каустичної соди у випарник переходить у режим дистанційного управління, приймаючи положення, при якому витрати каустичної соди у випарник та витрати з випарника збалансовуються.









система призупиняє автоматичне управління для уникнення некоректних команд під час аварійного стану.

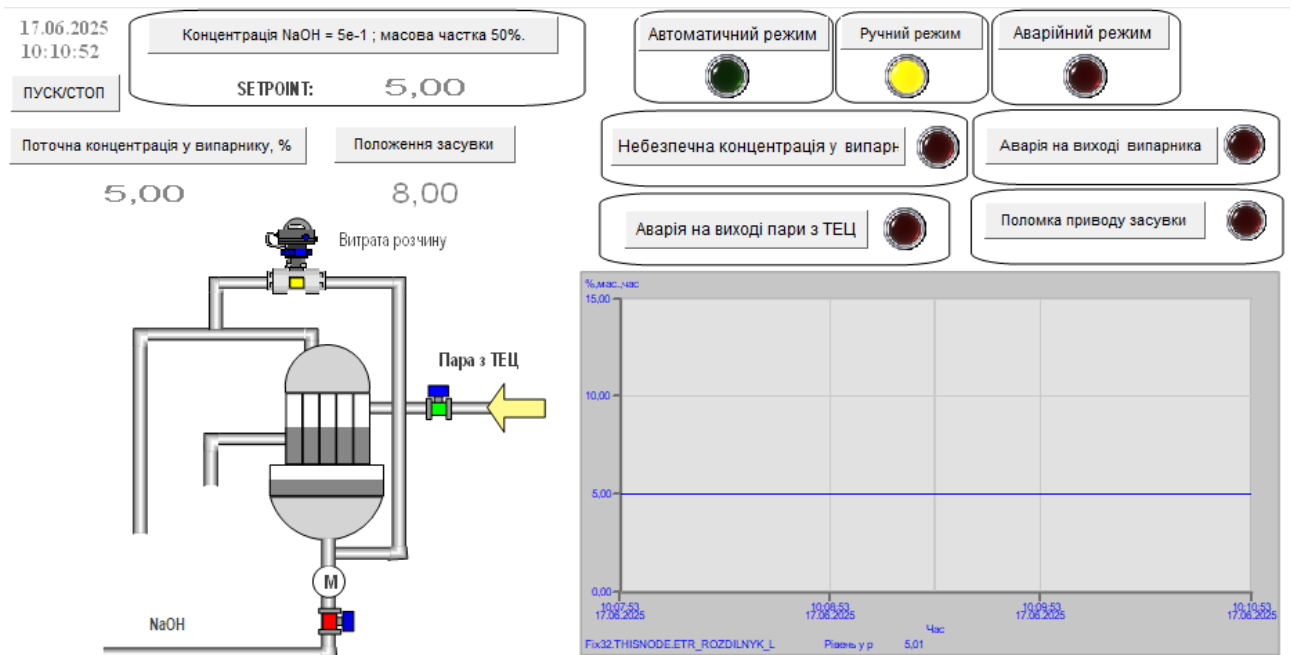


Рисунок 6.6 – Проект переключений у режим ручної роботи

Слід зауважити, що у разі виникнення аварійної ситуації на будь-якому з каналів, активація кнопки «Пуск/Стоп» призводить до появи повідомлення, яке інформує користувача про неможливість запуску системи через аварійний стан. Це запобігає ненавмисному запуску процесу в умовах несправності та забезпечує безпеку експлуатації.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

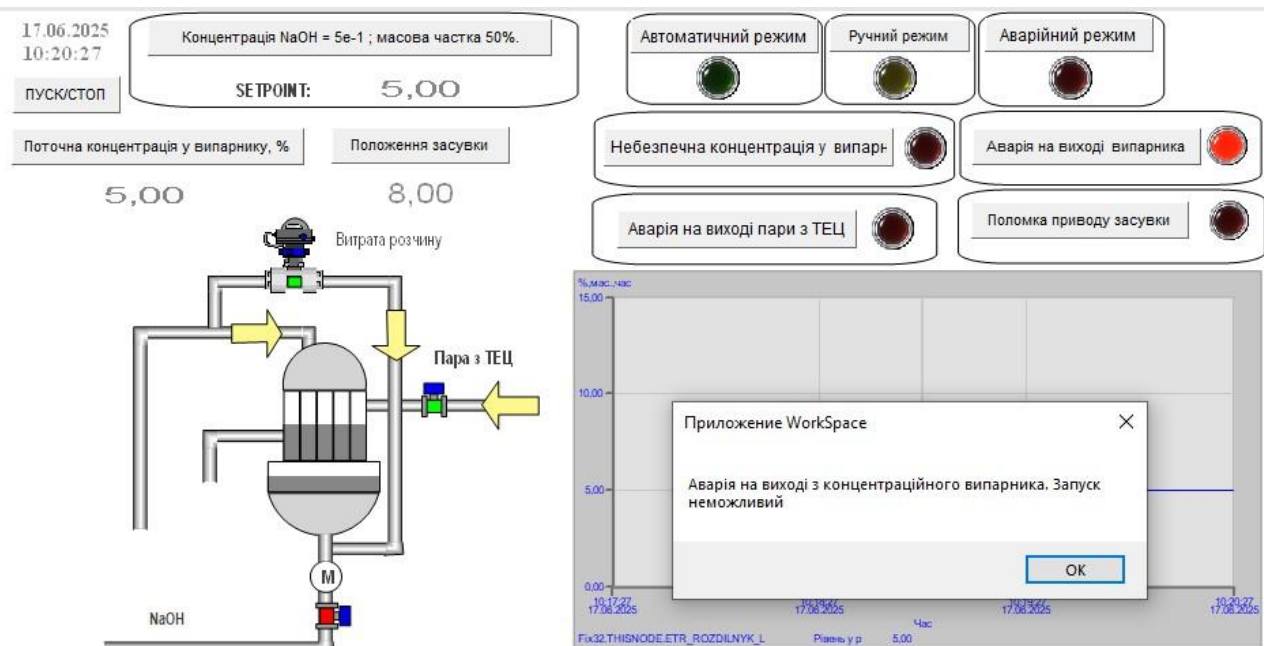


Рисунок 6.7 – Аварія на виході з концентраційного випарника

Повідомлення про аварійну ситуацію з пропозицією запустити систему в аварійному режимі (позначеному червоною лампою) активується лише після натискання кнопки «Пуск/Стоп» у випадку виникнення аварії на каналі витрати пари з ТЕЦу. Це дозволяє оператору свідомо обрати роботу системи в обмеженому режимі з урахуванням аварійних умов.

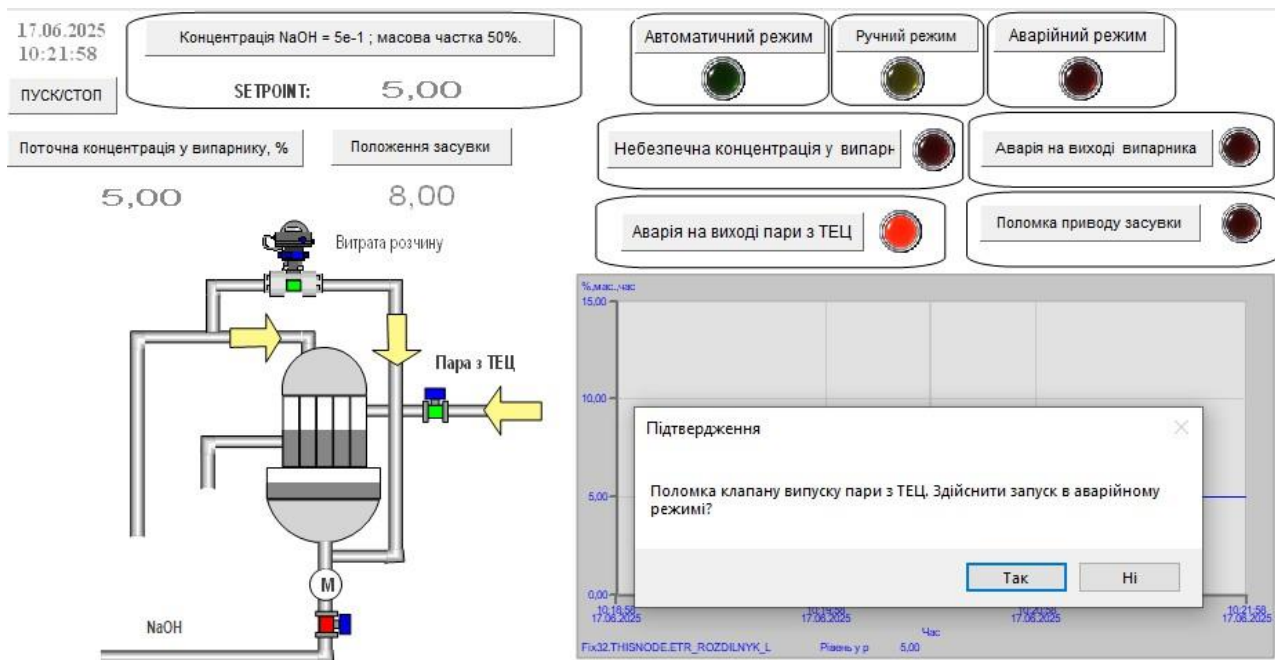


Рисунок 6.8 – Помилка клапану випуску пари з ТЕЦу







режимі реального часу, що є критично важливим для стабільності та безперервності виробничого процесу.

GE iFIX надає централізовану платформу для збору, обробки та відображення даних про концентрацію каустичної соди, що забезпечує операторам швидкий і зручний доступ до актуальної інформації для прийняття оперативних та стратегічних управлінських рішень. Інтеграція з інструментами візуалізації і аналітики дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормальних параметрів, оперативно реагувати на потенційні проблеми, що суттєво знижує ризики аварійних ситуацій і сприяє підвищенню загальної ефективності виробничого процесу.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі було проведено комплексне дослідження процесу доконцентрації каустичної соди, що включало аналіз технологічних особливостей виробничого процесу та розробку системи автоматизації.

1. Проаналізовано технологічні особливості процесу доконцентрації каустичної соди, а також принцип роботи випарних апаратів з падаючою плівкою, що є основним обладнанням у процесі.

2. Виконано розрахунки матеріального та теплового балансу, визначено вхідні, вихідні та збурюючі величини, що впливають на стабільність та ефективність технологічного процесу.

3. Розроблено спрощену та розгорнуту функціональні схеми автоматизації процесу доконцентрації, для яких було підбрано необхідні технічні засоби автоматизації і складено їх специфікації.

4. Для реалізації системи автоматичного керування обрано мікропроцесорний контролер Siemens Simatic S7-300 з модулями розширення аналогових входів та виходів. Складено принципову електричну схему зовнішніх підключень та розроблено програмне забезпечення контролера з використанням середовища Simatic Step 7.

5. Здійснено моделювання одноконтурної системи автоматичного регулювання концентрації каустичної соди в сепараторі третього випарника з ПД-регулятором у середовищі Matlab. Результати моделювання підтвердили, що система регулювання відповідає вимогам по якості стабілізації та швидкості реакції.

6. Розглянуто основні питання охорони праці та безпеки життєдіяльності при експлуатації випарної установки, а також розраховано контур захисного заземлення для забезпечення електробезпеки.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Проведено економічний розрахунок ефективності та терміну окупності впровадження системи автоматизації, що підтверджує доцільність її застосування на виробництві.

8. Складено повну специфікацію устаткування, виробів і матеріалів, необхідних для реалізації схеми автоматизації.

Таким чином, виконана робота дозволяє впровадити автоматизовану систему керування процесом доконцентрації каустичної соди, що підвищує ефективність, надійність і безпеку технологічного процесу.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Петров І. І. Автоматизація технологічних процесів: навч. посіб. Київ : Видавничий центр «Академія», 2018. 320 с.
2. Ковальчук О. М. Концентрація каустичної соди: технологія і обладнання. Львів : Львівська політехніка, 2017. 210 с.
3. Шевченко В. І. Системи автоматичного регулювання технологічних процесів. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2016. 275 с.
4. Грищенко М. М. Технологія виробництва каустичної соди. Київ : Наукова думка, 2015. 180 с.
5. Левченко В. В. Автоматизація виробничих процесів. Одеса : ОНУ імені І. І. Мечникова, 2019. 290 с.
6. Ткаченко С. О. Програмні засоби автоматизації технологічних процесів: навч. посіб. Харків: ХНАДУ, 2020. 240 с.
7. Нормативні документи з охорони праці при експлуатації електрообладнання / Державний нормативний документ ДНАОП 0.00-1.31-99. Київ, 1999.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

# ДОДАТКИ

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

## ДОДАТОК А

## СПЕЦИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Таблиця А.1 – Специфікація засобів автоматизації

№ п/п	№ позиції	Назва параметра	Назва засобу та коротка технічна характеристика	Тип	К-ть
1	2	3	4	5	6
1	1-1	Витрата NaOH на вході в 1 корпус	Електромагнітний витратомір DN 100; Діапазон витрати 0- 100 м <sup>3</sup> /год. Похибка 0.5% вихідний сигнал 4-20мА.	siemens sitrans f m mag 3100	2
	2-1	Витрата NaOH на вході в 2 корпус			
2	3-1	Витрата NaOH на вході в 3 корпус	Електромагнітний витратомір DN 80; Діапазон витрати 0- 50 м <sup>3</sup> /год. Похибка 0.5% вихідний сигнал 4-20мА.	siemens sitrans f m mag 3100	1
3	4-1	Рівень в 1 корпусі	Буйковий рівнемір Діапазон вимірювання: від 0 до 2 м. Похибка ±1.5%. Метеріал корпусу та буйка: Нержавіюча сталь. вихідний сигнал 4-20мА.	Krohne BW25	3
	5-1	Рівень в 2 корпусі			
	6-1	Рівень в 3 корпусі			
4	7-1	Рівень в конденсатозбірнику	Буйковий рівнемір Діапазон вимірювання: від 0 до 1 м. Похибка ±1.5%. вихідний сигнал 4-20мА.	Krohne BW25	1
5	8-1	Температура в 3 корпусі	Термоперетворювач опору НСХ 100П. Діапазон температур від -50 до 200 °С. Клас допуску – А. Сталь 12Х18Н10Т.	ТСП-1287	2
	9-1	Температура NaOH 50%			
6	8-3		Перетворювач температури Вихідний сигнал 4- 20мА. Діапазон вимірювання від -200 до +850° С	Sitranс TH100	1
7	1-4		Пневматичний прохідний клапан Температура середовища Від -10 до 220 °С Вхідний сигнал 4-20 мА. Dy=50; Py=10.	Samson 3241	4
	2-4				
	3-4				
	7-4				
8	4-4		Пневматичний прохідний клапан Температура середовища Від -10 до 220 °С Вхідний сигнал 4-20 мА. Dy=100; Py=10.	Samson 3241	3
	5-4				
	9-4				

						Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6
9	6-4 8-4		Пневматичний прохідний клапан Температура середовища Від -10 до 220 °С Вхідний сигнал 4-20 мА. Dу=80; Pу=10.	Samson тип 3241	2
1	2	3	4	5	6
10	1-3, 2-3 3-3, 4-3 5-3, 6-3 7-3, 8-4 9-3		Пневматичний привід SAMSON типу 3277 Всувна штанга приводу Тиск живлення від 1.4 до 6 бар	SAMSON тип 3277	9
11	1-2, 2-2 3-2, 4-2 5-2, 6-2 7-2, 8-3 9-2		Електропневматичний позиціонер Вхідний сигнал від 4 до 20 мА., Тиск живлення від 20 до 90 psi (від 1.4 до 6 бар)	SAMSON тип 3767	9
12	10-1	Температура пари	Манометричний термометр Границі вимірювання 0-200 °С ±3°С Вихідний сигнал від 4 до 20 мА.,	Wika TGT73	1
13	10-3 10-5		Нормально відкритий пневматичний клапан DN100, PN10 Тиск живлення від 5 до 7 бар	Burket тип 2012	2
14	10-2 10-4		3/2 Пневморозподільник електромагнітний Робоча напруга 24VDC	Burket тип 5470	2

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

**ПАРАМЕТРИ ЯКІ ВИЗНАЧИЛИ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЛАВ  
ФУНКЦІЇ *FMINSEARCH***

```
clc; clear;

t=[0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 170 190 220 240
260 270 300];

C=[50 50.01 50.06 50.2 50.44 50.7 51 51.3 51.54 51.88 52.08 52.28 52.44
52.54 52.6 52.7 52.78 52.84 52.94 52.98 53 53 53];

figure(1); plot(t,C,'*');grid;

delC=53-50; yn=50; dx=15;

Cn=(C-50)/delC;

figure(2);plot(t,Cn);grid

ti=[0:300];

Cek_i=interp1(t,Cn,ti);

x0=[100 10];

x=fminsearch('f_fmin_search',x0)

T1=x(1); T2=x(2);

k=delC/dx

tau=10;

[n d]=pade(tau,10);

% крива розгону за розрахованими значеннями k, T1 і T2

W1=tf(1, [T1 1]);

W2=tf(1, [T2 1]);

Wzap1=tf(n,d);

W=W1*W2*Wzap1;

C_roz=step(W,ti);
```

```

y=C_roz*dx*k+yn;
ye=Cek_i*dx*k+yn;
del=max(abs(y'-ye))/5*100
sig=sqrt(sum((y'-ye).^2)/length(ti))

```

% порівняння експериментальної та розрахованої кривих розгону

```

figure(3); plot(ti,y,'k',t,C,'o');grid;
xlabel('t,c');ylabel('C,%');

```

Файл функція:

```

function s=f_fmin_search(x);

```

```

t=[0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 170 190 220 240
260 270 300];

```

```

C=[50 50.01 50.06 50.2 50.44 50.7 51 51.3 51.54 51.88 52.08 52.28 52.44
52.54 52.6 52.7 52.78 52.84 52.94 52.98 53 53 53];

```

```

tau=10; delC=3;

```

```

[n d]=pade(tau,10);

```

```

Cn=(C-50)/delC;

```

```

ti=[0:1:300];

```

```

Cek_i=interp1(t,Cn,ti);

```

```

T1=x(1); T2=x(2);

```

% побудова кривої розгону за розрахованими k і T

```

W1=tf(1, [T1 1]);

```

```

W2=tf(1, [T2 1]);

```

```

Wzap1=tf(n,d);

```

```

W=W1*W2*Wzap1;

```

```

C_roz=step(W,ti);

```

```
s=sum((C_roz'-Cek_i).^2);
```

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТ  $\omega$ ,  $\omega^{**}$ 

```
clc; clear all;  
w=[0:0.001:0.06];  
m=0.325; k=0.2; T=38.4913; tau=10;  
p=-m*w+i*w;  
Wop=k.*exp(-tau*p)./((T.*p+1).*(T.*p+1));  
fi=phase(Wop);  
j=1:length(w);  
a(j)=-pi;  
b(j)=-pi/2+atan(m);  
plot(w,fi,w,a,w,b); grid;  
xlabel('w,rad/sec');  
ylabel('fi,rad');
```

**ПРОГРАМА ЗНАЧЕНЬ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ  
НАСТРОЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА**

```
clear all; clc;
m=0.325; K = 0.2; T = 38.4913; Td=20; tau=10;
w= [0.0136: 0.0001: 0.0463];
p=-m*w+i*w;
W_op=K.*exp(-tau*p)./((T*p+1).^2);
U=real(W_op); V=imag(W_op);
fi=phase(W_op);
A_op=abs(W_op);
gama=abs(fi)+atan(m)-pi;
kp_Ti=w./A_op.*(m*cos(gama)-
sin(gama)).*sqrt(m^2+1)+w.^2*(1+m^2)*Td;
kp=sqrt(m^2+1)*cos(gama)./A_op+2*w.*Td*m;
for i=1:length(w)
    t=[0:300];
    Wor1=tf(K,[T 1]);
    Wor2=tf(1,[T 1]);
    Wor=Wor1*Wor2;
    War1=tf(kp(i),[1]);
    War2=tf(kp_Ti(i),[1 0]);
    War=War1+War2;
    Wcap=Wor/(1+Wor*War);
    y=step(Wcap,t).*20;
    q=trapz(t,y.^2);
    S(i)=q;
Jmin=min(S);
if S(i)==Jmin;
kp_Tiopt=kp_Ti(i)
```

```
kpopt=kp(i);  
end  
end  
kpopt  
kp_Tiopt  
Jmin  
figure(1);plot(kp, kp_Ti,'-k',kpopt,kp_Tiopt,'ko');grid;  
xlabel('kp'); ylabel('kp/Ti');  
figure(2);plot(kp,S,'-k',kpopt,Jmin,'ko');grid;
```