

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП - 06.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

Володимир Дубовик

2026 рік

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

Дубовик Володимир Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.53

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизоване управління температурним режимом реактора в процесі

(назва роботи)

виробництва оцтової кислоти

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент

(посада)

О.В. Кучмистенко

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

Г.Г. Зварич

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1

(шифр групи)

В.О. Дубовик

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

О.В. Кучмистенко

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

А.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ

А.І. Лагойда.

« » 20 року

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

Дубовику Володимиру Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизоване управління температурним режимом
реактора в процесі виробництва оцтової кислоти

керівник роботи Кучмистенко Олександр Васильович к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 29 » травня 20 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики,
методичні вказівки, технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу виробництва оцтової
кислоти як об'єкта автоматизації;

2. Ідентифікація об'єкта керування та синтез каскадної системи
автоматизованого керування;

3. Синтез каскадної системи автоматичного керування для реактора з
виробництва оцтової кислоти;

4. Розробка системних рішень для автоматичної системи керування
Висновки. Перелік посилань на джерела.

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

1. БР.АКП – 06.00.00.000 01 – Технологічна схема процесу виробництва;
оцтової кислоти;

2. БР.АКП – 06.00.00.000 02 – Модель «чорний ящик» реактора ацетилювання;

3. БР.АКП – 06.00.00.000 03 – Аналіз і синтез каскадної АСК;

4. БР.АКП – 06.00.00.000 04 – Функціональна схема автоматизації;

5. БР.АКП – 06.00.00.000 05 – Схема зовнішніх з'єднань;

6. БР.АКП – 06.00.00.000 06 – Схема щита керування.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу виробництва оцтової кислоти як об'єкта автоматизації	08.05.2025 р.	
2	Ідентифікація об'єкта керування та синтез каскадної системи автоматизованого керування	15.05.2025 р.	
3	Синтез каскадної системи автоматичного керування для реактора з виробництва оцтової кислоти	21.05.2025 р.	
4	Розробка системних рішень для автоматичної системи керування	29.05.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

Дубовик В.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Кучмистенко О.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 97 сторінок, 48 рисунків, 4 таблиці, 14 посилань на джерела.

Тема: «Автоматизоване управління температурним режимом реактора в процесі виробництва оцтової кислоти».

Об'єкт дослідження: температурний режим реактора у процесі виробництва оцтової кислоти методом карбонілювання метанолу.

Мета роботи: синтез каскадної автоматичної системи керування температурним режимом реактора, що забезпечує стабілізацію технологічних параметрів з дотриманням вимог до точності, стійкості та безпеки.

Методи дослідження: активний ідентифікаційний експеримент зі ступінчастим впливом; апроксимація методом Нелдера–Міда (MATLAB); синтез регуляторів методами симетричного оптимуму та Сімою; частотний аналіз стійкості за Найквістом.

Результати бакалаврської роботи: проведено аналіз технологічного процесу виробництва оцтової кислоти та визначено 10 ключових параметрів керування. Виконано ідентифікацію двох каналів об'єкта: внутрішнього ($Q_w \rightarrow T_{w0}$, SOPDT, $T_1=T_2=15$ с) та зовнішнього ($Q_w \rightarrow T_{go}$, SOPDT, $T_1=120$ с, $T_2=60$ с, $\tau=40$ с). Синтезовано каскадну АСК: ПІД-регулятор внутрішнього контуру ($K_p=0.033$, $T_i=30$ с, $T_d=7.5$ с) та ПІ-регулятор зовнішнього ($K_p=3.645$, $T_i=152$ с). Моделювання підтвердило відповідність вимогам: $\sigma=16.7\%$, $t_{per}=582$ с, $P_m=47.2^\circ$, $G_m=12.4$ дБ. Розроблено системні рішення АСУ ТП на базі Siemens SIMATIC S7-1500, обрано засоби автоматизації та виконано проектування у EPLAN Education 2025.

Ключові слова: оцтова кислота, каскадна аск, реактор, температурний режим, ідентифікація, ПІД-регулятор, SIMATIC S7-1500, MATLAB, EPLAN.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 97 pages, 48 figures, 4 tables, 14 references.

Title: "Automated Temperature Control of the Reactor in the Acetic Acid Production Process".

Object of research: the temperature regime of the reactor in the acetic acid production process based on methanol carbonylation.

Purpose of the work: to synthesize a cascade automatic control system for the reactor temperature regime, ensuring stabilization of technological parameters in compliance with accuracy, stability and safety requirements.

Research methods: active step-response identification experiment; SOPDT model approximation via the Nelder–Mead method in MATLAB; controller synthesis using the symmetric optimum and Simu methods; Nyquist stability analysis.

Results of the bachelor's thesis: the acetic acid production process was analysed and 10 key control parameters identified. Two process channels were identified: inner ($Q_w \rightarrow T_{w0}$, SOPDT, $T_1=T_2=15$ s) and outer ($Q_w \rightarrow T_{go}$, SOPDT, $T_1=120$ s, $T_2=60$ s, $\tau=40$ s). A cascade ACS was synthesized: inner loop PID ($K_p=0.033$, $T_i=30$ s, $T_d=7.5$ s) and outer loop PI ($K_p=3.645$, $T_i=152$ s). MATLAB simulation confirmed requirements: overshoot $\sigma=16.7$ %, settling time $t_{set}=582$ s, phase margin $P_m=47.2^\circ$, gain margin $G_m=12.4$ dB. APCS engineering solutions were developed on the basis of Siemens SIMATIC S7-1500; automation equipment was selected and design performed in EPLAN Education 2025.

Key words: acetic acid, cascade acs, reactor, temperature regime, identification, PID controller, SIMATIC S7-1500, MATLAB, EPLAN.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	10
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	12
1.1 Загальна характеристика виробництва оцтової кислоти	12
1.2 Технологічні способи одержання оцтової кислоти та їх порівняльний аналіз	15
1.3 Технологічна схема виробництва оцтової кислоти та її функціональний аналіз	18
1.4 Аналіз матеріальних та енергетичних потоків технологічного процесу	21
1.5 Визначення параметрів керування та контрольованих величин	24
1.6 Аналіз динамічних властивостей виробництва як об'єкта автоматизації	29
Постановка задачі для дослідження.....	32
2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ	33
2.1 Характеристика об'єкта керування як об'єкта автоматизації	33
2.2 Обґрунтування каскадної структури системи автоматичного керування	34
2.3 Вимоги до каскадної системи автоматичного керування.....	35
2.4 Об'єкт керування як модель «чорний ящик»	36
2.5 Методика проведення експерименту.....	40
2.6 Нормування експериментальних даних	42
Висновки до розділу	47
3 СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ РЕАКТОРА З ВИРОБНИЦТВА ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ.....	48
3.1 Обґрунтування вибору каскадної структури	48
3.2 Структурна схема каскадної АСК.....	49

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизоване управління температурним режимом реактора в процесі виробництва оцтової кислоти		Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Дубовик В.О.					Д	6	97
Перевір.		Кучмистенко О.В.					АКП-22-1 ІФНТУНГ		
Реценз.		Зварич Г.Г.							
Н. Контр.									
Затверд.		Лагойда А.І.							

3.3 Синтез внутрішнього регулятора $W_{p2}(p)$	50
3.3 Еквівалентна передавальна функція замкненого внутрішнього контуру ..	52
3.4 Синтез зовнішнього регулятора $W_{p1}(p)$	52
3.5 Аналіз замкненого зовнішнього контуру	54
3.6 Порівняння каскадної та одноконтурної АСК	58
3.7 Аналіз компенсації збурень	59
3.8 Підсумкові результати та висновки	61
Висновки до розділу	62
4 РОЗРОБКА СИСТЕМНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	64
4.1 Нормативна база, вимоги до АСУ ТП та ієрархічна структура	64
4.1.1 Нормативна база проектування	64
4.1.2 Експлуатаційні вимоги до АСУ ТП реактора	66
4.1.3 Ієрархічна структура АСУ ТП	69
4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації	72
4.2.1 Засоби вимірювання температури – Endress+Hauser iTEMP TMT82	72
4.2.2 Засоби вимірювання витрати – Endress+Hauser Promag 50W	75
4.2.3 Програмований логічний контролер – Siemens SIMATIC S7-1500	78
4.2.4 Склад модулів ПЛК	81
4.2.5 Виконавчий механізм Fisher FIELDVUE DVC6200	84
4.3 Проектування у САПР EPLAN Education 2025.....	87
4.3.1 Принципи роботи EPLAN та організація проекту.....	87
4.3.2 Функціональна схема автоматизації	88
4.3.4 Схема шафи АСУ ТП.....	89
Висновки до розділу	91
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	92
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	95

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

AI – Analog Input – аналоговий вхідний сигнал (4–20 мА);

AO – Analog Output – аналоговий вихідний сигнал (4–20 мА);

ATEX – ATmosphères EXplosibles – директива ЄС 2014/34/EU щодо обладнання у вибухонебезпечних середовищах;

DC – Direct Current – постійний струм;

DI – Digital Input – дискретний вхідний сигнал;

DIN – Deutsches Institut für Normung – Німецький інститут стандартизації;
також: стандартна монтажна рейка;

DO – Digital Output – дискретний вихідний сигнал;

EPLAN – EPLAN Electric P8 – система автоматизованого проектування електричних схем;

FOPDT – First Order Plus Dead Time – стандартна модель динамічного об'єкта першого порядку із запізненням;

IAE – Integral of Absolute Error – інтеграл абсолютного значення помилки регулювання;

IEC – International Electrotechnical Commission – Міжнародна електротехнічна комісія;

ISA – International Society of Automation – Міжнародне товариство автоматизації; автор стандартів на графічні позначення у схемах автоматизації (ISA-5.1);

ISO – International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації;

ITAE – Integral of Time-weighted Absolute Error – інтеграл часово-зваженого абсолютного значення помилки регулювання;

MATLAB – MATrix LABoratory – пакет прикладного програмного забезпечення для математичних обчислень та моделювання;

MPI – Multi-Point Interface – інтерфейс зв'язку між пристроями Siemens

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

SIMATIC;

SIMATIC – Siemens Matic – торгова назва лінійки програмованих контролерів компанії Siemens AG;

SITOP – Siemens Industry Top – лінійка джерел безперебійного живлення компанії Siemens AG;

SM – Signal Module – модуль введення/виведення сигналів SIMATIC S7-1500;

SOPDT – Second Order Plus Dead Time – стандартна апроксимаційна модель динамічного об'єкта другого порядку із запізненням.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Виробництво оцтової кислоти належить до базових технологічних процесів хімічної промисловості та характеризується широким промисловим застосуванням. Сучасні технологічні установки являють собою складні багатостадійні системи, у яких одночасно протікають процеси хімічного синтезу, тепло- та масообміну, сепарації та ректифікаційного розділення багатокомпонентних сумішей. Така структура обумовлює значну кількість взаємопов'язаних параметрів, що визначають як продуктивність процесу, так і якість кінцевого продукту.

Особливу складність становить реакторна стадія, де відбуваються основні хімічні перетворення з інтенсивним тепловиділенням. Саме тут формуються основні динамічні збурення, які поширюються на інші елементи технологічної схеми. Додаткову складність створює наявність інерційності процесів, транспортних запізнень та суттєвих нелінійних залежностей між технологічними змінними, що робить задачу автоматизації реакторної стадії особливо актуальною.

Обґрунтування вибору теми. Питання автоматизації хімічних реакторів широко досліджуються у сучасній літературі. Зокрема, значна увага приділяється застосуванню каскадних САК для об'єктів із суттєвою інерційністю та транспортними запізненнями.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є синтез каскадної системи автоматичного керування температурним режимом реактора у виробництві оцтової кислоти, що забезпечує стабільність технологічного процесу та високу якість регулювання.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виробництва оцтової кислоти на стадії реактора.

Предмет дослідження – система автоматичного керування температурним режимом реакторної стадії.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- Аналіз технологічного процесу виробництва оцтової кислоти як об'єкта автоматизації;
- Ідентифікація об'єкта керування та синтез каскадної системи автоматизованого керування;
- Синтез каскадної системи автоматичного керування для реактора з виробництва оцтової кислоти;
- Розробка системних рішень для автоматичної системи керування.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи:

- методи математичного моделювання – для опису динаміки реакторної стадії та побудови передавальних функцій об'єкта керування;
- методи теорії автоматичного керування – для аналізу стійкості та якості замкнених систем, синтезу регуляторів каскадної структури;
- метод імітаційного моделювання – для перевірки працездатності розробленої системи та оцінки перехідних процесів при різних видах збурень.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена каскадна система керування може бути рекомендована до впровадження на промислових установках виробництва оцтової кислоти з метою підвищення стабільності температурного режиму реактора, зниження енергетичних витрат та покращення якості кінцевого продукту. Результати роботи також можуть бути використані при проектуванні систем автоматизації аналогічних хімічних виробництв.

Структура та обсяг роботи. Бакалаврська робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків та переліку посилань на джерела. Загальний обсяг роботи становить 97 сторінок.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Загальна характеристика виробництва оцтової кислоти

Оцтова кислота належить до числа найбільш поширених органічних кислот, що мають важливе значення для сучасної хімічної промисловості. Її широке використання обумовлене значною хімічною активністю, здатністю вступати у реакції естерифікації, ацилювання та нейтралізації, а також високою розчинністю у воді та багатьох органічних розчинниках. У промислових масштабах оцтова кислота застосовується як сировина для синтезу ацетатних ефірів, оцтового ангідриду, вініл ацетату, целюлозних матеріалів, полімерних композицій, барвників і фармацевтичних препаратів. Значні обсяги споживання оцтової кислоти характерні також для харчової промисловості, де вона використовується як консервант, регулятор кислотності та компонент технологічних середовищ у процесах переробки харчової продукції [1, 2].

Сучасне виробництво оцтової кислоти характеризується високим рівнем технологічної складності, що обумовлено необхідністю забезпечення стабільного перебігу фізико-хімічних процесів за умов значної чутливості реакційного середовища до зміни температури, тиску та концентрацій компонентів. Основним промисловим методом одержання оцтової кислоти на сучасному етапі є карбонілювання метанолу оксидом вуглецю у присутності каталізаторів на основі родію або іридію. Даний метод відзначається високою селективністю, незначним утворенням побічних продуктів та порівняно низькими енергетичними витратами. Реакція карбонілювання супроводжується складними теплообмінними та масообмінними процесами, що вимагає постійного контролю технологічних параметрів і підтримання оптимальних режимів функціонування реакторного обладнання.

Технологічний процес виробництва оцтової кислоти (рис.1.1) включає

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

декілька взаємопов'язаних стадій, серед яких підготовка сировини, проведення реакції синтезу, охолодження реакційної суміші, розділення компонентів, ректифікація та очищення кінцевого продукту. Кожна із зазначених стадій характеризується наявністю значної кількості параметрів, які визначають ефективність виробництва та якість готової продукції. Зміна температурного режиму в реакторі може призводити до зниження селективності процесу та збільшення утворення небажаних домішок, тоді як коливання тиску впливають на швидкість перебігу реакції та рівень використання реагентів. У процесах ректифікації особливе значення мають стабільність теплових потоків, рівень рідини у колонах та точність підтримання концентрацій компонентів.



Рисунок 1.1 – Установка по виробництву оцтової кислоти

Виробництво оцтової кислоти належить до категорії вибухо- та пожежонебезпечних хімічних процесів, оскільки технологічна схема передбачає використання горючих речовин, токсичних компонентів та експлуатацію обладнання за умов підвищених температур і тисків. Наявність таких факторів

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

суттєво підвищує вимоги до надійності систем контролю та автоматичного захисту. Порушення встановлених технологічних режимів може призвести до погіршення якості продукції, зростання втрат сировини, пошкодження обладнання та виникнення аварійних ситуацій. У зв'язку з цим сучасні установки виробництва оцтової кислоти оснащуються багаторівневими системами автоматичного контролю, регулювання та протиаварійного захисту, що забезпечують безперервний моніторинг стану технологічного комплексу.

Особливістю виробництва оцтової кислоти як об'єкта автоматизації є значна інерційність окремих технологічних апаратів, наявність взаємопов'язаних каналів керування та складний характер динамічних процесів. Реакторні системи характеризуються суттєвими тепловими ефектами, а процеси ректифікації мають значне транспортне запізнення та чутливість до змін витратних характеристик. Це ускладнює підтримання стабільних режимів функціонування та обумовлює необхідність використання сучасних методів автоматичного керування, здатних забезпечити високу точність регулювання за умов дії внутрішніх і зовнішніх збурень.

На сучасному етапі розвитку хімічної промисловості спостерігається тенденція до підвищення рівня енергоефективності виробництва, зменшення питомих витрат сировини та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Реалізація таких вимог безпосередньо пов'язана із впровадженням автоматизованих систем керування технологічними процесами. Автоматизація дозволяє забезпечити оптимізацію режимів роботи обладнання, стабілізацію технологічних параметрів, зменшення енергетичних втрат та підвищення точності дозування реагентів. Крім того, застосування сучасних мікропроцесорних систем керування створює можливість реалізації складних алгоритмів адаптивного та прогнозуючого регулювання, що підвищує ефективність функціонування виробництва в умовах змінних навантажень та нестабільності параметрів сировини.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Технологічні способи одержання оцтової кислоти та їх порівняльний аналіз

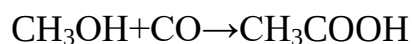
Оцтова кислота є однією з найбільш затребуваних органічних сполук у сучасній хімічній промисловості. Її хімічна формула – CH_3COOH , а молекулярна структура характеризується наявністю карбоксильної групи, що визначає кислотні властивості речовини та її високу реакційну здатність у процесах органічного синтезу. У промислових умовах виробництво оцтової кислоти реалізується за декількома технологічними напрямками, які відрізняються механізмом перебігу реакцій, типом вихідної сировини, енергетичними витратами та вимогами до систем автоматичного керування (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Оцтова кислота 99,9 %

Найбільш поширеним сучасним методом синтезу оцтової кислоти є карбонілювання метанолу оксидом вуглецю. Хімічна реакція процесу описується рівнянням:

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Даний спосіб ґрунтується на взаємодії метанолу CH_3OH з оксидом вуглецю CO у присутності каталізаторів на основі родію або іридію. Реакція здійснюється у рідинній фазі за підвищених температур і тисків, що забезпечує високу швидкість синтезу та значну селективність процесу. Температурний режим зазвичай перебуває у межах 150–220 °С, тоді як тиск може досягати 3–6 МПа залежно від типу каталізатора та складу реакційного середовища. Особливістю процесу є суттєва залежність швидкості реакції від концентрації каталізатора, вмісту води та стабільності теплового режиму.

Технологічний процес карбонілювання характеризується складними теплообмінними явищами та значною чутливістю до зміни параметрів середовища. Незначні відхилення температури можуть призводити до зниження селективності реакції та утворення побічних продуктів, серед яких метилацетат і пропіонова кислота. У зв'язку з цим реакторні системи оснащуються автоматизованими контурами регулювання температури, тиску, витрати метанолу та оксиду вуглецю. Важливого значення набуває контроль концентрації каталізатора та рівня рідини у реакторі, оскільки нестабільність цих параметрів негативно впливає на ефективність синтезу.

Іншим методом одержання оцтової кислоти є рідиннофазне окиснення вуглеводнів, зокрема бутану або ацетальдегіду. У випадку окиснення бутану реакція може бути представлена у спрощеному вигляді:



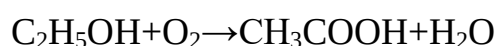
Процес реалізується за участю каталізаторів на основі солей кобальту або марганцю та супроводжується складними радикальними механізмами. Реакційне середовище характеризується багатостадійністю перетворень, унаслідок чого одночасно утворюється значна кількість побічних сполук. Це ускладнює подальше очищення продукту та знижує економічну ефективність технології.

Температурний режим процесу окиснення зазвичай перебуває в межах 150–200 °С, а тиск становить 4–8 МПа. Для даного способу характерна висока

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

екзотермічність реакцій, що обумовлює необхідність ефективного тепловідведення. Нестабільність теплового балансу може спричиняти розвиток неконтрольованих реакційних процесів та утворення вибухонебезпечних сумішей. Саме тому система автоматичного керування повинна забезпечувати швидкодіючий контроль температури, тиску та концентрації кисню у реакційному середовищі. Значна нелінійність процесу та наявність багатоканальних взаємозв'язків між параметрами ускладнюють синтез систем регулювання та потребують використання сучасних адаптивних алгоритмів керування.

Окремий напрям виробництва оцтової кислоти пов'язаний із біотехнологічними методами, які базуються на окисненні етилового спирту оцтовокислими бактеріями. Хімічне рівняння процесу має вигляд:



Біохімічний синтез здійснюється за участю мікроорганізмів роду *Acetobacter* у середовищі з контрольованим доступом кисню. На відміну від хімічних способів, даний метод реалізується за відносно невисоких температур, що зазвичай становлять 25–35 °С, та атмосферного тиску. Процес характеризується значною залежністю від кислотності середовища, концентрації розчиненого кисню та активності мікроорганізмів.

Автоматизація біотехнологічного виробництва має специфічний характер, оскільки необхідно підтримувати стабільні умови життєдіяльності бактеріальних культур. Система керування повинна забезпечувати точне регулювання температури, подачі повітря, швидкості перемішування та концентрації субстрату. Особливу складність становить контроль біологічної активності мікроорганізмів, яка може змінюватися під впливом зовнішніх факторів та накопичення продуктів реакції. Через значну інерційність біохімічних процесів та наявність часових запізнень системи автоматичного регулювання повинні враховувати повільний характер динаміки об'єкта.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Технологічна схема виробництва оцтової кислоти та її функціональний аналіз

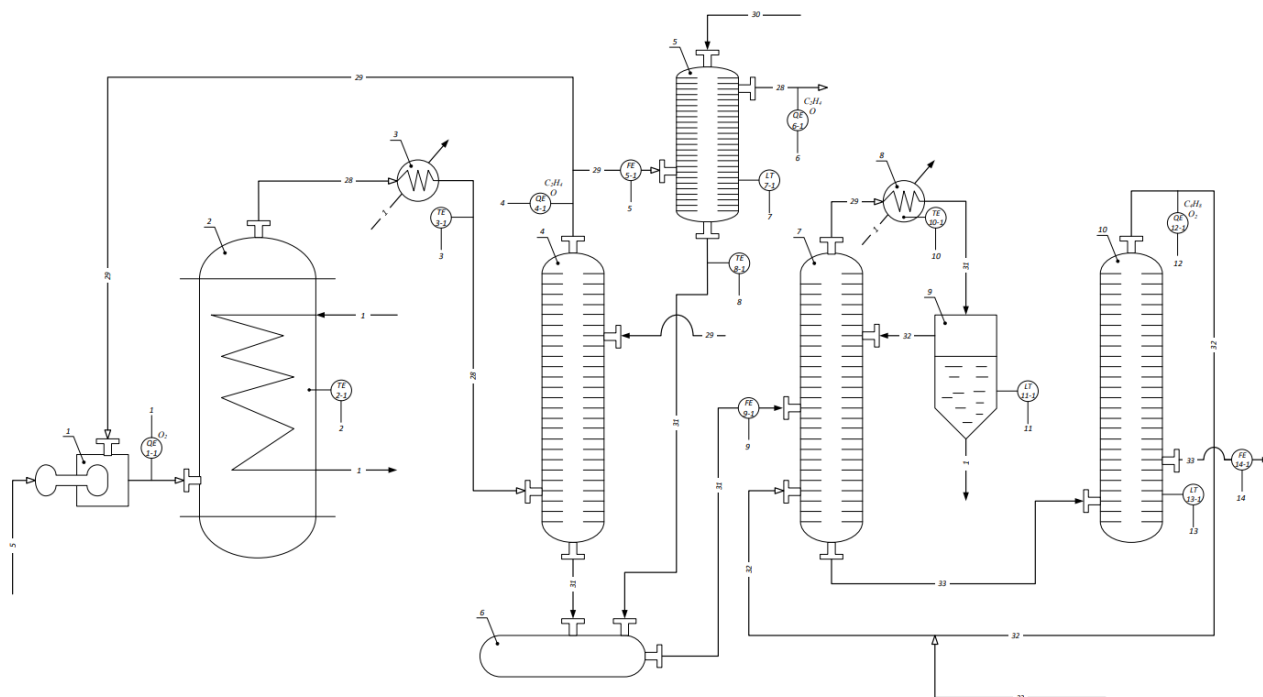
Технологічна схема виробництва оцтової кислоти характеризується складною структурою взаємопов'язаних апаратів, у межах якої реалізуються процеси окиснення, тепло- та масообміну, сепарації, ректифікації та циркуляції реакційних компонентів. Ефективність функціонування установки визначається стабільністю матеріальних і теплових потоків, а також точністю підтримання режимних параметрів на окремих технологічних ділянках. Враховуючи багатостадійний характер процесу, технологічна схема розглядається як складний багатозв'язний об'єкт автоматизації з вираженими внутрішніми взаємозалежностями між окремими апаратами та потоками [3].

Свіже повітря змішується у змішувачі 1 (рис. 1.3) із циркуляційним газом, після чого утворена газова суміш, що містить приблизно 7–9 % кисню, а також азот та інші газоподібні компоненти, подається до нижньої частини реактора 2. Підтримання заданої концентрації кисню у циркуляційному потоці має важливе значення для забезпечення стабільності процесу окиснення та запобігання утворенню вибухонебезпечних сумішей. Саме тому вузол змішування належить до найбільш чутливих ділянок технологічної схеми, де необхідне високоточне регулювання витрат свіжого повітря та рециркуляційного газу.

У реакторі 2, заповненому каталізаторним розчином, відбуваються основні фізико-хімічні процеси синтезу оцтової кислоти та оцтового ангідриду. Реакційне середовище характеризується інтенсивним тепловиділенням, унаслідок чого стабілізація температурного режиму є однією з найважливіших умов забезпечення необхідної селективності процесу. Відведення надлишкової теплоти здійснюється за допомогою системи внутрішніх змієвиків, що охолоджуються водою. Температура реакційної маси безпосередньо впливає на швидкість перебігу реакцій, ступінь перетворення реагентів та кількість побічних продуктів, тому система автоматичного регулювання температури

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реактора повинна забезпечувати високу швидкодiю та точнiсть пiдтримання теплового балансу.



- 1 – змiшувач; 2 – реактор; 3 – холодильник; 4 – сатуратор; 5 – скруббер;
6 – збiрник конденсату; 7 – колона азеотропної сушки; 8 – дефлегматор;
9 – сепаратор; 10 – колона вiдгонки ацетату

Рисунок 1.3 – Схема технологiчного процесу виробництва оцтової кислоти та оцтового ангiдريد

Парогазова сумiш, що виходить iз реактора 2, надходить до холодильника 3, де вiдбувається її попереднє охолодження. У даному апаратi реалiзуються процеси теплообмiну мiж гарячим реакцiйним потоком та охолоджувальним агентом. Ефективнiсть охолодження визначає подальший перебiг процесiв конденсацiї та сепарацiї компонентiв. Пiсля холодильника 3 потiк спрямовується до сатуратора 4, куди додатково вводиться ацетальдегiд CH_3CHO . Внаслiдок випаровування рiдкого ацетальдегiду температура у сатураторi знижується, що сприяє iнтенсивнiй конденсацiї залишкових продуктiв iз парогазової сумiшi.

Сатуратор 4 виконує важливу функцiю стабiлiзацiї фазового складу циркуляцiйного потоку та забезпечує додаткове вилучення цiнних компонентiв

із газової фази. Верхня частина сатуратора використовується для відведення циркуляційної парогазової суміші, яка повертається до змішувача 1 для повторного використання у технологічному циклі. Частина потоку виводиться до скрубера 5, який зрошується оцтовою кислотою CH_3COOH . У скрубєрі реалізується процес абсорбції парів ацетальдегіду, що дозволяє зменшити втрати реагентів та підвищити ефективність використання сировини. Стабільність роботи скрубєра значною мірою залежить від температури зрошувальної рідини, витрати кислоти та інтенсивності масообміну між фазами.

Конденсати із сатуратора 4 та скрубєра 5 надходять до збірника 6 у вигляді сирого продукту, який містить приблизно 60 % оцтового ангідриду $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$, 30 % оцтової кислоти CH_3COOH , близько 10 % води H_2O , а також домішки етілідендіацетату, ацетальдегіду та формальдегіду CH_2O . Склад сирого продукту характеризується значною нестабільністю та залежить від режиму роботи реактора, температури охолодження та ефективності сепараційних процесів. Це обумовлює необхідність безперервного контролю концентрацій компонентів та стабілізації рівня у збірнику.

Із збірника 6 сирий продукт подається до колони азеотропного осушення 7, у яку вводиться етилацетат $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$. У колоні реалізується процес азеотропної ректифікації, спрямований на видалення води із технологічної суміші. Пари води та етилацетату, що відганяються у верхній частині колони, проходять через дефлегматор 8, де здійснюється їх часткова конденсація. Після цього потік надходить до сепаратора 9, у якому відбувається фазове розділення води та етилацетату. Відокремлений етилацетат повертається до колони 7, забезпечуючи циркуляцію азеотропоутворювача та зменшення витрат допоміжних компонентів.

Суміш оцтової кислоти, оцтового ангідриду та залишкового етилацетату з нижньої частини колони 7 подається до колони 10, де здійснюється остаточне відділення етилацетату шляхом ректифікації. Відігнаний етилацетат після компенсації виробничих втрат свіжою добавкою повторно повертається до

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

колони азеотропного осушення 7. Така схема рециркуляції дозволяє підвищити економічну ефективність технологічного процесу та зменшити витрати органічного розчинника.

Товарний продукт у вигляді суміші оцтової кислоти та оцтового ангідриду, що містить приблизно 0,5–0,8 т ангідриду на 1 т кислоти, відводиться з нижньої частини колони 10 та спрямовується на подальшу ректифікацію й очищення. Ділянка ректифікації характеризується значною тепловою інерційністю та високою чутливістю до коливань температури, тиску і складу живлення. Саме тому процеси ректифікації належать до найбільш складних об'єктів автоматичного керування у структурі виробництва оцтової кислоти.

Функціональний аналіз технологічної схеми показує, що найбільш чутливими до зміни режимних параметрів є реактор 2, вузол рециркуляції газів, система охолодження та ректифікаційні колони 7 і 10. Порушення температурного режиму реактора призводить до зміни швидкості реакцій та погіршення селективності процесу, тоді як нестабільність роботи колон впливає на чистоту кінцевого продукту та енергетичну ефективність виробництва. Наявність значної кількості внутрішніх матеріальних та теплових зв'язків між апаратами формує складну динамічну структуру об'єкта автоматизації, що обумовлює необхідність використання багатоконтурних систем регулювання, засобів оперативного контролю та сучасних алгоритмів автоматичного керування технологічним процесом.

1.4 Аналіз матеріальних та енергетичних потоків технологічного процесу

Технологічний процес виробництва оцтової кислоти характеризується складною структурою матеріальних та енергетичних потоків, взаємодія яких визначає стабільність функціонування всієї установки, ефективність використання сировини та якість готової продукції. У межах технологічної

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

схеми одночасно реалізуються процеси транспортування реагентів, теплопередачі, фазових перетворень, рециркуляції компонентів та ректифікаційного розділення багатокомпонентних сумішей. Наявність великої кількості взаємопов'язаних потоків формує складну динамічну систему, у якій зміна одного параметра спричиняє зміну режимів роботи інших технологічних вузлів [4].

Матеріальні потоки установки включають потоки свіжого повітря, ацетальдегіду, циркуляційного газу, оцтової кислоти, етилацетату, сирого продукту та проміжних сумішей, що переміщуються між реактором, сепараційними апаратами та ректифікаційними колонами. Кожний із зазначених потоків характеризується змінними параметрами витрати, температури, тиску та концентраційного складу. У процесі функціонування установки відбувається безперервна зміна співвідношення між компонентами сумішей, що обумовлено перебігом хімічних реакцій, процесами конденсації, випаровування та рециркуляції.

Одним із найбільш важливих матеріальних потоків є газова суміш, що надходить до реактора 2 після змішування свіжого повітря із циркуляційним газом. Витрата повітря безпосередньо впливає на концентрацію кисню у реакційному середовищі та визначає інтенсивність процесів окиснення. Недостатня подача кисню призводить до зниження швидкості реакції та неповного перетворення реагентів, тоді як надлишкова кількість кисню може спричиняти розвиток небезпечних режимів та підвищення ризику утворення вибухонебезпечних сумішей. У зв'язку з цим система подачі газових потоків повинна забезпечувати стабільне співвідношення між свіжим повітрям та рециркуляційним газом за умов змінного навантаження установки.

Рециркуляційний газовий потік виконує не лише транспортну функцію, але й бере участь у стабілізації температурного режиму реактора. Повернення частини газової суміші до змішувача 1 дозволяє знизити концентраційні коливання та забезпечити рівномірність розподілу компонентів у реакційному

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середовищі. Одночасно рециркуляція формує складні внутрішні перехресні зв'язки між апаратами, оскільки зміна параметрів потоку після реактора впливає на умови роботи змішувача, системи охолодження та абсорбційного обладнання.

Реактор 2 є основним джерелом теплових потоків у технологічній схемі. У процесі окиснення ацетальдегіду виділяється значна кількість теплоти, унаслідок чого реактор характеризується високим тепловим навантаженням. Тепловий баланс реактора визначається співвідношенням між теплотою, що виділяється під час хімічних реакцій, та теплотою, яка відводиться через систему охолоджувальних змішувачів. Порушення цього балансу призводить до зміни температури реакційного середовища, що безпосередньо впливає на селективність процесу та склад кінцевих продуктів.

Температурний режим реактора характеризується значною інерційністю, обумовленою великим об'ємом реакційної маси та теплоємністю каталізаторного розчину. Зміна витрати охолоджувальної води не викликає миттєвої зміни температури середовища, що ускладнює процес автоматичного регулювання. Крім того, зміна температури у реакторі впливає на швидкість випаровування компонентів, склад парогазової суміші та навантаження на подальші апарати технологічної схеми.

У холодильнику 3 реалізується процес інтенсивного теплообміну між гарячою парогазовою сумішшю та охолоджувальним агентом. Енергетичне навантаження холодильника залежить від температури потоку після реактора, витрати газової суміші та ступеня конденсації компонентів. Зменшення ефективності охолодження призводить до збільшення кількості парів, що надходять до сатуратора 4, унаслідок чого змінюється фазовий склад циркуляційного потоку та порушується стабільність роботи сепараційних вузлів.

Суттєвий вплив на матеріальні та теплові потоки має процес введення ацетальдегіду до сатуратора 4. Випаровування ацетальдегіду супроводжується поглинанням теплоти, що сприяє охолодженню парогазової суміші та додатковій конденсації продуктів реакції. Водночас витрата ацетальдегіду визначає склад

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рідкої фази, ефективність вилучення продуктів та параметри циркуляційного газу. Нестабільність подачі ацетальдегіду спричиняє зміну температурного режиму сатуратора, що впливає на роботу скрубера 5 та загальний матеріальний баланс установки.

У скрубєрі 5 реалізується масообмінний процес абсорбції парів ацетальдегіду оцтовою кислотою. Ефективність поглинання визначається температурою зрошувальної рідини, швидкістю газового потоку та концентрацією компонентів у фазах. Процес характеризується значною чутливістю до зміни витратних характеристик, оскільки коливання швидкості газового потоку можуть спричинити погіршення умов контакту між фазами та збільшення втрат реагентів.

Важливе місце у структурі матеріальних та енергетичних потоків займають ректифікаційні колони 7 і 10. У цих апаратах реалізуються складні процеси тепло- та масообміну між паровою та рідинною фазами. Теплове навантаження колон визначається витратою гріючого агента у кип'ятильниках, температурою живлення та складом технологічної суміші. Навіть незначні зміни температури або тиску у колоні можуть призводити до суттєвого порушення концентраційного профілю та погіршення якості кінцевого продукту.

Ректифікаційні процеси характеризуються значною інерційністю через великі об'єми рідких фаз у тарілках або насадках колон. Зміна витрати теплового агента або флегми впливає на склад продуктів із певним часовим запізненням, що створює додаткові труднощі для систем автоматичного регулювання. Одночасно колони мають виражені внутрішні перехресні зв'язки між температурою, тиском, рівнем рідини та концентрацією компонентів, унаслідок чого процеси регулювання набувають багатоканального характеру.

1.5 Визначення параметрів керування та контрольованих величин

Ефективність функціонування виробництва оцтової кислоти значною

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мірою визначається точністю підтримання технологічних параметрів, що характеризують перебіг фізико-хімічних процесів у реакторному, сепараційному та ректифікаційному обладнанні. Стабільність температурного режиму, тиску, витрат реагентів та концентрацій компонентів безпосередньо впливає на селективність реакцій, ступінь перетворення сировини, енергетичні витрати та якість кінцевого продукту. У зв'язку з цим визначення параметрів керування та контрольованих величин є важливим етапом аналізу технологічного процесу як об'єкта автоматизації.

Основною контрольованою величиною у реакторі 2 є температура реакційного середовища. Перебіг реакцій окиснення ацетальдегіду супроводжується значним тепловиділенням, тому навіть незначне відхилення температури від заданого значення може призвести до зміни швидкості реакції, утворення побічних продуктів та погіршення селективності процесу. Підвищення температури спричиняє інтенсифікацію побічних реакцій і збільшення навантаження на систему охолодження, тоді як її зниження призводить до зменшення швидкості перетворення реагентів. Канал регулювання температури характеризується значною інерційністю через велику теплоємність реакційної маси та транспортне запізнення у системі теплообміну.

Важливим параметром керування є тиск у реакторі. Стабільність тиску визначає умови перебігу реакцій, швидкість масообміну та склад газової фази. Зниження тиску може спричинити порушення циркуляції газових потоків та погіршення умов контакту реагентів, тоді як надлишковий тиск створює небезпеку аварійних режимів. Регулювання тиску здійснюється шляхом зміни витрати циркуляційного газу та контролю роботи компресорного обладнання. Даний канал керування характеризується відносно високою швидкодією, однак його робота тісно пов'язана з температурними та витратними параметрами системи.

Суттєвий вплив на стабільність технологічного процесу має концентрація кисню у циркуляційному газі. Вміст кисню визначає інтенсивність процесів

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

окиснення та рівень пожежо- і вибухонебезпеки технологічної установки. Збільшення концентрації кисню підвищує швидкість реакцій, але одночасно створює ризик утворення вибухонебезпечних сумішей. Зниження концентрації кисню супроводжується погіршенням ступеня окиснення ацетальдегіду та зменшенням продуктивності установки. Контроль цього параметра здійснюється шляхом регулювання співвідношення між витратою свіжого повітря та рециркуляційного газу.

Одним із найважливіших параметрів керування є витрата ацетальдегіду CH_3CHO , що подається до сатуратора 4. Зміна витрати реагенту впливає на матеріальний баланс установки, склад реакційного середовища та температурний режим процесу. Надлишкова подача ацетальдегіду може призводити до накопичення непрореагованого реагенту та зростання втрат у газовій фазі, тоді як недостатня витрата викликає зменшення продуктивності установки. Канал регулювання витрати характеризується відносно малою інерційністю, однак має виражений вплив на інші технологічні параметри.

У процесах ректифікації важливого значення набуває контроль температури у верхній та нижній частинах колон 7 і 10. Температурний профіль колони визначає ефективність розділення компонентів та чистоту кінцевого продукту. Зміна температури у верхній частині колони свідчить про порушення режиму конденсації, тоді як коливання температури у нижній частині впливають на склад кубового залишку. Динаміка ректифікаційних процесів характеризується значним часовим запізненням і високою інерційністю через великі об'єми рідкої фази.

Не менш важливими контрольованими величинами є рівні рідини у збірниках, сепараторах та ректифікаційних колонах. Стабільність рівнів забезпечує безперервність технологічного процесу та запобігає порушенню гідравлічного режиму апаратів. Переповнення ємностей може спричиняти потрапляння рідини до газових комунікацій, тоді як зниження рівня викликає нестабільність роботи насосного обладнання та порушення матеріального

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

балансу системи.

Склад кінцевого продукту є інтегральним параметром, що характеризує ефективність функціонування всієї технологічної установки. Концентрація оцтової кислоти CH_3COOH , оцтового ангідриду $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$ та домішок залежить від режимів роботи реактора, систем охолодження та ректифікаційного обладнання. Контроль складу продукту у більшості випадків здійснюється за допомогою автоматичних аналізаторів концентрації або непрямими методами через контроль температурного режиму колон.

На стабільність технологічного режиму значний вплив мають зовнішні та внутрішні збурення. До зовнішніх збурень належать коливання температури охолоджувальної води, зміна параметрів електропостачання, нестабільність складу сировини та коливання витрати повітря. Внутрішні збурення пов'язані зі зміною швидкості реакцій, накопиченням побічних продуктів, коливанням теплових навантажень та зміною гідродинамічних характеристик потоків. Особливістю технологічного процесу є наявність значної кількості внутрішніх перехресних зв'язків між параметрами, унаслідок чого зміна одного регульованого параметра спричиняє зміну інших величин.

Для узагальнення основних параметрів керування та контрольованих величин технологічного процесу доцільно використати табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технологічні параметри виробництва оцтової кислоти

№	Технологічний параметр	Місце контролю	Робочий діапазон параметра	Регульована величина	Основний вплив на процес
1	Температура реакційного середовища	Реактор 2	140–170 °C	Витрата охолоджувальної води	Селективність реакції, швидкість синтезу
2	Тиск у реакторі	Реактор 2	0,15–0,40 МПа	Витрата циркуляційного газу	Інтенсивність масообміну, безпека процесу

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Продовження таблиці 1.1

№	Технологічний параметр	Місце контролю	Робочий діапазон параметра	Регульована величина	Основний вплив на процес
3	Концентрація кисню	Газова лінія перед реактором	7–9 % об.	Витрата свіжого повітря	Швидкість окиснення, вибухобезпечність
4	Витрата ацетальдегіду	Лінія подачі до сатуратора 4	0,8–1,5 м³/год	Положення регулюючого клапана	Матеріальний баланс процесу
5	Температура після холодильника	Холодильник 3	25–40 °С	Витрата охолоджувального агента	Ефективність конденсації
6	Рівень рідини	Збірник 6	40–75 % висоти апарата	Витрата відкачування продукту	Безперервність процесу
7	Температура у верхній частині колони	Колона 7	70–85 °С	Витрата флегми	Якість осушення продукту
8	Температура у нижній частині колони	Колона 10	115–140 °С	Витрата гріючого агента	Чистота товарного продукту
9	Склад кінцевого продукту	Вихід із колони 10	CH ₃ COOH: 99,0–99,8 % мас.; (CH ₃ CO) ₂ O: 0,5–0,8 т/т кислоти	Комплексне регулювання режимів	Якість оцтової кислоти
10	Тиск у системі рециркуляції	Газовий контур	0,10–0,25 МПа	Робота компресорного обладнання	Стабільність циркуляційного режиму

1.6 Аналіз динамічних властивостей виробництва як об'єкта автоматизації

Виробництво оцтової кислоти належить до складних багатопараметричних технологічних систем із вираженими нелінійними властивостями, значною інерційністю та наявністю багатьох внутрішніх взаємозв'язків між окремими апаратами і технологічними потоками. Динамічні властивості такого об'єкта формуються сукупністю фізико-хімічних процесів, що одночасно протікають у реакторному обладнанні, системах теплообміну, сепарації та ректифікації. Особливістю виробництва є те, що зміна одного технологічного параметра впливає не лише на локальну ділянку процесу, але й викликає перехідні процеси в інших функціонально пов'язаних елементах технологічної схеми (рис. 1.4).

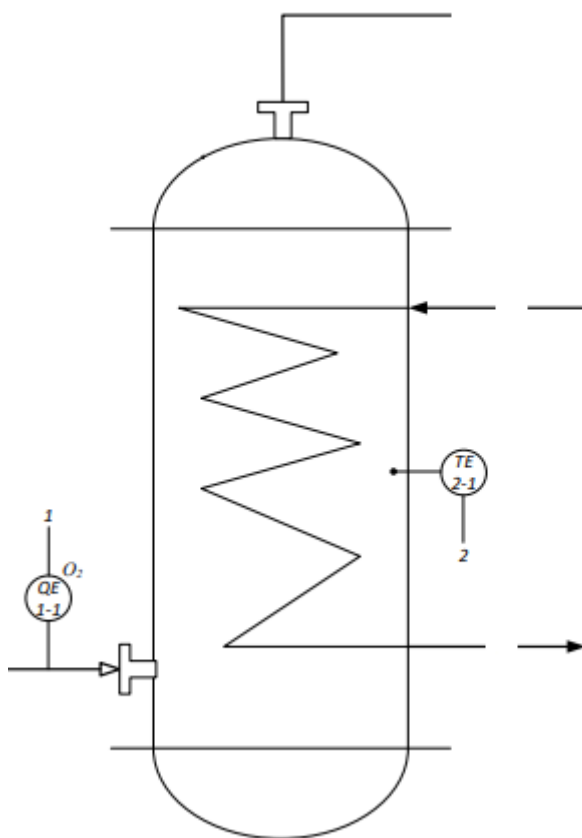


Рисунок 1.4 – Схема реактора

Однією з основних динамічних характеристик виробництва оцтової

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

кислоти є значна інерційність технологічних апаратів. Найбільшою інерційністю характеризується реактор 2, у якому відбувається окиснення ацетальдегіду в присутності каталізаторного розчину. Великий об'єм реакційного середовища та висока теплоємність рідкої фази призводять до того, що зміна витрати охолоджувальної води або подачі реагентів не викликає миттєвої зміни температури реакційної маси. Перехідні процеси у реакторі можуть тривати протягом значного часу, що суттєво ускладнює підтримання стабільного теплового режиму.

Температура реактора є одним із найбільш чутливих параметрів технологічного процесу. Внаслідок екзотермічного характеру реакцій навіть незначне зростання температури може призводити до інтенсифікації швидкості хімічних перетворень, що, у свою чергу, викликає додаткове тепловиділення. Така особливість формує нелінійний характер динаміки об'єкта. При певних режимах роботи система може переходити у нестійкий стан, що супроводжується різким зростанням температури та порушенням селективності процесу. Саме тому реакторне відділення потребує високошвидкісних систем автоматичного регулювання температури та ефективного тепловідведення.

Суттєвий вплив на динамічні властивості установки має транспортне запізнення, яке виникає під час переміщення матеріальних потоків між окремими апаратами. Парогазова суміш після реактора проходить через холодильник 3, сатуратор 4, скруббер 5 та систему рециркуляції, унаслідок чого зміна параметрів у реакторі проявляється в інших елементах схеми лише через певний проміжок часу. Наявність транспортного запізнення ускладнює процес регулювання, оскільки система керування отримує інформацію про результати керувальної дії із затримкою [5].

Особливо виражене транспортне запізнення характерне для ректифікаційних колон 7 і 10. У процесах ректифікації зміна витрати флегми або теплового навантаження кип'ятильника впливає на концентраційний склад продукту не миттєво, а після завершення складних процесів тепло- та

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

масообміну між паровою та рідинною фазами. Через це канали регулювання температури та складу продукту характеризуються великою сталою часу та значним запізненням реакції об'єкта на керувальні впливи.

Виробництво оцтової кислоти також характеризується вираженою багатозв'язністю каналів регулювання. Наприклад, зміна витрати охолоджувальної води у реакторі впливає не лише на температуру реакційного середовища, але й на швидкість випаровування компонентів, тиск у системі, склад парогазової суміші та навантаження на холодильник 3 і сатуратор 4. Аналогічно зміна витрати свіжого повітря одночасно впливає на концентрацію кисню, інтенсивність реакції, тепловиділення та параметри циркуляційного газового потоку.

Наявність внутрішніх перехресних зв'язків між параметрами суттєво ускладнює процес автоматичного керування. У багатьох випадках зміна одного регульованого параметра викликає небажані коливання інших технологічних величин. Наприклад, збільшення подачі теплового агента до ректифікаційної колони 10 покращує випаровування компонентів, однак одночасно змінює тиск у колоні та впливає на температурний профіль по висоті апарата. Унаслідок цього системи автоматизації повинні враховувати взаємозалежність параметрів і забезпечувати узгоджену роботу кількох контурів регулювання.

Важливою особливістю динаміки технологічного процесу є його нелінійність. Швидкість перебігу реакцій окиснення залежить від температури, концентрації кисню та вмісту реагентів за нелінійними законами. При зміні навантаження установки коефіцієнти підсилення каналів регулювання також змінюються, що призводить до нестабільності якості регулювання при використанні систем із фіксованими параметрами налаштування. Особливо це проявляється при роботі установки у перехідних режимах, під час запуску або зміни продуктивності.

Суттєвий вплив на стабільність функціонування виробництва мають зовнішні та внутрішні збурення. До зовнішніх збурень належать зміни

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури охолоджувальної води, коливання параметрів електроживлення, нестабільність витрати повітря та зміна складу сировини. Внутрішні збурення виникають унаслідок зміни активності каталізатора, накопичення побічних продуктів, коливання теплових навантажень та зміни гідродинамічних режимів у колонному обладнанні.

Реакція технологічного процесу на керувальні дії залежить від типу апарата та фізичної природи процесу. Канали регулювання витрати характеризуються відносно швидкою реакцією, тоді як температурні канали мають значну інерційність. Рівневі процеси у збірниках та сепараторах мають інтегруючий характер, унаслідок чого навіть невеликі дисбаланси між притоком і відтоком речовини можуть спричинити поступове накопичення відхилень.

Постановка задачі для дослідження

Технологічний процес виробництва оцтової кислоти є складною багатопараметричною системою з вираженою інерційністю, нелінійністю та наявністю значних транспортних запізнень. Найбільш динамічно навантаженою є реакторна стадія, де відбувається інтенсивне тепловиділення, а стабільність процесу визначається ефективністю відведення теплоти та узгодженістю роботи суміжних технологічних підсистем.

У реакторі теплова рівновага підтримується через систему охолодження, де зміна режиму реакції швидко впливає на тепловідведення. Це обумовлює необхідність застосування каскадної системи автоматичного керування, в якій зовнішній контур забезпечує стабілізацію температури продуктового потоку, а внутрішній швидко компенсує відхилення у роботі охолоджувальної системи шляхом регулювання інтенсивності теплообміну. Така структура дозволяє поєднати точність підтримання режиму з високою швидкодією реагування на збурення та забезпечує стійкість теплового процесу в реакторі.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

2.1 Характеристика об'єкта керування як об'єкта автоматизації

Реактор виробництва оцтової кислоти та оцтового ангідриду є складним хіміко-технологічним об'єктом, у якому одночасно протікають екзотермічні реакції ацетилювання, процеси тепло- і масопереносу між реакційним середовищем та теплоносієм, а також явища гідродинамічного перемішування реагентів. Сукупність цих процесів визначає теплові характеристики реактора, що з точки зору теорії автоматичного керування виявляються у значній тепловій інерційності об'єкта, нелінійності тепломасообмінних залежностей та чутливості до зовнішніх збурень різної природи [6].

Підтримання теплового режиму реактора в заданих межах здійснюється шляхом регулювання витрати охолоджувальної води Q_w через теплообмінник, розташований у реакційній зоні. Зміна витрати Q_w призводить до зміни інтенсивності відведення теплоти від реакційного середовища, що у свою чергу позначається на температурному полі реактора. Однак між керуючою дією і відгуком основної регульованої величини розташовані послідовно кілька теплових опорів та ємностей – стінка змійовика, прикордонні шари теплоносія і реакційного середовища, шар каталізатора – що й зумовлює значне транспортне запізнення та велику інерційність об'єкта по основному каналу керування.

Основною регульованою величиною є температура парогазової суміші на виході з реактора T_{go} , яка відіграє роль зовнішньої вихідної змінної Y_1 і безпосередньо визначає якість цільового продукту та безпеку ведення технологічного процесу. Водночас у реакторі з підключеним теплообмінником природним чином виникає проміжна змінна – температура охолоджувальної води на виході зі змійовика T_{wo} . Ця величина є вихідною змінною Y_2 внутрішнього контуру каскадної АСК і реагує на зміну витрати Q_w значно

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

швидше, ніж основна регульована величина T_{go} , оскільки визначається безпосередньо тепловим станом самого теплоносія, а не всього реакційного середовища. Саме ця різниця в динаміці є фізичною передумовою побудови каскадної системи керування.

2.2 Обґрунтування каскадної структури системи автоматичного керування

Вибір структури системи автоматичного керування є одним із визначальних етапів проектування, оскільки від нього залежать принципи можливості досягнення заданих показників якості. Для об'єктів із великою інерційністю та транспортним запізненням одноконтурна АСК має суттєве принципове обмеження, а саме, регулятор отримує інформацію про відхилення регульованої величини лише після того, як збурення вже повністю пройшло через об'єкт і позначилось на виході. Збільшення коефіцієнта підсилення регулятора прискорює реакцію, але обмежене умовою стійкості замкненої системи, яка стає тим жорсткішою, чим більше транспортне запізнення об'єкта. В результаті одноконтурна система змушена «чекати» і реагувати на вже наслідки збурення, а не на його причину.

Каскадна система автоматичного керування усуває цей недолік за рахунок введення додаткового вимірювання проміжної змінної та побудови внутрішнього швидкого контуру, який відпрацьовує збурення на ранньому етапі їхнього поширення. У розглянутому випадку внутрішній контур охоплює ділянку від витрати Q_w до температури T_{wo} і функціонує як самостійна система стабілізації з власним регулятором $W_{p2}(p)$. Зовнішній контур охоплює всю систему від Q_w до T_{go} і формує завдання для внутрішнього регулятора, розглядаючи замкнений внутрішній контур як еквівалентний об'єкт зі значно кращими динамічними властивостями – меншою сталою часу і практично відсутнім транспортним запізненням на вхід внутрішнього регулятора.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Принцип підпорядкованого регулювання, покладений в основу каскадної структури, дозволяє синтезувати регулятори послідовно: спочатку налаштовується внутрішній контур, досягаючи бажаних динамічних характеристик замкненого внутрішнього контуру $W_{зк2}(p)$, а потім зовнішній регулятор $W_{р1}(p)$ синтезується з урахуванням еквівалентної ПФ внутрішнього контуру вже як ланки об'єкта. Такий підхід значно спрощує задачу синтезу порівняно з проектуванням єдиного регулятора для всього об'єкта в цілому і дозволяє обрати для кожного контуру метод налаштування, найбільш відповідний його динамічним характеристикам.

Умовою ефективності каскадної структури є достатнє розділення динамік контурів: внутрішній контур має бути суттєво швидшим за зовнішній, що забезпечує їхню відносну незалежність і дозволяє нехтувати взаємним впливом при налаштуванні. Конкретна перевірка виконання цієї умови для даного об'єкта здійснюється в ході ідентифікації та розрахунку параметрів регуляторів у наступних підрозділах.

2.3 Вимоги до каскадної системи автоматичного керування

Вимоги до каскадної АСК реактора формуються на підставі технологічного регламенту ведення процесу та загальноприйнятих норм проектування систем автоматичного керування для хімічних виробництв. Вони охоплюють показники якості перехідних процесів, вимоги до точності в усталеному режимі та показники надійності та стійкості системи.

З точки зору якості перехідного процесу по основній регульованій величині T_{go} встановлюється обмеження на перерегулювання $\sigma < 25\%$. Ця вимога обумовлена допустимим технологічним діапазоном відхилення температури у реакторі: перевищення верхньої межі температури може призвести до неконтрольованого прискорення реакції та аварійного зростання тиску, тоді як тривале перебування нижче нижньої межі знижує конверсію реагентів і погіршує

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показники якості продукту. Статична похибка при постійному завданні повинна дорівнювати нулю, що забезпечується запровадженням інтегральних складових у закони керування обох регуляторів і є обов'язковою умовою для систем, що підтримують задане значення технологічного параметра.

Вимоги до запасів стійкості системи встановлюються виходячи з необхідності надійного функціонування в умовах можливої зміни динамічних властивостей об'єкта. Запас стійкості за фазою $P_m \geq 45^\circ$ забезпечує працездатність системи при збільшенні транспортного запізнення або зростанні інерційності об'єкта, що може відбуватися внаслідок відкладення забруднень на поверхні теплообміну, часткової дезактивації каталізатора або зміни складу реакційної суміші. Запас стійкості за амплітудою $G_m \geq 6$ дБ гарантує стійкість при можливому зростанні коефіцієнта підсилення об'єкта, пов'язаному, наприклад, зі зміною концентрації вихідних реагентів.

Вимога ефективної компенсації збурень стосується передусім коливань початкової температури охолоджувальної води $T_{wo,o}$, спричинених сезонними та добовими змінами умов водопостачання, а також відхилень витрати та температури сировини, що надходить до реактора. Каскадна структура принципово більш ефективна у компенсації збурень, що прикладаються всередині внутрішнього контуру, оскільки вони відпрацьовуються внутрішнім регулятором $W_{p2}(p)$ без участі повільного зовнішнього контуру, що суттєво прискорює компенсацію та знижує амплітуду відхилень T_{go} .

2.4 Об'єкт керування як модель «чорний ящик»

Перед синтезом системи автоматичного керування необхідно формалізувати об'єкт керування – встановити повний перелік вхідних і вихідних змінних, визначити характер їхнього зв'язку з технологічним процесом та класифікувати за функціональною роллю у майбутній системі. Такий підхід відповідає методології аналізу складних технологічних об'єктів через зовнішній

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

опис – модель «чорний ящик», яка абстрагується від внутрішньої фізико-хімічної природи процесів і зосереджується виключно на причинно-наслідкових зв'язках між вимірюваними та керованими величинами. Реактор ацетилювання зі теплообмінником розглядається як детермінований динамічний об'єкт із зосередженими параметрами, стан якого у кожний момент часу повністю визначається набором вхідних впливів та початковими умовами [7].

Відповідно до загальноприйнятої класифікації в теорії автоматичного керування, всі вхідні змінні об'єкта поділяються на три функціональних класи. До першого класу належать керуючі впливи U – ті змінні, значення яких цілеспрямовано змінюються системою автоматичного керування для досягнення заданого режиму роботи. До другого класу відносяться некеровані вхідні змінні, що задаються зовнішніми технологічними умовами і визначають робочу точку об'єкта. Третій клас утворюють збурення d – некеровані та, як правило, невимірювані впливи, що відхиляють стан об'єкта від бажаного режиму і є основним джерелом похибок регулювання. Вихідні змінні Y поділяються на основні регульовані величини, підтримання яких є метою функціонування АСК, та проміжні вимірювані величини, що використовуються в системах із складнішою структурою – зокрема, у каскадних системах. Схема моделі «чорний ящик» реактора з позначенням усіх вхідних і вихідних змінних наведена на рис. 2.1. Ця схема є вихідною для побудови структури каскадної АСК та постановки задачі ідентифікації динамічних об'єктів обох контурів.

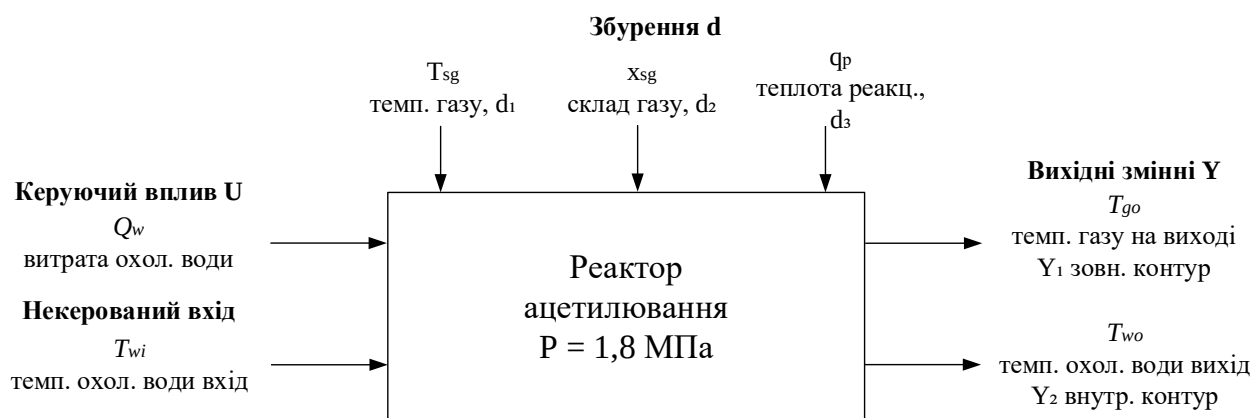


Рисунок 2.1 – Модель «чорний ящик» реактора ацетилювання

Керуючий вплив. Головним і єдиним керуючим впливом у розглянутій АСК є об'ємна витрата охолоджувальної води Q_w , що подається до теплообмінника реактора. Саме Q_w є тією змінною, на яку безпосередньо діє виконавчий механізм – регулювальний клапан, встановлений на трубопроводі подачі охолоджувальної води. Зміна Q_w впливає на інтенсивність теплообміну між теплоносієм і реакційним середовищем і тим самим регулює тепловий баланс реактора. Слід зазначити, що Q_w є керуючим впливом внутрішнього контуру каскадної АСК – тобто саме ця величина безпосередньо визначається виконавчим механізмом за сигналом внутрішнього регулятора $W_{p2}(p)$, тоді як зовнішній регулятор $W_{p1}(p)$ формує не Q_w безпосередньо, а завдання для внутрішнього контуру у вигляді бажаного значення T_{w0} .

Некеровані вхідні змінні. До цього класу належить температура охолоджувальної води на вході до змішувача T_{wi} , яка визначається умовами централізованого водопостачання підприємства і не підлягає регулюванню з боку даної АСК. T_{wi} входить у рівняння теплового балансу змішувача і тому безпосередньо впливає на теплову потужність охолодження при незмінному Q_w . Аналогічно, витрата та температура газосировинної суміші, що подається до реактора, встановлюються вищим рівнем технологічного управління виходячи з планових показників продуктивності і не підпорядковані даним АСК. Вказані змінні утворюють робоче середовище, в якому функціонує система керування, і їхні номінальні значення відповідають проектним умовам роботи реактора при тиску $P = 1,8$ МПа.

Збурення. Клас збурень охоплює всі ненавмисні зміни вхідних умов, що порушують сталий тепловий режим реактора. Первинним збуренням d_1 є коливання температури газосировинної суміші на вході до реактора, зумовлені нестабільністю попередніх стадій технологічного процесу. Друге суттєве збурення d_2 пов'язане із змінами складу газосировинної суміші – відхиленнями концентрацій реагентів від номінальних значень, що змінює питомий тепловий ефект реакції і тим самим тепловиділення в реакційній зоні. Теплота хімічної

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

реакції q_p є внутрішнім збуренням d_3 , що може змінюватися внаслідок часткової дезактивації каталізатора, нерівномірності його розподілу у реакторі або відхилення умов проведення реакції від оптимальних. Нарешті, сезонні та добові коливання температури T_{wi} охолоджувальної води, що надходить у систему водопостачання, є характерним збуренням, яке у практиці експлуатації установок виявляється одним із найбільш систематичних і передбачуваних. Каскадна структура АСК дозволяє суттєво зменшити вплив цього збурення завдяки його швидкій компенсації у внутрішньому контурі.

Вихідні змінні. Зовнішній вихід об'єкта керування представлений двома вимірюваними змінними, що відіграють різну роль у каскадній АСК. Основною регульованою величиною є температура парогазової суміші на виході з реактора T_{go} , що відповідає вихідній змінній Y_1 зовнішнього контуру. Підтримання T_{go} на заданому рівні є кінцевою метою функціонування всієї системи керування, оскільки ця величина безпосередньо характеризує якість і безпеку перебігу технологічного процесу. Проміжною вимірюваною змінною є температура охолоджувальної води на виході зі зміювика T_{wo} – вихідна змінна Y_2 внутрішнього контуру. T_{wo} не є самостійним об'єктом технологічного регулювання, але саме завдяки її вимірюванню стає можливим реалізація каскадного принципу: швидкий відгук T_{wo} на зміну Q_w дозволяє внутрішньому контуру відпрацьовувати збурення задовго до того, як вони позначаться на T_{go} .

Тепловий баланс теплообмінника. Зв'язок між керуючим впливом Q_w та вихідними змінними описується рівнянням теплового балансу, що пов'язує потужність відведення теплоти зі зміювика з витратою та температурним напором теплоносія:

$$q = Q_w \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{wo} - T_{wi}), \quad (2.1)$$

де q – тепловий потік, що відводиться охолоджувальною водою, Вт; ρ_w – густина охолоджувальної води, кг/м^3 ; $c_w = 4186 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ – питома теплоємність води; T_{wo} та T_{wi} – температури охолоджувальної води на виході та вході зі зміювика відповідно, $^\circ\text{C}$. Рівняння (2.1) є стаціонарним тепловим

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

балансом і справедливе для усталеного режиму роботи. У динаміці між зміною Q_w і зміною T_{w0} існує запізнення та інерційність, що і є предметом ідентифікації об'єкта внутрішнього контуру $W_{02}(p)$. Аналогічно, тепловий потік q впливає на температуру реакційного середовища T_{go} через ще більш інерційний канал, що описується передавальною функцією зовнішнього об'єкта $W_{01}(p)$.

2.5 Методика проведення експерименту

Визначення динамічних характеристик каналів керування є необхідним підготовчим етапом синтезу каскадної АСК, оскільки якість налаштування регуляторів безпосередньо залежить від точності математичних моделей об'єктів обох контурів. У даній роботі для ідентифікації обох каналів – внутрішнього по T_{w0} та зовнішнього по T_{go} – застосовано метод активного експерименту зі ступінчастим збурювальним впливом, який є найбільш поширеним і зручним для промислових теплотехнічних об'єктів [8].

Метод ґрунтується на тому, що будь-який лінійний стаціонарний динамічний об'єкт повністю описується своєю перехідною характеристикою $h(t)$ – реакцією виходу на одиничний ступінчастий вхідний вплив за нульових початкових умов. Зв'язок між перехідною характеристикою і передавальною функцією є взаємно однозначним: знаючи $h(t)$ у достатньому діапазоні часу, можна однозначно відновити передавальну функцію $W(p)$ шляхом апроксимації відповідними аналітичними виразами. Перевага методу перед частотними методами ідентифікації полягає у простоті реалізації безпосередньо на діючій технологічній установці без спеціального випробувального обладнання і без виведення об'єкта з робочого режиму на тривалий час.

Підготовка до проведення експерименту передбачає приведення реактора у стан термодинамічної рівноваги, при якому всі контрольовані параметри – температури T_{w0} та T_{go} , витрата охолоджувальної води Q_w , тиск у реакторі $P = 1,8$ МПа – стабілізуються на своїх номінальних значеннях і не виявляють тенденції

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до відходу від встановлених рівнів. Термодинамічна рівновага є принциповою умовою для коректності ідентифікації: якщо до початку збурення система перебуває у перехідному процесі, реакція на ступінчастий вплив буде суперпозицією двох перехідних процесів, що робить неможливим правильне відновлення передавальної функції об'єкта.

Після підтвердження стану рівноваги на керуючий вхід – витрату охолоджувальної води Q_w – подається ступінчасте збурення постійної амплітуди $\Delta Q_w = +2,0$ м³/год, яке утримується незмінним протягом усього часу вимірювання. Головною вимогою до амплітуди збурення є забезпечення вимірного та добре спостережуваного відгуку на виходах T_{wo} та T_{go} при одночасному збереженні режиму роботи реактора в лінійній зоні, де динамічні властивості об'єкта залишаються практично незмінними. Надто мале збурення призводить до того, що корисний сигнал на виходах тоне у завадах вимірювання, тоді як надто велике може перевести об'єкт у нелінійний режим і вивести технологічний процес за межі допустимих параметрів (рис. 2.2).

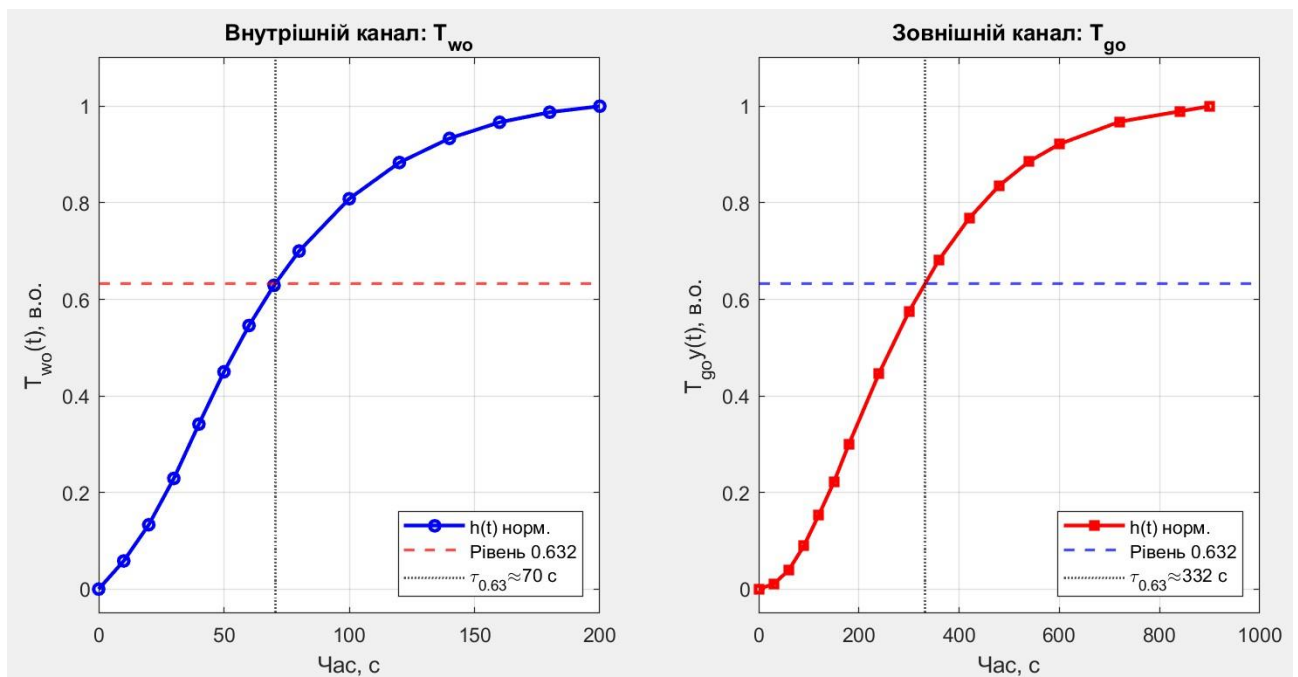


Рисунок 2.2 – Нормовані перехідні характеристики каналів

Реєстрація динамічної реакції виходів T_{wo} і T_{go} ведеться безперервно з моменту подачі збурення до повного встановлення нових усталених значень. Для

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

кожного каналу фіксуються характерні параметри перехідного процесу: час запізнення τ , що відповідає початку помітного відхилення виходу від початкового рівня; час наростання $t_{\text{нар}}$, що визначається як проміжок між моментами досягнення 10% та 90% усталеного значення; час регулювання $t_{\text{рег}}$, після якого вихід остаточно входить у зону $\pm 2\%$ від нового усталеного значення і більше не виходить за її межі; а також саме усталене значення $u_{\text{уст}}$, що встановлюється після завершення перехідного процесу. Повнота реєстрації всього перехідного процесу до виходу у новий стаціонарний стан є обов'язковою умовою – скорочена реєстрація призводить до систематичних похибок при апроксимації передавальних функцій.

Слід зазначити, що внутрішній і зовнішній канали мають принципово різні часові масштаби динаміки. Внутрішній канал $Q_w \rightarrow T_{w0}$ характеризується відносно невеликою сталою часу порядку десятків секунд, що зумовлює швидкий відгук T_{w0} на зміну Q_w та дозволяє реєструвати перехідний процес у часовому вікні до 200–300 секунд. Зовнішній канал $Q_w \rightarrow T_{g0}$ є значно більш інерційним: реакція T_{g0} на зміну Q_w розгортається протягом сотень секунд унаслідок великих теплових мас реакційного середовища та конструктивних елементів реактора. Тому для зовнішнього каналу необхідне значно триваліше спостереження – порядку 900 секунд і більше – для того, щоб перехідна характеристика повністю вийшла на усталений рівень і апроксимація передавальної функції дала достовірний результат.

2.6 Нормування експериментальних даних

Безпосередньо вимірювані в ході експерименту сигнали є фізичними величинами, вираженими у відповідних одиницях вимірювання – температури у градусах Цельсія, витрати у кубометрах на годину. Для побудови математичних моделей у формі передавальних функцій і подальшого синтезу регуляторів зручніше працювати з нормованими, або безрозмірними, величинами.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Нормування забезпечує однакову шкалу для вхідних і вихідних сигналів незалежно від їхньої фізичної природи, що суттєво спрощує ідентифікацію та дозволяє безпосередньо зіставляти динамічні характеристики різних каналів [9].

Нормування вхідного сигналу базується на тому, що збурення ΔQ_w є заданою постійною величиною і розглядається як одиничний ступінчастий вплив у відносних одиницях:

$$u_{\text{вдн}}(t) = \frac{\Delta Q_w(t)}{\Delta Q_{w,\text{ном}}} = 1 \text{ [в.о.]}, \quad (2.2)$$

де $\Delta Q_{w,\text{ном}} = 2,0 \text{ м}^3/\text{год}$ – номінальна амплітуда ступінчастого збурення, прийнята за одиницю виміру у відносній шкалі вхідного сигналу. Таке визначення означає, що вхідний сигнал одночасно є одиничним ступінчастим впливом $\hat{u}(t) = 1 \text{ [в.о.]}$, що є стандартною умовою для побудови перехідних характеристик.

Нормування вихідних сигналів виконується окремо для кожного каналу за загальною формулою, що зводить фізичну перехідну характеристику до безрозмірної:

$$\hat{y}(t) = \frac{y(t) - y_0}{\Delta y_{\text{уст}}}, \quad (2.3)$$

де y_0 – початкове (рівноважне) значення вихідної величини до подачі збурення, що визначається як середнє значення виходу за останній стаціонарний період перед початком експерименту; $\Delta y_{\text{уст}} = y_{\text{уст}} - y_0$ – різниця між новим усталеним значенням після завершення перехідного процесу та початковим рівноважним значенням. Нормування (2.3) побудоване таким чином, що на початку перехідного процесу $\hat{y}(0) = 0$, оскільки $y(0) = y_0$, а після виходу у новий усталений стан $\hat{y}(\infty) = 1$, оскільки $y(\infty) = y_{\text{уст}}$. Ця властивість дозволяє безпосередньо читати перехідну характеристику як частку досягнутого відносного відхилення від нуля до одиниці, а також забезпечує коефіцієнт підсилення об'єкта $K = 1$ у безрозмірних одиницях, що означає рівність відносних змін виходу та входу в усталеному стані.

Для внутрішнього каналу – температури охолоджувальної води на виході

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зі зміювика T_{wo} , що є проміжною вихідною змінною Y_2 внутрішнього контуру – початкове рівноважне значення та усталений приріст визначаються з умов проведення експерименту при тиску $P = 1,8$ МПа:

$$T_{wo,0} = 46,0 \text{ }^{\circ}\text{C}, T_{wo,уст} = 70,0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \Delta T_{wo,уст} = 70,0 - 46,0 = 24,0 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (2.4)$$

Перехідна характеристика внутрішнього каналу набуває вигляду:

$$\hat{y}_2(t) = \frac{T_{wo}(t) - 46,0}{24,0}. \quad (2.5)$$

Для зовнішнього каналу – температури парогазової суміші на виході з реактора T_{go} , що є основною регульованою величиною Y_1 зовнішнього контуру – аналогічно:

$$T_{go,0} = 188,0 \text{ }^{\circ}\text{C}, T_{go,уст} = 216,0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \Delta T_{go,уст} = 216,0 - 188,0 = 28,0 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (2.6)$$

Нормована перехідна характеристика зовнішнього каналу:

$$\hat{y}_1(t) = \frac{T_{go}(t) - 188,0}{28,0}. \quad (2.7)$$

Коректність нормування перевіряється підстановкою початкових і кінцевих значень: для обох виразів (2.5) і (2.7) виконуються умови $\hat{y}(0) = 0$ та $\hat{y}(\infty) = 1$, що підтверджує правильність вибору параметрів нормування. Нормовані перехідні характеристики обох каналів є вихідними даними для подальшої апроксимації передавальних функцій $W_{o2}(p)$ і $W_{o1}(p)$ методом Нелдера–Міда, що детально описано в наступному підрозділі (рис. 2.3).

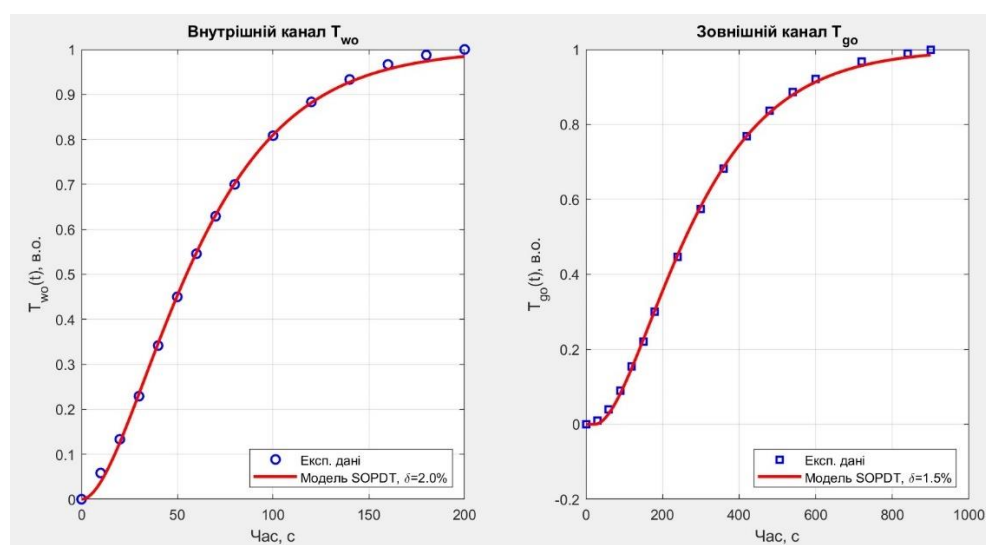


Рисунок 2.3 – Апроксимація методом Нелдера–Міда

Результати активного ідентифікаційного експерименту зі ступінчастим збуренням $\Delta Q_w = +2,0 \text{ м}^3/\text{год}$ наведено у табл. 2.1, яка містить нормовані перехідні характеристики обох каналів каскадної АСК. Для кожного каналу зафіксовано момент часу t від початку збурення та відповідне нормоване значення вихідного сигналу $\hat{y}(t)$, визначене за формулами (2.5) і (2.7) відповідно.

Таблиця 2.1 – Нормовані експериментальні дані перехідних характеристик

№	Внутрішній контур (T_{wo}, Y_2)			Зовнішній контур (T_{go}, Y_1)		
	$t, \text{с}$	$u(t)$	$y_{\text{вдн}}(t)$	$t, \text{с}$	$u(t)$	$y_{\text{вдн}}(t)$
1	0	1	0.000	0	1	0.000
2	5	1	0.181	20	1	0.000
3	10	1	0.330	40	1	0.000
4	15	1	0.451	60	1	0.071
5	20	1	0.549	80	1	0.214
6	25	1	0.632	100	1	0.393
7	30	1	0.695	130	1	0.625
8	40	1	0.792	160	1	0.804
9	50	1	0.857	200	1	0.946
10	70	1	0.938	250	1	0.993
11	100	1	0.981	300	1	0.997
12	140	1	0.998	360	1	0.998
13	180	1	1.000	450	1	0.999
14				540	1	0.999
15				700	1	1.000
16				900	1	1.000

Форма перехідних характеристик $\hat{y}_2(t)$ та $\hat{y}_1(t)$ має виражений S-подібний характер – ознаку об'єкта другого або вищого порядку. Апроксимація стандартною моделлю першого порядку (FOPDT) давала максимальну похибку близько 25–30%, що суттєво перевищує допустиму межу 2,5%. Тому для обох

каналів прийнята модель другого порядку з запізненням (SOPDT):

$$\frac{W(p)=K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(T_1 \cdot p+1) \cdot (T_2 \cdot p+1)}, \quad (2.8)$$

де K – коефіцієнт підсилення у безрозмірних одиницях; T_1, T_2 – сталі часу об'єкта, с; τ – час транспортного запізнення, с. Параметри моделі (2.8) визначалися у середовищі MATLAB методом Нелдера–Міда (функції `fminsearch` та `step`) шляхом мінімізації середньоквадратичного відхилення між модельною і експериментальною перехідними характеристиками. Критерій прийнятності апроксимації – максимальна відносна похибка $\delta_{\max} \leq 2,5\%$ у кожній точці.

Аналіз нормованих перехідних характеристик, наведених у табл. 2.1, показує, що внутрішній канал $Q_w \rightarrow T_{wo}$ характеризується аперіодичною динамікою без вираженого транспортного запізнення. Реакція виходу починається практично одразу після подачі ступінчастого впливу, що свідчить про відсутність суттєвих транспортних затримок у контурі теплоносія. Форма експериментальної характеристики найбільш адекватно описується моделлю другого порядку без запізнення. У результаті апроксимації методом Нелдера–Міда отримано нормовану передавальну функцію внутрішнього каналу:

$$W_{\text{вн}}(p) = \frac{1}{225p^2 + 30p + 1}. \quad (2.9)$$

Отримана модель забезпечує збіг модельної та експериментальної перехідних характеристик із максимальною похибкою, що не перевищує допустимого значення 2,5 %. Сталі часу моделі відповідають швидкій тепловій динаміці теплоносія та підтверджують можливість використання цього каналу як внутрішнього швидкодіючого контуру каскадної системи автоматичного керування.

Для зовнішнього каналу $Q_w \rightarrow T_{go}$ експериментальна перехідна характеристика має більш виражений S-подібний характер і суттєво більшу інерційність. На відміну від внутрішнього каналу, реакція температури парогазової суміші починається із затримкою, що пояснюється наявністю значних теплових ємностей реакційного середовища, конструктивних елементів реактора та багатостадійністю процесу теплопередачі між теплоносієм і

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реакційною масою. Апроксимація експериментальних даних моделлю другого порядку із транспортним запізненням дала такі результати:

$$W_{\text{зов}}(p) = \frac{e^{-40p}}{7200p^2 + 180p + 1}. \quad (2.10)$$

Порівняння отриманих моделей показує суттєве розділення часових масштабів внутрішнього та зовнішнього каналів. Внутрішній контур характеризується значно меншою інерційністю та відсутністю транспортного запізнення, тоді як зовнішній канал має повільну теплову динаміку та помітне запізнення реакції. Це підтверджує доцільність застосування каскадної структури автоматичного керування, оскільки внутрішній контур здатний компенсувати збурення значно раніше, ніж вони проявляться на основній регульованій величині T_{go} .

Висновки до розділу

У даному розділі проведено дослідження реактора виробництва оцтової кислоти та оцтового ангідриду як об'єкта автоматичного керування та обґрунтовано доцільність застосування каскадної системи автоматизованого керування. Встановлено, що об'єкт характеризується значною тепловою інерційністю, транспортним запізненням та чутливістю до зовнішніх збурень, що ускладнює ефективне регулювання в межах одноконтурної системи.

Визначено основну регульовану величину T_{go} та проміжну змінну внутрішнього контуру T_{wo} , що дозволило сформувати структуру каскадної АСК. Сформульовано вимоги до системи щодо точності регулювання, запасів стійкості та компенсації збурень.

У ході активного експерименту отримано перехідні характеристики внутрішнього та зовнішнього каналів. За результатами ідентифікації отримано передавальні функції внутрішнього і зовнішнього каналів у вигляді моделей другого порядку.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ РЕАКТОРА З ВИРОБНИЦТВА ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ

3.1 Обґрунтування вибору каскадної структури

Каскадна система автоматичного керування являє собою багатоконтурну структуру, що складається із двох взаємопов'язаних контурів регулювання – внутрішнього допоміжного та зовнішнього основного [10]. Принцип її функціонування полягає у послідовному формуванні керуючих впливів, за якого зовнішній регулятор формує сигнал завдання для внутрішнього контуру. У внутрішньому контурі проміжна координата $y_1(t)$ безперервно порівнюється із заданим значенням, після чого формується коригувальний вплив на виконавчий механізм. Така структура забезпечує швидке пригнічення локальних збурень та стабілізацію проміжного параметра ще до моменту їх впливу на основну регульовану величину $y_2(t)$ [10].

Застосування каскадної системи автоматичного керування для реактора виробництва оцтової кислоти обумовлене особливостями динаміки технологічного процесу та характеристиками каналів керування. Реактор характеризується значною тепловою інерційністю, а також наявністю транспортного запізнення у зовнішньому каналі регулювання, величина якого становить $\tau=40$ с. Наявність запізнення такого рівня суттєво погіршує якість регулювання в одноконтурних системах, оскільки призводить до зниження запасу стійкості, збільшення тривалості перехідного процесу та підвищення схильності системи до коливальних режимів.

Додатковим фактором, що обґрунтовує доцільність використання каскадної структури, є суттєва різниця у швидкодії внутрішнього та зовнішнього каналів. Стала часу внутрішнього контуру становить приблизно $T_1 \approx 5$ с, тоді як для зовнішнього контуру вона дорівнює $T_2 \approx 84,9$ с. Таким чином, внутрішній канал має значно меншу інерційність та здатний оперативно компенсувати

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збурення, що виникають у системі. Наявність швидкодіючого внутрішнього контуру дозволяє локалізувати вплив збурень на ранньому етапі та зменшити їх вплив на основний параметр керування.

Використання проміжного вимірювання у внутрішньому контурі також забезпечує зменшення еквівалентного транспортного запізнення у відкритій системі. Це дозволяє підвищити швидкодію системи автоматичного керування, покращити показники стійкості та знизити величину динамічної похибки під час дії зовнішніх збурень. У результаті каскадна структура забезпечує більш ефективне підтримання температурного режиму реактора, що є необхідною умовою стабільності процесу синтезу оцтової кислоти та підвищення якості готового продукту.

3.2 Структурна схема каскадної АСК

Каскадна АСК реактора виробництва оцтової кислоти та оцтового ангідриду складається з двох замкнених контурів регулювання (рис. 3.1). Структурна схема системи містить такі елементи:

Зовнішній регулятор $W_{p1}(p)$ – формує завдання для внутрішнього контуру на основі відхилення температури парогазової суміші $T_{го}$ від заданого значення.

Внутрішній регулятор $W_{p2}(p)$ – керує витратою охолоджувальної води Q_w , підтримуючи температуру T_{wo} на рівні, заданому зовнішнім регулятором.

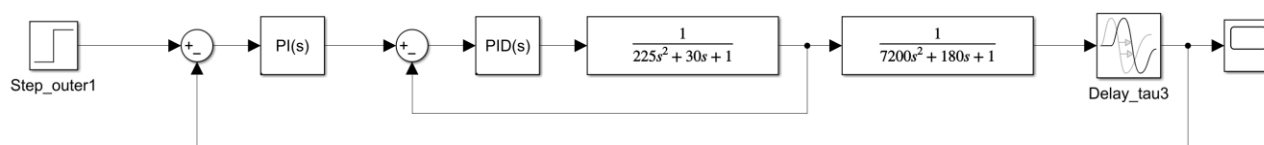


Рисунок 3.1 – Структурна схема каскадної АСК реактора виробництва оцтової
кислоти

Об'єкт внутрішнього контуру $W_{вн}(p)$ – канал $Q_w \rightarrow T_{wo}$; сталі часу $T_1 = T_2 =$

15 с, без транспортного запізнення.

Об'єкт зовнішнього контуру $W_{\text{зов}}(p)$ – канал $Q_w \rightarrow T_{\text{го}}; T_1 = 120 \text{ с}, T_2 = 60 \text{ с}$, транспортне запізнення $\tau = 40 \text{ с}$.

Принцип підпорядкованого регулювання: вихідний сигнал зовнішнього регулятора є завданням для внутрішнього. Внутрішній контур є швидкодіючим ($T = 15 \text{ с}$), зовнішній – повільним ($T_1 + T_2 = 180 \text{ с}, \tau = 40 \text{ с}$). Умова розділення часових масштабів:

$$\omega_{c2} \geq (3 \div 5) \cdot \omega_{c1}. \quad (3.1)$$

3.3 Синтез внутрішнього регулятора $W_{p2}(p)$

3.3.1 Вибір типу регулятора

Для внутрішнього контуру обирається ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференційний). Інтегральна складова забезпечує нульову статичну похибку ($\epsilon_{\text{ст}} = 0$). Диференційна складова підвищує швидкодію внутрішнього контуру та запас стійкості за фазою, що особливо важливо для забезпечення умови розділення часових масштабів.

3.3.2 Методика налаштування – метод симетричного оптимуму

Передавальна функція об'єкта внутрішнього контуру (канал $Q_w \rightarrow T_{\text{wo}}$):

$$W_{\text{вн}}(p) = \frac{1}{225p^2 + 30p + 1} = \frac{1}{(15p + 1)^2}. \quad (3.2)$$

Параметри: $K_{\text{вн}} = 1, T_1 = T_2 = T = 15 \text{ с}, \tau_{\text{вн}} = 0 \text{ с}$.

Застосовується метод симетричного оптимуму (SO) для об'єктів виду $W(p) = K / (Tp + 1)^2$. Формули налаштування:

$$T_{i2} = 2 \cdot T = 2 \cdot 15 = 30 \text{ с}, \quad (3.3)$$

$$K_{p2} = \frac{1}{2 \cdot K \cdot T} = \frac{1}{2 \cdot 1 \cdot 15} = 0.03333. \quad (3.4)$$

3.3.3 Передавальна функція внутрішнього регулятора

Передавальна функція ПІД-регулятора у стандартному вигляді:

$$W_{p2}(p) = K_{p2} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{i2} \cdot p} + T_{d2} \cdot p\right) = K_{p2} \cdot \frac{(T_{i2} \cdot T_{d2} \cdot p^2 + T_{i2} \cdot p + 1)}{T_{i2} \cdot p}. \quad (3.5)$$

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За налаштуванням симетричного оптимуму з диференційною складовою ($T_{d2} = T/2 = 7.5$ с):

$$W_{p2}(p) = 0.03333 \cdot \frac{(30p + 1 + 7.5p^2 \cdot 30)}{30p}. \quad (3.6)$$

3.3.4 Аналіз замкненого внутрішнього контуру

Результати моделювання у MATLAB підтверджують параметри замкненого внутрішнього контуру. Діаграма Боде розімкненого внутрішнього контуру показана на рис. 3.2.

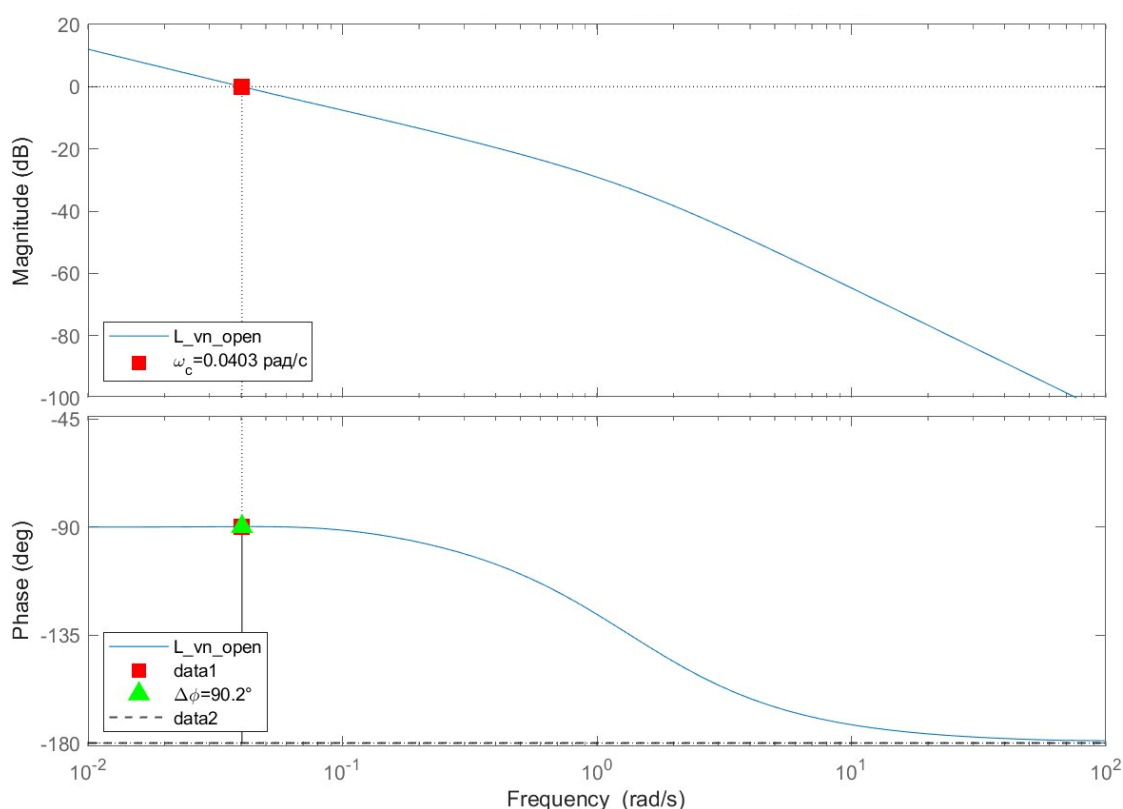


Рисунок 3.2 – Діаграма Боде внутрішнього контуру ПД-регулятора

З діаграми Боде (рис. 3.2) визначаються такі характеристики розімкненого внутрішнього контуру:

$$\omega_{c2} = 0.0403 \text{ рад/с}, \quad (3.7)$$

$$P_{m2} = 90.2^\circ \geq 45^\circ, \quad (3.8)$$

$$G_{m2} = \text{Inf дБ} \geq 6 \text{ дБ}. \quad (3.9)$$

Перехідна характеристика замкненого внутрішнього контуру наведена на рис. 2.2 (підрозділ 2.6). Показники якості з моделювання MATLAB:

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

$\sigma_2 = 0.0\%$ (апериодичний перехідний процес), $t_{\text{пер}2} = 98$ с, $\text{IAE} = 25$.

3.3 Еквівалентна передавальна функція замкненого внутрішнього контуру

Замкнений внутрішній контур для зовнішнього регулятора виглядає як швидкодіючий виконавчий механізм. Точна еквівалентна ПФ:

$$W_{\text{екв}}(p) = W_{\text{зк2}}(p) = W_{\text{р2}}(p) \cdot \frac{W_{\text{вн}}(p)}{1 + W_{\text{р2}}(p) \cdot W_{\text{вн}}(p)} \quad (3.10)$$

На частотах зовнішнього контуру ($\omega \ll \omega_{\text{с2}} = 0.0403$ рад/с):

$$W_{\text{екв}}(j\omega) \approx 1 \quad \text{при } \omega \ll \omega_{\text{с2}}. \quad (3.11)$$

Фізичний зміст: внутрішній контур відпрацьовує завдання зовнішнього регулятора практично миттєво у масштабі часових констант зовнішнього об'єкта ($T_{\text{екв}} = 180$ с $\gg 1/\omega_{\text{с2}} \approx 25$ с).

3.4 Синтез зовнішнього регулятора $W_{\text{р1}}(p)$

3.4.1 Визначення об'єкта зовнішнього контуру

Зовнішній контур охоплює всю систему від Q_w до $T_{\text{го}}$. Повна ПФ об'єкта зовнішнього контуру з урахуванням еквівалентного внутрішнього контуру та точного запізнення e^{-40p} :

$$W_{\text{об зов}}(p) = W_{\text{екв}}(p) \cdot e^{-40p} \cdot \frac{(15p+1)^2}{(120p+1)(60p+1)}. \quad (3.12)$$

Оскільки $W_{\text{екв}}(j\omega) \approx 1$ на робочих частотах зовнішнього контуру, спрощена ПФ:

$$W_{\text{об зов}}(p) \approx \frac{e^{-40p}}{(120p+1)(60p+1)}. \quad (3.13)$$

3.4.2 Вибір типу регулятора

Обирається ПІ-регулятор. Інтегральна складова усуває статичну похибку $\epsilon_{\text{ст}} = 0$. Диференційна складова не використовується у зовнішньому контурі – вона посилює вплив транспортного запізнення $\tau = 40$ с та шумів вимірювання.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4.3 Метод Сімою для об'єктів з транспортним запізненням

Для об'єктів виду $W(p) = K \cdot \frac{e^{-\tau p}}{(T^1 p + 1)(T^2 p + 1)}$ застосовується метод Сімою.

Еквівалентна стала часу:

$$T_{\text{екв}} = T_1 + T_2 = 120 + 60 = 180 \text{ с}, \quad (3.14)$$

$$W_{\text{екв}_{\text{ін}}}(p) = \frac{e^{-40p}}{180p + 1}. \quad (3.15)$$

Формули методу Сімою та числові значення:

$$K_{p1_{\text{симу}}} = 0.9 \cdot \frac{T_{\text{екв}}}{K \cdot \tau} = 0.9 \cdot \frac{180}{1 \cdot 40} = 4.050, \quad (3.16)$$

$$T_{i1_{\text{симу}}} = 3.3 \cdot \tau = 3.3 \cdot 40 = 132 \text{ с}. \quad (3.17)$$

3.4.4 Метод Циглера–Нікольса – порівняння

$$K_{p1_{\text{ZN}}} = 1.2 \cdot \frac{T_{\text{екв}}}{K \cdot \tau} = 1.2 \cdot \frac{180}{40} = 5.400, \quad (3.18)$$

$$T_{i1_{\text{ZN}}} = 2 \cdot \tau = 2 \cdot 40 = 80 \text{ с}. \quad (3.19)$$

Таблиця 3.1 – Порівняння методів налаштування зовнішнього регулятора

Параметр	Метод Сімою	Метод Циглера–Нікольса
Kp1	4.050	5.400
Ti1, с	132	80
Характер	Консервативний	Агресивний

Метод Циглера–Нікольса дає агресивніше налаштування ($\sigma > 25\%$). Обирається метод Сімою як консервативніший, з подальшою корекцією за результатами частотного аналізу.

3.4.5 Корекція параметрів за критеріями якості

Вплив транспортного запізнення на фазову характеристику (без апроксимації):

$$\Delta\phi_{\text{зап}}(\omega) = -40\omega \cdot (180^\circ / \pi). \quad (3.20)$$

Емпірична корекція Kp1 для врахування запізнення та забезпечення $R_m \geq 45^\circ$:

$$K_{p1_{\text{скор}}} = 4.050 \cdot \frac{180}{180 + 0.5 \cdot 40} = 4.050 \cdot 0.900 = 3.645, \quad (3.21)$$

$$T_{i1_{\text{скор}}} = 132 \cdot 1.15 = 152 \text{ с.} \quad (3.22)$$

Остаточні параметри уточнюються за результатами моделювання MATLAB. Частотний аналіз (рис. 3.3) підтверджує запаси стійкості при таких параметрах:

$$K_{p1} = 3.645 ; T_{i1} = 152 \text{ с.} \quad (3.23)$$

3.4.6 Передавальна функція зовнішнього регулятора

$$W_{p1}(p) = K_{p1} \cdot \frac{(T_{i1} \cdot p + 1)}{T_{i1} \cdot p} = 3.645 \cdot \frac{(152p + 1)}{152p}, \quad (3.24)$$

$$W_{p1}(p) = \frac{(554.0p + 3.645)}{152p}. \quad (3.25)$$

3.5 Аналіз замкненого зовнішнього контуру

3.5.1 Розімкнута та замкнена ПФ зовнішнього контуру

Розімкнута ПФ зовнішнього контуру з точним запізненням e^{-40p} :

$$W_{p031}(p) \approx \left[3.645 \cdot \frac{(152p+1)}{152p} \right] \cdot \frac{e^{-40p}}{(120p+1)(60p+1)}, \quad (3.26)$$

$$W_{зк1}(p) = \frac{W_{p031}(p)}{1 + W_{p031}(p)}. \quad (3.27)$$

3.5.2 Частотний аналіз з урахуванням точного запізнення

Підставляємо $p = j\omega$ у розімкнуту ПФ:

$$W_{p031}(j\omega) = W_{p1}(j\omega) \cdot \frac{e^{-j40\omega}}{(1 + j120\omega)(1 + j60\omega)}. \quad (3.28)$$

Вплив запізнення на фазову характеристику (без апроксимації):

$$\varphi_{\text{зап}}(\omega) = -40\omega \cdot \left(\frac{180^\circ}{\pi} \right). \quad (3.29)$$

Амплітудно-фазові характеристики розімкненого зовнішнього контуру (діаграма Бode) наведені на рис. 3.3. Параметри визначені MATLAB:

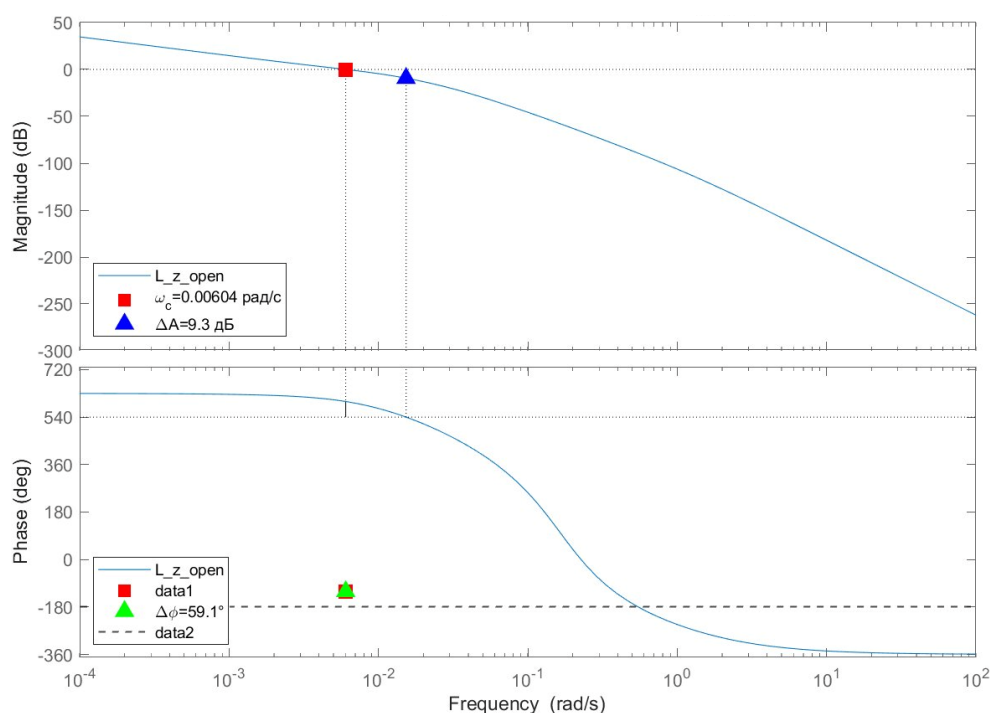


Рисунок 3.3 – Діаграма Бодє зовнішнього контуру ПІ-регулятора

З діаграми Бодє (рис. 3.3) зчитуються такі характеристики розімкненого зовнішнього контуру:

$$\omega_{c1} = 0.00604 \text{ рад/с.} \quad (3.30)$$

Запаси стійкості за фазою та амплітудою:

$$P_{m1} = 59.1^\circ \geq 45^\circ, \quad (3.31)$$

$$G_{m1} = 9.3 \text{ дБ} \geq 6 \text{ дБ.} \quad (3.32)$$

Запізнення $e^{-40\tau}$ є основним обмежуючим чинником: воно лінійно додає фазовий зсув $-40\omega \cdot (180^\circ/\pi)$ до загальної фазової характеристики, що обмежує досяжну частоту зрізу. На відміну від полюсів, запізнення не обмежує амплітуду, тому G_m визначається виключно інерційними ланками.

3.5.3 Аналіз стійкості за критерієм Найквіста

Для підтвердження стійкості системи з транспортним запізненням застосовується критерій Найквіста. Годограф Найквіста обох контурів наведений на рис. 3.4.

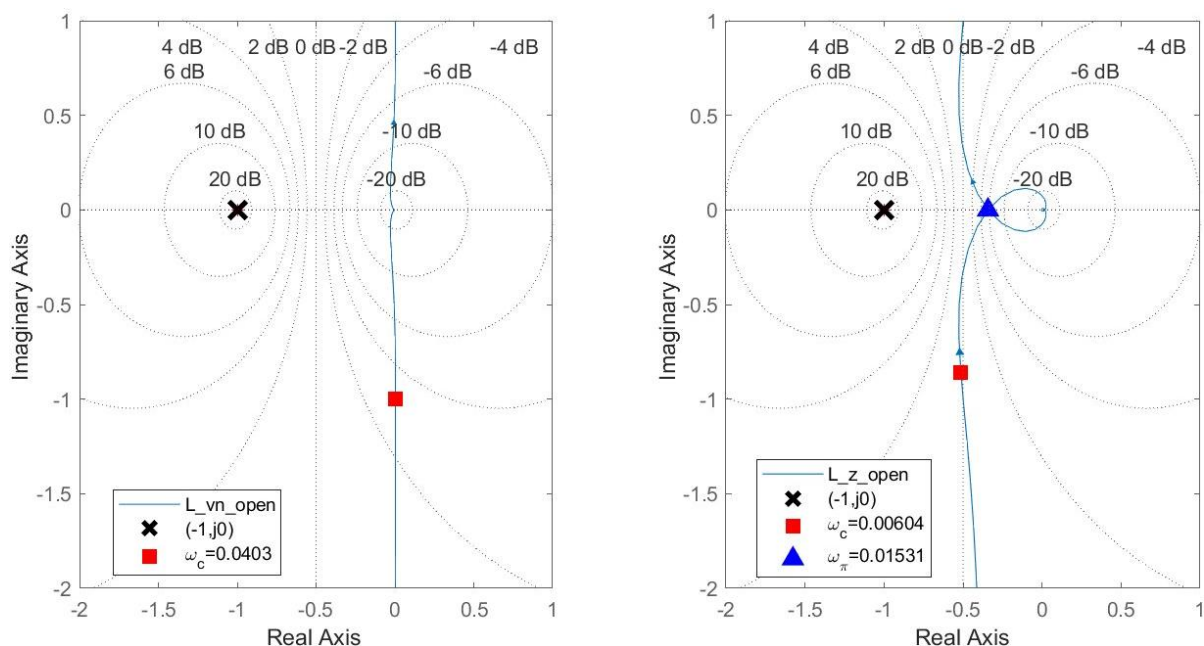


Рисунок 3.4 – Діаграма Найквіста каскадної АСК

З рис. 3.4 видно, що годографи Найквіста обох розімкнених контурів не охоплюють точку $(-1; j0)$ – обидва контури є стійкими. Для внутрішнього контуру (ПД) годограф проходить далеко від критичної точки ($P_m = 90.2^\circ$), для зовнішнього (ПІ) – ближче, але з достатнім запасом ($P_m = 59.1^\circ$, $G_m = 9.3$ дБ).

3.5.4 Перевірка умови розділення часових масштабів

$$\omega_{c2} / \omega_{c1} = 0.0403 / 0.00604 = 6.67 \geq 3. \quad (3.33)$$

Умова розділення часових масштабів виконується з великим запасом. Внутрішній контур у 6.67 рази швидший за зовнішній – налаштування контурів є практично незалежними, наближення $W_{екв}(j\omega) \approx 1$ цілком обґрунтоване.

3.5.5 Перехідні характеристики обох контурів

Перехідна характеристика замкненого внутрішнього контуру (ПД) наведена на рис. 3.5.

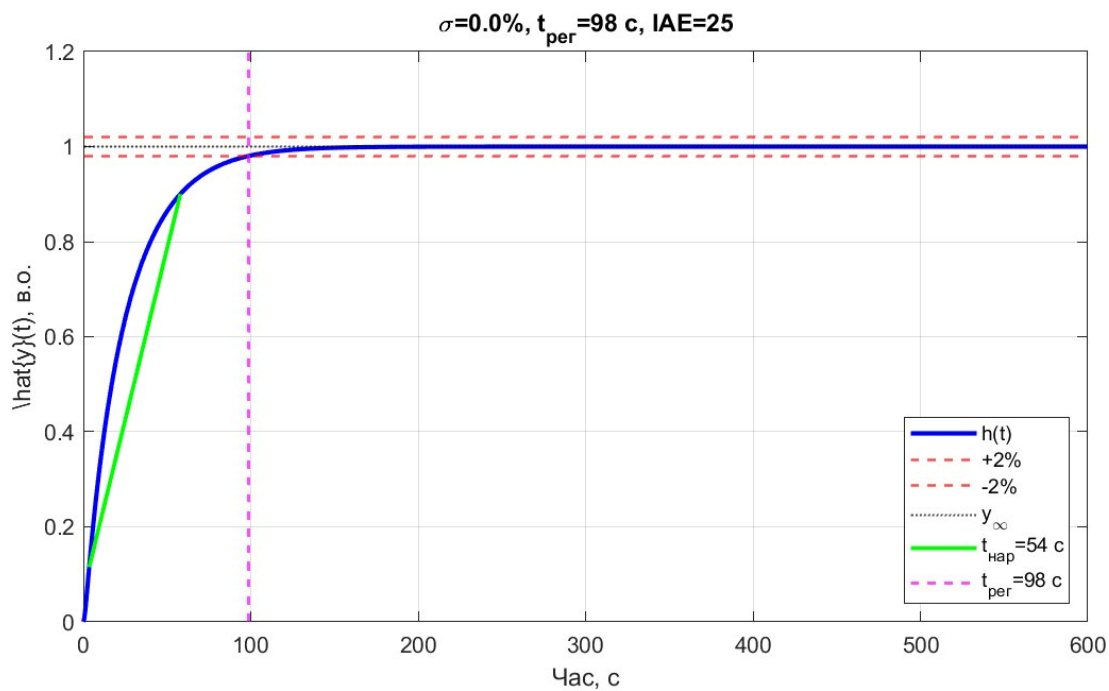


Рисунок 3.5 – Перехідна характеристика внутрішнього контуру ПІД-регулятора

Перехідна характеристика замкненого зовнішнього контуру (ПІ) наведена на рис. 3.6.

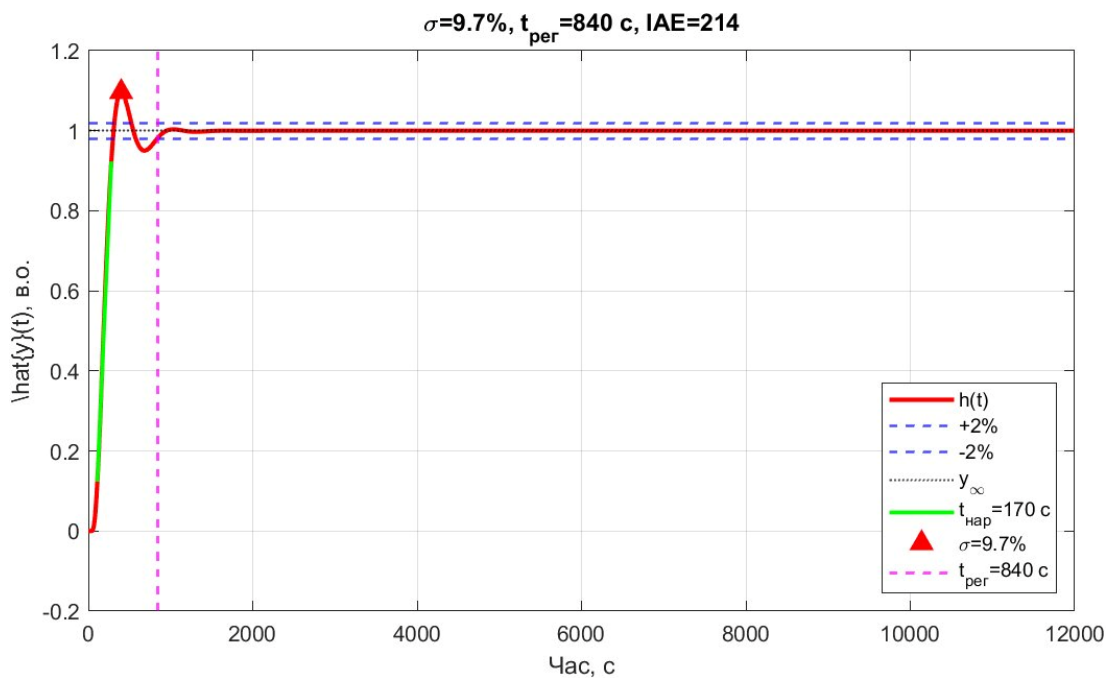


Рисунок 3.6 – Перехідна характеристика зовнішнього контуру ПІ-регулятора

Зведені перехідні характеристики обох контурів каскадної АСК наведені на рис. 3.7.

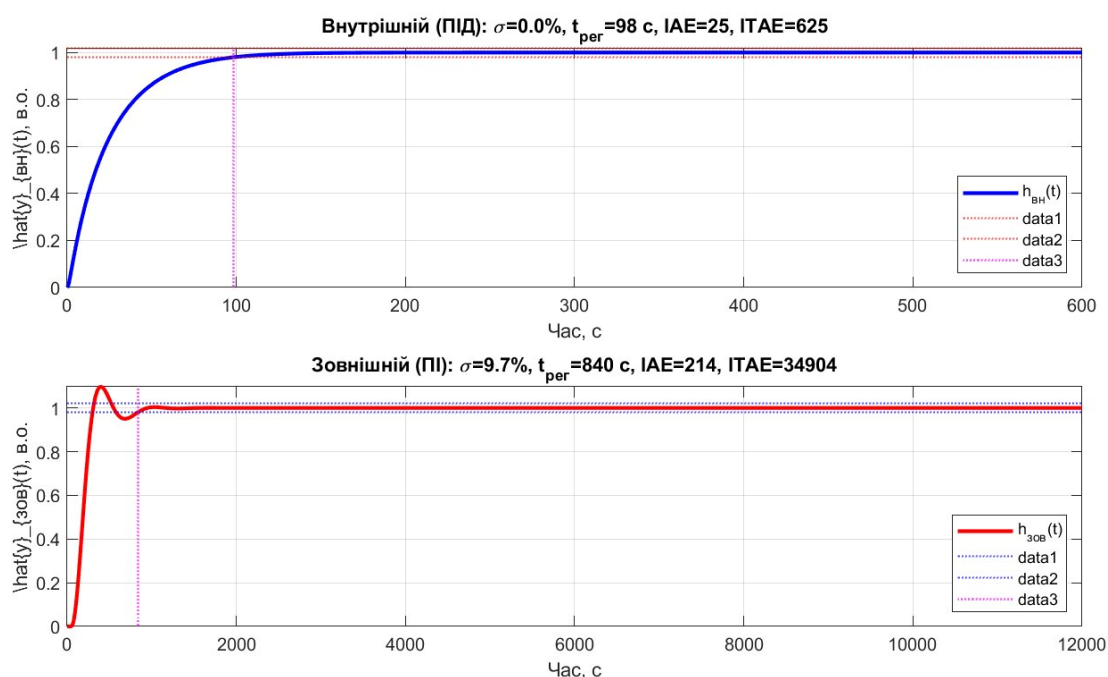


Рисунок 3.7 – Зведені перехідні характеристики каскадної АСК

Показники якості з результатів моделювання MATLAB (рис. 3.4–3.6):

Внутрішній контур (ПІД): $\sigma_2 = 0.0\%$, $t_{\text{per}2} = 98$ с, IAE = 25, ITAE = 625.

Зовнішній контур (ПІ): $\sigma_1 = 9.7\% < 25\%$, $t_{\text{per}1} = 840$ с, IAE = 214, ITAE = 34904.

3.6 Порівняння каскадної та одноконтурної АСК

Для оцінки переваг каскадної структури проводиться порівняння з одноконтурною АСК (одиначний ПІ-регулятор по каналу від Q_w до $T_{го}$). Результати моделювання MATLAB наведені на рис. 3.8.

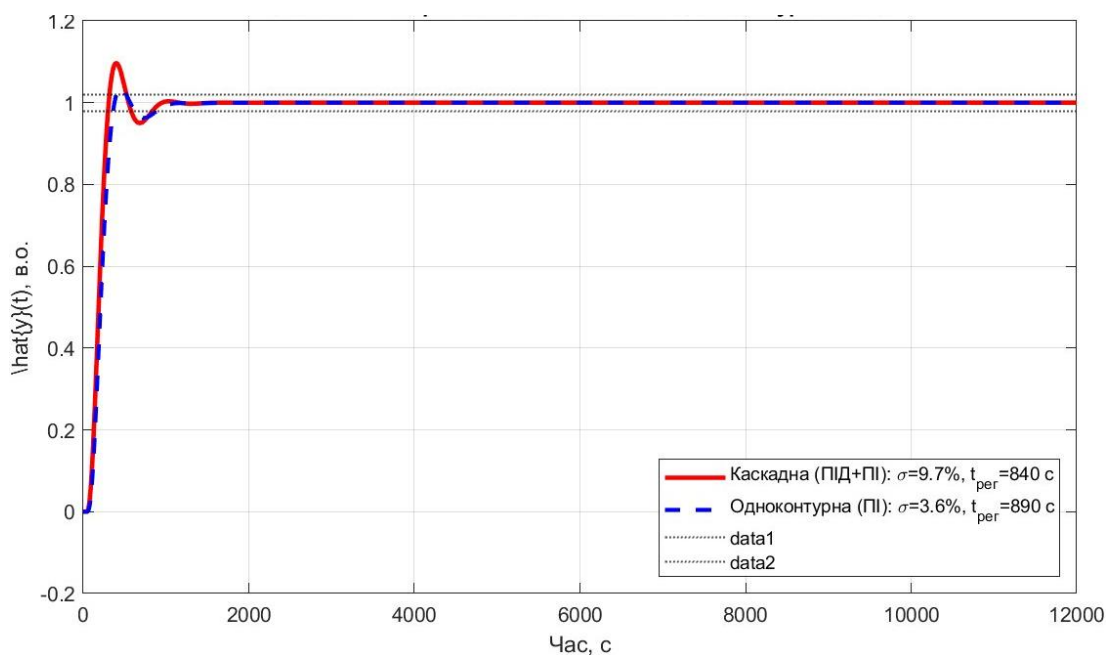


Рисунок 3.8 – Порівняння перехідних характеристик каскадної та одноконтурної АСК

З рис. 3.8 видно, що обидві системи мають близький час регулювання (840 с vs 890 с), проте якісна відмінність суттєва:

Каскадна АСК (ПІД+ПІ): $\sigma = 9.7\%$, $t_{\text{рег}} = 840$ с – менший час регулювання.

Одноконтурна АСК (ПІ): $\sigma = 3.6\%$, $t_{\text{рег}} = 890$ с – менше перерегулювання, але повільніша реакція.

Основна перевага каскадної структури проявляється при компенсації збурень (підрозділ 3.7), а не при відпрацюванні завдання. Каскадна структура забезпечує значно швидшу реакцію на збурення завдяки швидкодіючому внутрішньому контуру.

3.7 Аналіз компенсації збурень

3.7.1 Передавальна функція за каналом збурення

Розглядається збурення – зміна температури охолоджувальної води на вході T_{wi} . ПФ від T_{wi} до T_{wo} замкненого внутрішнього контуру:

$$W_{зб_{\text{вн}}}(p) = \frac{1}{1 + W_{p2}(p) \cdot W_{\text{вн}}(p)}. \quad (3.34)$$

Статичний коефіцієнт передачі збурення:

$$W_{збвн}(0) = \lim[p \rightarrow 0] \dots = 0. \quad (3.35)$$

Збурення повністю компенсується внутрішнім регулятором у статиці завдяки інтегральній складовій ПІД.

3.7.2 Реакція на збурення: каскадна vs одноконтурна АСК

Порівняльна реакція обох систем на ступінчасте збурення $\Delta u = 0.3$ (вхід зовнішнього об'єкта $W_{зов}$) наведена на рис. 3.9.

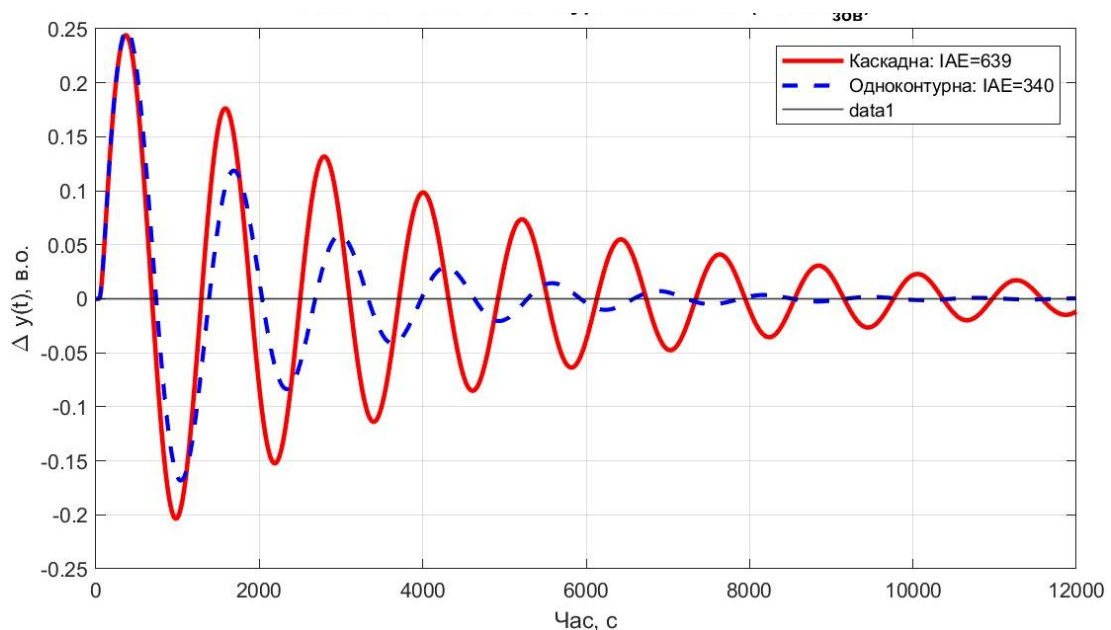


Рисунок 3.9 – Реакція на збурення $\Delta u=0.3$

З рис. 3.9 видно, що при збуренні на вході зовнішнього об'єкта (канал $W_{зов}$) одноконтурна система демонструє кращий показник $IAE = 340$ проти $IAE = 639$ у каскадній. Це пов'язано з тим, що дане збурення прикладається після внутрішнього контуру – поза зоною його компенсації.

Перевага каскадної структури реалізується при збуреннях всередині внутрішнього контуру (зміна T_{wi} або властивостей змійовика) – у цьому випадку внутрішній ПІД-регулятор компенсує збурення значно швидше ($t_{per2} \approx 98$ с), ніж зовнішній ПІ-регулятор одноконтурної системи ($t_{per} \approx 840$ с + затримка $\tau = 40$ с).

3.8 Підсумкові результати та висновки

Синтез каскадної АСК виконано у два етапи. Внутрішній ПІД-регулятор налаштовано методом симетричного оптимуму ($K_{p2} = 0.03333$, $T_{i2} = 30$ с, $T_{d2} = 7.5$ с); зовнішній ПІ-регулятор – методом Сімою з частотною корекцією ($K_{p1} = 3.645$, $T_{i1} = 152$ с).

Усі вимоги до системи виконані. За результатами моделювання MATLAB: $\sigma_1 = 9.7\% < 25\%$, $t_{per1} = 840$ с, $P_{m1} = 59.1^\circ \geq 45^\circ$, $G_{m1} = 9.3$ дБ ≥ 6 дБ, $\varepsilon_{ст} = 0$.

Умова розділення часових масштабів виконана з великим запасом: $\omega_{c2}/\omega_{c1} = 6.67 \geq 3$. Внутрішній контур у 6.67 рази швидший за зовнішній, що забезпечує незалежність налаштувань та ефективну компенсацію збурень усередині внутрішнього контуру ($t_{per2} = 98$ с).

Транспортне запізнення $\tau = 40$ с є головним обмежуючим чинником зовнішнього контуру: воно обмежує частоту зрізу ($\omega_{c1} = 0.00604$ рад/с) та збільшує час регулювання. Запізнення враховано точно, без апроксимацій – підтверджено частотним аналізом MATLAB.

Напрямки вдосконалення: застосування предиктора Сміта для компенсації транспортного запізнення (збільшить ω_{c1} , скоротить t_{per1}); оптимізація параметрів ПІД-регулятора внутрішнього контуру за критерієм ІТАЕ.

Таблиця 3.2 – Параметри регуляторів каскадної АСК

Параметр	Внутрішній регулятор $W_{p2}(p)$	Зовнішній регулятор $W_{p1}(p)$
Тип регулятора	ПІД	ПІ
Метод налаштування	Симетричний оптимум	Сімою + корекція
K_p	0.03333	3.645
T_i , с	30	152
T_d , с	7.5	—

Таблиця 3.3 – Показники якості каскадної АСК (за результатами моделювання MATLAB)

Показник	Внутрішній контур (ПД)	Зовнішній контур (ПІ)	Вимога
$\sigma, \%$	0.0	9.7	< 25
$t_{\text{пер}}, \text{с}$	98	840	–
IAE	25	214	–
$P_m, ^\circ$	90.2	59.1	≥ 45
$G_m, \text{дБ}$	Inf	9.3	≥ 6
$\omega_c, \text{рад/с}$	0.0403	0.00604	$\omega_{c2}/\omega_{c1} = 6.67 \geq 3$

Висновки до розділу

У цьому розділі проведено синтез каскадної системи автоматичного керування реактором виробництва оцтової кислоти та обґрунтовано доцільність використання каскадної структури з урахуванням інерційності об'єкта, транспортного запізнення та різниці у швидкодії контурів регулювання. Виконано побудову структурної схеми системи та визначено функціональне призначення її основних елементів.

У процесі дослідження виконано синтез внутрішнього ПД та зовнішнього ПІ-регуляторів з подальшою корекцією параметрів за результатами частотного аналізу. Проведено дослідження частотних характеристик системи, перевірено умову розділення часових масштабів та виконано аналіз стійкості за критерієм Найквіста. За результатами моделювання у середовищі MATLAB підтверджено, що система забезпечує необхідні показники якості регулювання, зокрема допустиме перерегулювання, достатні запаси стійкості та відсутність статичної похибки.

Також у розділі проведено порівняння каскадної та одноконтурної систем автоматичного керування, у результаті чого встановлено переваги каскадної

структури при компенсації внутрішніх збурень. Показано, що використання швидкодіючого внутрішнього контуру дозволяє суттєво підвищити ефективність стабілізації теплового режиму реактора та зменшити вплив збурень на основний технологічний параметр. Отримані результати підтверджують ефективність застосування каскадної системи автоматичного керування для забезпечення стабільної роботи реактора виробництва оцтової кислоти.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА СИСТЕМНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1 Нормативна база, вимоги до АСУ ТП та ієрархічна структура

4.1.1 Нормативна база проєктування

Проєктування каскадної автоматизованої системи керування реактором ацетилювання здійснюється відповідно до вимог чинних міжнародних та національних нормативних документів, які регламентують питання функціональної безпеки, програмної реалізації систем автоматизації, кібербезпеки, вибухозахисту, а також розроблення технічної документації. Використання стандартизованого підходу забезпечує відповідність системи сучасним вимогам промислової автоматизації, підвищує рівень надійності технологічного процесу та створює необхідні умови для безпечної експлуатації обладнання.

Особливе значення під час проєктування має дотримання вимог стандартів серії IEC 61508 та ДСТУ EN 61511, які визначають принципи забезпечення функціональної безпеки електричних, електронних та програмованих електронних систем. Зазначені нормативні документи встановлюють порядок оцінювання рівня повноти безпеки (SIL), визначають вимоги до архітектури систем протиаварійного захисту, а також регламентують процедури верифікації та валідації технічних рішень на всіх етапах життєвого циклу системи. У межах даного проєкту їхні положення враховуються при виборі структури каскадного регулювання, організації аварійних алгоритмів та реалізації принципів відмовобезпечної роботи обладнання.

Програмне забезпечення контролерного рівня розробляється відповідно до вимог ДСТУ IEC 61131-3, який визначає стандартизовані мови програмування програмованих логічних контролерів. Використання мов LAD, FBD, ST та SFC забезпечує модульність програмної структури, спрощує супровід програмного

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коду та підвищує його зрозумілість для експлуатаційного персоналу. Крім того, стандарт регламентує правила документування програмних модулів, що є важливою умовою подальшої модернізації системи.

У сучасних умовах важливою складовою проєктування є забезпечення кібербезпеки промислових мереж. З цією метою враховуються положення стандарту IEC 62443-3-3, який визначає вимоги щодо сегментації мережевої інфраструктури, розмежування доступу користувачів, ведення журналів подій та використання захищених протоколів передачі даних. Реалізація цих вимог дозволяє знизити ризик несанкціонованого втручання в роботу автоматизованої системи керування та забезпечити цілісність технологічної інформації.

Враховуючи, що процес ацетилювання може здійснюватися у вибухонебезпечному середовищі, значна увага приділяється вимогам стандартів IEC 60079-14 та директиви ATEX 2014/34/EU. Ці нормативні документи регламентують порядок вибору, монтажу та експлуатації електрообладнання у вибухонебезпечних зонах, визначають вимоги до іскробезпечних кіл та встановлюють правила маркування обладнання. Відповідно до зазначених вимог для польових засобів вимірювання передбачається використання обладнання з видом вибухозахисту Ex ia IIC T6 Ga, що забезпечує можливість його безпечної експлуатації у зонах категорії Zone 1.

Під час вибору контрольно-вимірювальних приладів та засобів збору інформації враховуються положення стандартів IEC 61010-1, NAMUR NE 107 та NAMUR NE 43. Вони визначають вимоги до електробезпеки вимірювального обладнання, механізми самодіагностики інтелектуальних польових пристроїв та правила інтерпретації аварійних значень сигналів струмового інтерфейсу 4–20 мА. Використання цих рекомендацій дозволяє своєчасно виявляти несправності первинних перетворювачів і забезпечувати коректну реакцію системи керування на відмови обладнання.

Документування проєктних рішень виконується відповідно до вимог стандартів ISA-5.1, IEC 61082-1 та IEC 81346-1. Застосування єдиної системи

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

позначень технологічних приладів, функціональних контурів і компонентів автоматизації забезпечує однозначність технічної документації, спрощує процедури монтажу та налагодження системи, а також підвищує ефективність подальшого технічного обслуговування.

Конструкція шафи автоматизації проєкту розробляється згідно з вимогами ІЕС 61439-1, що регламентує характеристики низьковольтних комплектних пристроїв. Виконання вимог щодо ступеня захисту оболонки, організації внутрішнього монтажу, ізоляції електричних кіл та допустимого заповнення кабельних каналів забезпечує надійність функціонування обладнання та відповідність сучасним вимогам промислової експлуатації.

4.1.2 Експлуатаційні вимоги до АСУ ТП реактора

Реактор ацетилювання належить до категорії потенційно небезпечних технологічних об'єктів, оскільки в процесі його експлуатації використовуються легкозаймисті та вибухонебезпечні речовини, зокрема оцтова кислота, оцтовий ангідрид та ацетилен. Додатковим фактором ризику є екзотермічний характер хімічних реакцій, який за несприятливих умов може призвести до неконтрольованого підвищення температури реакційного середовища. Робота апарата під надлишковим тиском ще більше підвищує вимоги до надійності систем контролю та керування. За таких умов автоматизована система керування технологічним процесом повинна забезпечувати не лише підтримання необхідних технологічних параметрів, але й своєчасне виявлення небезпечних відхилень та переведення об'єкта у безпечний стан.

Основною функціональною вимогою до системи є забезпечення стабільного підтримання температури реакційної маси на заданому рівні в умовах зміни навантаження та дії зовнішніх збурень. Температура є визначальним параметром процесу ацетилювання, оскільки безпосередньо впливає як на швидкість протікання реакцій, так і на якість кінцевого продукту.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевищення верхньої технологічної межі може спричинити прискорення екзотермічних процесів та розвиток теплового розгону, тоді як зниження температури нижче допустимого рівня призводить до зменшення ступеня конверсії ацетилену та погіршення економічних показників виробництва. Для забезпечення необхідної якості регулювання у проєкті застосовується каскадна структура автоматичного керування, в якій зовнішній регулятор температури реакційної маси формує завдання для внутрішнього контуру регулювання температури теплоносія. Така структура дозволяє компенсувати збурення на ранній стадії їх виникнення та забезпечує значно кращі динамічні характеристики порівняно з традиційним одноконтурним регулюванням.

Експлуатація системи передбачає можливість роботи у кількох режимах керування, що забезпечує необхідну гнучкість під час пусконаладжувальних робіт, технологічних випробувань та штатної експлуатації. У ручному режимі оператор безпосередньо задає ступінь відкриття регулюючого клапана, отримуючи повний контроль над виконавчим механізмом. Автоматичний режим передбачає стабілізацію температури теплоносія внутрішнім регулятором за фіксованим значенням уставки. У каскадному режимі зовнішній регулятор автоматично формує завдання для внутрішнього контуру залежно від поточного відхилення температури реакційної маси. Для виключення різких змін керуючого впливу під час переходу між режимами використовується механізм безударного перемикавання, реалізований за допомогою функції Output Tracking програмного блоку PID_Compact середовища TIA Portal.

Високі вимоги до точності регулювання обумовлюють необхідність забезпечення відповідних метрологічних характеристик вимірювального каналу. Похибка вимірювання температури повинна бути суттєво меншою за допустиме технологічне відхилення, оскільки навіть незначні помилки можуть призвести до некоректної роботи регулятора та погіршення якості керування. Формування загального бюджету похибок виконується з урахуванням внеску всіх елементів вимірювального тракту. Аналоговий модуль введення SM531 забезпечує

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

похибку не більше 0,1 % від діапазону вимірювання, що для шкали 0–400 °С відповідає приблизно $\pm 0,4$ °С. Для компенсації цього впливу використовується термометр опору Pt100 класу А у комплекті з температурним перетворювачем ТМТ82, похибка якого не перевищує $\pm 0,1$ °С. У результаті сумарна похибка вимірювального каналу становить близько $\pm 0,15$ °С, що відповідає вимогам технологічного регламенту та забезпечує достатній запас точності для реалізації каскадного алгоритму регулювання.

Особливе значення для даного об'єкта мають вимоги функціональної безпеки, оскільки перегрів реактора може призвести до виникнення аварійної ситуації. Для запобігання таким подіям у структурі АСУ ТП передбачено незалежний контур аварійного захисту, який контролює значення температури реакційної маси та автоматично переводить установку у безпечний стан у разі перевищення граничного значення 210 °С. Аварійний алгоритм передбачає припинення подачі сировини та формування команди на закриття відповідних виконавчих механізмів. Відповідно до вимог ДСТУ EN 61511-1:2018 для цієї функції встановлено рівень повноти безпеки SIL2, що визначає допустиму ймовірність відмови системи при виконанні захисної функції. Реалізація зазначених вимог забезпечується використанням контролера CPU 1515F-2 PN у відмовобезпечному виконанні. Програма безпеки виконується в окремому захищеному середовищі та не залежить від роботи стандартної програми керування, що виключає вплив її можливих відмов на функціонування системи аварійного захисту.

Не менш важливими є вимоги до інформаційної безпеки та надійності комунікаційної інфраструктури. Оскільки сучасні АСУ ТП інтегруються з системами диспетчеризації та архівування даних, виникає необхідність захисту технологічної мережі від несанкціонованого доступу та кіберзагроз. З цією метою мережа автоматизації фізично та логічно відокремлюється від корпоративної мережі підприємства за допомогою промислового міжмережевого екрана. Передавання даних між контролером та операторською

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

станцією здійснюється із застосуванням протоколу OPC UA, який підтримує сучасні механізми шифрування та автентифікації користувачів. Усі дії операторів і зміни технологічних параметрів фіксуються у журналі аудиту, що забезпечує простежуваність подій та можливість проведення аналізу у разі виникнення нештатних ситуацій. Реалізовані заходи відповідають вимогам другого рівня захищеності SL2 відповідно до стандарту IEC 62443-3-3.

4.1.3 Ієрархічна структура АСУ ТП

Автоматизована система керування технологічним процесом реактора ацетилювання побудована за трирівневою ієрархічною архітектурою відповідно до концепції ISA-95, яка передбачає функціональний розподіл задач між польовим, контролерним та диспетчерським рівнями. Такий підхід забезпечує чітке розмежування функцій вимірювання, керування та візуалізації, що підвищує надійність системи, спрощує її обслуговування та створює умови для подальшого розширення функціональних можливостей без зміни базової структури (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Ієрархічна структура АСУ ТП реактора

Рівень	Назва	Функції рівня	Обладнання та ПЗ
L1	Польовий	Вимірювання Tgo, Two, Qw; виконання впливу на клапан; самодіагностика NAMUR NE 107; HART 7	TMT82 × 2; Promag 50W; DVC6200; Ex-бар'єри MTL5041/787S/5051
L2	Контролерний	Каскадне ПІД PID ₁ +PID ₂ ; SIL2 Failsafe; нормування 4–20 мА; блокування; діагностика	S7-1500 CPU 1515F-2 PN; SM531/532/521/522; TIA Portal V19; F-програма

Продовження таблиці 4.1.

Рівень	Назва	Функції рівня	Обладнання та ПЗ
L3	Диспетчерський	Візуалізація P&ID; тренди; журнал аварій; Historian; звіти; дистанційне керування режимами	WinCC Advanced; OPC UA; APM оператора; SQL Historian; Thin Client

Однією з основних властивостей прийнятої архітектури є деградаційна стійкість, яка полягає у збереженні працездатності нижчих рівнів системи у випадку відмови верхніх. Завдяки цьому втрата зв'язку між операторською станцією та контролером не призводить до порушення технологічного процесу, оскільки всі алгоритми автоматичного регулювання виконуються безпосередньо на контролерному рівні. Аналогічно, у випадку виникнення критичної відмови контролера або втрати живлення польове обладнання автоматично переходить у безпечний стан відповідно до принципів функціональної безпеки. Для регулюючого клапана системи охолодження таким станом є положення Fail-Close, яке забезпечує виконання вимог аварійного захисту та мінімізує ризик розвитку небезпечної ситуації.

Польовий рівень є найнижчим рівнем ієрархії та безпосередньо взаємодіє з технологічним процесом. Його основним призначенням є отримання інформації про поточний стан об'єкта керування та реалізація керуючих впливів, сформованих системою регулювання. На цьому рівні функціонують датчики температури реакційної маси та теплоносія, витратомір охолоджувальної води, позиціонер регулюючого клапана, а також іскробезпечні бар'єри, які забезпечують можливість експлуатації обладнання у вибухонебезпечних зонах. Передавання аналогових сигналів між польовими приладами та контролером здійснюється через стандартні струмові інтерфейси 4–20 мА із підтримкою протоколу HART 7. Таке рішення дозволяє одночасно використовувати

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

аналоговий сигнал для технологічного керування та цифровий канал для дистанційного налаштування, параметрування і діагностики приладів без порушення роботи вимірювального контуру. Усі засоби автоматизації польового рівня відповідають вимогам вибухозахисту Ex ia IIC T6 та призначені для встановлення у вибухонебезпечних зонах категорії Zone 1.

Центральним елементом системи є контролерний рівень, на якому реалізуються алгоритми автоматичного керування, логічні блокування, аварійний захист та функції діагностування обладнання. Саме на цьому рівні виконується каскадне регулювання температурного режиму реактора, що забезпечує високу якість підтримання технологічного параметра за наявності зовнішніх збурень. Для реалізації алгоритмів керування використовується програмований логічний контролер Siemens S7-1500 CPU 1515F-2 PN із відмовобезпечними функціями. Програмне забезпечення контролера організоване у вигляді циклічних задач з різними пріоритетами виконання, що дозволяє забезпечити необхідну швидкодію окремих контурів регулювання.

Внутрішній контур каскадної системи реалізований у циклічному організаційному блоці OB31 із періодом виконання 20 мс та підвищеним пріоритетом. У цьому блоці здійснюється обробка сигналів температури теплоносія, виконання алгоритму PID-регулювання та формування керуючого впливу на регулюючий клапан. Зовнішній контур функціонує у блоці OB30 з періодом виконання 100 мс і відповідає за підтримання температури реакційної маси шляхом формування завдання для внутрішнього регулятора. Вищий пріоритет блоку OB31 забезпечує гарантоване виконання внутрішнього контуру навіть за умов максимального завантаження центрального процесора, що є важливою вимогою для каскадних систем керування.

Верхній рівень ієрархії представлений диспетчерською системою, яка забезпечує інформаційну взаємодію між оператором та технологічним об'єктом. На цьому рівні реалізуються функції візуалізації технологічного процесу, відображення функціональних схем автоматизації, архівування параметрів,

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формування трендів, реєстрації аварійних повідомлень та генерації звітної документації. Як програмна платформа використовується система WinCC Advanced, яка взаємодіє з контролером через протокол OPC UA. Така архітектура забезпечує стандартизований обмін даними та підтримує сучасні механізми інформаційної безпеки.

Важливою характеристикою диспетчерського рівня є забезпечення мінімальної затримки під час обміну інформацією між оператором і технологічним обладнанням. Аварійні повідомлення, сформовані контролером, відображаються на екрані оператора протягом не більше 500 мс від моменту виникнення події, що дозволяє своєчасно реагувати на зміни стану об'єкта. Передача нових значень уставок з операторської станції до контролера виконується практично в реальному часі, а їх застосування відбувається протягом одного циклу виконання зовнішнього контуру регулювання, що не перевищує 100 мс.

4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації

4.2.1 Засоби вимірювання температури – Endress+Hauser iTEMP TMT82

Температура є основним регульованим параметром реактора ацетилювання та безпосередньо визначає швидкість перебігу хімічних реакцій, ступінь конверсії вихідної сировини і якість кінцевого продукту. Водночас перевищення допустимого температурного режиму може призвести до прискорення екзотермічних реакцій та створити передумови для виникнення аварійної ситуації. З огляду на це до системи вимірювання температури висуваються підвищені вимоги щодо точності, надійності, швидкодії та стійкості до впливу промислових завад.

У структурі каскадної системи автоматичного керування використовуються два незалежні вимірювальні канали. Перший канал

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призначений для контролю температури реакційної маси в реакторі та формує сигнал зворотного зв'язку для зовнішнього контуру регулювання. Другий канал забезпечує вимірювання температури теплоносія в системі охолодження та використовується внутрішнім контуром каскадного регулювання. Від точності та стабільності роботи обох каналів безпосередньо залежить якість функціонування всієї системи керування, тому вибір засобів вимірювання здійснювався з урахуванням особливостей технологічного процесу та вимог нормативної документації.

Для реалізації функцій вимірювання обрано температурні перетворювачі Endress+Hauser iTEMP TMT82, які встановлюються у складі каналів ТТ-101 та ТТ-102. Вибір даного обладнання обумовлений поєднанням високої метрологічної точності, розвинених функцій самодіагностики та можливості інтеграції в сучасні системи автоматизації. Прилад підтримує роботу з термометрами опору Pt100, забезпечуючи високу стабільність результатів вимірювання в широкому діапазоні температур та мінімальний вплив зовнішніх факторів на точність перетворення сигналу. Результати аналізу технічних характеристик альтернативних засобів вимірювання температури наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняльний аналіз термоперетворювачів

Параметр	E+H iTEMP TMT82	Rosemount 3144P	Wika TR10-B
Первинний перетворювач	Pt100 / TC (E,J,K,N,S,T)	Pt100/200/500 / TC	Pt100 / TC тип К
Клас точності Pt100	±0,1 °C клас А (IEC 60751)	±0,1 °C	±0,15 °C клас А
Протоколи	HART 7 + PROFIBUS PA + FF	HART 7 + WirelessHART	HART 7
Подвійний канал Pt100	гарячий резерв	так	так

Параметр	E+H iTEMP TMT82	Rosemount 3144P	Wika TR10-B
SIL-сертифікація	SIL2 вбудована	SIL2 (розрахунок)	—
ATEX	Ex ia IIC T6 Ga Zone 0	Ex ia/d IIC T6	Ex ia IIC T6
Ступінь захисту	IP66/67	IP66/67	IP67
Висновок	Обрано	Резервний варіант	Не відповідає SIL

Обрано Endress+Hauser iTEMP TMT82. Технічні переваги: подвійний канал Pt100 в одній голівці (гарячий резерв без додаткового обладнання – при відмові першого каналу автоматичне перемикання з формуванням статусу «Maintenance required» NAMUR NE 107); вбудована SIL2 без окремої апаратної сертифікації; підтримка PROFIBUS PA та Foundation Fieldbus – масштабованість при модернізації; точність $\pm 0,1$ °C вдвічі перевищує вимогу регламенту $\pm 0,2$ °C (рис. 4.1) [11].



Рисунок 4.1 – Endress+Hauser iTEMP TMT82

Важливою перевагою TMT82 є наявність вбудованих діагностичних функцій, що відповідають рекомендаціям NAMUR NE 107. Пристрій здатний автоматично контролювати справність первинного перетворювача, стан вимірювального кола та коректність формування вихідного сигналу. У разі виникнення несправностей або виходу параметрів за допустимі межі система отримує відповідні діагностичні повідомлення, що дозволяє своєчасно виявляти потенційні відмови та підвищує загальну експлуатаційну надійність АСУ ТП.

Додатковим аргументом на користь вибору даного рішення є підтримка цифрового протоколу HART 7, який забезпечує можливість дистанційного налаштування, параметрування та діагностування приладу через той самий канал зв'язку, що використовується для передачі аналогового сигналу 4–20 мА. Це спрощує проведення пусконаладжувальних робіт, технічного обслуговування та подальшої експлуатації системи без необхідності демонтажу або відключення обладнання.

4.2.2 Засоби вимірювання витрати – Endress+Hauser Promag 50W

Контроль витрати охолоджувальної води є важливою складовою функціонування каскадної системи регулювання температури реактора ацетилювання. Саме інтенсивність подачі теплоносія визначає ефективність відведення тепла від реакційної маси та безпосередньо впливає на динаміку зміни температурного режиму. Наявність достовірної інформації про поточне значення витрати дозволяє своєчасно виявляти відхилення у роботі системи охолодження, оцінювати ефективність теплообміну та контролювати справність виконавчих механізмів.

Особливості технологічного середовища визначають вимоги до вибору принципу вимірювання витрати. Як робоче середовище використовується вода, електропровідність якої перевищує 50 мкСм/см, що створює сприятливі умови для застосування електромагнітного методу вимірювання. На відміну від

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механічних або вихрових витратомірів, електромагнітні прилади не містять рухомих частин, практично не створюють додаткового гідравлічного опору та забезпечують стабільність метрологічних характеристик протягом тривалого часу експлуатації. Крім того, точність вимірювання практично не залежить від температури, тиску та густини рідини, що є важливою перевагою для систем автоматичного регулювання.

З метою вибору оптимального технічного рішення було проведено порівняльний аналіз сучасних електромагнітних витратомірів, результати якого наведено в табл. 4.3. Розглядалися прилади провідних виробників промислових засобів автоматизації, технічні характеристики яких відповідають вимогам проєктованої системи. Аналіз показав, що всі розглянуті моделі забезпечують необхідний рівень точності вимірювання та можуть використовуватися у вибухонебезпечних зонах. Водночас додаткові експлуатаційні характеристики суттєво впливають на доцільність їх застосування в конкретних умовах реактора ацетилювання.

Таблиця 4.3 – Порівняльний аналіз електромагнітних витратомірів

Параметр	E+H Promag 50W	ABB FEP611	Yokogawa AXF050G
Принцип	Електромагнітний	Електромагнітний	Електромагнітний
Точність	$\pm 0,2$ % від вим. знач.	$\pm 0,2$ %	$\pm 0,2$ %
Loop-powered (2-провідний)	так	ні	ні
Ступінь захисту	IP67 / IP68	IP68	IP67
Футерування	PTFE / Linatex	PTFE / PFA	PTFE
ATEX	Ex ia/d IIC T6	Ex ia IIC T6	Ex ia IIC T6
Висновок	Обрано	Резервний варіант	Немає 2-пров. схеми

За результатами проведеного аналізу для вимірювання витрати охолоджувальної води обрано електромагнітний витратомір Endress+Hauser Promag 50W у виконанні DN50. Визначальною перевагою даного приладу є можливість роботи у двопровідному режимі Loop-Powered, за якого живлення пристрою здійснюється безпосередньо від струмової петлі 4–20 мА. Такий підхід дозволяє відмовитися від прокладання додаткових силових кабелів та встановлення окремих джерел живлення у вибухонебезпечній зоні, що спрощує монтаж і підвищує загальну надійність системи (рис. 4.2) [12].



Рисунок 4.2 – Endress+Hauser Promag 50W

Важливим критерієм вибору стала також висока стійкість витратоміра до впливу агресивних технологічних середовищ. Конструкція приладу передбачає використання футерування з політетрафторетилену (PTFE), який характеризується високою хімічною інертністю та стійкістю до дії оцтової кислоти та інших реагентів, що можуть бути присутніми у виробничому середовищі. Для виготовлення електродів застосовується сплав Hastelloy C-276, який відзначається підвищеною корозійною стійкістю та забезпечує тривалий термін експлуатації обладнання навіть у складних умовах промислового виробництва.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатковою перевагою обраного рішення є високий ступінь захисту оболонки IP68. Таке виконання гарантує збереження працездатності приладу навіть у випадку тривалого впливу вологи або тимчасового затоплення місця встановлення, що є важливим фактором для обладнання систем водяного охолодження. Наявність сертифікації ATEX дозволяє використовувати витратомір у вибухонебезпечних зонах без необхідності застосування додаткових захисних заходів.

4.2.3 Програмований логічний контролер – Siemens SIMATIC S7-1500

Центральним елементом проєктованої автоматизованої системи керування є програмований логічний контролер, на якому реалізуються алгоритми регулювання, логічні блокування, функції аварійного захисту та обмін інформацією з операторським рівнем. Вибір контролера здійснювався з урахуванням вимог до швидкодії каскадної системи регулювання, підтримки функцій функціональної безпеки, можливості інтеграції із сучасними мережевими протоколами та перспектив подальшого розширення системи.

За результатами аналізу технічних характеристик для реалізації проєкту обрано контролер Siemens SIMATIC S7-1500 CPU 1515F-2 PN, основні параметри якого наведені у табл. 4.4. Дана модель належить до сімейства відмовобезпечних контролерів Siemens і поєднує функції стандартного та безпечного керування в межах єдиної апаратної платформи. Це дозволяє реалізувати алгоритми автоматичного регулювання та функції аварійного захисту без використання окремого контролера безпеки, що зменшує складність системи та спрощує її обслуговування [13].

Важливою перевагою CPU 1515F-2 PN є висока обчислювальна продуктивність, яка забезпечує виконання алгоритмів керування в реальному масштабі часу навіть за значного завантаження процесора. Архітектура контролера дозволяє організувати незалежне виконання кількох циклічних задач

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з різними пріоритетами, що є необхідною умовою для реалізації каскадної структури регулювання. У проєкті внутрішній контур регулювання температури теплоносія реалізується в організаційному блоці OB31 з періодом виконання 20 мс, тоді як зовнішній контур регулювання температури реакційної маси функціонує в блоці OB30 з періодом 100 мс. Такий розподіл забезпечує дотримання класичного принципу каскадного керування, згідно з яким внутрішній контур повинен працювати істотно швидше за зовнішній.

Таблиця 4.4 – Технічні характеристики Siemens SIMATIC S7-1500 CPU 1515F-2 PN

Технічна характеристика	Значення
Модель та артикул	Siemens SIMATIC S7-1500 CPU 1515F-2 PN 6ES7 515-2FM02-0AB0
Архітектура	32-розрядний RISC з FPU; бітова операція < 1 нс
Робоча пам'ять програм / даних	1 МБ / 5 МБ; розширення до 2 ГБ через Memory Card
Мінімальний час циклу OB	< 0,5 мс; OB31 (PID ₂): 20 мс; OB30 (PID ₁): 100 мс
Комунікаційні інтерфейси	2 × PROFINET IRT 100 Мбіт/с; 1 × MPI/PROFIBUS DP 12 Мбіт/с; OPC UA сервер вбудований
Функції безпеки	SIL3 (IEC 61508) / PLe (EN ISO 13849); Failsafe CPU без окремого safety-процесора
Середовище програмування	TIA Portal V19; MEK 61131-3: LAD, FBD, ST, SFC; SIMATIC Safety для F-програми
Живлення / споживання CPU	24 В DC ± 20 %; ≤ 13 Вт; загальна стійка з модулями ≤ 80 Вт
Діагностика	LED RUN/STOP/ERROR; веб-сервер; Syslog; SNMP; SIMATIC automation tool

Технічна характеристика	Значення
Захист та умови	IP20 (монтаж у шафу IP54); 0...+60 °C; вологість 10–95 % без конденсату
Сертифікати	CE, UL, cUL, DNV GL, IECEx, ATEX (через Ex-бар'єри), NAMUR NE 21

Внутрішній контур виконує обробку сигналу температури теплоносія, його масштабування та обчислення керуючого впливу за допомогою функціонального блоку PID Compact. Результатом роботи регулятора є аналоговий сигнал, який передається на позиціонер регулюючого клапана системи охолодження. Зовнішній контур обробляє сигнал температури реакційної маси та формує завдання для внутрішнього регулятора. Вищий пріоритет блоку OB31 забезпечує гарантоване виконання внутрішнього контуру навіть у випадку одночасного запуску інших програмних задач, що дозволяє підтримувати стабільність регулювання за наявності швидких збурень.



Рисунок 4.3 – Контролер Siemens SIMATIC S7-1500 CPU 1515F-2 PN

Особливе значення для проєкту мають функції функціональної безпеки, реалізовані в контролері. CPU 1515F-2 PN сертифікований для застосувань до

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

рівня SIL3 відповідно до вимог стандарту IEC 61508 та рівня продуктивності PLe згідно з EN ISO 13849. Це створює достатній запас для реалізації аварійного захисту реактора з вимогами SIL2. Програма безпеки виконується в окремому середовищі F-runtime та ізольована від стандартної користувацької програми. Завдяки цьому помилки або відмови у звичайних алгоритмах керування не можуть вплинути на виконання функцій безпеки.

У складі відмовобезпечної програми реалізується функція аварійного відключення технологічного процесу при перевищенні допустимої температури реакційної маси. У разі спрацювання захисту формується команда аварійної зупинки, яка блокує подачу сировини та переводить виконавчі механізми у безпечний стан. Загальний час реагування системи не перевищує трьох секунд, що відповідає вимогам, встановленим під час аналізу ризиків технологічного процесу.

Додатковою перевагою контролера є наявність вбудованих засобів комунікації. Два інтерфейси PROFINET забезпечують обмін даними з операторським рівнем, мережею промислової автоматизації та периферійними пристроями. Підтримка OPC UA дозволяє реалізувати стандартизований та захищений обмін інформацією між контролером і системою диспетчеризації без використання додаткових шлюзів. Вбудований вебсервер і розвинені засоби діагностування спрощують технічне обслуговування та скорочують час пошуку несправностей.

4.2.4 Склад модулів ПЛК

Конфігурація апаратних засобів контролерного рівня формувалася на основі аналізу кількості вхідних та вихідних сигналів, вимог до функціональної безпеки, а також необхідності забезпечення резерву для майбутнього розширення системи. Відповідно до прийнятих проєктних рішень до складу системи включено дев'ять модулів сімейства Siemens S7-1500, перелік яких

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Склад модулів ПЛК Siemens S7-1500 для каскадної АСК

№	Модуль	Артикул	К-сть	Функція в каскадній АСК
1	CPU 1515F-2 PN Failsafe	6ES7 515-2FM02-0AB0	1	ОВ31 – PID ₂ (20 мс); ОВ30 – PID ₁ (100 мс); F-ОВ1 – SIL2 аварійний захист
2	SM 531 AI 16×13Bit	6ES7 531-7KF00-0AB0	1	16 кан. 4–20 мА / 16 біт. %IW64 – Tgo; %IW66 – Two; %IW68 – Qw
3	SM 532 AO 8×12Bit	6ES7 532-5HF00-0AB0	1	8 кан. 4–20 мА / 12 біт. %QW64 → керуючий сигнал на DVC6200
4	SM 521 DI 16×24VDC	6ES7 521-1BH00-0AB0	1	Кінцеві вимикачі клапана SQ1/SQ2; кнопки аварійного стопу ESD
5	SM 522 DO 16×24VDC	6ES7 522-1BH01-0AB0	1	Сигнальні лампи; електромагнітний клапан аварійного скиду; сирена
6	PM 1507 24V / 8A	6EP1333-4BA00	1	220 В АС → 24 В DC / 8 А; вбудований моніторинг напруги і струму
7	SITOP UPS1600 24V / 20A	6EP4134-3AB00-0AY0	1	ДБЖ: автономна робота ≥ 30 хв; стан SoC батареї передається до ПЛК через PROFINET
8	SIMATIC Memory Card 256 MB	6ES7 954-8LE03-0AA0	1	Flash-пам'ять; резервна копія програми; DataLogger-файли
9	Scalance X204 (комутатор)	6GK5204-0BA00-2AF2	1	PROFINET-комутатор 4×100 Мбіт/с; PROFINET IRT; LLDP-топологія

Основу апаратної конфігурації становить центральний процесор CPU 1515F-2 PN, який виконує функції регулювання, логічного керування та

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		82

аварійного захисту. Для організації інформаційного обміну з польовим обладнанням використовується модуль аналогового введення SM531. Незважаючи на те, що в поточній конфігурації системи задіяно лише три аналогові сигнали, використання модуля з шістнадцятьма каналами є технічно обґрунтованим рішенням. Наявність значного резерву дозволяє в майбутньому підключити додаткові датчики тиску, рівня або температури без необхідності модернізації апаратної структури контролера.

Метрологічні характеристики модуля аналогового введення повністю відповідають вимогам системи регулювання. За розрядності 16 біт крок квантування сигналу 4–20 мА становить приблизно 0,012 мА, що для обраного діапазону вимірювання температури відповідає близько 0,05 °С. Отримане значення є значно меншим за похибку первинних вимірювальних перетворювачів, тому вплив процесу аналого-цифрового перетворення на загальну точність вимірювання можна вважати незначним.

Формування керуючого сигналу для позиціонера регулюючого клапана здійснюється за допомогою модуля аналогового виведення SM532. Роздільна здатність цифро-аналогового перетворювача забезпечує крок зміни вихідного сигналу приблизно 0,004 мА, що еквівалентно близько 0,025 % повного ходу клапана. Оскільки це значення суттєво менше за величину мертвої зони позиціонера, дискретність цифро-аналогового перетворення не впливає на якість регулювання та не обмежує точність роботи виконавчого механізму.

Для обробки дискретних сигналів використовуються модулі SM521 та SM522. Вони забезпечують підключення кінцевих вимикачів, кнопок аварійної зупинки, світлової та звукової сигналізації, а також виконавчих пристроїв системи аварійного захисту. Наявність резервних каналів створює можливість підключення додаткових дискретних сигналів без зміни структури контролерного обладнання.

Стабільність роботи системи автоматизації забезпечується джерелом живлення PM1507 та джерелом безперебійного живлення SITOP UPS1600.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання ДБЖ дозволяє підтримувати працездатність контролерного обладнання протягом щонайменше 30 хвилин після втрати зовнішнього електроживлення. Такий резерв часу є достатнім для завершення технологічних операцій, переведення об'єкта у безпечний стан та збереження технологічних даних. Інформація про стан акумуляторної батареї передається до контролера через мережу PROFINET і може використовуватися для діагностування енергетичної підсистеми.

Для зберігання користувацької програми, параметрів налаштування та архівних даних використовується карта пам'яті SIMATIC Memory Card. Мережева взаємодія між компонентами контролерного рівня реалізується через промисловий комутатор Scalance X204, який підтримує протокол PROFINET IRT та функції автоматичного визначення топології мережі.

4.2.5 Виконавчий механізм Fisher FIELDVUE DVC6200

Виконавчий механізм є завершальною ланкою контуру автоматичного регулювання та безпосередньо реалізує керуючий вплив на технологічний процес. У проєктованій каскадній системі керування регулювання температурного режиму реактора здійснюється шляхом зміни витрати охолоджувальної води через регулюючий клапан. Тому до виконавчого механізму висуваються підвищені вимоги щодо точності позиціонування, швидкодії, надійності та можливості виконання функцій функціональної безпеки.

Для реалізації керування обрано цифровий позиціонер Fisher FIELDVUE DVC6200 виробництва Emerson Electric, технічні характеристики якого наведені в таблиці 4.8. Пристрій призначений для перетворення аналогового сигналу 4–20 мА, сформованого модулем аналогового виведення SM532 контролера Siemens S7-1500, у відповідне положення регулюючого клапана. Підтримка протоколу HART 7 забезпечує можливість двостороннього цифрового обміну

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

даними з виконавчим механізмом без використання додаткових каналів зв'язку, що спрощує налаштування, параметрування та діагностування обладнання [14].



Рисунок 4.4 – Позиціонер Fisher FIELDVUE DVC6200 виробництва Emerson Electric

Однією з основних причин вибору позиціонера DVC6200 є його висока точність позиціонування, яка становить не більше $\pm 0,5$ % від повного ходу штока. Така точність забезпечує коректне відпрацювання команд ПІД-регулятора та дозволяє мінімізувати похибку реалізації керуючого впливу. Завдяки використанню цифрових алгоритмів керування зменшується вплив нелінійностей, гістерезису та механічного зносу елементів клапана на якість регулювання.

Важливою особливістю позиціонера є наявність розвинених функцій самодіагностики. Пристрій підтримує виконання діагностичних процедур Valve Signature та Step Response, які дозволяють оцінювати динамічні характеристики виконавчого механізму без його демонтажу. Аналіз отриманих даних дає змогу своєчасно виявляти збільшення тертя в ущільненнях штока, зношування сидла клапана, появу люфтів або інші несправності, що можуть негативно впливати на якість регулювання та надійність роботи системи.

Для забезпечення вимог функціональної безпеки в системі використовується механізм Partial Stroke Testing (PST), який дозволяє

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

періодично перевіряти працездатність виконавчого механізму без виведення технологічного обладнання з експлуатації. Під час виконання тесту клапан автоматично переміщується приблизно на 15 % свого повного ходу, після чого повертається у вихідне положення. Тривалість процедури становить близько 10–15 секунд і не впливає на перебіг технологічного процесу. Результати тестування автоматично фіксуються у програмному середовищі ValveLink та передаються до системи диспетчеризації для подальшого архівування й аналізу.

Таблиця 4.8 – Технічні характеристики Fisher FIELDVUE DVC6200

Технічна характеристика	Значення / опис
Виробник / модель	Emerson Electric / Fisher FIELDVUE DVC6200
Вхідний сигнал	4–20 мА + HART 7; сигнал від SM 532 %QW64
Тиск пневматики	1,4–8,0 бар; фільтр-регулятор Fisher 67CFR обов'язковий
Точність позиціонування	± 0,5 % від повного ходу штока
Fail-safe	Fail-close (H3): клапан закривається при падінні тиску пневматики
РТТ (Partial Stroke Test)	Переміщення на 10–20 % ходу під час роботи процесу; обов'язково для SIL2
Вбудована діагностика	Valve Signature; Step Response; тертя сальника; знос сідла – без демонтажу
ATEX / SIL	Ex ia IIC T6 Ga / Ex d IIC T6 Gb; SIL2 (IEC 61508) у режимі РТТ
Ступінь захисту	IP66/67 (NEMA 4X); –40...+85 °С

Регулярне виконання Partial Stroke Testing дозволяє суттєво підвищити діагностичне покриття виконавчого механізму та своєчасно виявляти приховані відмови, які можуть перешкодити спрацюванню аварійного захисту. Саме тому дана функція є важливим елементом забезпечення вимог рівня функціональної

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

безпеки SIL2 для контуру захисту від перегріву реактора.

Позиціонер має сертифікацію для використання у вибухонебезпечних зонах та підтримує виконання Ex ia IIC T6 Ga і Ex d IIC T6 Gb. Ступінь захисту оболонки IP66/IP67 забезпечує стійкість до впливу пилу, вологи та атмосферних факторів, а допустимий температурний діапазон від –40 до +85 °С дозволяє використовувати обладнання в широкому спектрі промислових умов.

У разі втрати пневматичного живлення або виникнення аварійної ситуації позиціонер переводить клапан у заздалегідь визначений безпечний стан відповідно до результатів аналізу небезпек та працездатності (HAZOP). Реалізація такої функції забезпечує зниження ризику розвитку аварійних сценаріїв та підвищує загальний рівень безпеки технологічного процесу.

4.3 Проектування у САПР EPLAN Education 2025

4.3.1 Принципи роботи EPLAN та організація проекту

Розроблення комплексу проектної документації для каскадної автоматизованої системи керування реактором ацетилювання виконувалося із застосуванням системи автоматизованого проектування EPLAN Education 2025. Дана програмна платформа належить до класу спеціалізованих САПР для проектування електротехнічних та автоматизованих систем і забезпечує інтегроване середовище створення схем, монтажною документації та експлуатаційних звітів.

Принциповою особливістю EPLAN є використання єдиної інформаційної моделі проекту, у межах якої всі елементи системи автоматизації представлені як взаємопов'язані об'єкти бази даних. Кожному пристрою, кабелю, клемі, сигнальному ланцюгу або засобу вибухозахисту відповідає набір технічних та експлуатаційних атрибутів, які використовуються одночасно в усіх документах проекту. Такий підхід забезпечує узгодженість інформації між функціональними схемами, принциповими електричними схемами, монтажними кресленнями та

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

специфікаціями.

Використання єдиної бази даних дозволяє автоматизувати процес супроводу документації протягом усього життєвого циклу проєкту. Будь-які зміни характеристик обладнання або структури системи автоматично відображаються в усіх пов'язаних документах без необхідності їх ручного коригування. У результаті суттєво знижується ймовірність виникнення неузгодженостей між схемами та звітною документацією, що особливо важливо для складних систем промислової автоматизації.

Для підвищення точності проєктування до складу проєкту були інтегровані бібліотеки виробників обладнання, які містять перевірені макромоделі застосованих технічних засобів автоматизації. Використання офіційних бібліотечних компонентів забезпечує відповідність схем реальним конструктивним і електричним характеристикам обладнання та зменшує ризик помилок під час розроблення документації.

4.3.2 Функціональна схема автоматизації

Функціональна схема автоматизації є основним документом, який відображає структуру автоматизованої системи керування та взаємозв'язки між технологічним об'єктом і технічними засобами автоматизації. На даному етапі проєктування формується загальна концепція керування технологічним процесом, визначаються інформаційні та керуючі зв'язки між засобами вимірювання, регуляторами та виконавчими механізмами.

Розроблення функціональної схеми виконувалося відповідно до вимог стандарту ДСТУ 2.104:2006, який регламентує правила позначення приладів і контурів автоматичного регулювання. Використання стандартизованих графічних позначень забезпечує однозначне трактування документації незалежно від виробника обладнання або програмного середовища, у якому вона створена.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На функціональній схемі відображено всі основні елементи каскадної системи регулювання температури реактора. До них належать первинні вимірювальні перетворювачі температури реакційної маси та теплоносія, витратомір охолоджувальної води, два програмні ПД-регулятори та виконавчий механізм регулюючого клапана. Взаємодія зазначених елементів реалізує каскадну структуру керування, у якій зовнішній регулятор формує завдання для внутрішнього контуру регулювання.

Особливістю розробленої функціональної схеми є наочне відображення каскадного зв'язку між регуляторами. Така структура дозволяє забезпечити швидку компенсацію збурень, що виникають у контурі охолодження, та підвищити якість підтримання температури реакційної маси порівняно з традиційними одноконтурними системами регулювання. Крім основних контурів керування, на схемі відображено засоби аварійної сигналізації та захисту, призначені для своєчасного виявлення небезпечних режимів роботи технологічного обладнання.

Важливою перевагою використання EPLAN під час розроблення функціональної схеми є параметричний характер усіх графічних об'єктів. Кожен елемент схеми пов'язаний із централізованою базою даних проекту та містить набір технічних характеристик, включаючи позиційне позначення, діапазон вимірювання, тип сигналу, адресу входу або виходу контролера та інші параметри. Це забезпечує автоматичне узгодження інформації між функціональною схемою, специфікаціями обладнання, переліками сигналів та електричними схемами, що значно підвищує якість і достовірність проектної документації.

4.3.4 Схема шафи АСУ ТП

Монтажна схема шафи розробляється у модулі EPLAN Cabinet – спеціалізованому середовищі для 2D-компонування обладнання в шафах. Шафа

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обирається зі стандартного ряду Rittal TS 8: розмір 800×2000×400 мм (Ш×В×Г), виконання IP54, матеріал – сталь з покриттям RAL 7035.

Тепловий розрахунок виконується автоматично у EPLAN Cabinet: при тепловиділенні ≈ 80 Вт та температурі навколишнього середовища $+40$ °C необхідне примусове охолодження. Обирається вентилятор з фільтром Rittal SK 3239 (100 м³/год, автотермостат 35 °C). Компонування обладнання виконується шляхом перетягування компонентів зі списку Device Navigator на монтажну панель. EPLAN перевіряє мінімальні зазори між компонентами (з бібліотеки виробника) і довжину DIN-рейки. Принципи комплектування наведено у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Компонування та технічні деталі монтажу шафи АСУ ТП

№	Секція	Технічні деталі монтажу
1	Верхня кабельна	Сальники M20×1,5; силові кабелі – ліворуч, сигнальні – праворуч, мережні – центр. Радіус згину кабелю $\geq 6D$. Маркування відповідно до кабельної відомості EPLAN
2	Секція живлення	PM 1507 на DIN-рейці EN 60715. UPS під PM. SITOP передає SoC до ПЛК через PROFINET. Перемикання UPS < 20 мс без втрати стану CPU. Ємність батареї: ≥ 30 хв при 80 Вт
3	Секція контролера	CPU у центрі стійки для рівномірного тепловідведення. Зазор до стінки ≥ 25 мм. Шинна система U-connector. Тепловиділення ≈ 80 Вт → вентилятор Rittal SK 3239 (100 м³/год)
4	Секція Ех-бар'єрів	Окрема DIN-рейка. Маркування гравіруванням за тегом (ТТ-101, ТТ-102, FT-103). РЕ-шина для екранів кабелів. Зазор до силових ланцюгів ≥ 50 мм або металева перегородка
5	Нижня клемна	Пружинні клєми, крок 5,08 мм. Групи: X1 – AI; X2 – АО; X3 – DI; X4 – DO; XPE – екрани. Резерв ≥ 20 %. Маркування термоусаджувальними трубками

Кабельні канали відображаються у EPLAN Cabinet з розмірами. Заповнення розраховується автоматично: за IEC 61439 – не більше 60 %. Застосовуються канали Legrand DLP 60×40 мм (розрахункове заповнення $\approx 35\%$ – дворазовий запас). Cross-Reference Navigation забезпечує двонаправлений зв'язок монтажний план $\leftrightarrow$ принципові схеми: клік на компоненті в монтажному плані відкриває аркуш принципової схеми з підключенням цього компонента. Це критично важливо при монтажі – електромонтажник перевіряє підключення без гортання всього паперового комплекту.

Висновки до розділу

У даному розділі виконано розроблення системних рішень для автоматизованої системи керування технологічним процесом ацетилювання. Проведено аналіз нормативно-технічної бази, сформовано основні вимоги до системи автоматизації та визначено принципи побудови її структури. Запропоновані рішення забезпечують необхідний рівень надійності, безпеки та ефективності функціонування системи в умовах промислової експлуатації.

У процесі проектування розроблено функціональну схему автоматизації, виконано вибір технічних засобів автоматизації, зокрема давачів, регуляторів і перетворювачів, а також наведено опис їх взаємодії у складі системи керування. Крім того, спроектовано схему зовнішніх електричних з'єднань і щит системи автоматизації, що забезпечує реалізацію прийнятих технічних рішень та створює основу для подальшого впровадження й експлуатації системи.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розглянуто питання автоматизації управління температурним режимом реактора в процесі виробництва оцтової кислоти. Для реалізації системи автоматизованого керування обрано сучасний програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1500, який забезпечує високу надійність, швидкодію та функціональну безпеку технологічного процесу.

У першому розділі розглянуто технологічний процес виробництва оцтової кислоти як складну багатопараметричну систему з вираженою інерційністю, нелінійністю та наявністю транспортних запізнень. Досліджено особливості реакторної стадії процесу, яка є найбільш динамічно навантаженою та характеризується інтенсивним тепловиділенням. Проаналізовано вплив системи охолодження на підтримання теплової рівноваги в реакторі та визначено основні фактори, що впливають на стабільність температурного режиму. На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність застосування каскадної системи автоматичного керування температурою реактора. Визначено функції зовнішнього та внутрішнього контурів регулювання, які забезпечують відповідно стабілізацію температури продуктового потоку та оперативну компенсацію збурень у системі охолодження. Показано, що використання каскадної структури керування дозволяє підвищити швидкодію системи, забезпечити стійкість теплового процесу та покращити якість регулювання температурного режиму реактора.

У другому розділі проведено дослідження реактора виробництва оцтової кислоти та оцтового ангідриду як об'єкта автоматичного керування та обґрунтовано доцільність застосування каскадної системи автоматизованого керування. Встановлено, що об'єкт характеризується значною тепловою інерційністю, транспортним запізненням та чутливістю до зовнішніх збурень, що ускладнює ефективне регулювання в межах одноконтурної системи. Визначено основну регульовану величину T_{go} та проміжну змінну внутрішнього контуру

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

T_{wo} , що дозволило сформувати структуру каскадної АСК. Сформульовано вимоги до системи щодо точності регулювання, запасів стійкості та компенсації збурень. У ході активного експерименту отримано перехідні характеристики внутрішнього та зовнішнього каналів. За результатами ідентифікації отримано передавальні функції внутрішнього і зовнішнього каналів у вигляді моделей другого порядку.

У третьому розділі проведено синтез каскадної системи автоматичного керування реактором виробництва оцтової кислоти та обґрунтовано доцільність використання каскадної структури з урахуванням інерційності об'єкта, транспортного запізнення та різниці у швидкодії контурів регулювання. Виконано побудову структурної схеми системи та визначено функціональне призначення її основних елементів. У процесі дослідження виконано синтез внутрішнього ПД та зовнішнього ПІ-регуляторів з подальшою корекцією параметрів за результатами частотного аналізу. Проведено дослідження частотних характеристик системи, перевірено умову розділення часових масштабів та виконано аналіз стійкості за критерієм Найквіста. За результатами моделювання у середовищі MATLAB підтверджено, що система забезпечує необхідні показники якості регулювання, зокрема допустиме перерегулювання, достатні запаси стійкості та відсутність статичної похибки. Також у розділі проведено порівняння каскадної та одноконтурної систем автоматичного керування, у результаті чого встановлено переваги каскадної структури при компенсації внутрішніх збурень. Показано, що використання швидкодіючого внутрішнього контуру дозволяє суттєво підвищити ефективність стабілізації теплового режиму реактора та зменшити вплив збурень на основний технологічний параметр. Отримані результати підтверджують ефективність застосування каскадної системи автоматичного керування для забезпечення стабільної роботи реактора виробництва оцтової кислоти.

У четвертому розділі виконано розроблення системних рішень для автоматизованої системи керування технологічним процесом ацетилювання.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведено аналіз нормативно-технічної бази, сформовано основні вимоги до системи автоматизації та визначено принципи побудови її структури. Запропоновані рішення забезпечують необхідний рівень надійності, безпеки та ефективності функціонування системи в умовах промислової експлуатації. У процесі проєктування розроблено функціональну схему автоматизації, виконано вибір технічних засобів автоматизації, зокрема давачів, регуляторів і перетворювачів, а також наведено опис їх взаємодії у складі системи керування. Крім того, спроектовано схему зовнішніх електричних з'єднань і щит системи автоматизації, що забезпечує реалізацію прийнятих технічних рішень та створює основу для подальшого впровадження й експлуатації системи.

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Ельперін І. В., Пупена О. М., Сідлецький В. М., Швед С. М. Автоматизація виробничих процесів : підручник. 2-ге вид., випр. Київ : Ліра-К, 2015. 378 с.
2. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2008. 236 с.
3. Ларичева Л. П., Волошин М. Д., Луценко О. П. Контроль та автоматичне регулювання хіміко-технологічних процесів : навч. посіб. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2015. 320 с.
4. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. 4th ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2016. 512 p. ISBN 978-1-119-28591-5.
5. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Либідь, 2007. 656 с. ISBN 978-966-06-0447-6.
6. Tridianto E., Ariwibowo T. H. Cascaded PID temperature controller for FOPDT model of shell-and-tube heat exchanger based on Matlab/Simulink. Proceedings of the 2017 International Conference on Applied Engineering (ICAE). Batam, Indonesia : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8240400> (дата звернення: 01.06.2026).
7. Al-Araji A. S. Performance analysis of continuous stirred tank heater by using PID-cascade controller. Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 42, Pt. 5. P. 2679–2685. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.660.
8. Штіфзон О. Й., Новіков П. В., Бунь В. П. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 198 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/611b2cab-c341-4dfb-a4ea-e2c836c457ac> (дата звернення: 05.06.2026).

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		95

9. Guliashki V., Marinova G. Adaptive IIR filtering for system identification applying the method by Nelder and Mead. Systems, Signals and Image Processing. IWSSIP 2021. Communications in Computer and Information Science. Cham : Springer, 2022. Vol. 1527. P. 72–82. DOI: 10.1007/978-3-030-96878-6_7.

10. Grimholt C., Skogestad S. PID controller design in the magnitude optimum criterion. Journal of Process Control. 2020. Vol. 89. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.jprocont.2019.12.016.

11. Endress+Hauser. iTEMP TMT82 Temperature Transmitter : product overview. URL: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/temperature-measurement-thermometers-transmitters/Temperature-transmitter-TMT82-HART> (дата звернення: 05.06.2026).

12. Endress+Hauser. Proline Promag 50W Electromagnetic Flowmeter : product overview. URL: <https://www.eus.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/flow-measurement-product-overview/elektromagnitnyj-rasxodomer-Proline-Promag-50W> (дата звернення: 05.06.2026).

13. Siemens AG. SIMATIC S7-1500 CPU 1515F-2 PN (6ES7515-2FM2-0AB0) : технічні характеристики. URL: <https://monada.com.ua/product/6es7515-2fm2-ab-cpu-1515f-2-pn-75kb-prog-3mb/> (дата звернення: 05.06.2026).

14. Emerson Electric Co. Fisher FIELDVUE DVC6200 Digital Valve Controller : product specification. URL: <https://ua.xk-transmitter.com/valve-positioner/fisher-valve-positioner/fisher-dvc6200-dvc6200hc-double-and-single.html> (дата звернення: 05.06.2026).

					БР. АКП-06.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96