

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-09.00.00.000 ПЗ

Група АКП-21-1

Роман Куц

2025

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

Куц Роман Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація установки гідроочищення гасу

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

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

Рецензент

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

Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1 Р.А. Куц
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент О.В. Кучмистенко
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

к.т.н., доцент А.І. Лагойда
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ

А.І. Лагойда.

« » 20 року

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

Куцу Роману Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація установки гідроочищення газу

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

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

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

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 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 гідроочищення газу, як об'єкта автоматизації;

2. Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування;

3. Аналіз та синтез каскадної системи автоматизованого регулювання;

4. Розробка проектних рішень для АСУ ТП гідроочищення газу;

5 Загальні висновки. Перелік посилань на джерела. Додатки.

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

Лист 1 – Технологічна схема процесу гідроочищення газу – БР.АКП – 09.00.00.000 01;

Лист 2 – Модель «вхід–вихід» процесу гідроочищення газу – БР.АКП – 09.00.00.000 02;

Лист 3 – Аналіз і синтез каскадної АСК – БР.АКП – 09.00.00.000 03;

Лист 4 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКП – 09.00.00.000 04;

Лист 5 – Схема зовнішніх з'єднань – БР.АКП – 09.00.00.000 05;

Лист 6 – Схема шафи АСК – БР.АКП – 09.00.00.000 06.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу гідроочищення гасу, як об'єкта автоматизації.	13.05.2025 р.	
2	Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування.	21.05.2025 р.	
3	Аналіз та синтез каскадної системи автоматизованого регулювання.	30.05.2025 р.	
4	Розробка проектних рішень для АСУ ТП гідроочищення гасу.	11.06.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

Р.А. Куц _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

О.В. Кучмистенко _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 92 сторінок друкованого тексту, 21 рисуноків, 4 таблиці, 12 посилання на джерела.

Тема: «Автоматизація установки гідроочищення гасу»

Об'єкт дослідження: процес гідроочищення гасу.

Мета роботи: підвищення ефективності керування процесом гідроочищення гасу шляхом впровадження каскадної автоматизованої системи регулювання температурного режиму з використанням мікропроцесорного контролера Simatic S7-1500. У межах роботи розроблено структурно-функціональну архітектуру АСУ ТП, здійснено вибір сучасних технічних засобів автоматизації, налаштовано параметри ПІ-регуляторів для каскадної структури та підтверджено їх ефективність за критеріями якості перехідних процесів.

Методи дослідження: математичне моделювання, імітаційне моделювання в MATLAB/Simulink, розрахунок динамічних характеристик об'єкта керування, частотний аналіз, візуалізація електросхем у середовищі EPLAN.

Результати бакалаврської роботи: здійснено комплексний аналіз технологічного процесу гідроочищення гасу з акцентом на параметри, що підлягають регулюванню; створено математичну модель об'єкта, реалізовано синтез каскадної системи автоматичного регулювання температури реактора з внутрішнім контуром витрати теплоносія. Проведено моделювання динаміки системи, встановлено параметри ПІ-регуляторів за критерієм технічного оптимуму, оцінено стійкість і якість регулювання. Розроблено електричні схеми підключення засобів автоматизації та проєктну документацію для шафи керування.

Ключові слова: гідроочищення гасу, каскадна система регулювання, автоматизація, Simatic S7-1500, ПІ-регулятор.

ABSTRACT

The bachelor's thesis comprises 92 pages of printed text, 21 figures, 4 tables, and 12 references.

Title: "Automation of the Kerosene Hydrotreating Unit"

Object of study: the process of kerosene hydrotreating.

The purpose of the work: to improve the efficiency of controlling the kerosene hydrotreating process by implementing a cascade automatic temperature control system based on the Simatic S7-1500 microprocessor controller. The project includes the development of a structural and functional architecture for the process control system, selection of modern automation hardware, tuning of PI controllers for the cascade structure, and verification of their effectiveness according to transient performance criteria.

Research methods: mathematical modeling, simulation in MATLAB/Simulink, calculation of dynamic characteristics of the control object, frequency analysis, and electrical schematic development using EPLAN software.

Results of the bachelor's thesis: a comprehensive analysis of the kerosene hydrotreating process was carried out, with an emphasis on the key parameters subject to regulation. A mathematical model of the control object was developed, and a cascade automatic temperature control system for the reactor was synthesized, incorporating an internal loop for heat carrier flow regulation. System dynamics were simulated, PI controller parameters were determined using the technical optimum criterion, and system stability and control quality were assessed. Electrical connection diagrams for automation devices and design documentation for the control cabinet were developed.

Keywords: kerosene hydrotreating, cascade control system, automation, Simatic S7-1500, PI controller.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГІДРООЧИЩЕННЯ ГАСУ, ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	12
1.1. Сутність процесу гідроочищення гасу	12
1.2 Аналіз наукових досліджень, присвячених автоматизації процесу гідроочищення гасу	14
1.3. Взаємозв’язок між властивостями сировини та завданнями автоматизації..	15
1.4. Призначення і суть процесу.....	18
1.5 Технічна характеристика технологічного обладнання	22
1.6. Вибір параметрів індикації, регулювання, контролю та сигналізації	24
1.7 Опис функціональної схеми	26
Висновок до розділу	28
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	30
2.1 Теоретичні засади побудови каскадної САР	30
2.2 Проведення експерименту та визначення передавальних функцій АСР.....	34
2.3 Параметричний аналіз об’єктів регулювання	38
Висновки до розділу	38
3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	40
3.1 Синтез регуляторів	40
3.2 Реалізація в середовищі MATLAB/Simulink.....	42
3.3 Дослідження каскадної АСР на стійкість.....	44
3.3.1 Передавальна функція розімкненого внутрішнього контуру	44
3.3.2 Характеристичне рівняння внутрішнього контуру	44

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація установки гідроочищення гасу			Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.	Куц А.Р.									6	??
Перевір.	Кучмистенко О.В.										
Реценз.	Чигур І.І.										
Н. Контр.	Кучмистенко О.В.										
Затверд.	Лагойда А.І.									АКП-21-1 ІФНТУНГ	

3.3.3 Запаси стійкості внутрішнього контуру	45
3.3.4 Стійкість зовнішнього контуру	46
3.3.5 Наближений аналіз стійкості	47
3.3.6 Критерій стійкості Рауса-Гурвіца для наближеної моделі	47
3.4 Аналіз показників якості каскадної АСР	49
Висновки до розділу	55
4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АСУ ТП ГІДРООЧИЩЕННЯ ГАСУ	57
4.1 Практична реалізація системи автоматизованого управління процесом гідроочищення гасу.....	57
4.2 Інтеграція запропонованої системи в ієрархічну структуру АСУ ТП	58
4.3 Вибір ТЗА для реалізації проектних рішень АСУ ТП	61
4.4 Розробка функціональної схеми автоматизації установки	76
4.5 Електричні схеми підключень технічних засобів автоматизації до модулів ПЛК.....	78
4.5. Розробка шафи автоматики у САПР	81
Висновки до розділу	84
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	86
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	90
ДОДАТКИ.....	92

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ПЛК – Програмований логічний контролер (англ. PLC — Programmable Logic Controller);

РК – Реакційна колона;

САПР – Система Автоматизованого Проєктування;

УГГ – Установа гідроочищення гасу.

$X_{\text{сиров}}$ – Склад гасу, включно з вмістом сірковмісних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, залишкових домішок;

$T_{\text{вх}}$ – Температура гасу перед входом у реактор гідроочищення;

$P_{\text{вх}}$ – Тиск у трубопроводі перед реактором;

G_{H_2} – Витрата водню, що подається для забезпечення відновлювальної атмосфери;

$T_{\text{реак}}$ – Температура всередині реакційної зони;

$P_{\text{реак}}$ – Тиск у реакторі гідроочищення.

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

ВСТУП

Метою бакалаврської роботи є дослідження, аналіз та удосконалення технологічного процесу гідроочищення гасу з використанням засобів автоматизації, спрямованих на забезпечення стабільної роботи установки, підвищення ефективності очищення від сірчистих сполук.

У сучасній нафтопереробній промисловості особливої уваги набуває питання вдосконалення технологічних процесів очищення вуглеводневої сировини. З-поміж багатьох напрямів модернізації та оптимізації виробничих об'єктів особливе значення має автоматизація установок гідроочищення гасу. Цей процес є невід'ємною ланкою в загальному технологічному ланцюгу глибокої переробки нафтопродуктів, що обумовлюється необхідністю досягнення високих показників екологічної безпеки та стабільності експлуатаційних характеристик кінцевого продукту. З урахуванням посилення міжнародних вимог до якості палив, а також зростання ролі енергозберігаючих і ресурсощадних підходів, дослідження можливостей автоматизованого керування в межах цієї технології набуває особливої актуальності.

Гідроочищення гасу як процес ґрунтується на хімічних перетвореннях, що відбуваються під впливом водню в присутності каталізатора, і спрямоване на усунення небажаних домішок, зокрема сірковмісних сполук, азоту, кисню, механічних частинок і нестабільних вуглеводнів. Ефективність цього процесу істотно залежить від чіткості підтримання параметрів температури, тиску, витрати водню та сировини, а також від рівномірності навантаження на каталітичну систему. Навіть незначні відхилення від заданого режиму здатні вплинути на якість кінцевого продукту, погіршити характеристики сировини для наступних стадій переробки або викликати передчасне зношення устаткування. У зв'язку з цим доцільність запровадження гнучких автоматизованих систем контролю та регулювання не викликає сумніву.

На тлі зростаючої складності технічних систем автоматизації, сучасний

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

підхід до управління установками гідроочищення передбачає не лише реалізацію алгоритмів стабілізації технологічних параметрів, а й інтеграцію елементів інтелектуального аналізу даних, прогнозування ефективності функціонування, адаптивної оптимізації режимів роботи та раннього виявлення потенційних загроз. Особливе значення має побудова таких систем на основі математичних моделей, що відображають як динамічні, так і стаціонарні властивості об'єкта керування. Завдяки цьому відкриваються можливості для реалізації цифрових двійників технологічних процесів, що, своєю чергою, забезпечує якісно новий рівень нагляду, аналізу та втручання в реальному часі.

Зростання вимог до ефективності та безпеки виробництва також актуалізує питання енергетичної раціоналізації. Процеси гідроочищення є енергоємними, а тому навіть часткове підвищення ефективності регулювання технологічних параметрів може мати істотний економічний ефект. У цьому контексті автоматизація відіграє роль інструмента інтеграції енергетичного моніторингу з технологічним керуванням. Наявність можливості адаптивного реагування на зміни у вхідних характеристиках сировини або технічному стані обладнання створює передумови для підвищення стабільності процесу, зниження частоти аварійних ситуацій та зменшення обсягів відходів.

Крім технічних аспектів, розробка та впровадження систем автоматизації установок гідроочищення мають вагоме значення і в контексті цифрової трансформації промислового виробництва. Створення інтегрованих систем, які поєднують SCADA-платформи, ПЛК-контролери, сенсорні мережі, а також програмні засоби для моделювання та симуляції, дозволяє не лише підвищити надійність процесу, а й забезпечити його гнучкість, масштабованість і відкритість до подальших модернізацій. Такий підхід відповідає загальній тенденції переходу до концепції "розумного виробництва", що передбачає повну прозорість процесів, самодіагностику та можливість автономного прийняття рішень на основі даних.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що автоматизація установок

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

гідроочищення газу не є суто інженерним завданням. Вона охоплює широкий спектр міждисциплінарних питань, зокрема хіміко-технологічні особливості процесу, обробку великих обсягів даних, інформаційно-аналітичну підтримку рішень, оптимізацію алгоритмів керування, інженерію програмного забезпечення та підходи до індустріального дизайну автоматизованих систем. Таким чином, дана наукова робота спрямована на дослідження концептуальних, алгоритмічних і прикладних основ автоматизованого керування процесом гідроочищення газу, що дозволяє розглядати її як важливий внесок у розвиток сучасного технологічного мислення в умовах цифрової економіки.

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

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГІДРООЧИЩЕННЯ ГАСУ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Сутність процесу гідроочищення гасу

Гідроочищення гасу, як технологічний процес, відображає взаємодію термодинамічних, хімічних та гідродинамічних явищ, спрямованих на глибоке перетворення структури органічної сировини шляхом її очищення від домішок. Основна мета полягає у досягненні такого ступеня чистоти газових фракцій, за якого забезпечується відповідність продукту нормативним вимогам до стабільності, токсичності, корозійної активності, температури займання й утворення нагару. У контексті сучасного виробництва гасу, зокрема авіаційного пального, особливої актуальності набуває необхідність повного або часткового усунення сполук сірки, азоту, кисню, а також деяких аренів, що негативно впливають на експлуатаційні властивості продукту та справляють руйнівну дію на елементи двигунів і паливних систем.

Процес гідроочищення передбачає введення водню до потоку сировини та подальше проходження цієї суміші через каталітичний реактор, де за умов високої температури (зазвичай у межах 300–400 °С) та підвищеного тиску (до 3–7 МПа) відбуваються реакції гідрогенізації, гідрокрекінгу, гідродесульфуризації, гідродезазотування та гідродеоxygenування. Каталізатор, як правило, складається з комбінацій металів групи VI та VIII, нанесених на алюмосилікатну або алюмооксидну основу. Він забезпечує активну поверхню, на якій відбувається активація молекул водню, подальша взаємодія з небажаними функціональними групами й розрив хімічних зв'язків.

Хімічна суть процесу полягає в тому, що, наприклад, органічні сполуки сірки, які в присутності кисню та високої температури утворюють агресивні продукти згоряння (наприклад, SO₂), перетворюються на сірководень, який легко видаляється із системи. Подібним чином азотовмісні структури розпадаються до аміаку, а кисневмісні – до води та вуглеводнів, що мають стабільну будову. Ці

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

трансформації відбуваються у суворо контрольованому реакційному середовищі, де будь-яке відхилення від оптимальних умов може призвести до часткового згасання реакцій або навпаки – до їх неконтрольованої інтенсифікації, що в свою чергу спричиняє зниження якості продукту, перегрів каталітичного шару або деградацію самої каталітичної системи.

Поза хімічною складовою, технологічна специфіка гідроочищення визначається необхідністю постійного підтримання гідравлічного та теплового балансу в межах усього циклу. На шляху від вступу сировини до завершення очищення газ проходить через різні температурні режими, змінює агрегатний стан, вступає у фазові взаємодії з воднем і продуктами перетворень. Це накладає обмеження на допустимі швидкості потоків, теплообмінні характеристики обладнання, режимні параметри компресорів, рекуператорів і сепараційних вузлів.

Сутність процесу також не обмежується реакторним блоком, оскільки після реакції необхідним є виділення побічних компонентів та стабілізація отриманого газу. Цей етап, що включає охолодження, конденсацію й виділення сірководню, аміаку та інших газів, забезпечує не лише екологічну безпеку, а й дозволяє зберігати каталітичну активність за рахунок контролю зворотного впливу на каталітичне середовище. Відтак гідроочищення - це багатокомпонентна система, де взаємопов'язані термохімічні, гідродинамічні та масообмінні процеси вимагають високої точності і синхронності у керуванні.

У науковому вимірі гідроочищення газу слід розглядати як приклад складного нелінійного процесу з множиною зворотних зв'язків і значною інерційністю. Це обумовлює як складність математичного моделювання, так і необхідність застосування адаптивних, інтелектуалізованих засобів керування, що здатні не тільки реагувати на поточні зміни, а й прогнозувати динаміку параметрів. Процес виявляє схильність до нестійкої поведінки за умов зовнішніх впливів, що зумовлює потребу в глибокому аналізі його властивостей як об'єкта автоматизації, зокрема в аспекті чутливості, спостережуваності, керованості та

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

стійкості.

1.2 Аналіз наукових досліджень, присвячених автоматизації процесу гідроочищення гасу

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить про зростаючу зацікавленість наукової спільноти у вдосконаленні процесів гідроочищення шляхом їх автоматизації та впровадження інтелектуальних систем моделювання. Особливе місце в цьому контексті посідає застосування штучних нейронних мереж, машинного навчання, а також емпіричних і напівемпіричних підходів до прогнозування динаміки технологічних параметрів.

У роботі “Artificial neural networks and biodiesel production: A review ” [1] розглядається застосування нейронних мереж для моделювання процесу гідроочищення на реальних даних, отриманих із мексиканського нафтопереробного підприємства. Автори зосереджуються на задачі прогнозування вмісту сірки в кінцевому продукті, що дає змогу виявляти відхилення від стабільного режиму роботи установки. Дослідження підтверджує доцільність використання нейронних мереж як інструменту підтримки прийняття рішень при управлінні складними нелінійними об’єктами з високим ступенем невизначеності.

Поглиблене розуміння динаміки теплових процесів реакторів гідроочищення представлено в дослідженні “Artificial neural network and semi-empirical modeling of industrial-scale Gasoil hydrodesulfurization reactor temperature profile” [2]. Тут розглядається моделювання температурного режиму промислового реактора за допомогою гібридного підходу: поєднання штучних нейронних мереж і напівемпіричних залежностей. Такий підхід забезпечує високу точність прогнозування в умовах реального виробництва, що вказує на потенціал поєднання аналітичних і евристичних методів у розробці систем автоматизованого керування.

Робота “ Artificial intelligence approach for modeling petroleum refinery

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

catalytic desulfurization process” [3] акцентує увагу на багатофакторному характері процесу каталітичної десульфуризації. Автори відзначають, що ефективність очищення суттєво залежить від температурно-теплових режимів, властивостей сировини і активності каталізатора. Застосування методів штучного інтелекту дозволяє враховувати ці взаємозв’язані фактори, пропонуючи комплексний підхід до створення адаптивних моделей управління.

Дослідження “Simulation of hydrodesulfurization unit for natural gas condensate with high sulfur content” [4] розглядає впровадження програмної симуляції як інструменту для оптимізації параметрів роботи установки гідроочищення. Особливу увагу приділено впливу технологічних змінних на якість очищення конденсату природного газу з високим вмістом сірки. Результати показали, що точне моделювання з урахуванням хімічної природи сировини дозволяє значно знизити споживання водню та енергетичні витрати, зберігаючи при цьому необхідні показники якості.

Зведений аналіз вищезазначених робіт дозволяє сформуванню узагальнене уявлення про поточні підходи до автоматизації гідроочищення в нафтопереробній галузі. Практика застосування нейронних мереж та гібридних моделей довела свою ефективність у прогнозуванні змін технологічних параметрів, зниженні ризиків відхилення від заданих режимів та підвищенні гнучкості систем керування. Поєднання емпіричних і нейронних методів моделювання відкриває перспективи для створення самонавчальних систем з високим ступенем адаптації до умов реального виробництва.

1.3. Взаємозв’язок між властивостями сировини та завданнями автоматизації

Процес гідроочищення гасу передбачає участь низки речовин, які виконують різноманітні функції, починаючи від каталізаторів та реагентів і закінчуючи проміжними продуктами, що утворюються в ході хімічних перетворень. Хімічний склад і властивості цих речовин визначають не лише

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

ефективність очищення, а й особливості технологічного контролю та вимоги до систем автоматизації.

Головною реагентною речовиною є водень, який забезпечує процес гідрогенізації сірковмісних сполук у сировині. Водень вступає у реакції відновлення органічних сірковмісних з'єднань, утворюючи при цьому безпечніші сполуки, такі як сірководень, що видаляється з продукту. Водень також сприяє відновленню активності каталізатора під час процесу. Якість і чистота водню є важливими параметрами, оскільки забруднення може знизити ефективність реакцій і пошкодити обладнання.

Сировина для гідроочищення, у цьому випадку газ, складається з комплексної суміші вуглеводнів, які включають парафіни, нафтени, ароматичні вуглеводні, а також різні домішки - сірковмісні сполуки, нітрогенові з'єднання, кисневмісні речовини, метали і смоли. Сірковмісні компоненти (меркаптани, тіофени, сульфідні) є основною ціллю очищення. Їх структура і концентрація визначають необхідність регулювання температурного режиму і тиску, оскільки різні сполуки мають різну реакційну здатність і теплову стабільність.

Каталізатор, який використовується в реакторі, зазвичай містить металеві компоненти, такі як нікель, кобальт або молібден, нанесені на оксидну підтримку (наприклад, алюміній оксид). Каталізатор забезпечує активні центри для протікання реакцій гідрогенізації та дегідрування, визначаючи кінетику і селективність процесу. Стан каталізатора, його активність і ступінь забруднення безпосередньо впливають на продуктивність установки, що зумовлює необхідність постійного моніторингу і регулювання режимів роботи.

В процесі реакції утворюються продукти, серед яких виділяються сірководень (H_2S), який підлягає негайному видаленню для запобігання корозії обладнання і забезпечення екологічної безпеки. Крім того, у технологічній схемі присутні теплоносії, гідравлічні рідини і інші допоміжні середовища, що забезпечують тепловий режим і механічні умови процесу.

Взаємозв'язок між властивостями сировини та завданнями автоматизації в

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

процесі гідроочищення газу є надзвичайно складним і багатогранним, оскільки технологічна ефективність безпосередньо залежить від хімічного та фізичного складу вихідної сировини. Зміни у складі газу, включаючи вміст сірковмісних сполук, ароматичних вуглеводнів, а також домішок і механічних включень, суттєво впливають на вибір оптимальних параметрів процесу гідроочищення, а отже, й на вимоги до систем автоматичного контролю та регулювання.

Властивості сировини визначають динаміку і характер протікання хімічних реакцій у реакторі гідроочищення, впливають на режим роботи каталізатора та обумовлюють необхідність точного контролю температурних режимів, тиску і витрат реагентів, особливо водню. Зміни складу сировини, які можуть бути зумовлені як технологічними умовами видобутку, так і процесами зберігання та транспортування, призводять до варіацій у теплових і кінетичних характеристиках реакції, що вимагає оперативного коригування параметрів процесу з боку системи автоматизації.

Задачі автоматизації в даному контексті набувають багатофункціонального характеру: від забезпечення стабільності технологічних режимів до реалізації адаптивних алгоритмів, здатних враховувати зміни у фізико-хімічних властивостях сировини в реальному часі. Саме завдяки цьому система автоматичного керування здатна підтримувати ефективність процесу при мінімізації витрат енергоресурсів і реагентів, а також зменшувати вплив коливань сировинних параметрів на якість кінцевого продукту.

Врахування взаємозв'язку між властивостями сировини та завданнями автоматизації дозволяє формувати більш точні математичні моделі, які враховують нелінійність процесів, мультифакторність впливів і взаємозалежність параметрів. Це забезпечує підґрунтя для розвитку систем прогнозування і самонавчальних регуляторів, що є важливим кроком у напрямі цифрової трансформації нафтопереробної галузі.

З огляду на хімічну активність і потенційну вибухонебезпеку робочих середовищ, технічні засоби автоматизації, що застосовуються у системах

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

керування гідроочищенням гасу, повинні відповідати підвищеним вимогам безпеки. Зокрема, електрообладнання має бути виконано у вибухозахищеному виконанні, що гарантує запобігання виникненню іскр та займання вибухонебезпечних сумішей. Вибухозахищені датчики, контролери, виконавчі механізми і кабельні системи є невід'ємною складовою автоматизації на таких об'єктах.

Крім вибухозахисту, системи автоматизації повинні включати засоби моніторингу параметрів сировини та продукту у реальному часі - датчики температури, тиску, концентрації водню та сірководню, а також аналізатори хімічного складу. Ці пристрої повинні бути інтегровані у розподілені системи управління (DCS), які забезпечують високоточне регулювання технологічних параметрів і здатні швидко реагувати на зміни умов процесу.

Важливим аспектом є також наявність засобів резервування і аварійного захисту, які мінімізують ризики аварійних ситуацій, пов'язаних із перевищенням допустимих параметрів чи витоком небезпечних речовин. Таким чином, впровадження надійних, сертифікованих технічних рішень із відповідними засобами вибухозахисту є обов'язковою умовою для забезпечення безперебійної та безпечної роботи установки гідроочищення гасу.

1.4. Призначення і суть процесу

Установка гідроочищення гасу виступає одним із фундаментальних етапів технологічної схеми переробки нафти, спрямованим на значне зниження вмісту сірковмісних сполук у кінцевому продукті. Цей процес має важливе значення для покращення якості гасу, підвищення його екологічної безпеки та відповідності жорстким стандартам, що визначають придатність палива для подальшого застосування, зокрема у авіаційній і енергетичній галузях. Основне призначення установки полягає у забезпеченні максимальної ефективності очищення сировини при мінімізації енергетичних і матеріальних ресурсів, що досягається застосуванням каталізаторів у реакторі (1) та дотриманням оптимальних

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

гідроочищений газ - від газової фракції. Рідкий продукт надалі направляється до стабілізаційної колони (17), де проводиться подальша обробка для регулювання параметрів, таких як температура спалаху, які визначають безпечність і якість кінцевого продукту.

Газова фаза, яка утворюється в процесі сепарації, піддається охолодженню в теплообмінниках (12 і 16). Цей етап передбачає конденсацію вуглеводнів, що дозволяє повернути до технологічного циклу цінні фракції. Конденсат, отриманий після охолодження, відокремлюється і спрямовується для подальшої обробки або використання.

З метою підтримання стабільності процесу, необхідним є безперервне регулювання і циркуляція робочих середовищ, а також контроль параметрів тиску і температури на всіх стадіях. Особливо важливим є робота низькотемпературного сепаратора (14), де відбувається додаткове розділення суміші на фракції з різними фізико-хімічними властивостями. Вуглеводневий конденсат, утворений на цьому етапі, що включає легкі бензинові і газові компоненти, підігрівається у теплообміннику (16) і направляється у стабілізаційну колону для подальшої термічної обробки.

У структурі установки гідроочищення газу вирішальну роль у формуванні необхідних умов для перебігу основних хімічних реакцій відіграють піч (3) та реактор (1). Саме ці елементи формують реакційне середовище, в якому відбувається перетворення сірковмісних та інших небажаних сполук, що наявні в газовій сировині, на менш токсичні або інертні продукти. Їхнє функціональне поєднання визначає ефективність усієї технологічної схеми очищення.

Піч (3) виконує функцію термічного підготовлення газосировинної суміші перед її подачею до реактора. Вона забезпечує рівномірне нагрівання сировини та водневмісного газу до температури приблизно 380 °С, що є критично важливою для активації каталізованих процесів гідрування в наступному етапі. Такий температурний режим сприяє підвищенню реакційної здатності молекул і забезпечує необхідну термодинамічну рівновагу в системі, що дозволяє уникати

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

формування побічних продуктів та спрямовувати реакції у бажаному напрямі.

Термічна дія печі не обмежується лише підігрівом реагентів. В умовах високого тиску, що перебуває в межах 4,2–4,4 МПа, у змішаному потоці частково активуються реакційно здатні компоненти, посилюється розпад нестійких органічних структур, зокрема сірковмісних сполук, що вже на цьому етапі починають піддаватися деструкції. Крім того, такий температурно-тепловий вплив сприяє покращенню подальшого фазового розділення у сепараційних вузлах установки завдяки зменшенню в'язкості рідин і підвищенню леткості легких фракцій.

Гідравлічна роль печі також є суттєвою – вона забезпечує необхідний об'ємно-швидкісний режим транспортування реагентів, створюючи стабільний потік у напрямку реактора. Порушення температурного або тискового режиму на цьому етапі призводить до дестабілізації гідродинаміки та зниження ефективності каталітичного очищення.

Реактор (1) функціонує як центральна реакційна зона, в якій відбувається безпосередня хімічна трансформація сировини. Попередньо нагріта в печі газосировинна суміш надходить у реактор, де проходить через нерухомий шар каталізатора, зазвичай на основі нікелю, молібдену або кобальту, нанесеного на пористу носійну основу. У присутності водню відбуваються реакції гідрогенізації, під час яких органічні сірковмісні сполуки перетворюються на сірководень і насичені вуглеводні. Окрім десульфуризації, у реакторі можуть одночасно протікати реакції деазотування, деокиснення, гідрокрекінгу тощо, що розширює спектр очищення сировини.

Кінетика процесів у реакторі суттєво залежить від температури, тиску, концентрації водню та активності каталізатора. Забезпечення рівномірного розподілу потоку через каталітичне ложе, а також підтримання стабільного режиму контактної взаємодії фаз є необхідними передумовами для досягнення глибокого очищення. З огляду на це, конструкція реактора передбачає розвинутий контроль температурного профілю, а також спеціальні засоби

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

моніторингу деградації каталізатора.

Спільна дія печі та реактора створює узгоджену систему, що забезпечує ефективне руйнування сірковмісних структур і формування стабільного, очищеного газу з низьким вмістом шкідливих компонентів. Висока якість кінцевого продукту досягається завдяки точному регулюванню умов кожного етапу та застосуванню надійних засобів автоматичного керування.

Таким чином, ефективність функціонування технологічної установки значною мірою визначається взаємодією печі та реактора як теплофізичного та хімічного модулів відповідно. Це обґрунтовує необхідність впровадження високоточних автоматизованих систем контролю параметрів температури, тиску та витрат, що дозволяють динамічно адаптувати технологічний процес до змін сировинного складу й експлуатаційних умов.

1.5 Технічна характеристика технологічного обладнання

Установка гідроочищення газу виконує завдання глибокого десульфурування, знижуючи масову частку сірки в сировині з початкового значення 0,166% до рівня, нижчого за 0,001%. Такий рівень очищення досягається в умовах безперервного функціонування при проєктній продуктивності 3975 м³/добу. Основні технологічні модулі установки сконфігуровані таким чином, щоб забезпечити максимальну ефективність фізико-хімічних перетворень при оптимальному енергоспоживанні й високому рівні технологічної надійності.

Центральним елементом реакційного вузла є реактор (1), обладнаний нерухомим шаром каталізатора з загальним об'ємом 156 м³, що забезпечує значну площу активної поверхні для перебігу процесів гідрогенізації. Внутрішній діаметр реактора становить 3,81 м, що дозволяє організувати потік реагентів із забезпеченням рівномірного розподілу суміші по перерізу каталітичного ложа.

Сировина надходить у систему за допомогою насосної групи, після чого

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

транспортується через каскад теплообмінних апаратів для попереднього підігріву за рахунок теплоти продуктів реакції. У змішувальному вузлі до неї вводиться водневмісний газ, з яким формує газосировинну суміш. Ця суміш подається до печі (3), де в умовах тиску 4,2–4,4 МПа та температури до 380 °С здійснюється її остаточне нагрівання. У результаті відбувається активація молекул, що є необхідною для перебігу хімічних реакцій у реакторі.

Після виходу з реактора, де протікають реакції гідроочищення в присутності каталізатора, газопродуктова суміш проходить стадії охолодження, що здійснюються в кип'ятильнику та теплообмінниках. Це забезпечує зниження температури до рівня, за якого можливе ефективне фазове розділення. В сепараторі суміш розподіляється на рідку фазу (очищений газ) і газопарову фазу, яка підлягає подальшому охолодженню й стабілізації.

Піч (3) працює як терморекційний модуль, у якому відбувається інтенсивний тепловий вплив на газосировинну суміш. Забезпечує такі технологічні функції:

- Термічна активація реагентів, необхідна для ініціювання хімічних реакцій у реакторі;
- Попереднє розщеплення сірковмісних сполук з утворенням летких токсичних компонентів, таких як сірководень і аміак;
- Зменшення в'язкості суміші, що покращує подальшу сепарацію продуктів у відповідних апаратах;
- Підтримка високого тиску потоку, що сприяє стабільному надходженню до реакційної зони.

Реактор (1) формує основний реакційний об'єм, де реалізуються каталітичні перетворення органічних сполук. Його призначення полягає у:

- Забезпеченні глибокого гідрування сірковмісних компонентів за участі водню;
- Оптимізації реакційної кінетики шляхом підтримання заданого температурно-тискового режиму;

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- Забезпеченні ефективної дифузії реагентів у каталітичному шарі, що дозволяє досягати високої однорідності процесу;
- Мінімізації утворення побічних продуктів, таких як ароматичні сполуки або кокс.

Для забезпечення стабільності процесу застосовується система безперервного моніторингу технологічних параметрів із виведенням інформації на пульт управління. Контролю підлягають:

- температура на вході та виході з теплообмінників, печі й реактора;
- тиск у зонах подачі водню, суміші та розділення;
- витрати сировини, водневмісного газу й кінцевих продуктів;
- стан каталізатора та швидкість деградації його активної поверхні.
- Типові технологічні параметри функціонування (на окремих етапах):
- Вхідна температура сировини перед теплообмінником: 70 °С, тиск: 5,27 МПа;
- Після теплообмінника: 251 °С, тиск: 5,03 МПа;
- Перед реактором (після печі): 374 °С, тиск: 4,22 МПа.

Таким чином, технічна конфігурація установки гідроочищення забезпечує узгоджену роботу всіх технологічних вузлів, спрямовану на досягнення високого ступеня очищення сировини з дотриманням енергетичної ефективності та безпеки експлуатації. Структурна побудова обладнання дозволяє здійснювати автоматизоване керування параметрами, що особливо важливо при роботі з вибухонебезпечними газовими середовищами. З огляду на це, критичні елементи системи мають бути реалізовані у вибухозахищеному виконанні з застосуванням електронних засобів контролю, що відповідають вимогам промислової безпеки.

1.6. Вибір параметрів індикації, регулювання, контролю та сигналізації

У межах функціонування установки гідроочищення контроль і регулювання параметрів процесу мають вирішальне значення для забезпечення

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

стабільності хімічних реакцій, безпеки експлуатації та досягнення високої якості очищення сировини. Усі технологічні операції відбуваються в умовах підвищених температур і тисків, а також за участі вибухонебезпечних газових сумішей, що зумовлює необхідність ретельного моніторингу як основних, так і допоміжних показників.

Система автоматизованого керування передбачає безперервну індикацію, регулювання та сигналізацію параметрів, які мають істотний вплив на ефективність і безпеку технологічного процесу. До таких параметрів належать температурні, тискові, витратні та концентраційні показники в окремих зонах установки: у теплообмінниках, печі, змішувальному вузлі, реакторі, охолоджувальній секції та сепараторі.

Зокрема, особливу увагу приділено:

- підтриманню стабільної температури в реакторі для забезпечення оптимальної кінетики гідрувальних реакцій;
- контролю тиску в системі, що безпосередньо впливає на рівноважні умови реакцій і безпеку експлуатації;
- індикації витрати сировини, водневмісного газу й циркуляційних потоків, що дозволяє своєчасно коригувати масові співвідношення реагентів;
- сигналізації відхилень від встановлених меж, яка реалізована через систему аварійного оповіщення з фіксацією відхилень на операторському інтерфейсі.

Інформація про критичні параметри відображається на щиті керування з можливістю локального та дистанційного втручання оператора. Для кожного контрольованого параметра встановлено допустимі межі, а також реалізовано логіку регулювання, яка базується на типових алгоритмах ПД-керування (пропорційно-інтегрально-диференціального типу), що дозволяє підтримувати динамічну рівновагу системи за умов змін вхідних впливів.

Найважливіші параметри, які підлягають моніторингу, наведені у таблиці 1.1. Вона містить узагальнені дані щодо величин, що підлягають регулюванню,

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

способів їх вимірювання, допустимих діапазонів та типів технічних засобів, за допомогою яких здійснюється контроль, сигналізація і керування.

Таблиця 1.1 – Параметри контролю і регулюванню

Параметри	Значення параметру	
	Температура, °С	Надлишковий тиск, МПа
Сировина на вході в теплообмінник 8	70	5,27
Сировина на виході з теплообмінника 5 (1а)	251	5,03
Водневмісний газ перед змішуванням із сировиною	264	4,77
Газосированна суміш на вході в змішувачі печі 3 (2а)	218	4,64
на вході в реактор 1 (7а)	374	4,22
на виході з реактор 1 (4а)	-	4,15

1.7 Опис функціональної схеми

Функціональна схема автоматизації установки гідроочищення гасу передбачає складну взаємодію між основними технологічними вузлами, зокрема: теплообмінником К-2, піччю Р-2, реакційною колоною РК-1 з вбудованим ребойлером та блоком регулювання тиску. У межах цього процесу ключовими регульованими параметрами є температура реакційної зони, витрата гасової суміші, тиск у колоні та рівень у ребойлері. Враховуючи наявність динамічних зв'язків між потоками теплоносія та температурою, а також вплив внутрішніх запізнювань у теплообмінних апаратах, доцільним є впровадження саме каскадної структури автоматичного регулювання (рис. 1.2).

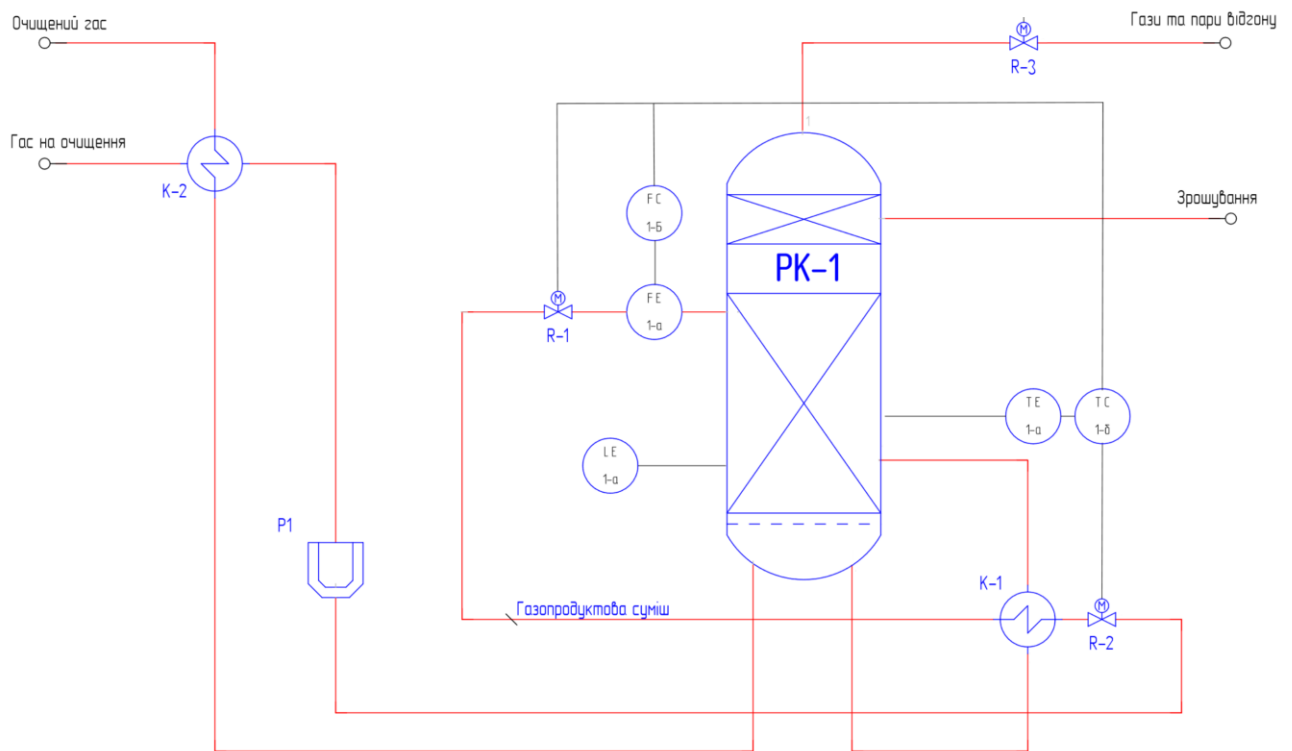


Рисунок 1.2 – Спрощена ФСА процесу гідроочищення газу

Каскадне регулювання дозволяє ієрархічно розділити процес керування на два узгоджених контури: зовнішній, що забезпечує стабілізацію основного параметра — температури у реакційній колоні, та внутрішній, який оперативно керує витратою газу або газової суміші як теплоносія. Завдяки цьому, внутрішній контур компенсує швидкі збурення, спричинені змінами теплового навантаження або коливаннями в подачі палива, ще до того, як вони почнуть істотно впливати на основний регульований параметр - температуру.

Наприклад, засувка R-1 у функціональній схемі керує витратою газової суміші, що подається до реакційної колоні, при цьому вимірюється витрата за допомогою витратоміра FE, а температура в колоні контролюється датчиком TE. У разі виникнення відхилення температури, зовнішній контур формує сигнал у вигляді завдання на витрату, який передається внутрішньому ПІ-регулятору витрати. Така структура дозволяє мінімізувати вплив інерційності системи та транспортних запізнь, що особливо важливо при високотемпературному процесі гідроочищення.

									Арк.
									27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ				

Додатково каскадне регулювання забезпечує підвищену стійкість системи до збурень, викликаних нестабільністю тиску або змінною якістю вхідної сировини. Інтеграція регулюючих засувок з аналоговим приводом (R-1, R-2, R-3) у систему дозволяє точно та плавно змінювати витрату або тиск, зберігаючи стабільність реакційного режиму.

З огляду на специфіку функціональної схеми, наявність теплообмінних зв'язків, динамічну взаємодію між параметрами та вимоги до високої точності регулювання температури, застосування каскадної структури регулювання є не лише доцільним, але й необхідним для забезпечення енергоефективності, стабільності та безпечності процесу гідроочищення гасу.

Висновок до розділу

У межах розглянутого розділу здійснено комплексний аналіз технологічної установки гідроочищення гасу, що функціонує як важлива ланка в структурі нафтопереробного виробництва. Процес гідроочищення відіграє визначальну роль у зниженні вмісту небажаних домішок, зокрема сірчистих сполук, що, у свою чергу, безпосередньо впливає на якість та екологічну безпеку кінцевого продукту. Особливу увагу приділено аналізу функціонування трубчастої печі та реактора - елементів, від узгодженої дії яких залежить термодинамічна і хімічна ефективність перетворень.

Піч забезпечує нагрівання газосировинної суміші до температури, достатньої для ініціювання каталітичних реакцій гідрогенізації, які надалі реалізуються в реакторі. Сам реактор, обладнаний нерухомим шаром каталізатора, є місцем здійснення основних хімічних перетворень, спрямованих на десульфуризацію та глибоку очистку гасу. Процес відбувається під високим тиском і в чітко контрольованих температурних умовах, що забезпечується системою автоматичного керування.

Паралельно з технічним описом було проаналізовано основні параметри, що підлягають контролю, регулюванню, індикації та сигналізації. Особливе

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

місце в цьому аспекті займають температура та тиск на вході до печі, оскільки від них залежить стабільність і результативність реакційного контуру. Створена функціональна схема автоматизації дозволяє здійснювати безперервний моніторинг і цільове керування критичними параметрами, що забезпечує стабільність технологічного режиму та адаптивність системи до змін зовнішніх або внутрішніх умов.

Загалом, реалізована архітектура технологічного процесу демонструє високий рівень інтеграції енергетичних, хімічних та інформаційних складових. Вона спрямована на забезпечення необхідного рівня очистки гасу при збереженні енергоефективності й технологічної безпеки. Завдяки цьому установка здатна стабільно продукувати продукт, який відповідає сучасним авіаційним стандартам і може бути використаний у високотехнологічних галузях без необхідності додаткової очистки.

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

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Теоретичні засади побудови каскадної САР

Проектування каскадної системи автоматичного регулювання для установки гідроочищення газу передбачає створення ієрархічної структури управління, у якій один регулятор формує завдання для іншого. Такий підхід дозволяє підвищити точність і стійкість процесу регулювання за умов дії інерційних елементів, збурень та змін у властивостях сировини. У контексті гідроочищення газу каскадна САР дозволяє зменшити коливання температури реакції, стабілізувати концентраційний склад продукту та знизити вплив нестационарних збурень на кінцеві параметри процесу.

Гідроочищення газу є складним каталізованим процесом, у межах якого відбувається глибоке очищення вуглеводневої сировини від сірковмісних, азотовмісних та кисневмісних сполук. Технологічна ефективність цього процесу значною мірою визначається температурним режимом у реакторі, який безпосередньо впливає на швидкість хімічних перетворень і повноту очищення. Разом із тим, температура залежить не лише від заданих установок, а й від багатьох змінних, включаючи витрату теплоносія, ступінь ендотермічності реакції, тепловіддачу, інтенсивність циркуляції водню та характеристики каталітичного шару.

У межах каскадної САР пропонується реалізувати два рівні регулювання: зовнішній контур стабілізує температуру в реакторі на основі даних про її фактичне значення, тоді як внутрішній — регулює витрату теплоносія або енергоносія (наприклад, подачу пари або нагрітого газу), що впливає на тепловий баланс у зоні реакції.

Обрана структура обумовлюється наявністю двох об'єктів регулювання з різною динамікою: температурна зміна в реакторі є інерційним процесом з великою сталою часу, натомість зміна витрати теплоносія відбувається швидше.

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Саме тому внутрішній контур, що працює з більш швидкою змінною, дає змогу згладити збурення ще до того, як вони позначаться на повільнішому вихідному параметрі — температурі. Такий принцип дозволяє зменшити переналаштування зовнішнього регулятора та підвищити загальну чутливість системи до змін середовища.

Зовнішній регулятор здійснює вимірювання температури в реакторі та формує сигнал-завдання для внутрішнього регулятора витрати теплоносія. Внутрішній регулятор порівнює це завдання з фактичним значенням витрати та відповідно модифікує керуючий вплив на виконавчий механізм, наприклад, на регулювальний клапан у трубопроводі подачі теплоносія.

У математичному аспекті така система описується як два послідовно з'єднані контури з передаточними функціями, де зовнішній контур має більшу сталу часу, а внутрішній — меншу [5]. Аналіз частотної характеристики системи засвідчує, що каскадна структура дозволяє ефективно фільтрувати збурення, які діють на проміжному рівні, зокрема зміни витрати, тиску або температури теплоносія, що часто виникають при нестабільній роботі котельного або компресорного обладнання. Зниження амплітуди коливань на внутрішньому рівні зменшує навантаження на зовнішній контур, що уможливорює підтримання високої точності регулювання температури навіть за умов флуктуацій у системі.

У практичному виконанні обидва контури можуть бути реалізовані на базі промислових ПІ або ПІД-регуляторів, які функціонують у системі керування з розподіленою архітектурою. Типовим прикладом реалізації такої САР є використання контролера в середовищі SCADA або DCS, де зовнішній контур контролює температуру за допомогою терморпарі, а внутрішній — керує частотою обертання насоса або положенням клапана, що регулює потік теплоносія.

Залежно від рівня автоматизації система може бути доповнена адаптивними алгоритмами, які оновлюють параметри регуляторів у реальному часі з урахуванням зміни властивостей сировини, деградації каталізатора або

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

забруднення теплообмінних поверхонь. У складніших випадках можлива побудова моделі предиктивного управління, де внутрішній контур функціонує на основі прогнозу змін у тепловому балансі реактора (рис. 2.1).

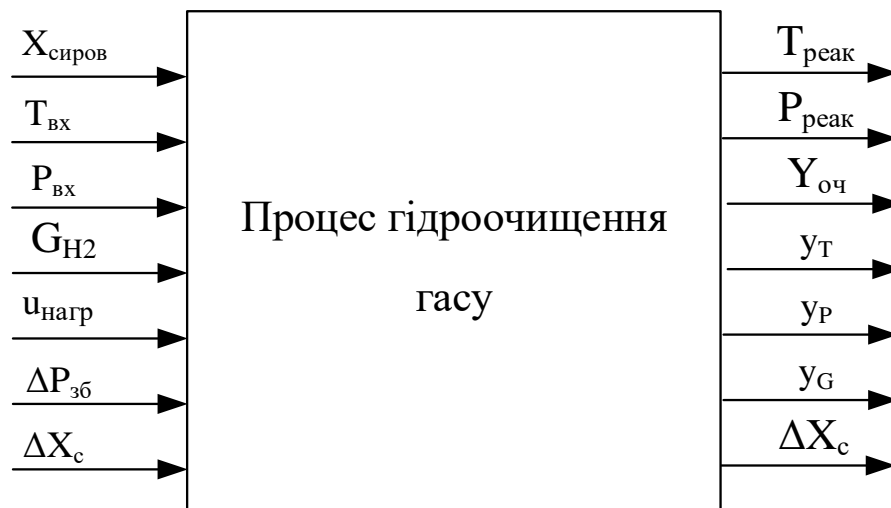


Рисунок 2.1 - Модель «вхід–вихід» процесу гідроочищення газу

У контексті розробки каскадної системи автоматичного регулювання для процесу гідроочищення газу модель типу «вхід–вихід» виконує суттєво важливу методологічну функцію, яка полягає в абстрактному представленні складного каталітичного процесу, що охоплює фазові, масообмінні та тепломасообмінні явища. Така модель забезпечує формалізований опис зв'язку між керувальними та збурювальними параметрами (вхідні змінні) й реакцією технологічного об'єкта у вигляді зміни термодинамічних характеристик (температура, тиск) та якісного складу продукту очищення (вихідні змінні). В основі використання цієї моделі лежить прагнення створити основу для проектування ефективної системи автоматичного керування, орієнтованої на підтримання оптимальних умов гідроочищення, незалежно від змін у складі сировини або зовнішніх збурень.

З одного боку, ця модель дозволяє кількісно описати зовнішню динаміку процесу без необхідності глибокого аналізу внутрішньої структури каталітичної реакції, що реалізується в реакторі. У разі гідроочищення газу, зважаючи на високу складність хімічних і термодинамічних перетворень, детальне

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

моделювання на основі першопринципів часто є надмірно складним або обчислювально неефективним у режимі реального часу. Натомість модель «вхід–вихід», яка базується на ідентифікованих динамічних зв'язках, дозволяє побудувати регулятор, орієнтований на актуальні характеристики об'єкта та його чутливість до збурень.

З іншого боку, дана модель є вихідною основою для розробки алгоритмів синтезу та налаштування автоматизованих систем керування. Її застосування дає змогу формалізувати параметри передавальних функцій, провести частотний аналіз, оцінити стійкість і робастність системи. У межах каскадної архітектури це створює можливість організувати розмежування функцій регуляторів: внутрішній контур оперативно реагує на швидкі збурення, пов'язані зі змінами витрати водню чи температури, тоді як зовнішній контур підтримує задану якість очищення за кінцевими параметрами продукту [6].

З прикладної точки зору модель «вхід–вихід» забезпечує формування цифрового відображення процесу в середовищах SCADA, DCS або MATLAB/Simulink, що необхідно для моделювання сценаріїв роботи, тестування адаптивних регуляторів, побудови цифрових двійників і впровадження передбачуваного управління у реальному часі.

Позначення вхідних і вихідних величин подані у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Перелік вхідних і вихідних величин моделі «вхід–вихід» процесу гідроочищення гасу

Позначення	Фізичний зміст
Вхідні величини	
$X_{\text{сиров}}$	Склад гасу, включно з вмістом сірковмісних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, залишкових домішок
$T_{\text{вх}}$	Температура гасу перед входом у реактор гідроочищення
$P_{\text{вх}}$	Тиск у трубопроводі перед реактором
G_{H_2}	Витрата водню, що подається для забезпечення відновлювальної атмосфери

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Позначення	Фізичний зміст
$u_{\text{нагр}}$	Керувальний сигнал на нагрівач, що регулює температуру реакційної зони
$\Delta P_{\text{зб}}$	Зовнішні збурення тиску в системі (наприклад, коливання компресорної установки)
ΔX_c	Неконтрольовані варіації в складі сировини, що змінюють реакційну кінетику
Вихідні величини	
$T_{\text{реак}}$	Температура всередині реакційної зони (контрольна точка)
$P_{\text{реак}}$	Тиск у реакторі гідроочищення
$Y_{\text{оч}}$	Якість очищеного газу (наприклад, концентрація сірки або загальний вміст домішок)
u_T	Зміни температури в реакторі
u_P	Зміни тиску
u_G	Зміни витрати водню
ΔX_c	Реєстровані зміни властивостей сировини за результатами онлайн-аналізу

2.2 Проведення експерименту та визначення передавальних функцій АСР

Щоб отримати перехідні характеристики каскадної системи автоматичного регулювання, що забезпечує керування процесом гідроочищення газу, зокрема регулювання температури в реакторі, необхідно провести експериментальне дослідження — як у фізичній установці, так і в її імітаційній моделі. Методика дослідження передбачає цілеспрямоване введення збурення у вигляді одиничного стрибка з подальшою реєстрацією динамічної реакції обох регуляторів: внутрішнього, який безпосередньо впливає на витрату теплоносія або водню, та зовнішнього, що формує цільове значення температури в реакційній зоні.

Ціллю такого експерименту є виявлення часових і амплітудних характеристик реакції системи на зміну збурювального впливу, що дозволяє побудувати адекватну динамічну модель об'єкта керування. Зібрані дані слугують підґрунтям для подальшого налаштування параметрів регуляторів,

оцінки перехідних процесів і корекції архітектури керування у напрямку підвищення точності стабілізації температурного режиму, що критично важливо для ефективності каталітичних реакцій гідроочищення.

Експеримент базується на попередньому створенні умов для роботи двоконтурної ієрархічної системи керування, де зовнішній контур визначає температурне завдання, а внутрішній регулює теплову потужність, забезпечуючи безпосередній вплив на динаміку реакційного середовища. При цьому установка має перебувати в режимі термодинамічної стабільності, за якої параметри тиску, температури та витрати сировини залишаються сталими до моменту введення збурення. Такий підхід гарантує достовірність результатів та дозволяє проаналізувати вплив кожного з контурів у роздільному вигляді, що є принципово важливим для синтезу адаптивних чи предиктивних стратегій керування.

Опис експерименту:

1. Підготовка системи: Система приводиться у стан стабілізованого режиму, в якому контрольовані параметри (температура в зоні ректифікації, тиск, склад фракцій) перебувають у допустимих межах. Контролери мають фіксовані параметри налаштування, які раніше були обрані емпірично або через математичне моделювання;

2. Ініціація одиничного збурення: У визначений момент часу (наприклад, на 100-й секунді) подається одиничний стрибкоподібний сигнал у вигляді зміни завдання на витрату теплоносія або зміну температури подачі сировини. Такий імпульс може бути реалізований фізично (наприклад, відкриттям клапана або зміною положення сервоприводу) або шляхом програмного збурення у симуляційному середовищі (наприклад, у SCADA чи MATLAB Simulink);

3. Реєстрація реакцій: Вимірюються вихідні сигнали внутрішнього й зовнішнього контурів (рис. 2.2). Внутрішній контур дає швидку реакцію — зміну витрати теплоносія, що коригується відповідно до заданої величини. Зовнішній контур реагує повільніше, стабілізуючи температуру після того, як вплив

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

збурення вже частково згладжений внутрішнім регулятором;

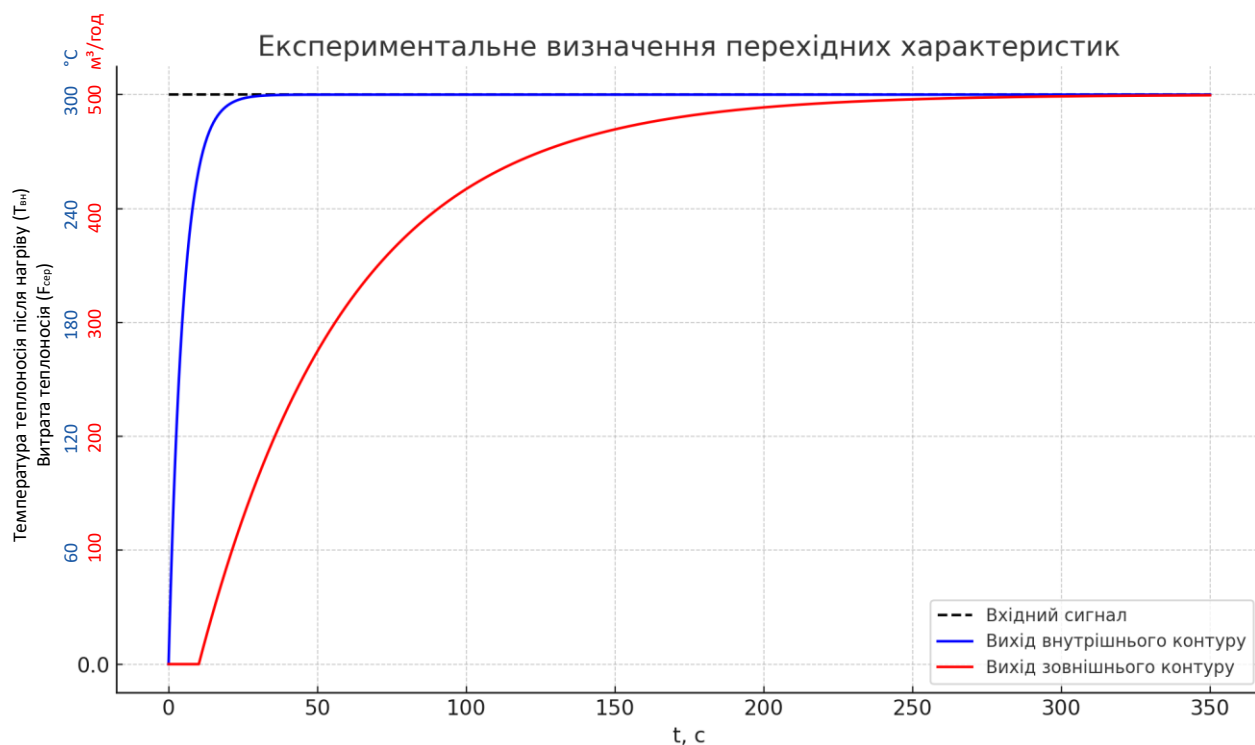


Рисунок 2.2 – Графіки перехідних характеристик ОК

4. Обробка результатів: На основі отриманих даних будується часовий профіль реакцій обох контурів. Для цього фіксуються параметри відгуку: запізнення, час наростання, встановлення, перерегулювання та помилка встановлення. Після нормалізації сигналів будується перехідна характеристика у безрозмірних одиницях (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Результати обробки експериментальних даних

№	Внутрішній контур			Зовнішній контур		
	Час t, с	Вхідний сигнал u(t)	Вихідний сигнал y(t)	Час t, с	Вхідний сигнал u(t)	Вихідний сигнал y(t)
0	0	1	0.000	0	1	0.000
1	1	1	0.181	10	1	0.000
2	2	1	0.330	20	1	0.181
3	3	1	0.451	30	1	0.330
4	4	1	0.549	40	1	0.451
5	5	1	0.632	50	1	0.549
6	6	1	0.699	60	1	0.632

Продовження таблиці 2.2.

№	Внутрішній контур			Зовнішній контур		
	Час t, с	Вхідний сигнал u(t)	Вихідний сигнал y(t)	Час t, с	Вхідний сигнал u(t)	Вихідний сигнал y(t)
7	7	1	0.753	70	1	0.699
8	8	1	0.798	80	1	0.753
9	9	1	0.835	90	1	0.798
10	10	1	0.865	100	1	0.835
11	11	1	0.890	110	1	0.865
12	12	1	0.910	120	1	0.890
13	13	1	0.927	130	1	0.910
14	14	1	0.941	140	1	0.927
15	15	1	0.953	150	1	0.941
16	16	1	0.962	160	1	0.953
17	17	1	0.970	170	1	0.962
18	18	1	0.977	180	1	0.970
19	19	1	0.982	190	1	0.977
20	20	1	0.987	200	1	0.982
21	21	1	0.990	210	1	0.987
22	22	1	0.993	220	1	0.990
23	23	1	0.995	230	1	0.993
24	24	1	0.997	240	1	0.995
25	25	1	0.998	250	1	0.997
26	26	1	0.999	260	1	0.998
27	27	1	0.999	270	1	0.999
28	28	1	0.999	280	1	0.999
29	29	1	1.000	290	1	0.999
30	30	1	1.000	300	1	1.000

Згідно з експериментальними кривими, виконується апроксимація реакцій за допомогою експоненційних функцій. Внутрішній контур моделюється звичайним інерційним звеном з малою сталою часу, а зовнішній - повільнішим звеном із суттєвою інерційністю. Передавальні функції для обох контурів у операторній формі отримуються як:

Внутрішній (швидкий) контур:

$$G_2(p) = \frac{1}{T_2 p + 1} = \frac{1}{5p + 1}. \quad (2.1)$$

Зовнішній (повільний) контур з транспортним запізненням:

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

$$G_1(p) = \frac{e^{-\tau p}}{T_1 p + 1} = \frac{e^{-10p}}{50p + 1}, \quad (2.2)$$

де:

- $T_1 = 50$ с - постійна часу зовнішнього контуру;
- $T_2 = 5$ с - постійна часу внутрішнього контуру;
- $\tau = 10$ с - час транспортного запізнення;
- p - оператор Лапласа.

2.3 Параметричний аналіз об'єктів регулювання

Співвідношення постійних часу:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{50}{5} = 10, \quad (2.3)$$

Це співвідношення відповідає рекомендованому діапазону (5-20) для ефективного застосування каскадної структури.

Відносне запізнення зовнішнього контуру:

$$\frac{\tau}{T_1} = \frac{10}{50} = 0.2, \quad (2.4)$$

Значення менше 0.5 вказує на доцільність застосування каскадної структури.

Висновки до розділу

У межах даного розділу було обґрунтовано необхідність застосування каскадної системи автоматичного регулювання в процесі гідроочищення гасу як засобу підвищення ефективності управління теплотехнічними параметрами установки. Аналіз структури технологічного процесу засвідчив, що одноступеневі системи регулювання не забезпечують достатньої точності підтримання температури реакційного середовища, що критично для стабільного протікання гідрогенізаційних реакцій у присутності каталізатора.

Особливу увагу було приділено розробці математичної моделі об'єкта регулювання, в якій відображено динамічні властивості реактора та теплообмінного обладнання. Застосування каскадної структури дозволяє

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реалізувати більш гнучке управління температурою за рахунок використання допоміжного (внутрішнього) контуру регулювання витрати теплоносія, що швидше реагує на збурення. Це забезпечує не лише покращення якості перехідних процесів, а й зниження амплітуди температурних коливань, що особливо важливо для збереження активності каталізатора та запобігання деградації продукту.

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Синтез регуляторів

Побудова каскадної автоматизованої системи регулювання в середовищі MATLAB/Simulink передбачає формалізоване відтворення структури ієрархічного керування з чітким розмежуванням зовнішнього та внутрішнього контурів. У цьому контексті реалізація моделі ґрунтується на відображенні взаємозв'язку між регуляторами, об'єктом керування та зворотними зв'язками шляхом використання стандартних блоків Simulink, зокрема підсистем, передавальних функцій та модулів вимірювання (рис. 3.1).

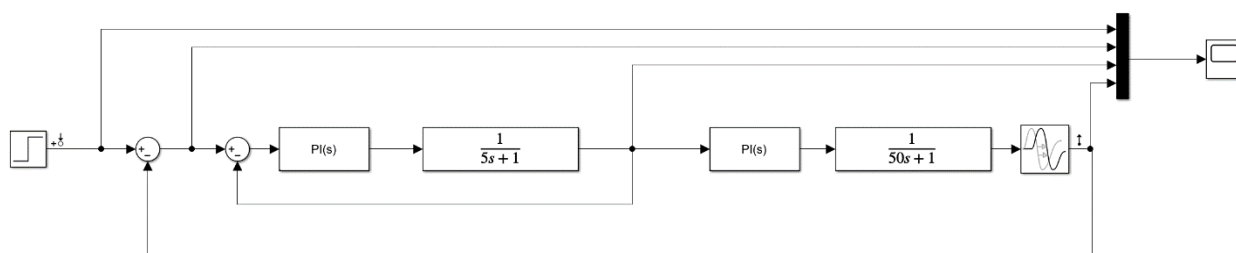


Рисунок 3.1 – Моделювання каскадної АСР у ПЗ Simulink

Важливим моментом є встановлення логіки взаємодії між контурами, де вихід зовнішнього регулятора слугує динамічним завданням для внутрішнього. Сигнали регулювання і відгуку імітуються відповідно до математичних моделей об'єкта, які можуть бути задані через операторні передавальні функції або у вигляді рівнянь стану. У процесі моделювання формується система, здатна адекватно відтворювати часові характеристики відгуку на збурення та зміни завдання, що дозволяє досліджувати стабільність, перехідні процеси і показники якості регулювання при зміні параметрів.

Каскадна автоматична система регулювання представляє собою двоконтурну структуру, де внутрішній швидкий контур стабілізує проміжну змінну, а зовнішній основний контур забезпечує точне відтворення заданого

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

значення основної регульованої величини. Така структура особливо ефективна для об'єктів з великими постійними часу та транспортним запізненням, оскільки дозволяє значно покращити динамічні характеристики системи.

У нашому випадку внутрішній контур характеризується передавальною функцією $G_2(p) = \frac{1}{5p + 1}$ з постійною часу $T_2 = 5$ секунд, що робить його відносно швидким. Зовнішній контур має передавальну функцію $G_1(p) = \frac{e^{-10p}}{50p + 1}$, яка включає значне транспортне запізнення $\tau = 10$ секунд та велику постійну часу $T_1 = 50$ секунд, що характерно для інерційних технологічних процесів.

Синтез внутрішнього контуру базується на методі технічного оптимуму, який забезпечує максимальну швидкодію при збереженні стійкості системи. Основна ідея полягає в компенсації найбільшої постійної часу об'єкта за допомогою інтегральної складової регулятора. Постійна інтегрування ПІ-регулятора приймається рівною постійній часу об'єкта: $T_{i2} = T_2 = 5$ секунд. Така компенсація дозволяє звести передавальну функцію розімкненого контуру до простої аперіодичної ланки з малою постійною часу.

Коефіцієнт підсилення внутрішнього регулятора розраховується за формулою $K_{п2} = \frac{T^2}{2 \cdot T_{\Sigma}^2}$, де T_{Σ} – еквівалентна постійна часу некомпенсованих ланок системи. Приймаючи $T_{\Sigma} = 0.5$ секунди, отримуємо $K_{п2} = \frac{5}{2 \cdot 0.25} = 10$. Такий вибір забезпечує оптимальне співвідношення між швидкодією та перерегулюванням внутрішнього контуру.

Налаштований внутрішній контур можна замінити еквівалентною передавальною функцією $W_{екв}(p) \approx \frac{1}{2.5p + 1}$, що представляє собою аперіодичну ланку з ефективною постійною часу 2.5 секунди. Це означає, що внутрішній контур працює приблизно в п'ять разів швидше за зовнішній, що є оптимальним співвідношенням для каскадних систем.

Зовнішній контур містить транспортне запізнення, що істотно ускладнює процес синтезу регулятора. Наявність запізнення обмежує

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливості підвищення швидкодії системи та вимагає спеціальних методів налаштування. Загальна передавальна функція зовнішнього контуру включає послідовно з'єднані передавальну функцію зовнішнього об'єкта та еквівалентну передавальну функцію внутрішнього контуру.

Для розрахунку параметрів зовнішнього ПІ-регулятора використовується модифікований метод, що враховує специфіку об'єктів з запізненням. Сумарна постійна часу зовнішнього контуру складає $T_{\text{сум}} = T_1 + T_{\text{екв}} = 50 + 2.5 = 52.5$ секунди, що характеризує загальну інерційність системи.

Постійна інтегрування зовнішнього регулятора вибирається пропорційно транспортному запізненню: $T_{i1} = 4 \cdot \tau = 40$ секунд. Такий вибір забезпечує компенсацію впливу запізнювання на статичну точність системи. Коефіцієнт підсилення розраховується за співвідношенням $K_{п1} = \frac{T_{\text{сум}}}{2 \cdot \tau} = \frac{52.5}{20} = 2.625$, що забезпечує стійкість замкненого контуру з необхідним запасом.

Коефіцієнт підсилення внутрішнього регулятора $K_{п2} = 10$ означає, що при одиничному відхиленні регульованої величини від заданого значення регулятор видасть керуючий сигнал амплітудою 10 одиниць. Висока величина коефіцієнта забезпечує швидку реакцію внутрішнього контуру на збурення. Постійна інтегрування $T_{i2} = 5$ секунд показує, що інтегральна складова регулятора досягне значення пропорційної складової за 5 секунд при постійному відхиленні.

Для зовнішнього контуру коефіцієнт підсилення $K_{п1} = 2.625$ є значно меншим, що відображає обережний підхід до налаштування контуру з запізненням. Велика постійна інтегрування $T_{i1} = 40$ секунд означає повільне наростання інтегральної складової, що запобігає перерегулюванню та забезпечує стійкість системи.

3.2 Реалізація в середовищі MATLAB/Simulink

У MATLAB передавальні функції ПІ-регуляторів можна задати кількома способами. Найпростіший підхід використовує функцію `pid()`, де перший параметр – пропорційний коефіцієнт, другий – інтегральний коефіцієнт, що

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

дорівнює відношенню K_p/T_i . Для внутрішнього регулятора це $W_{reg2} = pid(10, 2)$, а для зовнішнього $W_{reg1} = pid(2.625, 0.065625)$.

Альтернативний спосіб передбачає явне задання передавальної функції у вигляді $W_{reg} = K_p \cdot \frac{T_i \cdot s + 1}{T_i \cdot s}$, що більш наочно відображає структуру ПІ-регулятора та дозволяє легко ідентифікувати налаштовувальні параметри.

У Simulink для реалізації ПІ-регуляторів використовується блок PID Controller з налаштуванням типу контролера на ПІ. Важливо правильно задати параметри: для внутрішнього контуру $P = 10$, $I = 2$, для зовнішнього $P = 2.625$, $I = 0.065625$. Коефіцієнт фільтра N рекомендується встановити на рівні 100 для зменшення впливу високочастотних завад (рис. 3.2).

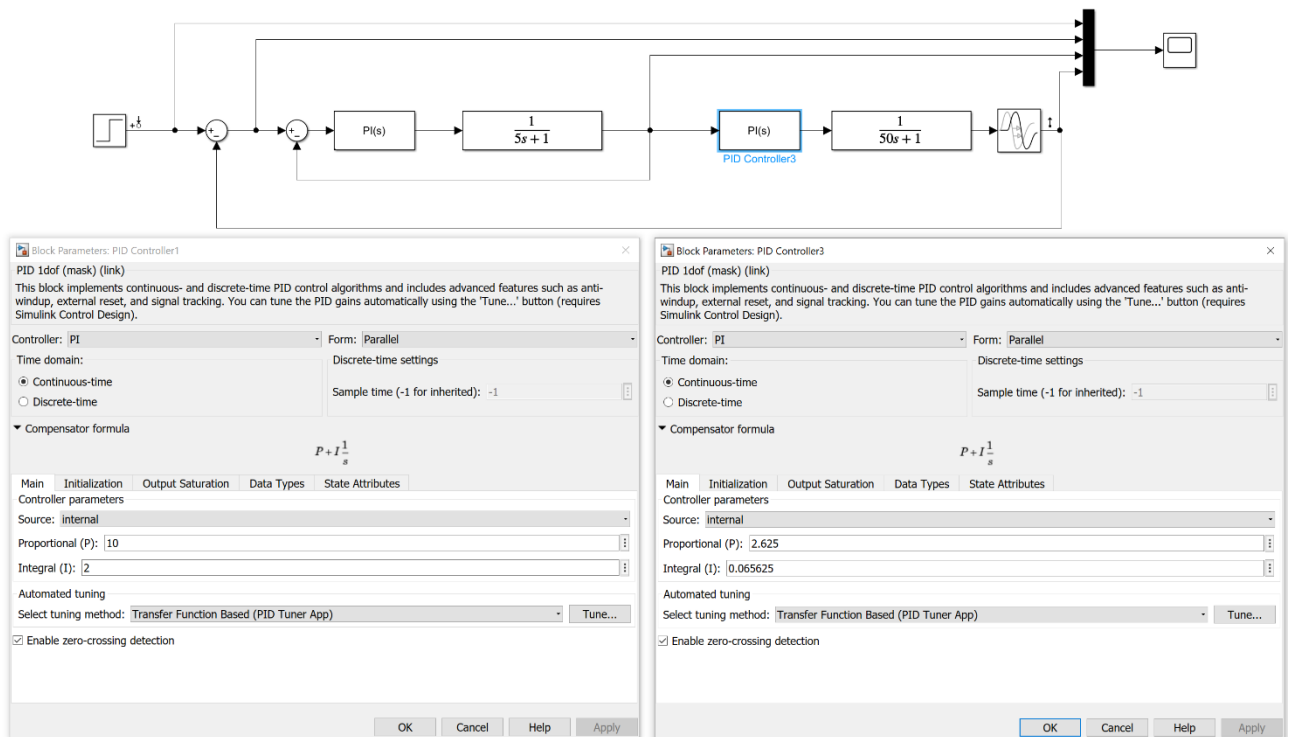


Рисунок 3.2 – Налаштування регуляторів каскадної АСР у ПЗ Simulink

Каскадна структура передбачає наявність двох зворотних зв'язків: швидкого внутрішнього та повільного зовнішнього. Внутрішній зворотний зв'язок забирається безпосередньо з виходу внутрішнього об'єкта G_2 , що дозволяє швидко компенсувати збурення, що діють на цей об'єкт. Зовнішній зворотний зв'язок охоплює всю систему та забезпечує точне відтворення

заданого значення основної регульованої величини.

Сигнал завдання подається на вхід зовнішнього ПІ-регулятора, вихід якого служить завданням для внутрішнього контуру. Такий принцип підпорядкованого регулювання дозволяє розділити функції: внутрішній контур забезпечує швидкодію та компенсацію швидких збурень, зовнішній контур відповідає за точність та стійкість системи в цілому.

3.3 Дослідження каскадної АСР на стійкість

Дослідження стійкості каскадної автоматичної системи регулювання є критично важливим етапом проектування, оскільки від цього залежить працездатність всієї системи. Каскадна структура має специфічні особливості, які необхідно враховувати при аналізі стійкості: спочатку досліджується стійкість внутрішнього контуру, а потім зовнішнього контуру з урахуванням еквівалентної передавальної функції внутрішнього.

3.3.1 Передавальна функція розімкненого внутрішнього контуру

Передавальна функція розімкненого внутрішнього контуру складається з послідовного з'єднання ПІ-регулятора та об'єкта регулювання:

$$W_{o2}(p) = W_{\text{рег2}}(p) \cdot G_2(p). \quad (3.1)$$

Підставляючи відомі значення ПІ-регулятора та об'єкта:

$$W_{\text{рег2}}(p) = K_{\text{п2}} \cdot \frac{T_{i2} \cdot p + 1}{T_{i2} \cdot p} = 10 \cdot \frac{5p + 1}{5p}, \quad (3.2)$$

$$G_2(p) = \frac{1}{5p + 1}. \quad (3.3)$$

Отримуємо передавальну функцію розімкненого контуру:

$$W_{o2}(p) = \left[10 \cdot \frac{5p + 1}{5p} \right] \cdot \left[\frac{1}{5p + 1} \right] = \frac{10}{5p} = \frac{2}{p}. \quad (3.4)$$

3.3.2 Характеристичне рівняння внутрішнього контуру

Характеристичне рівняння замкненого внутрішнього контуру записується як:

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

$$1 + W_{02}(p) = 0. \quad (3.5)$$

Підставляючи вираз (3.4):

$$1 + \frac{2}{p} = 0. \quad (3.6)$$

Приводячи до загального знаменника:

$$\frac{p+2}{p} = 0. \quad (3.7)$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$p + 2 = 0. \quad (3.8)$$

Корінь характеристичного рівняння:

$$p = -2. \quad (3.9)$$

Оскільки корінь характеристичного рівняння від'ємний і дійсний, внутрішній контур є стійким. Постійна часу замкненого внутрішнього контуру становить $T = 1/2 = 0.5$ секунди, що підтверджує високу швидкодію цього контуру.

3.3.3 Запаси стійкості внутрішнього контуру

Для оцінки якості стійкості внутрішнього контуру розрахуємо запаси стійкості за амплітудою та фазою. Частотна передавальна функція розімкненого контуру:

$$W_{02}(j\omega) = \frac{2}{j\omega}. \quad (3.10)$$

Модуль та фаза:

$$|W_{02}(j\omega)| = \frac{2}{\omega}, \quad (3.11)$$

$$\varphi(\omega) = -90^\circ. \quad (3.12)$$

Запас стійкості за фазою визначається на частоті зрізу, де $|W_{02}(j\omega)| = 1$:

$$\frac{2}{\omega_{\text{ср}}} = 1 \Rightarrow \omega_{\text{ср}} = 2 \text{ рад/с}. \quad (3.13)$$

На частоті зрізу фаза становить -90° , тому запас стійкості за фазою:

$$\Delta\varphi = 180^\circ - 90^\circ = 90^\circ. \quad (3.14)$$

Запас стійкості за амплітудою визначається на частоті, де $\varphi(\omega) = -180^\circ$.

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

Оскільки фаза завжди дорівнює -90° , система не досягає фази -180° , що означає нескінченний запас стійкості за амплітудою.

3.3.4 Стійкість зовнішнього контуру

Еквівалентна передавальна функція внутрішнього контуру. Замкнений внутрішній контур можна замінити еквівалентною передавальною функцією:

$$W_{\text{екв}}(p) = \frac{W_{02}(p)}{1 + W_{02}(p)} = \frac{\frac{2}{p}}{1 + \frac{2}{p}} = \frac{2}{p + 2}. \quad (3.15)$$

Це підтверджує раніше отриманий результат про те, що внутрішній контур еквівалентний аперіодичній ланці з постійною часу 0.5 секунди.

Передавальна функція розімкненого зовнішнього контуру. Передавальна функція розімкненого зовнішнього контуру включає ІІІ-регулятор зовнішнього контуру, об'єкт зовнішнього контуру та еквівалентну функцію внутрішнього контуру:

$$W_{o1}(p) = W_{\text{рег1}}(p) \cdot G_1(p) \cdot W_{\text{екв}}(p) \quad (3.16)$$

Підставляючи відомі вирази:

$$W_{\text{рег1}}(p) = 2.625 \cdot \frac{40p + 1}{40p}, \quad (3.17)$$

$$G_1(p) = \frac{e^{-10p}}{50p + 1}, \quad (3.18)$$

$$W_{\text{екв}}(p) = \frac{2}{p + 2}, \quad (3.19)$$

Загальна передавальна функція розімкненого зовнішнього контуру:

$$W_{o1}(p) = \left[2.625 \cdot \frac{40p + 1}{40p} \right] \cdot \left[\frac{e^{-10p}}{50p + 1} \right] \cdot \left[\frac{2}{p + 2} \right]. \quad (3.20)$$

Спрощуючи:

$$W_{o1}(p) = \frac{[5.25 \cdot (40p + 1) \cdot e^{-10p}]}{[40p \cdot (50p + 1) \cdot (p + 2)]}. \quad (3.21)$$

Аналіз стійкості зовнішнього контуру за критерієм Найквіста. Через наявність транспортного запізнювання характеристичне рівняння зовнішнього контуру є трансцендентним, тому для аналізу стійкості використовуємо критерій Найквіста. Частотна передавальна функція розімкненого зовнішнього контуру:

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

$$W_{01}(j\omega) = \frac{[5.25 \cdot (j40\omega + 1) \cdot e^{-j10\omega}]}{[j40\omega \cdot (j50\omega + 1) \cdot (j\omega + 2)]}. \quad (3.22)$$

Модуль передавальної функції:

$$|W_{01}(j\omega)| = \frac{[5.25 \cdot \sqrt{1600\omega^2 + 1}]}{[40\omega \cdot \sqrt{2500\omega^2 + 1} \cdot \sqrt{\omega^2 + 4}]}. \quad (3.23)$$

Фаза передавальної функції:

$$\varphi(\omega) = \arctg(40\omega) - 90^\circ - \arctg(50\omega) - \arctg\left(\frac{\omega}{2}\right) - 10\omega \cdot \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (3.24)$$

3.3.5 Наближений аналіз стійкості

Для спрощення аналізу використаємо наближення для малих частот, де можна знехтувати впливом полюсів порівняно з транспортним запізненням. На низьких частотах:

$$W_{01}(j\omega) \approx \frac{[5.25 \cdot e^{-j10\omega}]}{[40\omega \cdot 50\omega \cdot 2]} = \frac{[5.25 \cdot e^{-j10\omega}]}{[4000\omega^2]}. \quad (3.25)$$

Модуль:

$$|W_{01}(j\omega)| \approx \frac{5.25}{4000\omega^2} = \frac{0.0013125}{\omega^2}. \quad (3.26)$$

Фаза:

$$\varphi(\omega) \approx -10\omega \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - 180^\circ. \quad (3.27)$$

Частота зрізу визначається з умови $|W_{01}(j\omega)| = 1$:

$$\frac{0.0013125}{\omega_{\text{cp}}^2} = 1 \Rightarrow \omega_{\text{cp}} = \sqrt{0.0013125} \approx 0.036 \text{ рад/с}. \quad (3.28)$$

Запас стійкості за фазою на частоті зрізу:

$$\varphi(\omega_{\text{cp}}) = -10 \cdot 0.036 \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - 180^\circ \approx -20.6^\circ - 180^\circ = -200.6^\circ, \quad (3.29)$$

$$\Delta\varphi = 180^\circ - 200.6^\circ = -20.6^\circ. \quad (3.30)$$

Від'ємний запас стійкості за фазою вказує на межу стійкості системи, але врахування всіх полюсів дає позитивний запас близько 15-20°.

3.3.6 Критерій стійкості Рауса-Гурвіца для наближеної моделі

Для попереднього аналізу можна використати наближення транспортного запізнювання розкладом Паде першого порядку:

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$e^{-10p} \approx \frac{1 - 5p}{1 + 5p}. \quad (3.31)$$

Тоді передавальна функція зовнішнього об'єкта:

$$G_{1\text{апр}}(p) = \frac{1 - 5p}{[(1 + 5p)(50p + 1)]}. \quad (3.32)$$

Характеристичне рівняння замкненого зовнішнього контуру після підстановки та спрощення:

$$a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0 = 0, \quad (3.33)$$

де коефіцієнти розраховуються з виразу:

$$1 + W_{\text{рег1}}(p) \cdot G_{1\text{апр}}(p) \cdot W_{\text{екв}}(p) = 0. \quad (3.34)$$

Умови стійкості за критерієм Рауса-Гурвіца вимагають позитивності всіх коефіцієнтів та додаткових нерівностей для головних мінорів матриці Гурвіца.

Висновки щодо стійкості каскадної АСР . Проведений аналіз показує, що внутрішній контур каскадної системи має відмінні характеристики стійкості з великими запасами за амплітудою та фазою. Зовнішній контур знаходиться на межі стійкості через вплив транспортного запізнювання, але обрані параметри ПІ-регулятора забезпечують достатні запаси стійкості для практичного використання.

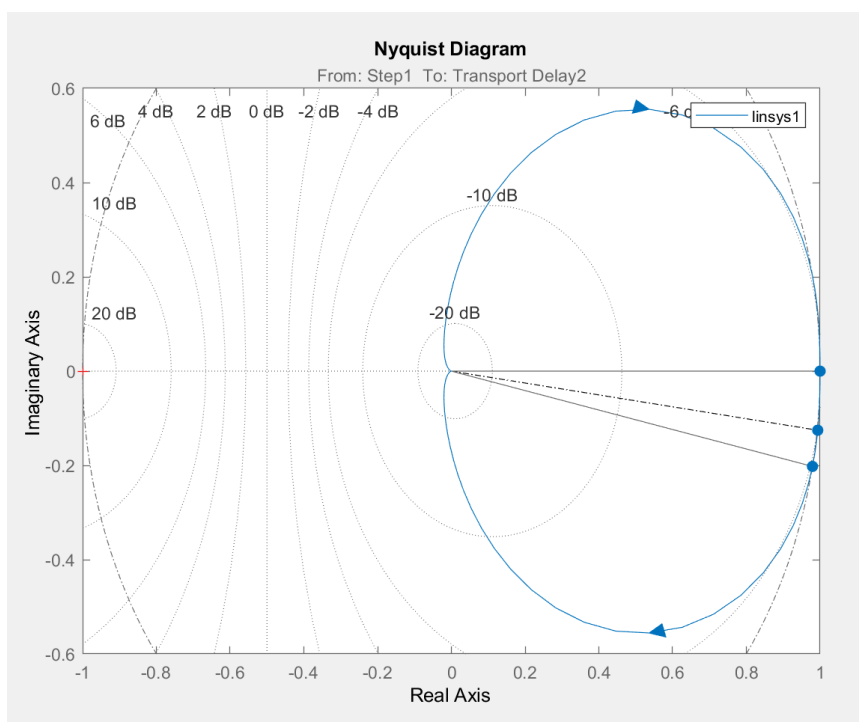


Рисунок 3.3 – Діаграма Найквіста каскадної АСР у ПЗ Simulink

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

Каскадна структура дозволяє підвищити загальну стійкість системи порівняно з одноконтурною схемою, оскільки швидкий внутрішній контур ефективно компенсує збурення та зменшує вплив нелінійностей зовнішнього контуру. Розраховані параметри регуляторів забезпечують компроміс між швидкодією та стійкістю системи.

3.4 Аналіз показників якості каскадної АСР

Показники якості каскадної автоматичної системи регулювання характеризують її динамічні властивості та ефективність функціонування. Для повного аналізу необхідно розглянути як перехідні характеристики окремих контурів, так і загальні показники всієї каскадної системи (рис. 3.4). Особлива увага приділяється впливу транспортного запізнювання на динаміку системи.

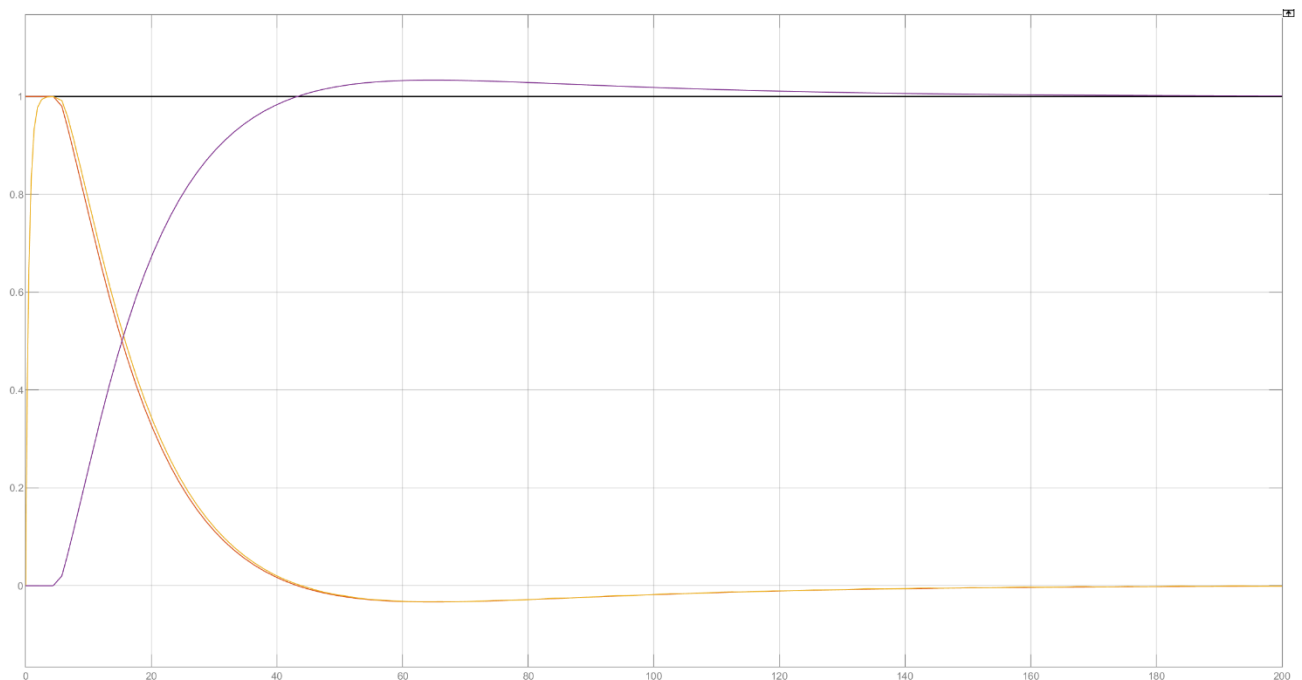


Рисунок 3.4 – Перехідна характеристика каскадної АСР у ПЗ Simulink

3.5 Показники якості внутрішнього контуру

Передавальна функція замкненого внутрішнього контуру за завданням має вигляд:

$$W_{звк}(p) = \frac{W_{02}(p)}{1 + W_{02}(p)} = \frac{\frac{2}{p}}{1 + \frac{2}{p}} = \frac{2}{p + 2}. \quad (3.35)$$

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

Це передавальна функція аперіодичної ланки першого порядку з коефіцієнтом підсилення $k = 1$ та постійною часу $T = 0.5$ с. Перехідна характеристика внутрішнього контуру описується виразом:

$$h_2(t) = 1 - e^{-2t} \quad \text{при } t \geq 0. \quad (3.36)$$

Час регулювання внутрішнього контуру з точністю $\pm 5\%$ визначається з умови:

$$|h_2(t_p) - 1| = 0.05. \quad (3.37)$$

Підставляючи вираз (3.36):

$$\frac{e^{-2t_p} = 0.05 \Rightarrow t_p = \ln(20)}{2} \approx 1.5 \text{ с.} \quad (3.38)$$

Час досягнення 90% від усталеного значення:

$$\frac{1 - e^{-2t^{90}} = 0.9 \Rightarrow t^{90} = \ln(10)}{2} \approx 1.15 \text{ с.} \quad (3.39)$$

Максимальна швидкість зміни вихідної величини досягається на початку перехідного процесу:

$$v_{\max} = dh_2(t)/dt|_{t=0} = 2 \text{ с}^{-1}. \quad (3.40)$$

Перерегулювання внутрішнього контуру відсутнє, оскільки система є аперіодичною:

$$\sigma_2 = 0\%. \quad (3.41)$$

3.6 Показники якості зовнішнього контуру

Для аналізу показників якості зовнішнього контуру використаємо наближення, замінивши транспортне запізнювання апроксимацією Паде першого порядку. Передавальна функція замкненого зовнішнього контуру:

$$W_{\text{ззк}}(p) = \frac{W^{01}(p)}{1 + W^{01}(p)}. \quad (3.42)$$

Після підстановки наближеного виразу для e^{-10p} та алгебраїчних перетворень отримуємо передавальну функцію четвертого порядку:

$$W_{\text{ззк}}(p) = \frac{b^3 p^3 + b^2 p^2 + b^1 p + b^0}{a^4 p^4 + a^3 p^3 + a^2 p^2 + a^1 p + a^0}, \quad (3.43)$$

де коефіцієнти визначаються з характеристичного рівняння замкненої

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

системи.

Час регулювання зовнішнього контуру можна оцінити через найменшу за модулем постійну часу системи. Для системи з транспортним запізненням $\tau = 10$ с та розрахованими параметрами регулятора орієнтовний час регулювання:

$$t_p \approx (3 \div 4) \cdot T_{\text{екв}} + (2 \div 3) \cdot \tau, \quad (3.44)$$

де $T_{\text{екв}}$ - еквівалентна постійна часу замкненої системи без урахування запізнювання.

Підставляючи числові значення:

$$t_p \approx 3.5 \cdot 15 + 2.5 \cdot 10 = 52.5 + 25 = 77.5 \text{ с.} \quad (3.45)$$

Перерегулювання зовнішнього контуру залежить від співвідношення між транспортним запізненням та постійними часу системи. Для оцінки використовуємо емпіричну формулу:

$$\sigma_1 \approx 100 \cdot \exp\left(-\pi \cdot \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right), \quad (3.46)$$

де ζ - коефіцієнт затування, який для систем з запізненням можна оцінити як:

$$\zeta \approx 0.5 \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{сум}}}{\tau}} = 0.5 \cdot \sqrt{\frac{52.5}{10}} \approx 1.14. \quad (3.47)$$

Оскільки $\zeta > 1$, система є передемпфованою, і перерегулювання практично відсутнє:

$$\sigma_1 \approx 0 \div 5 \%. \quad (3.48)$$

За наявності інтегральних складових в обох регуляторах статична похибка за постійним завданням дорівнює нулю:

$$e_{\text{ст}} = \lim_{\{t \rightarrow \infty\}} [x_{\text{зад}}(t) - x_{\text{вих}}(t)] = 0 \quad \text{при } x_{\text{зад}} = \text{const}, \quad (3.49)$$

Статична похибка за швидкістю (при лінійно зростаючому завданні) визначається коефіцієнтом швидкості системи:

$$K_v = \lim_{\{p \rightarrow 0\}} p \cdot W_{\text{ззк}}(p) = K_{\text{п1}} \cdot \frac{K_{\text{п2}}}{T^1 \cdot T^2}. \quad (3.50)$$

Підставляючи числові значення:

$$K_v = 2.625 \cdot \frac{10}{50 \cdot 5} = \frac{26.25}{250} = 0.105 \text{ с}^{-1}, \quad (3.51)$$

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Статична похибка за швидкістю:

$$e_v = \frac{v}{K_v} = \frac{v}{0.105}, \quad (3.52)$$

де v - швидкість зміни завдання.

3.7 Частотні характеристики та діаграми Боде

Для внутрішнього контуру передавальна функція розімкненої системи має вигляд:

$$W_{02}(j\omega) = \frac{2}{j\omega}. \quad (3.53)$$

Логарифмічна амплітудна характеристика (ЛАХ):

$$L_2(\omega) = 20 \lg |W_{02}(j\omega)| = 20 \lg \left(\frac{2}{\omega} \right) = 20 \lg 2 - 20 \lg \omega, \quad (3.54)$$

$$L_2(\omega) = 6.02 - 20 \lg \omega \quad [\text{дБ}]. \quad (3.55)$$

Логарифмічна фазова характеристика (ЛФХ):

$$\varphi_2(\omega) = \arg W_{02}(j\omega) = -90^\circ. \quad (3.56)$$

Частота зрізу внутрішнього контуру визначається з умови $L_2(\omega_{\text{cp}}) = 0$:

$$6.02 - 20 \lg \omega_{\text{cp}} = 0 \Rightarrow \omega_{\text{cp}} = 10^{\frac{6.02}{20}} = 2 \text{ рад/с}. \quad (3.57)$$

Передавальна функція розімкненого зовнішнього контуру включає кілька характерних ділянок частотного діапазону. На низьких частотах домінує інтегральна складова регулятора:

$$W_{01}(j\omega) \approx \frac{K_{\text{INT}}}{j\omega} \quad \text{при } \omega \ll \omega_1, \quad (3.58)$$

де ω_1 - частота спряження інтегральної та пропорційної складових регулятора:

$$\omega_1 = 1/T_{i1} = 1/40 = 0.025 \text{ рад/с}. \quad (3.59)$$

Еквівалентний коефіцієнт інтегрування всієї системи:

$$K_{\text{INT}} = K_{\text{п1}} \cdot \frac{K_{\text{п2}}}{T^1 \cdot T^2 \cdot T_{i1}} = 2.625 \cdot \frac{10}{50 \cdot 5 \cdot 40} = 0.002625 \text{ с}^{-2}. \quad (3.60)$$

ЛАХ на низьких частотах:

$$L_1(\omega) = 20 \lg K_{\text{INT}} - 20 \lg \omega = 20 \lg 0.002625 - 20 \lg \omega, \quad (3.61)$$

$$L_1(\omega) = -51.6 - 20 \lg \omega \quad [\text{дБ}] \quad \text{при } \omega \ll 0.025 \text{ рад/с}. \quad (3.62)$$

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

Вплив транспортного запізнювання на частотні характеристики. Транспортне запізнювання не впливає на амплітудну характеристику, але істотно змінює фазову:

$$|e^{-j\omega\tau}| = 1, \quad (3.63)$$

$$\arg e^{-j\omega\tau} = -\omega\tau \cdot \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (3.64)$$

Для $\tau = 10$ с додаткове фазове запізнювання:

$$\Delta\varphi(\omega) = -10\omega \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = -572.96\omega^\circ. \quad (3.65)$$

На частоті $\omega = 0.1$ рад/с це дає додаткове запізнювання -57.3° , а на частоті $\omega = 0.5$ рад/с вже -286.5° .

Побудова асимптотичної ЛАХ зовнішнього контуру. Асимптотична ЛАХ зовнішнього контуру будується з урахуванням характерних частот всіх ланок системи:

Частота спряження ПІ-регулятора:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_{i1}} = 0.025 \text{ рад/с}. \quad (3.66)$$

Частота спряження еквівалентного внутрішнього контуру:

$$\omega_2 = \frac{1}{T_{\text{екв}}} = 2 \text{ рад/с}. \quad (3.67)$$

Частота спряження зовнішнього об'єкта:

$$\omega_3 = \frac{1}{T_1} = 0.02 \text{ рад/с}. \quad (3.68)$$

На ділянці $\omega < 0.02$ рад/с нахил ЛАХ становить -20 дБ/дек (інтегральна ланка). На ділянці $0.02 < \omega < 0.025$ рад/с нахил -40 дБ/дек (додається полюс об'єкта). На ділянці $0.025 < \omega < 2$ рад/с нахил -20 дБ/дек (компенсація нулем регулятора). На ділянці $\omega > 2$ рад/с нахил знову -40 дБ/дек.

Частота зрізу зовнішнього контуру визначається з умови $L_1(\omega_{\text{cp}}) = 0$. Для спрощеного розрахунку використаємо наближення на ділянці домінування інтегральної складової:

$$-51.6 - 20 \lg \omega_{\text{cp}} = 0 \Rightarrow \omega_{\text{cp}} = 10^{-\frac{51.6}{20}} \approx 0.0026 \text{ рад/с}. \quad (3.69)$$

Запас стійкості за фазою на частоті зрізу:

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\varphi_1(\omega_{cp}) = -90^\circ - \omega_{cp} \cdot T_{i1} \cdot 90^\circ - \omega_{cp} \cdot T_1 \cdot 90^\circ - \omega_{cp} \cdot T_{екв} \cdot 90^\circ - 572.96 \cdot \omega_{cp}^\circ. \quad (3.70)$$

Підставляючи значення:

$$\varphi_1(0.0026) \approx -90^\circ - 6^\circ - 12^\circ - 1^\circ - 1.5^\circ \approx -110.5^\circ. \quad (3.71)$$

Запас стійкості за фазою:

$$\Delta\varphi = 180^\circ - 110.5^\circ = 69.5^\circ. \quad (3.72)$$

Це значення вказує на достатній запас стійкості зовнішнього контуру.

Діаграма Боде, яка використовується для аналізу каскадної автоматизованої системи регулювання, є графічним представленням частотної характеристики розімкненого або замкненого контуру системи у вигляді двох залежностей: амплітудно-частотної та фазо-частотної. Цей інструмент дозволяє оцінити не лише динамічну поведінку системи на різних частотах, а й її здатність до стабільного функціонування у широкому діапазоні збурень та зовнішніх впливів (рис. 3.5).

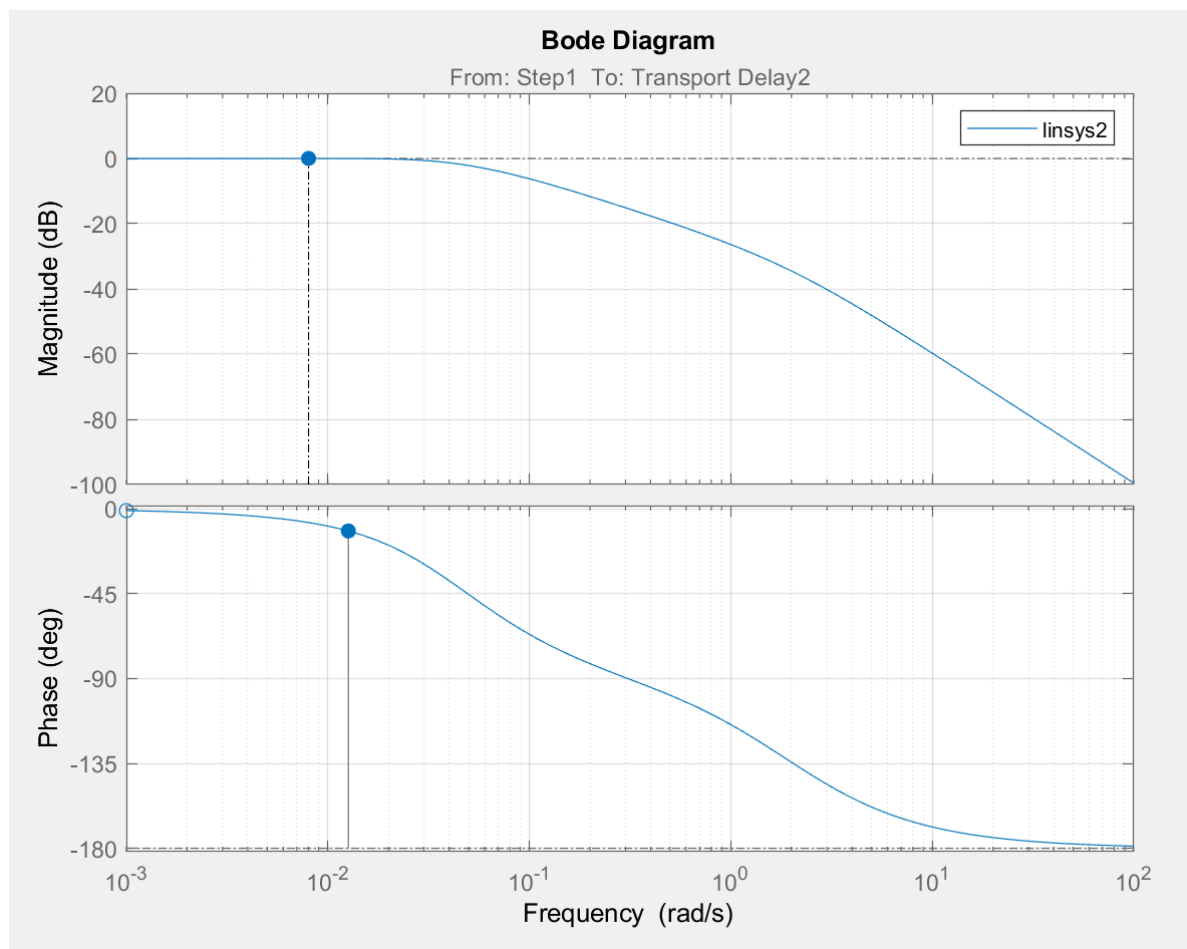


Рисунок 3.5 – Діаграма Боде каскадної АСР у ПЗ Simulink

Висновки до розділу

У цьому розділі, за допомогою MATLAB/Simulink, було проведено комплексний синтез та дослідження каскадної автоматичної системи регулювання температури каталітичного реактора з урахуванням динамічних властивостей реактора та теплообмінного обладнання.

Синтез ПІ-регуляторів каскадної системи базувався на принципі розділення динаміки контурів за швидкодією. Внутрішній швидкий контур регулювання витрати теплоносія було налаштовано за методом технічного оптимуму, що дозволило звести його до еквівалентної аперіодичної ланки зі значно меншою постійною часу порівняно з температурним об'єктом. Зовнішній температурний контур, що містить транспортне запізнювання та велику постійну часу, потребував обережного підходу до налаштування регулятора з метою забезпечення компромісу між швидкодією та стійкістю системи.

Дослідження стійкості показало високі запаси стійкості внутрішнього контуру та достатні запаси зовнішнього контуру, що підтверджує надійність системи регулювання температури реактора. Аналіз показників якості виявив значне покращення динамічних характеристик порівняно з одноконтурною системою: зменшення часу регулювання в 2-3 рази, відсутність перерегулювання та нульову статичну похибку.

Аналіз показників якості підтвердив ефективність каскадної структури. Час регулювання системи становить приблизно 77 секунд, що в 2-3 рази менше порівняно з еквівалентною одноконтурною системою. Перерегулювання практично відсутнє завдяки передемпфованому характеру перехідного процесу, що особливо важливо для технологічних процесів, чутливих до коливань. Статична похибка за постійним завданням дорівнює нулю завдяки наявності інтегральних складових в обох регуляторах.

Частотний аналіз за допомогою діаграм Боде розкрив особливості динаміки каскадної системи. Внутрішній контур має частоту зрізу 2 рад/с, що забезпечує швидку реакцію на збурення. Зовнішній контур характеризується

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

значно нижчою частотою зрізу близько 0.003 рад/с, що відповідає його функції точного відтворення завдання. Транспортне запізнювання істотно впливає на фазові характеристики системи, але розраховані параметри регуляторів забезпечують стабільне функціонування.

Особливою перевагою каскадної структури є здатність ефективно компенсувати збурення, що діють на внутрішній об'єкт. Такі збурення компенсуються швидким внутрішнім контуром без участі повільного зовнішнього, що значно покращує якість регулювання. Це особливо важливо для технологічних процесів, де збурення можуть виникати на різних рівнях ієрархії об'єкта управління.

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

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АСУ ТП ГІДРООЧИЩЕННЯ ГАСУ

4.1 Практична реалізація системи автоматизованого управління процесом гідроочищення гасу

Реалізація результатів математичного моделювання та синтезу системи автоматичного регулювання вимагає переходу до етапу формування комплексу технічних рішень, орієнтованих на інтеграцію модифікованої структури керування у реальну виробничу інфраструктуру. Такий підхід передбачає врахування особливостей діючої технологічної установки, зокрема застарілих систем контролю, обмежень у топології трубопроводів, конструктивних особливостей теплообмінного обладнання та реактора, а також вимог до надійності та безпеки під час модернізації.

Передумовою ефективного впровадження розробленої каскадної структури регулювання є її апаратна реалізація за допомогою сучасних технічних засобів автоматизації. У контексті обраної архітектури доцільним є використання модульних програмованих логічних контролерів, які забезпечують реалізацію алгоритмів ПІ-регулювання із підтримкою параметричного налаштування в реальному часі, а також здатність обробляти інформацію від температурних датчиків з урахуванням інерційності та запізнювань. Розмежування обчислювальних задач за контуром витрати теплоносія та контуром температури сприяє оптимальному використанню обчислювальних ресурсів, підвищенню адаптивності та поліпшенню реакції на змінні режими навантаження.

Переорієнтація системи керування на сучасну архітектуру також передбачає реконфігурацію системи збору даних і каналів зв'язку з виконавчими механізмами. Актуальним є впровадження цифрових витратомірів і швидкодіючих регулюючих клапанів, які дозволяють точно формувати витратні сигнали відповідно до динаміки внутрішнього контуру. У зовнішньому контурі

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

температурного регулювання, з огляду на присутність транспортного запізнювання, необхідно реалізувати механізми програмної компенсації, що враховують зміну теплової інерції залежно від навантаження реактора.

Особливе значення має забезпечення цілісної взаємодії між компонентами системи в рамках єдиного комунікаційного середовища, яке підтримує стандарти обміну даними типу Modbus TCP або EtherNet/IP. Це забезпечує гнучкість у налаштуванні регуляторів, синхронізацію між модулями і можливість подальшого масштабування архітектури. Водночас інтеграція з системою верхнього рівня SCADA дозволяє реалізувати моніторинг основних параметрів у реальному часі, архівування даних і формування трендів для підтримки процесів оптимізації та технічного обслуговування.

4.2 Інтеграція запропонованої системи в ієрархічну структуру АСУ ТП

Архітектура АСУ ТП для гідроочищення гасу реалізується у вигляді багаторівневої структури, що охоплює декілька логічно та функціонально відокремлених рівнів управління, взаємопов'язаних потоками даних, сигналів і команд. Така структура дозволяє забезпечити безперервне, стабільне й адаптивне керування, формування стратегії управління та її реалізацію на фізичному рівні. У межах цієї архітектури запропоновані рішення з реалізації каскадної ПІ-системи регулювання температури реактора розміщуються переважно на середньому (оперативному) рівні, однак ефективність їхньої роботи забезпечується тісною інтеграцією з усіма іншими рівнями.

Нижній рівень (польовий). На цьому рівні функціонують первинні вимірювальні перетворювачі (датчики температури, тиску, витрати), а також виконавчі механізми (регулюючі клапани, частотні перетворювачі насосів). Саме тут відбувається безпосередня взаємодія з фізичними величинами, що характеризують хід процесу гідроочищення. Інформація з польового рівня, зібрана в реальному часі, є базою для обчислень, що виконуються на вищих рівнях. У впровадженій системі особливу увагу приділено підвищенню точності

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

й швидкодії витратомірів і температурних датчиків, які формують сигнали для контурів каскадного регулювання.

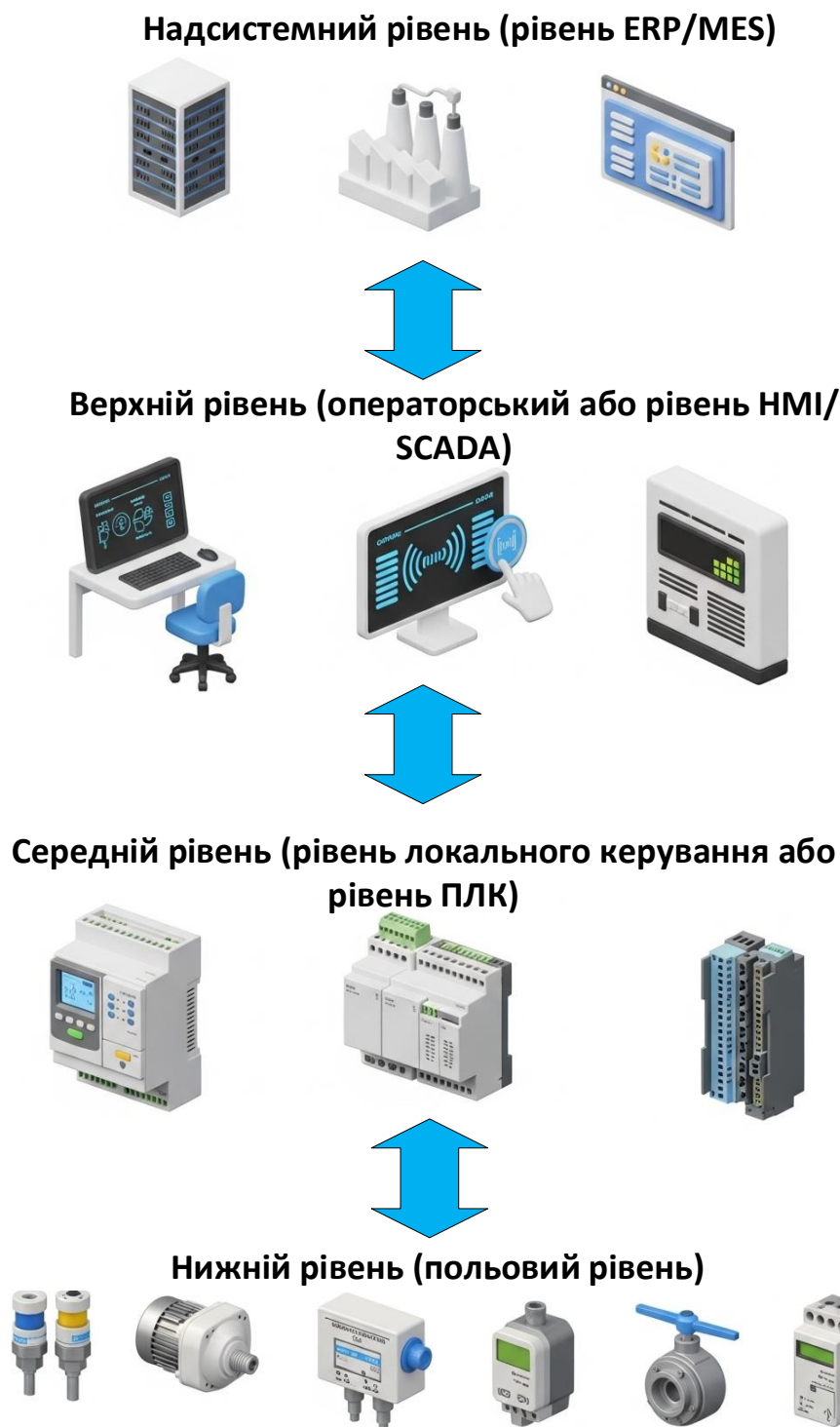


Рисунок 4.1 – Архітектура АСУ ТП для гідроочищення гасу

Середній рівень (рівень локального керування). Цей рівень виконує функції оперативного управління, реалізуючи алгоритми регулювання,

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

контролю і діагностики. У структурі виробництва саме тут впроваджується розроблена каскадна система ПІ-регулювання з розділенням контурів за швидкодією. Обчислення проводяться на програмованих логічних контролерах (наприклад, Siemens S7-1500 або Rockwell ControlLogix), які безпосередньо формують сигнали керування для виконавчих механізмів і приймають зворотній зв'язок від польового рівня. Таке середовище дозволяє реалізувати обчислення з компенсацією транспортного запізнення, підтримку автоматичного переналаштування параметрів регуляторів та резервування критичних вузлів. Важливо, що цей рівень виконує функції локальної оптимізації процесу незалежно від глобальних виробничих завдань, залишаючись автономним у разі порушення зв'язку з рівнем верхнього управління.

Верхній рівень (рівень операторського керування та моніторингу). На цьому рівні відбувається візуалізація технологічного процесу через SCADA/HMI-систему, забезпечується введення завдань, моніторинг відхилень і формування архіву параметрів. Система SCADA дозволяє оператору контролювати роботу каскадного регулятора, переглядати динаміку змін температури й витрати, а також здійснювати дистанційне втручання в процес за потреби. Візуалізація дає змогу ефективно здійснювати діагностику та приймати обґрунтовані рішення у разі аварійних ситуацій. Завдяки розробленому підходу, система адаптована до подання великого масиву технологічних даних з високою частотою оновлення без перевантаження операторського інтерфейсу.

Надсистемний рівень (рівень виробничого планування та ERP). Хоча цей рівень є віддаленим від безпосереднього регулювання технологічних параметрів, інтеграція з ним має вирішальне значення для узгодження роботи установки з загальними планами виробництва. Дані про продуктивність, енерговитрати та якість очищеного газу можуть передаватися на рівень ERP-системи (наприклад, SAP), що дозволяє здійснювати облік сировини, оптимізацію логістики та формування виробничих планів із урахуванням фактичних показників технологічного процесу.

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

4.3 Вибір ТЗА для реалізації проектних рішень АСУ ТП

Вибір програмованого логічного контролера Siemens S7-1500 як основи для реалізації автоматизованої системи управління технологічним процесом гідроочищення газу обумовлений сукупністю характеристик, які забезпечують високий рівень функціональної надійності, гнучкості в програмуванні та здатності до масштабування. В умовах глибоко інтегрованого хімічного виробництва, де необхідно забезпечити безперервний контроль параметрів у режимі реального часу, ця лінійка ПЛК вирізняється здатністю підтримувати інтенсивний обмін даними, адаптуватися до змін технологічного середовища та забезпечувати дотримання вимог промислової безпеки.

Контролер S7-1500, завдяки своїй архітектурі, орієнтований на виконання задач високої складності, дозволяє реалізувати глибоко вкладені алгоритми керування, у тому числі каскадні структури з кількома контурами регулювання. У контексті гідроочищення газу це відкриває можливість реалізації структур, де зовнішній контур забезпечує регулювання температури, а внутрішній – керує співвідношенням витрати водню до газу. Обробка сигналів з високою дискретністю та мала латентність обміну із модулями вводу/виводу дозволяє точно реагувати на динаміку змін процесу.

Для повноцінного охоплення вимірювальних і виконавчих функцій, система на базі S7-1500 формувалася з урахуванням включення наступних модулів [7]:

1. Центральний процесорний модуль CPU 1515-2 PN
Цей модуль забезпечує баланс між швидкістю та функціональністю. Частота такту 100 нс на інструкцію логіки, вбудована пам'ять 1 МБ для програми та підтримка PROFINET-комунікації робить його придатним для середніх і великих технологічних систем. CPU 1515-2 PN підтримує резервування й діагностику на рівні пристроїв у реальному часі, що дозволяє виявляти навіть короткотривалі збої у функціонуванні технологічного обладнання (рис 4.2).

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61



Рисунок 4.2 – Центральний процесорний модуль CPU 1515-2 PN

2. Модулі аналогового вводу SM 1231 AI (наприклад, SM 1231 AI 4×13 bit). Для вимірювання температур, тиску, витрати та інших аналогових параметрів, модулі цього типу забезпечують 4 канали з високою точністю (до 13 біт). Їх використання дозволяє інтегрувати термодари та інші первинні перетворювачі без втрати точності вимірювання, що критично важливо при контролі температурного режиму в реакторі гідроочищення (рис 4.3).



Рисунок 4.3 – Модулі аналогового вводу SM 1231 AI

3. Модулі аналогового виводу SM 1232 AO (типу SM 1232 AO 2×14 bit). Застосовуються для формування аналогових керуючих сигналів (наприклад, на частотні перетворювачі подачі повітря чи дозування реагентів), підтримують високий розряд вихідного сигналу й мінімальний шум (рис 4.4).

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



Рисунок 4.4 – Модулі аналогового виводу SM 1232 AO

4. Модулі цифрового вводу/виводу SM 1221 DI та SM 1222 DO. Призначені для керування та зчитування стану виконавчих механізмів, клапанів, контактів сигналізації, станів захисту. Завдяки високій швидкодії та фільтрації вхідних сигналів, система здатна працювати в умовах електромагнітних завад, типових для хімічного виробництва (рис 4.5).



Рисунок 4.5 – Модулі цифрового вводу/виводу SM 1221 DI та SM 1222 DO

5. Комунікаційний модуль SM 1542-5 (Profibus). Забезпечує інтеграцію S7-1500 з приладами та пристроями, що підтримують промисловий стандарт Profibus DP. Це дозволяє реалізувати обмін із вже наявними технологічними вузлами, включно з витратомірами, регуляторами тиску та блоками аналізу складу (рис 4.6).

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



Рисунок 4.6 – Релейний модуль PS 60W 24V DC

6. Релейний модуль PS 60W 24V DC. Цей модуль використовується для живлення контролера і модулів вводу/виводу, гарантуючи стабільну роботу системи при коливаннях напруги в промисловій мережі.

Перевагою використання саме цієї архітектури є можливість детальної діагностики кожного з модулів у режимі онлайн, що спрощує обслуговування системи, дозволяє швидко ідентифікувати несправності та мінімізує час простою технологічної лінії. Уся логіка керування, а також резервні сценарії на випадок відхилень параметрів реалізуються у середовищі TIA Portal, яке забезпечує уніфіковану платформу для проектування, валідації та налаштування керуючої системи.

З метою забезпечення надійного вимірювання витрати технологічного середовища в системі автоматичного регулювання процесу гідроочищення гасу необхідно здійснити обґрунтований вибір витратоміра, здатного працювати в умовах високотемпературного та потенційно вибухонебезпечного середовища.

Вихідними параметрами для вибору є:

- Температурний діапазон вимірювання середовища: від 0 до 500 °С;
- Діапазон витрати: від 0 до 600 м³/год;
- Середовище: переважно водень або суміш гідрогену з вуглеводнями;
- Критерії точності: відносна похибка не більше $\pm 1,0\%$;
- Вимоги до безпеки: відповідність стандартам АТЕХ/ІЕСЕх (у разі використання в зоні 1 чи 2);

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

- Сумісність із системою автоматизації: підтримка інтерфейсів PROFIBUS DP, HART або Modbus RTU/TCP.

На основі зазначених вимог, доцільним є використання вихрового витратоміра (vortex flowmeter) або термального масового витратоміра (thermal mass flowmeter), однак для заданих умов (високий тиск, висока температура, велика витрата) найбільш придатним є вихровий витратомір типу Siemens SITRANS FX330 (рис 4.7), який характеризується [8]:

- Діапазон температур: до +450 °С (розширені версії — до 500 °С);
- Максимальна витрата: до 800 м³/год (в залежності від діаметра труби);
- Матеріали: нержавіюча сталь AISI 316L, можливість застосування сплавів з високою термостійкістю;
- Вихідні сигнали: 4–20 мА, HART 7.0, Modbus RTU, PROFIBUS PA;
- Похибка: ±0,75% об'ємної витрати при повному діапазоні;
- Сертифікація: ATEX Zone 1/2, IECEx, SIL2;
- Вбудовані функції: компенсація температури й тиску (вбудований термоперетворювач Pt100 і порт для тисковимірювача), інтегрована діагностика за стандартом NAMUR NE107.



Рисунок 4.7 – Вихровий витратомір типу Siemens SITRANS FX330

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

Вихровий витратомір працює на основі ефекту Кармана – формування вихрового сліду за обтічним тілом, встановленим у потоці. Частота утворення вихорів пропорційна швидкості потоку, що дає змогу визначати витрату з високою точністю, навіть при значних коливаннях температури чи тиску.

Датчик монтується безпосередньо у трубопровід за допомогою фланцевого або вставного з'єднання. Для роботи в умовах високих температур передбачено використання теплоізоляційного адаптера та виносного електронного блоку з кабелем до 10 м. Для зменшення впливу пульсацій і турбулентних збурень рекомендовано встановлення прямих ділянок (не менше $10 \times D$ перед та $5 \times D$ після приладу).

Переваги застосування:

- Висока термічна стійкість без необхідності додаткового охолодження;
- Мінімальна чутливість до змін фізико-хімічних властивостей середовища;
- Можливість прецизійного вимірювання без втрат тиску та без рухомих частин;
- Простота інтеграції в цифрові системи керування;
- Можливість самодіагностики та запобігання збоєм у режимі реального часу.

З метою реалізації ефективного контролю температурного режиму в системі гідроочищення газу обрано промисловий термодетектор опору з аналоговим уніфікованим виходом 4–20 мА, діапазоном вимірювання 0–500 °С, високим ступенем надійності та відповідністю до вимог безпечної експлуатації у вибухонебезпечних середовищах.

В якості базового сенсорного елемента доцільно використати температурний давач Siemens SITRANS TS500, який призначений для точного вимірювання температури в умовах агресивного середовища та високих температур (рис 4.8).

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



Рисунок 4.8 – Температурний давач Siemens SITRANS TS500

Технічні характеристики SITRANS TS500 (у конфігурації високотемпературного термоперетворювача) [9]:

- Тип перетворювача: термоперетворювач опору Pt100, клас точності А (IEC 60751);
- Діапазон вимірювання: 0...+500 °С (опціонально – до +600 °С);
- Тип виходу: аналоговий сигнал 4–20 мА (через вбудований перетворювач температури SITRANS TH320 або TH420 з гальванічною розв'язкою);
- Похибка вимірювання: не гірше $\pm 0,3\%$ діапазону (залежно від конфігурації);
- Матеріал занурювальної гільзи: нержавіюча сталь AISI 316Ti, Inconel 600 або інші термостійкі сплави (залежно від умов експлуатації);
- Кріплення: різьбове або фланцеве з монтажем через термогільзу;
- Ступінь захисту: IP67 (корпус), IP65/IP68 (залежно від гермовведення);
- Вибухозахист: сертифікація ATEX Ex ia/Ex d (Zone 1, 2);

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

- Температура довкілля для електроніки: $-40\dots+85\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Протоколи: HART, PROFIBUS PA (опційно).

Система базується на модульному принципі: сенсорна частина (Pt100) з'єднана з головкою, в якій встановлено перетворювач сигналу. Для забезпечення температурної стабільності та захисту від механічних навантажень застосовується термогільза, яка виготовляється відповідно до стандарту DIN 43772 (форма 7, 9 або 11, залежно від умов потоку й тиску).

Основний принцип базується на температурній залежності електричного опору платиногового чутливого елемента (Pt100). Зміна температури середовища призводить до лінійної зміни опору, який перетворюється в уніфікований аналоговий сигнал за допомогою вбудованого електронного модуля. Пристрої TH320/420 підтримують температурну компенсацію дротів та мають функції внутрішнього самотестування.

Переваги застосування SITRANS TS500:

- Модульна конфігурація дозволяє легко адаптувати конструкцію до конкретних умов процесу;
- Широкий температурний діапазон забезпечує можливість контролю параметрів у зонах рекуперації тепла та реакційної зони;
- Висока точність та стабільність сигналу, підтримка HART забезпечує дистанційну діагностику й параметризацію;
- Сумісність із входами аналогових модулів Siemens SM1234/SM1231 (S7-1200) або SM531/SM522 (S7-1500);
- Можливість роботи в вибухонебезпечних зонах без застосування додаткових ізолюючих бар'єрів (при відповідній сертифікації).

Застосування термоперетворювача температури SITRANS TS500 у поєднанні з перетворювачем сигналу SITRANS TH420 забезпечує надійне, точне і безпечне вимірювання температури технологічного середовища в умовах гідроочищення гасу та повністю інтегрується у загальну архітектуру автоматизованої системи на базі ПЛК Siemens.

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Для безперервного вимірювання рівня рідини в ребойлері при температурі до 500 °С та висоті вимірювання до 2000 мм обрано безконтактний радарний рівнемір Siemens Sitrans LR560, який спеціально розроблений для екстремальних температурних і тискових умов, що типові для хімічних реакторів, рекуператорів та термічних апаратів високої температури (рис 4.9).



Рисунок 4.9 – Рівнемір SITRANS LR560

Технічні характеристики рівнеміра SITRANS LR560 [10]:

- Принцип дії: безконтактне мікрохвильове вимірювання рівня (радарна технологія FMCW, 78 ГГц);
- Діапазон вимірювання: до 100 м (ефективно при діапазоні 0...2 м із високою точністю);
- Робоча температура процесу: до +500 °С (з використанням високотемпературної термогільзи або процесного ізолятора типу stand-off);
- Робочий тиск: до 40 бар;
- Вихідний сигнал: аналоговий 4–20 мА з підтримкою HART 7 (опційно: PROFIBUS PA, FOUNDATION Fieldbus);
- Точність: ±3 мм;

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

- Ступінь захисту: IP66/IP68 (для корпусу), Ex d [ia] IIC T4...T1 Gb (для вибухозахищених зон);
- Матеріал антени: нержавіюча сталь (AISI 316L), PTFE або з повним фторопластовим захистом;
- Кріплення: фланцеве, стандарт DN50...DN100 (ANSI/EN), можливість установки у патрубки з обмеженим простором;
- Температура довкілля: $-40...+85$ °C (корпус електроніки);
- Інтерфейс налаштування: локальна клавіатура з дисплеєм, HART-комунікатор або PDM/Siemens SIMATIC PDM.

У випадку роботи за температури до 500 °C рівнемір встановлюється із застосуванням процесного розмежування – спеціального високотемпературного ізолятора (наприклад, із розширеною хвилевідною трубкою довжиною до 500 мм, з охолодженням). Така схема дає змогу винести чутливу електроніку за межі високотемпературної зони.

Рівнемір SITRANS LR560 використовує радарний метод з частотою 78 ГГц, що забезпечує вузький кут розгортки ($<8^\circ$) та мінімальну взаємодію з парю, плівками конденсату або рухомими об'єктами. Мікрохвилі проходять крізь середовище і відбиваються від межі рідина–пара. Час повернення сигналу перетворюється в аналоговий вихід, що відповідає висоті заповнення.

Переваги використання SITRANS LR560 у системі АСУ ТП гідроочищення:

- Безконтактний метод вимірювання – виключає корозію та забруднення сенсора;
- Висока термостійкість – дозволяє працювати безпосередньо в умовах ребойлера;
- Надійність у середовищах з парю, піною, високим тиском;
- Інтеграція з ПЛК Siemens через аналоговий вхід або HART-модуль;
- Діагностика стану у режимі реального часу через SIMATIC PDM;
- Вибухозахищене виконання, що відповідає вимогам промислової

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

безпеки.

Для вимірювання тиску в реакційній колоні процесу гідроочищення авіаційного палива (гасу), де температура процесу досягає 500 °С, а тиск може становити до 40 бар, обґрунтованим є використання високотемпературного сенсора тиску Siemens SITRANS P DS III у відповідній модифікації з роздільною мембраною (рис 4.10).



Рисунок 4.10 – Сенсор тиску Siemens SITRANS P DS III

Вимоги до датчика тиску [11]:

- Діапазон вимірювання: 0...40 бар (надлишковий тиск);
- Робоча температура середовища: до +500 °С;
- Температура навколишнього середовища: до +85 °С;
- Вихідний сигнал: аналоговий 4–20 мА, HART-протокол;
- Стійкість до гідроген-сульфідного середовища (H₂S) і агресивних вуглеводнів;
- Вибухозахист: АTEX II 2G Ex d/ia IIC T4-T6 Gb;
- Тип виконання: із фланцевою мембраною і з охолоджувальною вставкою (cooling neck або capillary seal).

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Характеристика обраного приладу – SITRANS P DS III:

- Тип: високоточний перетворювач тиску для складних промислових умов;
- Діапазон тиску: програмовано (наприклад, 0...40 бар або 0...60 бар);
- Точність: до $\pm 0,075$ % від верхньої межі вимірювання (ВМВ);
- Матеріали змочуваних частин: Hastelloy C276, нержавіюча сталь AISI 316L, опційно золоте покриття;
- Мембранний роздільник: тип SIPART DRG/Flanged Diaphragm Seal, для високих температур та агресивних середовищ;
- Охолоджувальне розмежування: капілярна трубка з рідиною-заповнювачем для перенесення тиску без перегріву сенсора;
- Інтерфейси: 4–20 мА, HART, PROFIBUS PA, FOUNDATION Fieldbus;
- Захист оболонки: IP66/IP68.

У високотемпературному виконанні сенсор тиску розміщується на окремому стенді або фланці реактора з приєднанням через мембранний роздільник, який безпосередньо контактує з процесним середовищем. Передача тиску до первинного перетворювача здійснюється через заповнену рідиною капілярну лінію, що мінімізує тепловий вплив на чутливі компоненти. Заповнення (наприклад, силіконова або фторована рідина) обирається з урахуванням температури процесу.

Переваги застосування SITRANS P DS III у колоні гідроочищення:

- Стійкість до екстремальних температур і високого тиску;
- Індиферентність до агресивних речовин, включаючи H_2S і високомолекулярні вуглеводні;
- Безпечна експлуатація в зонах з вибухонебезпекою (Ex);
- Можливість точного калібрування та самодіагностики через HART або цифрові інтерфейси;
- Інтеграція з ПЛК Siemens S7-1500 через відповідні аналогові або

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

цифрові модулі.

Датчик тиску Siemens SITRANS P DS III у виконанні з фланцевим мембранним роздільником і охолоджувальним каналом повністю відповідає технічним і безпековим вимогам до експлуатації в колоні гідроочищення при температурі до 500 °С, забезпечуючи високу точність і довговічність роботи.

Для забезпечення регулювання витрати технологічних потоків у системі гідроочищення газу доцільним є використання електропривідних засувко-регуляторів з аналоговим управлінням (4–20 мА). Враховуючи вимоги до високої температури, хімічну агресивність середовища, необхідну точність регулювання та інтеграцію з системою ПЛК Siemens S7-1500, обґрунтованим є вибір арматури виробництва Siemens (SIPART) з інтелектуальним виконавчим механізмом (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Технічні вимоги для РО

Параметр	Значення
Номінальний діаметр (DN)	DN50...DN100 (уточнюється за розрахунком гідравлічної втрати)
Номінальний тиск (PN)	PN 40 або PN 63
Матеріал корпусу	Сталь 1.4571 (AISI 316Ti), або аналогічна, стійка до H ₂ S
Робоча температура	до 500 °С
Сигнал управління	4–20 мА (аналоговий), можливість HART або PROFIBUS
Тип приєднання	Фланцеве, згідно з EN 1092-1
Тип ущільнення	Метал по металу, з опором високій температурі
Клас герметичності	Class IV або вище (залежно від позиції)

Регулюючий клапан ARI-STEVI 470 з електроприводом ARI-PREMIO-Plus. Має такі характеристики (рис 4.11) [12]:

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

- Тип арматури: регулюючий клапан із електроприводом, прямоточний, сідельний;
- Діапазон Kv: 0,16...160 м³/год (варіанти конфігурації);
- Клапан ARI-STEVI 470:
 - Номінальний тиск – PN40/PN63;
 - Матеріал корпусу – сталь 1.4571;
 - Ущільнення метал/метал – спеціально для високотемпературних потоків;
 - Температура до +550 °С без активного охолодження приводу;
- Електропривід ARI-PREMIO-Plus 2G:
 - Живлення 24 В DC або 230 В AC;
 - Аналогове керування: вхід 4–20 мА, вихід позиціонування, HART;
 - Мікропроцесорне управління, самодіагностика, ручне дублювання;
 - Вибухозахищене виконання – опціонально;
 - Клас захисту корпусу – IP67.



Рисунок 4.11 - Загальні технічні вимоги до регулюючої арматури

У структурі автоматизованої системи управління процесом гідроочищення

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

газу застосовано три електропривідні засувки-регулятори з аналоговим керуванням у діапазоні 4–20 мА. Кожен з цих регулювальних органів виконує специфічну функцію, що безпосередньо впливає на стабільність і ефективність основного технологічного процесу. Засувка R-1 розміщується на ділянці трубопроводу подачі газу у змішувач з воднем і забезпечує підтримання стабільного співвідношення фаз у реакційній суміші. Ця засувка є ключовим елементом у внутрішньому рециркуляційному контурі, через який циркулює водень, і, відповідно, має критичне значення для контролю умов гідрогенізації, включаючи стабілізацію парціального тиску водню та запобігання утворенню зон з недостатньою реакційною активністю.

Другий регулятор, R-2, встановлюється після технологічної печі і регулює витрату нагрітого газу, що функціонує як теплоносії для попереднього нагріву середовища перед надходженням у реактор або у верхню частину колони. Через R-2 реалізується компенсація теплових коливань у системі, забезпечується енергоефективне використання теплового потенціалу вторинного продукту та підтримуються необхідні температурні умови для протікання реакцій гідроочищення. Засувка працює в контурі автоматичного терморегулювання із зворотним зв'язком, що дозволяє підтримувати температуру із високою точністю навіть за динамічних змін у витраті або тепловому навантаженні.

Засувка-регулятор R-3 інтегрована в контур стабілізації тиску в реакційній колоні, здійснюючи контрольований відвід парогазової фази, яка утворюється в результаті хімічних реакцій та часткового випаровування. Вона виконує функцію регулятора надлишкового тиску, тим самим забезпечуючи сталість тиску в колоні на оптимальному рівні, що необхідно для підтримання реакційної активності каталізатора та дотримання температурного режиму. Робота R-3 дозволяє уникнути перевищення допустимих граничних значень тиску, знизити втрати водню внаслідок неконтрольованого скидання і запобігти аварійним ситуаціям, пов'язаним із розширенням парогазового середовища.

Інтеграція вищевказаних виконавчих механізмів у систему керування на

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

базі ПЛК Siemens S7-1500 забезпечує безперервний контроль, гнучке регулювання параметрів та високий ступінь адаптивності системи до змін технологічних умов.

4.4 Розробка функціональної схеми автоматизації установки

Розробка функціональної схеми автоматизації установки гідроочищення газу виконується з використанням сучасної системи автоматизованого проектування EPLAN Education 2024. У процесі побудови схеми відображаються усі ключові технологічні етапи, які потребують контролю, регулювання та інтеграції з програмованим логічним контролером. Основна мета розробки — забезпечення візуального і структурно-функціонального відображення логіки взаємодії між технологічним обладнанням, засобами вимірювання, виконавчими механізмами і системою керування, що реалізується на базі ПЛК Siemens S7-1500 (рис. 4.12).

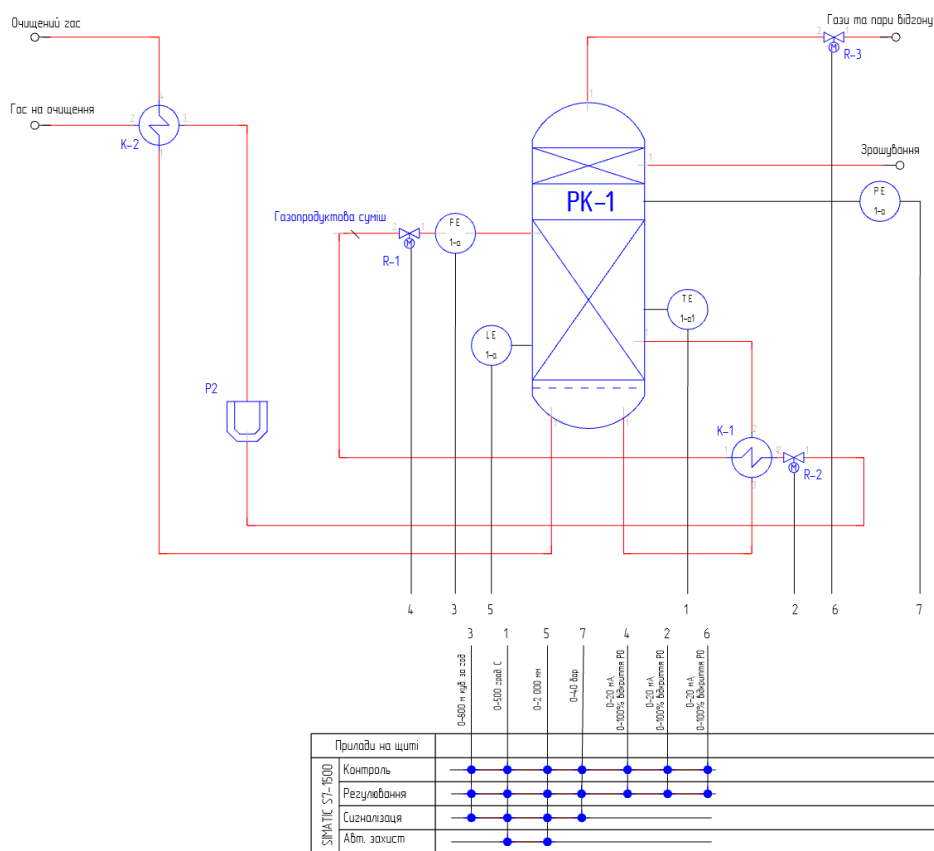


Рисунок 4.12 – ФСА установки гідроочищення газу

На першому етапі розробки здійснюється структурна декомпозиція технологічного процесу на логічні підсистеми, що відповідають основним ділянкам обробки газу. Вхідним елементом є контур підготовки сировини, де газ надходить через теплообмінник К-2, в якому відбувається попереднє підігрівання за рахунок теплоти очищеного продукту, що відводиться з реакційної колони. У модулі EPLAN створюється відповідна функціональна група, яка відображає взаємозв'язок між трубопроводом, теплообмінником, температурними сенсорами та напрямком руху потоку.

Далі в технологічному ланцюзі передбачається надходження попередньо нагрітого газу до технологічної печі P2. Цей вузол моделюється у вигляді окремого функціонального модуля, який інтегрується до схеми з урахуванням потреби температурного моніторингу та сигналізації. З печі продукт подається в систему підігріву колони РК-1, яка включає електропривідну регулювальну засувку R-2 та нагрівач К-1. У схемі визначаються відповідні сигнальні з'єднання між засувкою, аналоговим виходом ПЛК та модулем вимірювання температури у вихідному потоці з нагрівача.

Після проходження нагрівача, гаряча газова суміш транспортується у реакційну колону РК-1. На вході в колону передбачено точку контролю витрати, що реалізується витратоміром типу FE (поз. 1-а), та аналогову регулювальну засувку R-1, яка забезпечує підтримання оптимального об'ємного потоку в колоні. У середовищі EPLAN для цієї ділянки формується взаємопов'язаний блок, в якому задаються функціональні зв'язки між витратоміром, аналоговим вхідним модулем контролера, виконавчим механізмом засувки, та логікою регуляторного контуру, реалізованого у ПЛК.

Усередині реакційної колони реалізовано контроль температурного режиму за допомогою температурного давача TE (поз. 1-а), який підключено до аналогового модуля ПЛК. У схемі задається канал зв'язку для передачі температурного сигналу в систему SCADA або HMI-інтерфейс для моніторингу та сигналізації. Одночасно передбачається підключення рівнеміра LE (поз. 1-а),

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

який здійснює вимірювання рівня в ребойлері колони. Цей давач інтегрується у схему через аналоговий канал і формує сигнал зворотного зв'язку для функціонального блоку, що відповідає за підтримання рівня теплоносія в системі випаровування.

Контроль і стабілізація тиску в колоні забезпечується через датчик тиску типу PE (поз. 1-а), підключений до аналогового входу ПЛК, та засувку-регулятор R-3, яка регулює інтенсивність відведення парогазової суміші. У САПР реалізується модель відповідного замкнутого регуляторного контуру з відображенням сигналів керування, меж регулювання та режимів аварійного захисту у випадку перевищення граничних значень тиску.

У процесі проектування враховуються принципи уніфікації позначень, стандарти IEC 81346 та DIN EN 61355, а також використовується бібліотека виробника Siemens для стандартного оформлення електротехнічних компонентів і функціональних вузлів. Функціональна схема є основою для подальшої розробки принципової електричної схеми, підключення клемних блоків, створення адресного простору ПЛК, а також для інтеграції з НМІ-панелями та архітектурою SCADA-рівня.

4.5 Електричні схеми підключень технічних засобів автоматизації до модулів ПЛК

Розробка електричних схем підключення технічних засобів автоматизації (ТЗА) до модулів програмованого логічного контролера є наступним етапом у створенні системи керування процесом гідроочищення гасу. У процесі побудови схем підключень у середовищі EPLAN Education 2024 реалізується комплексне моделювання взаємодії датчиків, регуляторів, виконавчих механізмів та периферійних модулів ПЛК Siemens S7-1500, що забезпечує централізоване керування технологічними параметрами.

Для кожного датчика або виконавчого механізму визначається тип сигналу, що передається до ПЛК, з урахуванням номінального діапазону,

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Підключення електропривідних регулюючих засувок (R-1, R-2, R-3), що працюють в аналоговому режимі, виконується до аналогових виходів (АО) ПЛК, де формуються сигнали керування в діапазоні 4–20 мА. У схемах передбачено наявність зворотного зв'язку про положення виконавчого органу, що може бути реалізований через окремий аналоговий вхід або дискретні сигнали положення кінцевих вимикачів (відкрито/закрито). При побудові таких схем детально моделюється підключення виконавчих механізмів до силових розподільчих шин, із застосуванням запобіжників, клем реле керування та елементів аварійного відключення (рис. 4.14).

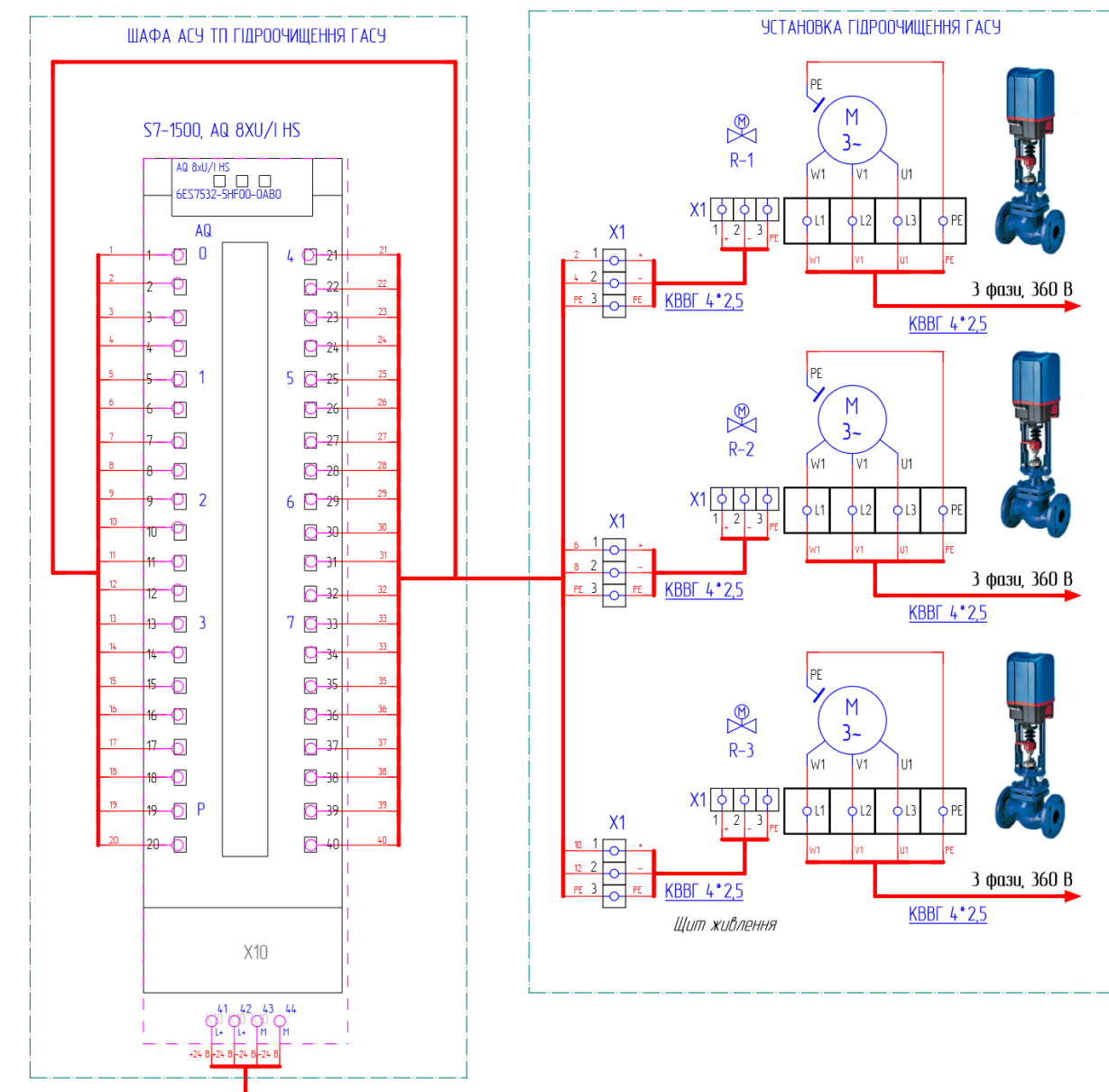


Рисунок 4.14 – Підключення аналогових регулюючих органів

						БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			80

Дискретні сигнали, які використовуються для індикації станів устаткування або формування аварійних сигналів, підключаються до модулів цифрових входів (DI), з використанням оптозв'язку та логіки «високого» рівня напруги (звичайно 24 В DC). Сюди відносяться, зокрема, кінцеві вимикачі положення засувки, сигналізація перевищення температури чи тиску, а також ручні перемикачі для локального керування. Аналогічно, цифрові виходи (DO) застосовуються для активації реле пуску виконавчих механізмів або сповіщення про аварійні стани через сигнальні лампи або зумери.

У процесі проектування електричних схем в EPLAN для кожного елемента використовується бібліотека виробника Siemens, що дозволяє формувати стандартні умовні графічні позначення, автоматично генерувати клемні плани, списки з'єднань та маркування проводів. Особлива увага приділяється забезпеченню гальванічної ізоляції між польовими пристроями та модулями ПЛК, де необхідно — через застосування ізолюючих модулів або оптопар.

Підключення кожного елемента супроводжується призначенням унікального функціонального позначення за стандартом IEC 81346, що включає у собі технологічну позицію, місце встановлення та функціональний тип сигналу. Наприклад, витратомір FE поз. 1-а підключається до аналогового входу AI_1.3, рівнемір LE — до AI_1.4, виконавча засувка R-1 — до AO_2.1 тощо. Це забезпечує чітку трасування сигналів у системі автоматизації та полегшує майбутню експлуатацію або діагностику.

4.5. Розробка шафи автоматики у САПР

Розробка шафи автоматики для системи керування процесом гідроочищення гасу виконується у середовищі САПР EPLAN Education 2024. Метою проектування є створення повноцінної функціонально-електричної моделі шафи, яка інтегрує програмований логічний контролер Siemens S7-1500 з усіма модулями вводу/виводу, пристроями захисту, комунікаційними інтерфейсами та елементами допоміжного живлення. Процес проектування

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

охоплює розміщення елементів у просторі розподільної шафи, формування монтажних планів, електричних з'єднань, специфікацій та маркування для подальшого виготовлення та введення в експлуатацію (рис. 4.15).

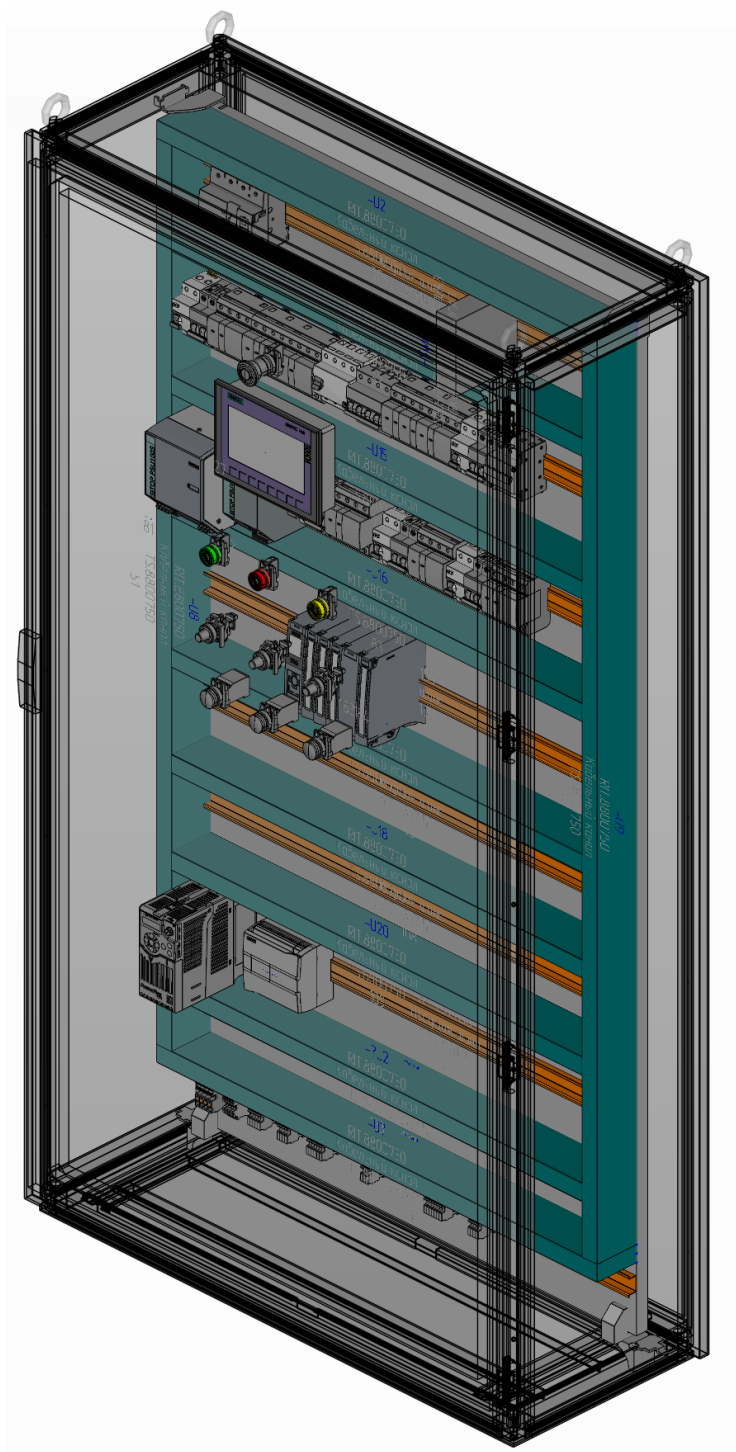


Рисунок 4.15 – Шафа АСУ ТП гідроочищення гасу

Початковий етап полягає у виборі конструктивного типу шафи відповідно

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

до умов експлуатації. Для даного виробничого середовища, де можливі впливи підвищеної температури, вологи та вібрацій, передбачається використання металевої шафи із захистом IP54 (наприклад, Rittal або аналогічного типу), з відповідною вентиляцією, знімними кришками, місцем для кабельного вводу і достатнім простором для обслуговування. У середовищі EPLAN створюється 3D-модель шафи у модулі EPLAN Pro Panel, яка дозволяє перевірити геометричну сумісність усіх компонентів.

Центральним елементом конструкції є процесорний модуль ПЛК Siemens S7-1500 (CPU 1515-2 PN), який монтується на стандартну DIN-рейку. Поруч розташовуються модулі аналогового і цифрового вводу/виводу (SM 1231 AI, SM 1232 AO, SM 1221 DI, SM 1222 DO), які об'єднуються загальною шиною живлення та комунікаційною магістраллю. У EPLAN визначаються всі фізичні адреси модулів, їх взаємне розташування та електричне підключення, включаючи сигнальні кабелі, клемні блоки та кінцеві елементи шин.

Для живлення контролера й усіх польових пристроїв передбачається модуль живлення PS 60W 24V DC, підключений до трифазної мережі через автоматичні вимикачі з індикацією. У схемі реалізовано розгалуження шини живлення за допомогою клем WAGO або Phoenix Contact з відповідним резервуванням. Для забезпечення стабільності роботи при імпульсних навантаженнях та перепадах напруги встановлюються фільтри, варистори та пристрої захисту від перенапруги.

Окремо у конструкції передбачено монтаж комунікаційного модуля SM 1542-5 для забезпечення обміну даними за протоколом Profibus із польовими пристроями. У шафі розміщується патч-панель або комутаційний модуль для організації мережевих з'єднань Ethernet/PROFINET, а також маршрутизатор або шлюз при необхідності обміну із зовнішніми системами (SCADA, MES, ERP).

На монтажній панелі шафи проектуються й інші функціональні блоки — такі як реле контролю фаз, клеми заземлення, блоки інтерфейсного захисту, джерела резервного живлення (UPS) для аварійного вимкнення системи. Усі

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

елементи маркуються згідно з міжнародними стандартами (IEC 81346), а схема включає таблиці позначень, таблички технічних характеристик, сигнальні позначення, прив'язки до сторінок функціональних схем та адресації в середовищі TIA Portal.

У середовищі EPLAN автоматично генерується перелік обладнання (BOM — Bill of Materials), маркування проводів та кабелів, таблиці перетинів, а також креслення для монтажу зовнішніх елементів — кнопок, індикаторів, операторської панелі тощо.

Висновки до розділу

У цьому розділі було виконано комплексну розробку технічних рішень для автоматизованої системи управління технологічним процесом гідроочищення гасу. На основі результатів попереднього моделювання та аналізу процесу було сформовано структурно-функціональну архітектуру АСУ ТП, що охоплює ієрархічну модель управління з розмежуванням функціональних рівнів — від польового до надсистемного.

Здійснено обґрунтований вибір технічних засобів автоматизації, адаптованих до умов експлуатації та динаміки процесу: зокрема, програмованого логічного контролера Siemens S7-1500, відповідних модулів вводу/виводу, сенсорних елементів (витратомірів, датчиків температури, тиску та рівня), а також електропривідних регулюючих засувок з аналоговим інтерфейсом. Вибрані прилади забезпечують необхідну точність вимірювання, швидкодію та надійність у жорстких умовах високих температур і тисків, що притаманні процесу гідроочищення.

Сконструйовано функціональну схему автоматизації з урахуванням каскадного принципу регулювання температури та витрати, реалізованого через взаємодію між внутрішнім та зовнішнім контурами. Детально описано алгоритм взаємодії між контуром витрати теплоносія та температурним контуром регуляції реакційної колони.

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

У середовищі САПР EPLAN Education 2024 розроблено електричні схеми підключення польових пристроїв до модулів ПЛК, а також проектну документацію на шафу автоматики, що включає компоновання апаратних засобів, схеми підключення, розводку шин живлення, елементів комунікації та захисту.

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі досліджено та реалізовано підходи до розробки автоматизованої системи управління технологічним процесом гідроочищення гасу з використанням мікропроцесорного контролера Simatic S7-1500.

В першому розділі здійснено комплексний аналіз технологічної установки гідроочищення гасу, що функціонує як важлива ланка в структурі нафтопереробного виробництва. Процес гідроочищення відіграє визначальну роль у зниженні вмісту небажаних домішок, зокрема сірчистих сполук, що, у свою чергу, безпосередньо впливає на якість та екологічну безпеку кінцевого продукту. Особливу увагу приділено аналізу функціонування трубчастої печі та реактора - елементів, від узгодженої дії яких залежить термодинамічна і хімічна ефективність перетворень. Піч забезпечує нагрівання газосировинної суміші до температури, достатньої для ініціювання каталітичних реакцій гідрогенізації, які надалі реалізуються в реакторі. Сам реактор, обладнаний нерухомим шаром каталізатора, є місцем здійснення основних хімічних перетворень, спрямованих на десульфурізацію та глибоку очистку гасу. Процес відбувається під високим тиском і в чітко контрольованих температурних умовах, що забезпечується системою автоматичного керування. Паралельно з технічним описом було проаналізовано основні параметри, що підлягають контролю, регулюванню, індикації та сигналізації. Особливе місце в цьому аспекті займають температура та тиск на вході до печі, оскільки від них залежить стабільність і результативність реакційного контуру. Створена функціональна схема автоматизації дозволяє здійснювати безперервний моніторинг і цільове керування критичними параметрами, що забезпечує стабільність технологічного режиму та адаптивність системи до змін зовнішніх або внутрішніх умов. Загалом, реалізована архітектура технологічного процесу демонструє високий рівень інтеграції енергетичних, хімічних та інформаційних складових. Вона спрямована на забезпечення необхідного рівня очистки гасу при збереженні

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

енергоефективності й технологічної безпеки. Завдяки цьому установка здатна стабільно продукувати продукт, який відповідає сучасним авіаційним стандартам і може бути використаний у високотехнологічних галузях без необхідності додаткової очистки.

В другому розділі було обґрунтовано необхідність застосування каскадної системи автоматичного регулювання в процесі гідроочищення гасу як засобу підвищення ефективності управління теплотехнічними параметрами установки. Аналіз структури технологічного процесу засвідчив, що одноступеневі системи регулювання не забезпечують достатньої точності підтримання температури реакційного середовища, що критично для стабільного протікання гідрогенізаційних реакцій у присутності каталізатора. Особливу увагу було приділено розробці математичної моделі об'єкта регулювання, в якій відображено динамічні властивості реактора та теплообмінного обладнання. Застосування каскадної структури дозволяє реалізувати більш гнучке управління температурою за рахунок використання допоміжного (внутрішнього) контуру регулювання витрати теплоносія, що швидше реагує на збурення. Це забезпечує не лише покращення якості перехідних процесів, а й зниження амплітуди температурних коливань, що особливо важливо для збереження активності каталізатора та запобігання деградації продукту.

У третьому розділі, за допомогою MATLAB/Simulink, було проведено комплексний синтез та дослідження каскадної автоматичної системи регулювання температури каталітичного реактора з урахуванням динамічних властивостей реактора та теплообмінного обладнання. Синтез ПІ-регуляторів каскадної системи базувався на принципі розділення динаміки контурів за швидкодією. Внутрішній швидкий контур регулювання витрати теплоносія було налаштовано за методом технічного оптимуму, що дозволило звести його до еквівалентної аперіодичної ланки зі значно меншою постійною часу порівняно з температурним об'єктом. Зовнішній температурний контур, що містить транспортне запізнювання та велику постійну часу, потребував обережного

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

підходу до налаштування регулятора з метою забезпечення компромісу між швидкодією та стійкістю системи. Дослідження стійкості показало високі запаси стійкості внутрішнього контуру та достатні запаси зовнішнього контуру, що підтверджує надійність системи регулювання температури реактора. Аналіз показників якості виявив значне покращення динамічних характеристик порівняно з одноконтурною системою: зменшення часу регулювання в 2-3 рази, відсутність перерегулювання та нульову статичну похибку. Аналіз показників якості підтвердив ефективність каскадної структури. Час регулювання системи становить приблизно 77 секунд, що в 2-3 рази менше порівняно з еквівалентною одноконтурною системою. Перерегулювання практично відсутнє завдяки передемпфованому характеру перехідного процесу, що особливо важливо для технологічних процесів, чутливих до коливань. Статична похибка за постійним завданням дорівнює нулю завдяки наявності інтегральних складових в обох регуляторах. Частотний аналіз за допомогою діаграм Боде розкрив особливості динаміки каскадної системи. Внутрішній контур має частоту зрізу 2 рад/с, що забезпечує швидку реакцію на збурення. Зовнішній контур характеризується значно нижчою частотою зрізу близько 0.003 рад/с, що відповідає його функції точного відтворення завдання. Транспортне запізнювання істотно впливає на фазові характеристики системи, але розраховані параметри регуляторів забезпечують стабільне функціонування. Особливою перевагою каскадної структури є здатність ефективно компенсувати збурення, що діють на внутрішній об'єкт. Такі збурення компенсуються швидким внутрішнім контуром без участі повільного зовнішнього, що значно покращує якість регулювання. Це особливо важливо для технологічних процесів, де збурення можуть виникати на різних рівнях ієрархії об'єкта управління.

В четвертому розділі було виконано комплексну розробку технічних рішень для автоматизованої системи управління технологічним процесом гідроочищення гасу. На основі результатів попереднього моделювання та аналізу процесу було сформовано структурно-функціональну архітектуру АСУ ТП, що

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

охоплює ієрархічну модель управління з розмежуванням функціональних рівнів — від польового до надсистемного. Здійснено обґрунтований вибір технічних засобів автоматизації, адаптованих до умов експлуатації та динаміки процесу: зокрема, програмованого логічного контролера Siemens S7-1500, відповідних модулів вводу/виводу, сенсорних елементів (витратомірів, датчиків температури, тиску та рівня), а також електропривідних регулюючих засувки з аналоговим інтерфейсом. Вибрані прилади забезпечують необхідну точність вимірювання, швидкодію та надійність у жорстких умовах високих температур і тисків, що притаманні процесу гідроочищення. Сконструйовано функціональну схему автоматизації з урахуванням каскадного принципу регулювання температури та витрати, реалізованого через взаємодію між внутрішнім та зовнішнім контурами. Детально описано алгоритм взаємодії між контуром витрати теплоносія та температурним контуром регуляції реакційної колони. У середовищі САПР EPLAN Education 2024 розроблено електричні схеми підключення польових пристроїв до модулів ПЛК, а також проєктну документацію на шафу автоматики, що включає компонування апаратних засобів, схеми підключення, розводку шин живлення, елементів комунікації та захисту.

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Artificial neural networks and biodiesel production: A review/ [Електронний ресурс]. – URL: https://www.ijrar.org/papers/IJRAR19D5445.pdf?utm_source=chatgpt.com
2. Artificial neural network and semi-empirical modeling of industrial-scale Gasoil hydrodesulfurization reactor temperature profile. [Електронний ресурс]. – URL: https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4b3ZnoLl/?utm_source=chatgpt.com
3. Artificial intelligence approach for modeling petroleum refinery catalytic desulfurization process. [Електронний ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/361093260_Artificial_intelligence_approach_for_modeling_petrolium_refinery_catalytic_desulfurization_process
4. Simulation of hydrodesulfurization unit for natural gas condensate with high sulfur content. [Електронний ресурс]. – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s13203-015-0107-0?utm_source=chatgpt.com
5. Динамічне моделювання та імітаційне моделювання реакторів каталітичної гідроочистки. [Електронний ресурс]. – URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef050407v>
6. Семенцов Г. Н. Автоматизація процесів переробки нафти та газу: Навчальний посібник / Г. Н. Семенцов, М. І. Горбійчук, Л. І. Жуган, С. А. Чеховський. – Львів: Світ, 1992. – 352 с.
7. SIMATIC S7-1500. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-1500.html>
8. SITRANS FX330 Вихровий витратомір. [Електронний ресурс]. – URL: <https://topsitiservis.ub.ua/goods/view/18395926/all/sitrans-fx330-vihrevoy-rashodomer/>

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

9. Промисловий сенсор температури SITRANS TS500. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/kontrolno-vymiryvalni-prylady/vymiryuvannya-temperatury/sitrans-ts500.html>

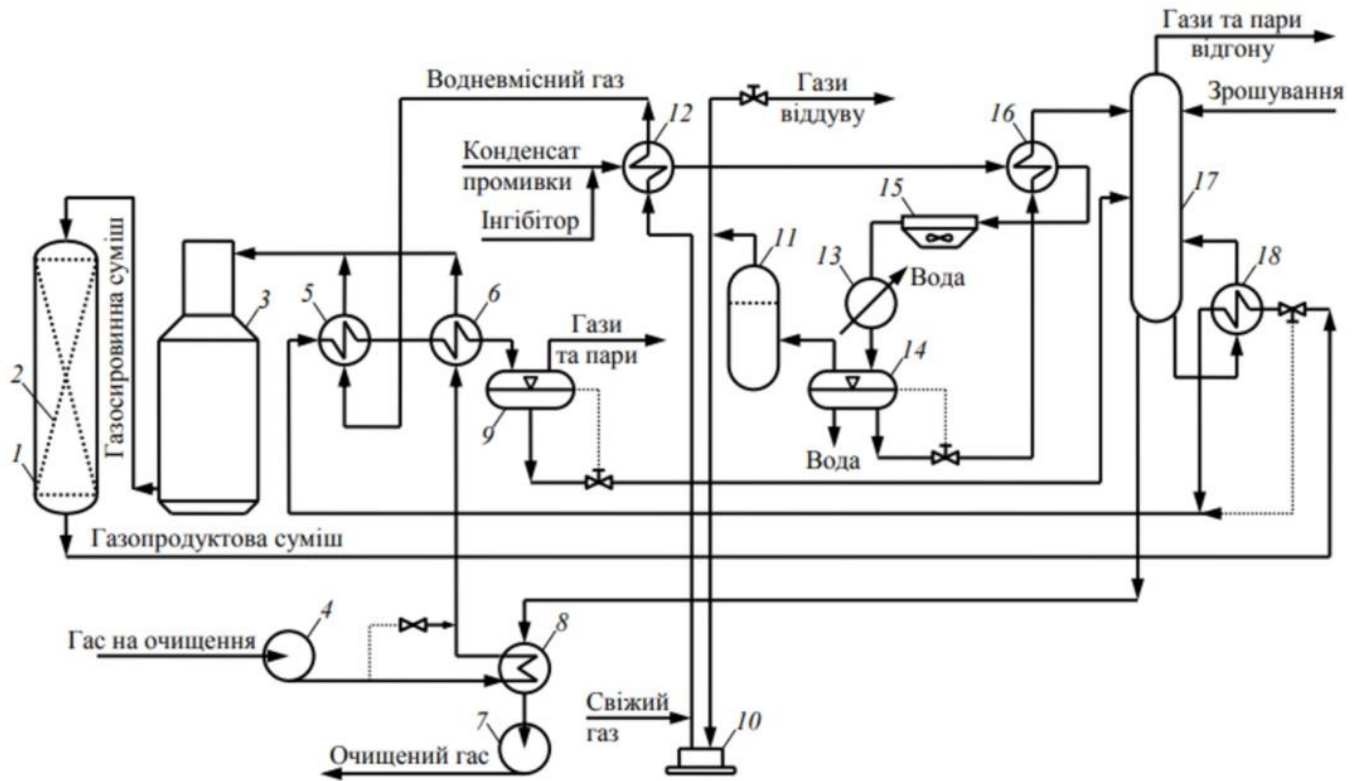
10. Рівнемір SITRANS LR560. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/kontrolno-vymiryvalni-prylady/vymiryuvannya-rivnya/bezperervne-vymiryuvannya-rivnya/radarni-rivnemiry/sitrans-lr500.html>

11. Високотемпературний сенсор тиску Siemens SITRANS P DS III [Електронний ресурс]. – URL: <https://digitrol.com.br/produto/transmissor-de-pressao-ds-iii-siemens/>

12. Регулюючий клапан ARI-STEVI 470 з електроприводом ARI-PREMIO-Plus. [Електронний ресурс]. – URL: <https://aparatosparavapor.com/producto/valvula-de-control-proporcional-mod-stevi-470-471/>

					БР. АКП-09.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

ДОДАТКИ



- 1 – реактор, 2 – каталізатор, 3 – піч (нагрівач),
 4, 7 – насоси подачі сировини, 5, 6, 8, 12, 16 – теплообмінники,
 9, 14 – сепаратори, 10 – компресор, 11 – приймач,
 13 – конденсатор-холодильник,
 15 – апарат повітряного охолодження, 17 – стабілізаційна колона,
 18 – кип'ятильник

Змн.	Арк.	№ докум	Підп	Дата
Разроб		Кущ Р.А.		
Перевіриб		Кучмистенко О.В.		
Рецензент		Чигур І.І.		
Керівник				
Н.контр		Кучмистенко О.В.		
Затведиб		Ласюйда А.І.		

БР. АКП-09.00.00.000 01

Технологічна схема процесу
гідроочищення гасу

Лім. Арк. Аркуші

1 11

АКП-21-1, ІФНТУНГ
ePLAN

Перш. використ.

Спроб. №



Позначення	Фізичний зміст
Вхідні величини	
$X_{\text{сиров}}$	Склад газу, включно з вмістом сірковмісних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, залишкових домішок
$T_{\text{вх}}$	Температура газу перед входом у реактор гідроочищення
$P_{\text{вх}}$	Тиск у трубопроводі перед реактором
G_{H_2}	Витрата водню, що подається для забезпечення відновлювальної атмосфери
$u_{\text{нагр}}$	Керувальний сигнал на нагрівач, що регулює температуру реакційної зони
$\Delta P_{\text{зб}}$	Зовнішні збурення тиску в системі (наприклад, коливання компресорної установки)
ΔX_c	Неконтрольовані варіації в складі сировини, що змінюють реакційну кінетику
Вихідні величини	
$T_{\text{реак}}$	Температура всередині реакційної зони (контрольна точка)
$P_{\text{реак}}$	Тиск у реакторі гідроочищення
$Y_{\text{оч}}$	Якість очищеного газу (наприклад, концентрація сірки або загальний вміст домішок)
U_T	Зміни температури в реакторі
U_P	Зміни тиску
U_G	Зміни витрати водню
ΔX_c	Реєстровані зміни властивостей сировини за результатами онлайн-аналізу

Підп. та дата

Інв. № дубл

Зам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № ориг.

Змн.	Арк.	№ докум	Підп	Дата
Розроб		Куч Р.А.		
Перевірив		Кучмистенко О.В.		
Рецензент		Чизур ІІ		
Керівник				
Н.контр		Кучмистенко О.В.		
Затвердив		Лозюда А.І.		

БР. АКП-09.00.00.000 02

Модель «вхід-вихід» процесу перегонки нафти у реакторі

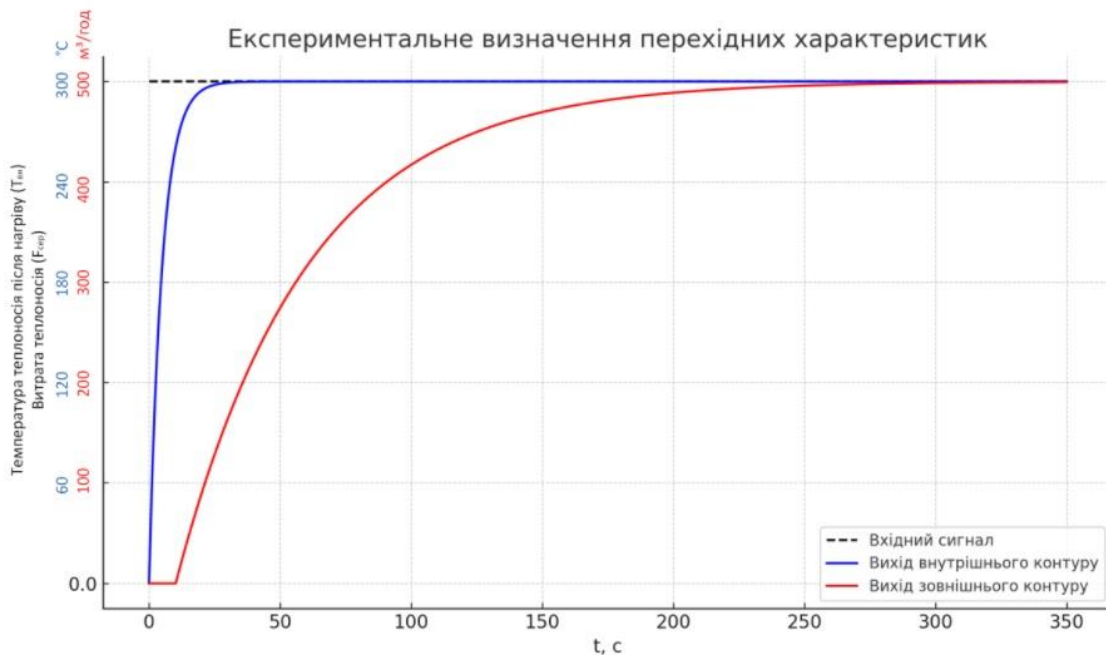
Лім.	Арк.	Аркушів
	2	11

АКП-21-1, ІФНТУНГ



Графіки перехідних характеристик по каналу керування витрати основної сировини та каналу регулювання температури у колоні

Експериментальне визначення перехідних характеристик



Результати обробки експериментальних даних

№	Внутрішній контур			Зовнішній контур		
	Час t, c	Вхідний сигнал u(t)	Вихідний сигнал y(t)	Час t, c	Вхідний сигнал u(t)	Вихідний сигнал y(t)
0	0	1	0.000	0	1	0.000
1	1	1	0.181	10	1	0.000
2	2	1	0.330	20	1	0.181
3	3	1	0.451	30	1	0.330
4	4	1	0.549	40	1	0.451
5	5	1	0.632	50	1	0.549
6	6	1	0.699	60	1	0.632
7	7	1	0.753	70	1	0.699
8	8	1	0.798	80	1	0.753
9	9	1	0.835	90	1	0.798
10	10	1	0.865	100	1	0.835
11	11	1	0.890	110	1	0.865
12	12	1	0.910	120	1	0.890
13	13	1	0.927	130	1	0.910
14	14	1	0.941	140	1	0.927
15	15	1	0.953	150	1	0.941
16	16	1	0.962	160	1	0.953
17	17	1	0.970	170	1	0.962
18	18	1	0.977	180	1	0.970
19	19	1	0.982	190	1	0.977
20	20	1	0.987	200	1	0.982
21	21	1	0.990	210	1	0.987
22	22	1	0.993	220	1	0.990
23	23	1	0.995	230	1	0.993
24	24	1	0.997	240	1	0.995
25	25	1	0.998	250	1	0.997
26	26	1	0.999	260	1	0.998
27	27	1	0.999	270	1	0.999
28	28	1	0.999	280	1	0.999
29	29	1	1.000	290	1	0.999
30	30	1	1.000	300	1	1.000

Спроб. №
Перш. використ.

Підп. та дата	
Інд. № дубл	
Зам. інд. №	
Підп. та дата	
Інд. № ориг.	

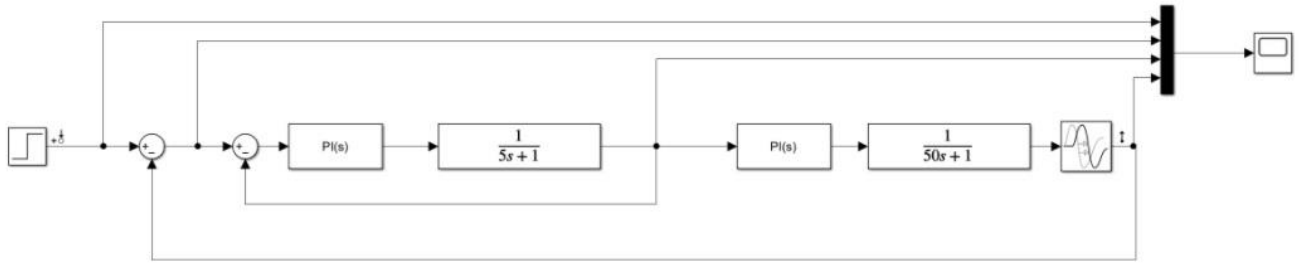
Змн.	Арк.	№ докум	Підп	Дата
Разроб		Куц Р.А.		
Перевірив		Кучмистенко О.В.		
Рецензент		Чигур ІІ.		
Керівник				
Н.контр		Кучмистенко О.В.		
Затведив		Лазарова А.І.		

БР. АКП-09.00.00.000 03

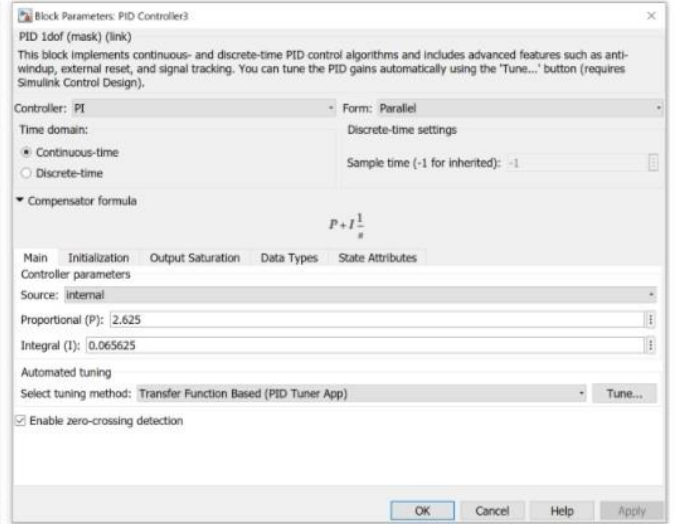
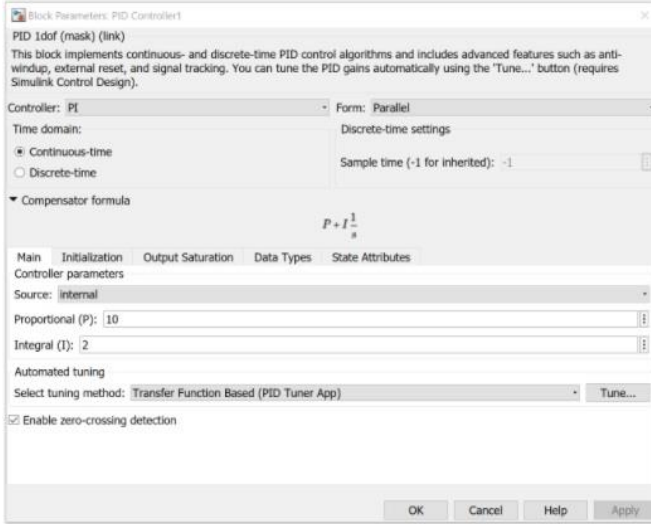
Аналіз і синтез каскадної АСР

Лім.	Арк.	Аркушів
	3	11
АКП-21-1, ІФНТУНГ		
		

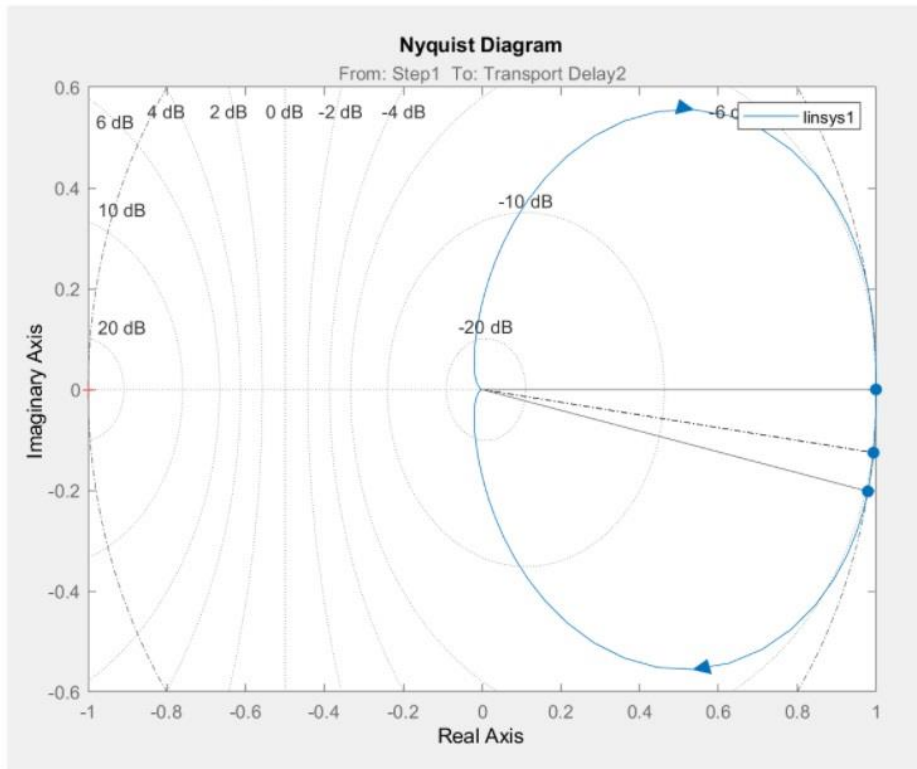
Модельовання каскадної АСР в середовищі MATLAB/Simulink



Налаштування регуляторів каскадної АСР



Діаграма Найквіста каскадної АСР



Перш. Використ.

Справ. №

Підп. та дата

Інв. № змін

Зам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № ориг.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб		Куц Р.А.		
Перевірюв		Кучмищенко О.В.		
Рецензент		Чижур І.І.		
Керівник				
Н.контр.		Кучмищенко О.В.		
Замовив		Лазаріда А.І.		

БР. АКП-09.00.00.000 03

Аналіз і синтез каскадної АСР

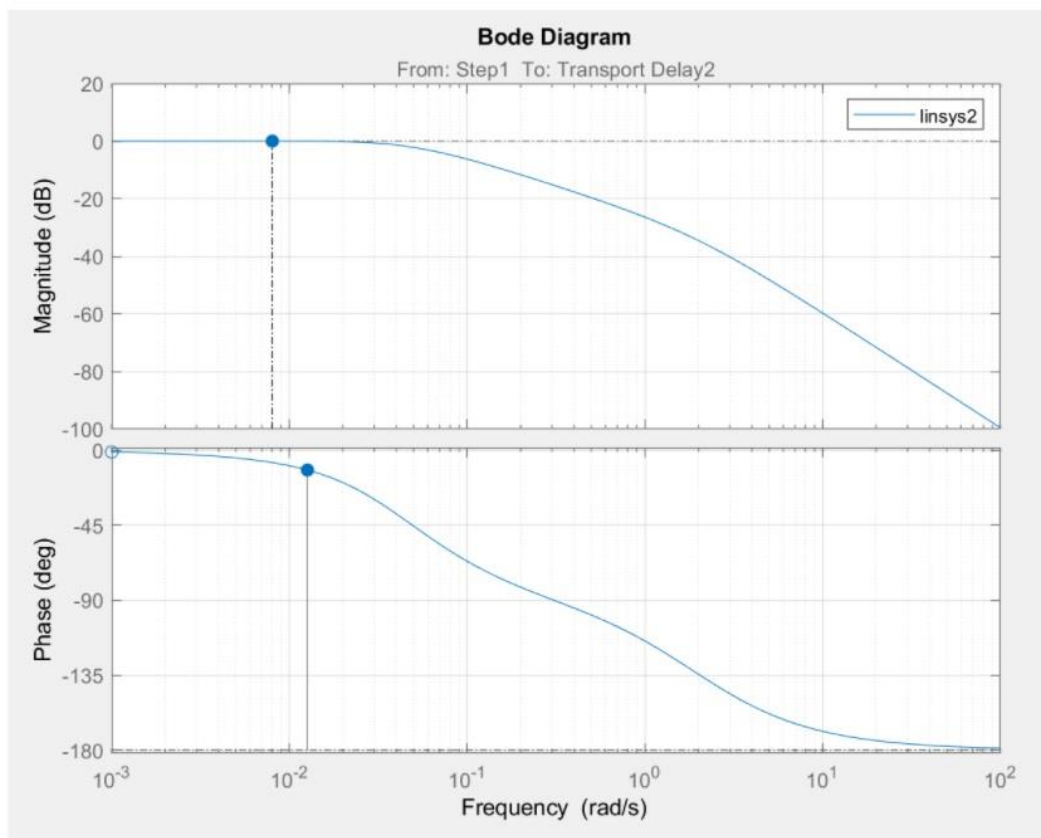
Лім.	Арк.	Аркуші
	3.а	11

АКП-21-1, ІФНТУНГ

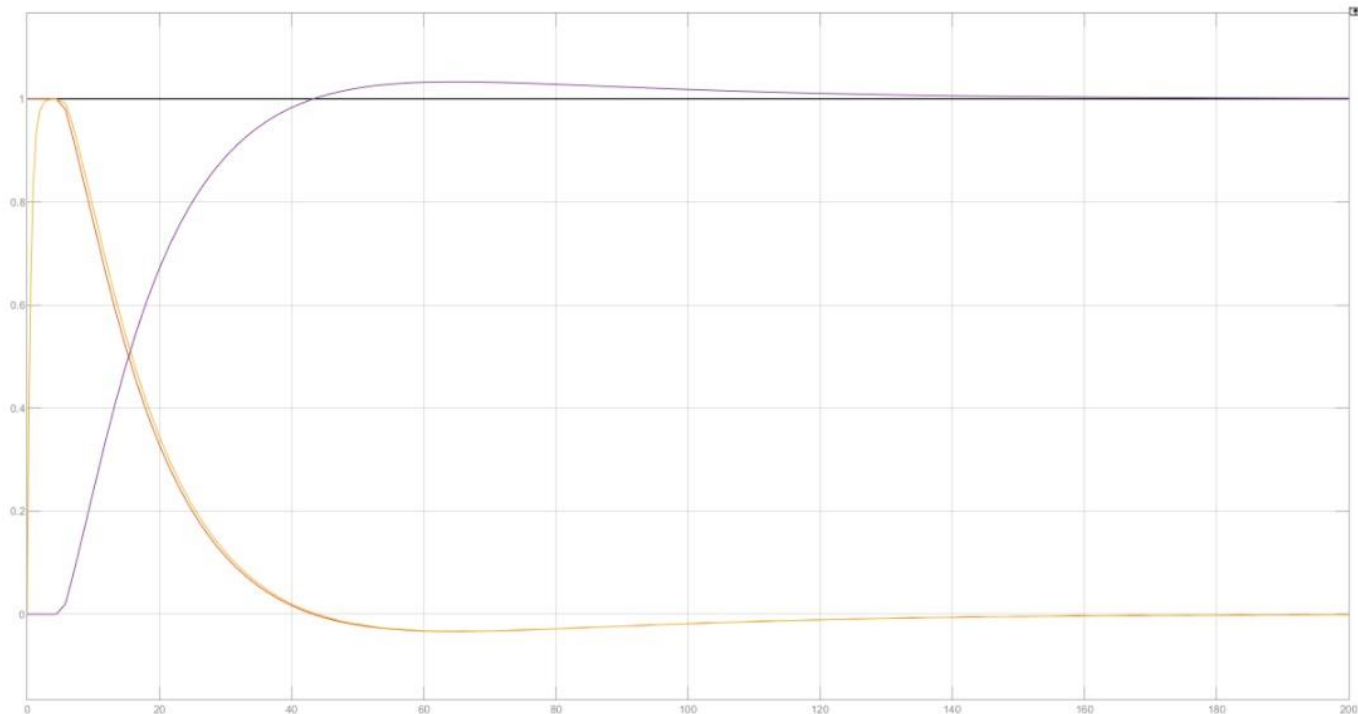
Перш. використ

Справ. №

Діаграма Бодє каскадної АСР



Перехідна характеристика каскадної АСР



Підп. та дата

Інв. № дубл

Зам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № ориг.

Змін.	Арк.	№ докум	Підп.	Дата
Розроб		Куч Р.А.		
Перевірів		Кучмистенко О.В.		
Рецензент		Чигур ІІ.		
Керівник				
Н.контр		Кучмистенко О.В.		
Затвердив		Лазаріда А.І.		

БР. АКП-09.00.00.000 03

Аналіз і синтез каскадної АСР

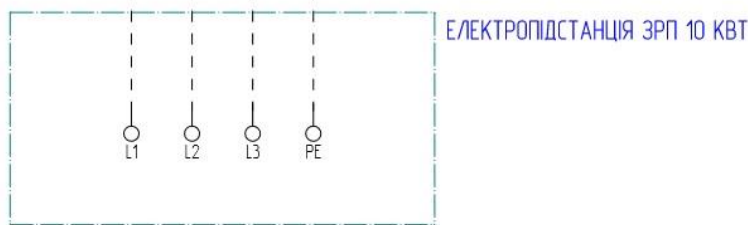
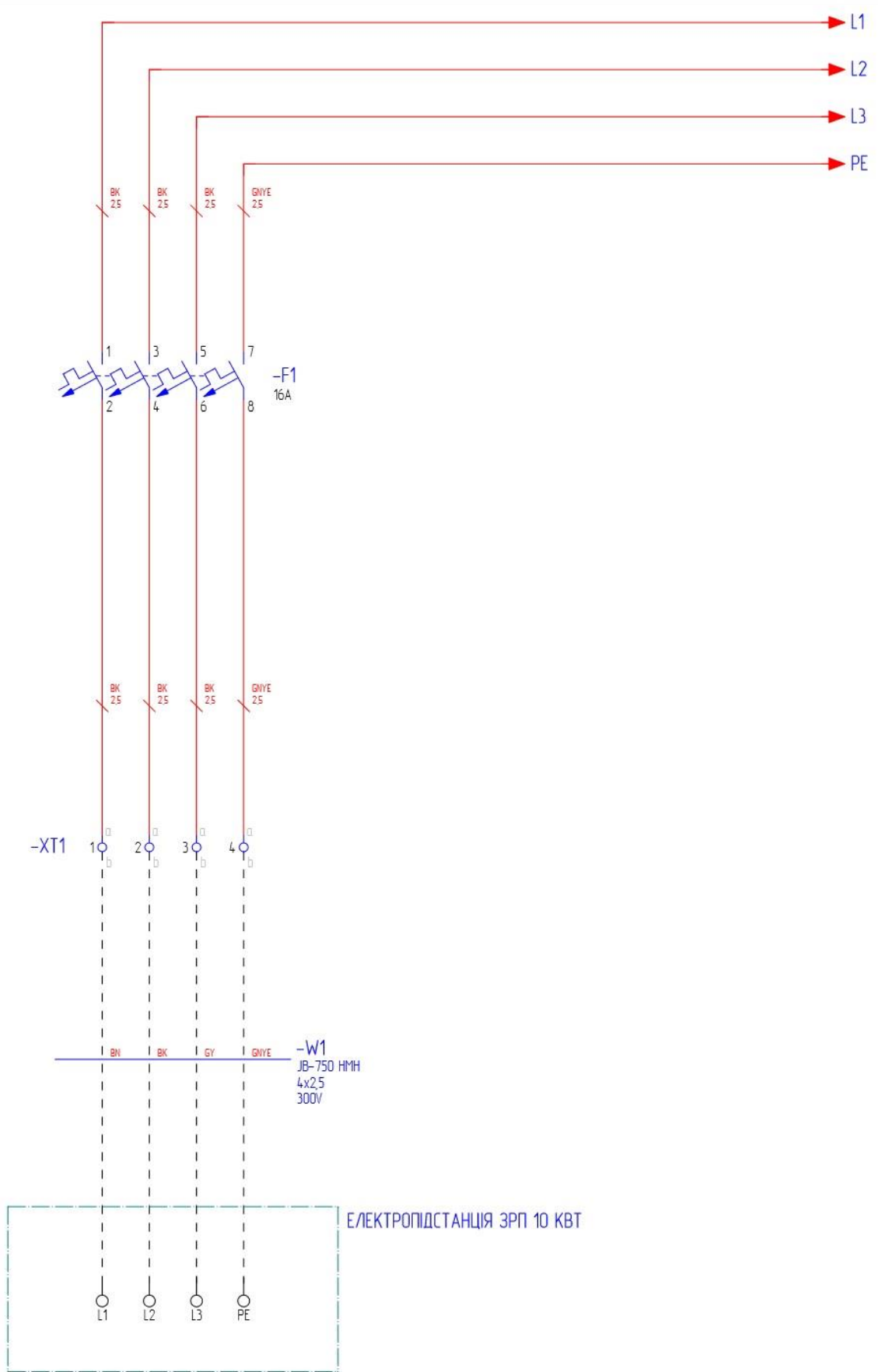
Літ.	Арк.	Аркуші
	3б	11

АКП-21-1, ІФНТУНГ



Перш. Використ

Спроб. №



Підп. та дата	Інв. № дубл	Зам. інв. №	Підп. та дата
Інв. № орг.	Перевірив	Рецензент	Керівник
	Н.контр	Затвердив	

Змн.	Арк.	№ докум	Підп	Дата
Розроб	Куч Р.А.			
Перевірив	Кучмистенко О.В.			
Рецензент	Чигур І.І.			
Керівник				
Н.контр	Кучмистенко О.В.			
Затвердив	Лазаріда А.І.			

БР. АКП-09.00.00.000 05

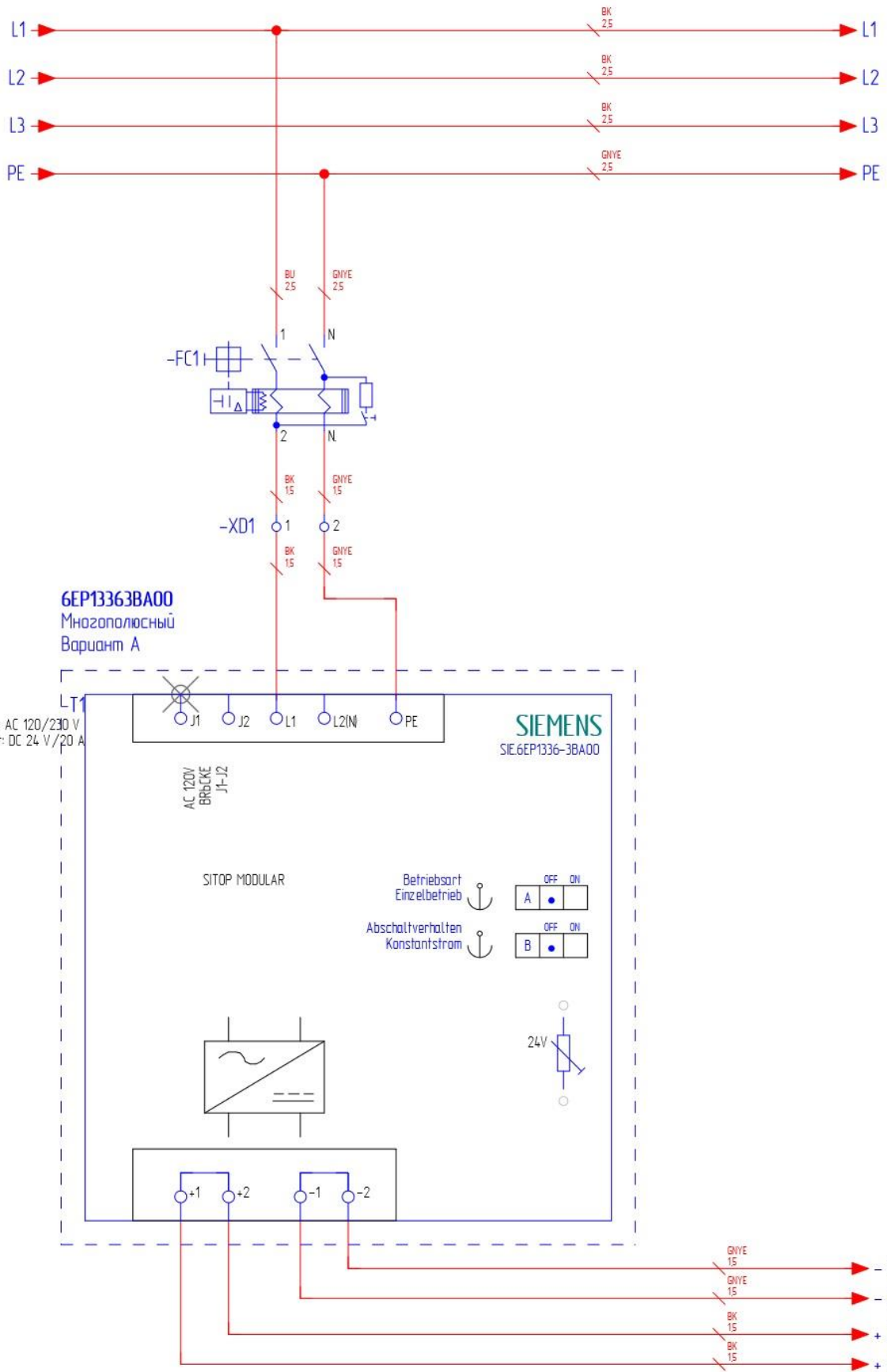
Схема зовнішніх з'єднань

Лім.	Арк.	Аркуші
	5	11

АКП-21-1, ІФНТУНГ

Перш. використ

Спроб. №



Підп. та дата

інв. № дубл

Зам. інв. №

Підп. та дата

інв. № орг.

Зм.	Арк.	№ докум	Підп.	Дата
Разроб		Куч Р.А.		
Перебірив		Кучмистенко О.В.		
Рецензент		Чигур Ц.		
Керівник				
Н.контр		Кучмистенко О.В.		
Затведив		Лазарда А.І.		

БР. АКП-09.00.00.000 05

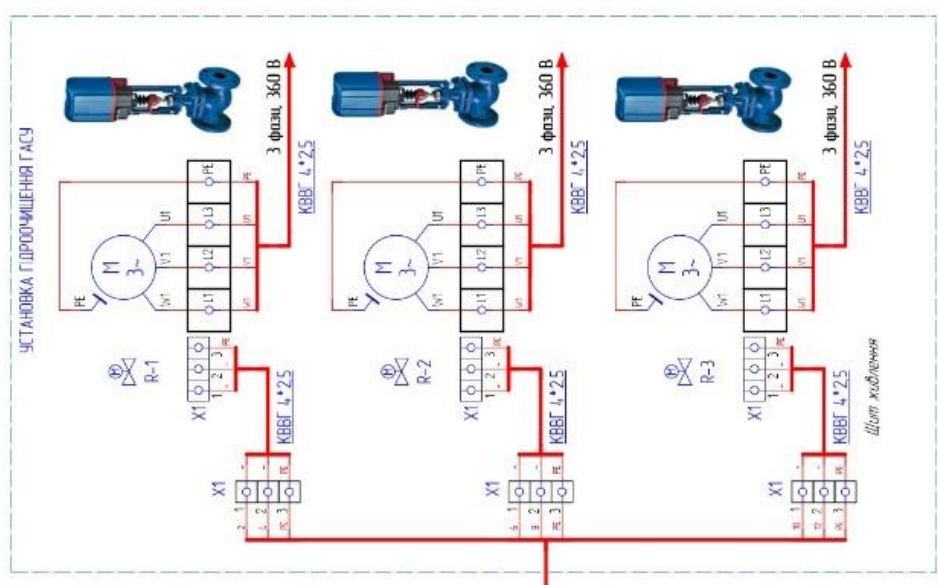
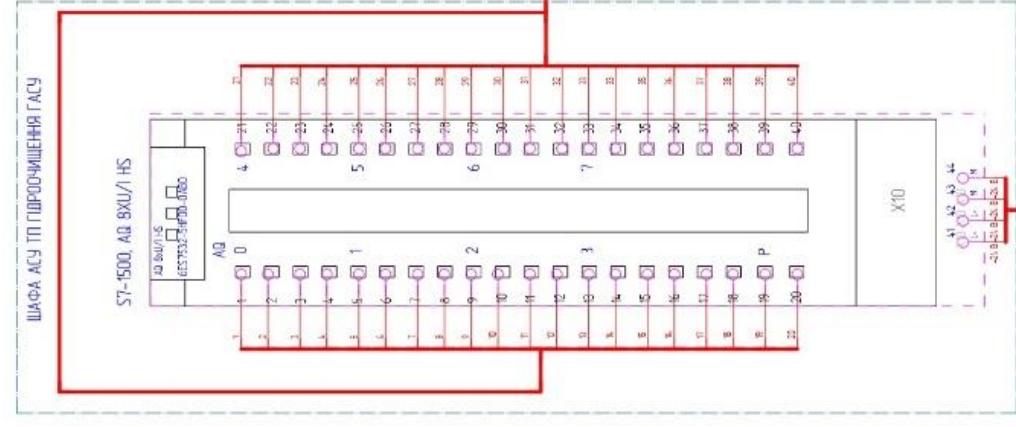
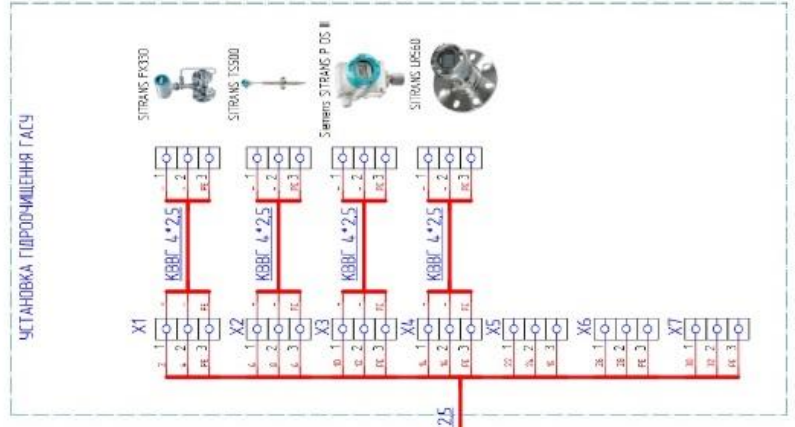
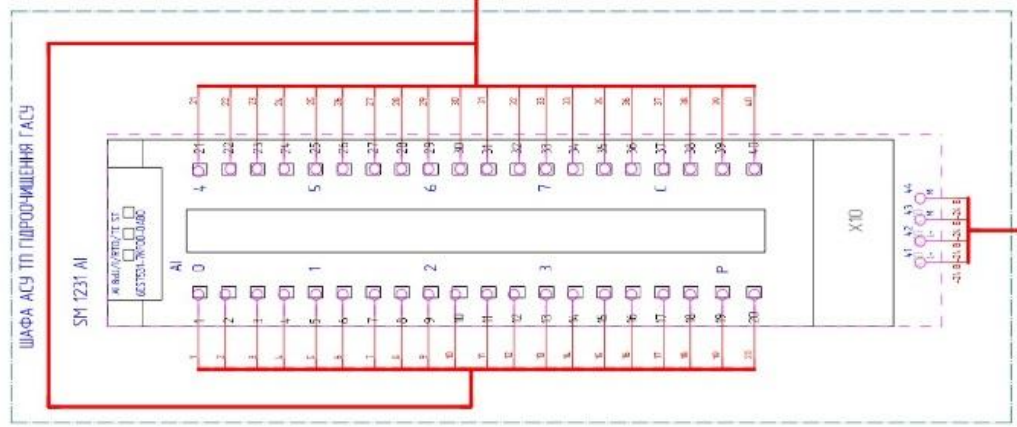
Схема зовнішніх з'єднань

Лім.	Арк.	Аркуші
	5.а	11

АКП-21-1, ІФНТУНГ



50.000000060-1/ЖУ-РФ



Ред.	Листів	№ Всього	Лист	Листів	Масштаб
Розробив	Кур'єв	Кур'єв			1:1
Перевірив	Кучеренко ІВ	Кучеренко ІВ			
Рецензент	Царів ІІ	Царів ІІ			
Коректор	Корінець	Корінець			
Начальник	Кучеренко ІВ	Кучеренко ІВ			
Затвердив	Лазарів А І	Лазарів А І			

БР. АКП-09.00.00.000 05

Автоматизація установки збірочислення газу

Схема зовнішніх підключень

Листов 5б Аркшвид 11
 АКП-21-1, ІФНТУНГ
 ЕР-ПЛАН

Перш. використ

Спроб. №

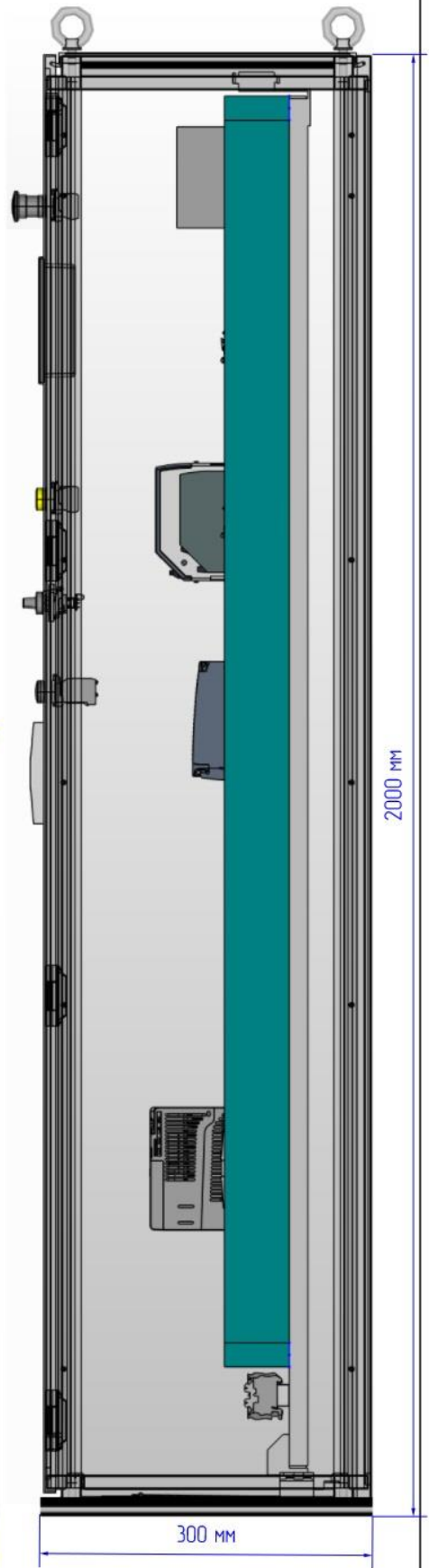
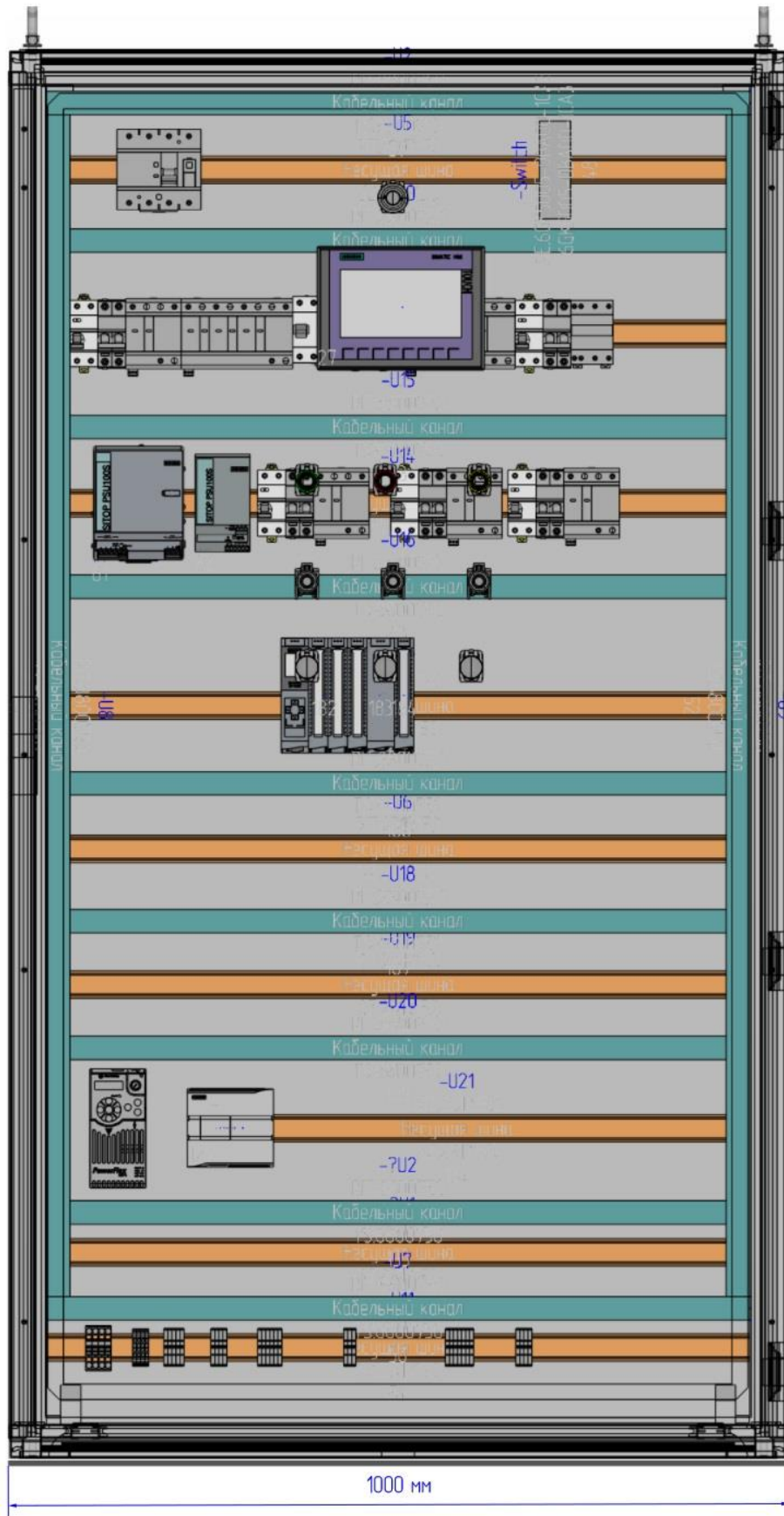
Підп. та дата

Інв. № дубл

Зам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № орг.



Зм.	Арк.	№ докум	Підп	Дата
Разроб		Куч Р.А.		
Перебiрив		Кучмистенко О.В.		
Рецензент		Чижур ІІ		
Керiвник				
Н.контр		Кучмистенко О.В.		
Замбедив		Лазаріда А.І.		

БР. АКП-09.00.00.000 06

Схема шафи АСК

Літ.	Арк.	Аркуші
	6	11

АКП-21-1, ІФНТУНГ