

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ

Група АКП-21-1

Олег Парипа

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

Парипа Олег Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.53

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю

(назва роботи)

термічним розкладанням

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

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

О.М. Парипа

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(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 АКІТ.

А.І. Лагойда

« » 2025 року

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

Парипа Олег Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням

керівник роботи Лагойда Андрій Іванович к.т.н., доцент

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

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

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики,

методичні вказівки, технічна література, інтернет-ресурс.

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

вуглецю термічним розкладанням як об'єкта автоматичного контролю і

керування. 2 Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування.

3 Синтез та аналіз системи автоматичного керування. 4 Розробка проектної

складової САК. Загальні висновки. Перелік посилань на джерела.

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

Лист 1 – Технологічна схема виробництва технічного вуглецю – БР.АКП-16.00.00.001

Лист 2 – Функціональна схема системи автоматизації виробництва технічного

вуглецю – БР.АКП-16.00.00.002

Лист 3 – Принципова схема підключення електроживлення до монтажної шафи

системи автоматизації – БР.АКП-16.00.00.003

Лист 4 – Принципова електрична схема підключення обладнання системи

автоматизації – БР.АКП-16.00.00.004

Лист 5 – Специфікація обладнання – БР.АКП-16.00.00.005

Лист 6 – Габаритне креслення щита керування системи автоматизації –

БР.АКП-16.00.00.006

Лист 7 – 3D-модель внутрішнього компонування щита керування –

БР.АКП-16.00.00.007

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Лагойда Андрій Іванович, доцент		
2	Лагойда Андрій Іванович, доцент		
3	Лагойда Андрій Іванович, доцент		
4	Лагойда Андрій Іванович, доцент		

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням як об'єкта автоматичного контролю і керування	13.05.2025 р.	
2	Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування	20.05.2025 р.	
3	Синтез та аналіз системи автоматичного керування	30.05.2025 р.	
4	Розробка проектної складової САК	11.06.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

О.М. Парипа _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

А.І. Лагойда _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 96 сторінок друкованого тексту, 34 рисунків, 6 таблиць, 10 посилань на джерела.

Тема: «Автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням».

Об'єкт дослідження: процес термічного розкладу вуглеводневої сировини у циклонному реакторі.

Мета роботи: розробка автоматизованої системи керування процесом виробництва технічного вуглецю з метою підвищення стабільності технологічного процесу, зменшення енерговитрат та забезпечення високої якості продукції. У роботі застосовано сучасні технічні засоби автоматизації та програмне моделювання систем керування.

Методи дослідження: математичне моделювання об'єкта керування, лінеаризація рівнянь, аналіз передатних функцій, перевірка стійкості системи за критерієм Михайлова, імітаційне моделювання в середовищі MATLAB Simulink.

Результати бакалаврської роботи: здійснено опис технологічного процесу та вибір параметрів регулювання. Побудовано математичну модель циклонного реактора, проведено її лінеаризацію та отримано передатні функції. Змодельовано одноконтурну та каскадну САК, підібрано параметри ПІ-регуляторів, проведено аналіз перехідних і імпульсних характеристик. Розроблено функціональну та принципову схеми автоматизації, виконано підбір обладнання і створено 3D-модель щита керування. Система показала високу ефективність за результатами моделювання.

Ключові слова: технічний вуглець, автоматизація, САК, термічний розклад, моделювання, ПІ-регулятор.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 96 pages of printed text, 34 figures, 6 tables, 10 references.

Title: "Automation of Carbon Black Production by Thermal Decomposition".

Object of research: the process of hydrocarbon thermal decomposition in a cyclone reactor.

The objective of the bachelor's thesis: to design an automated control system for the carbon black production process, aimed at increasing process stability, reducing energy consumption, and improving product quality. The work uses modern automation equipment and software modeling of control systems.

Research methods: mathematical modeling of the control object, linearization of equations, transfer function analysis, stability check using the Mikhailov criterion, and simulation in MATLAB Simulink.

Results of the thesis: the technological process was analyzed, control parameters were selected. A mathematical model of the cyclone reactor was built, linearized, and its transfer functions derived. Single-loop and cascade ACSs were modeled, with PI-controller parameters selected based on dynamic criteria. Functional and principle wiring diagrams were developed, equipment specified, and a 3D model of the control panel created. Simulation results demonstrated high efficiency of the proposed system.

Keywords: carbon black, automation, ACS, thermal decomposition, modeling, PI-controller.

ЗМІСТ

ВСТУП		9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ТЕХНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ ТЕРМІЧНИМ РОЗКЛАДАННЯМ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ		11
1.1 Призначення установки та суть процесу.....		11
1.2 Характеристика продукції, сировини та реагентів.....		13
1.3 Аналіз технологічної схеми установки виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням.....		17
1.4 Технічна характеристика технологічного обладнання.....		20
1.4.1 Вологовипарник.....		20
1.4.2 Піновіддільник.....		20
1.4.3 Відцентровий насос.....		20
1.4.4 Безполуменевий підігрівник.....		21
1.4.5 Фільтр тонкого очищення.....		21
1.4.6 Циклонний реактор.....		21
1.4.7 Повітропідігрівник.....		21
1.4.8 Колектор.....		22
1.4.9 Холодильник-зрошувач.....		22
1.5 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання.....		22
Висновки до розділу.....		23

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Парипа О.М.						
Перевір.		Лагойда А.І					6	96
Реценз.		Кучмистенко О.В.				АКП-21-1 ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

4.1.8 Регулюючий клапан Siemens VXF42 з електроприводом SAX61.	71
4.1.9 Блок живлення Mean Well HDR-150-24.....	73
4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	74
4.3 Розробка додаткових проектних рішень.....	79
Висновки до розділу.....	87
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	88
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	89
Додаток А – Технологічна схема виробництва технічного вуглецю..	90
Додаток Б – Функціональна схема системи автоматизації виробництва технічного вуглецю.....	91
Додаток В – Принципова схема підключення електроживлення до монтажної шафи системи автоматизації.....	92
Додаток Г – Принципова електрична схема підключення приладів...	93
Додаток Д – Специфікація обладнання.....	94
Додаток Е – Габаритне креслення щита керування системи автоматизації.....	95
Додаток Ж – 3D-модель внутрішнього компонування щита керування.....	96

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

У сучасному світі промисловість стрімко розвивається, що обумовлює необхідність переходу від застарілих методів управління виробництвом до новітніх технологій, орієнтованих на автоматизацію та цифровізацію процесів. Автоматизація є важливим інструментом підвищення продуктивності, енергоефективності та конкурентоспроможності промислових підприємств. Особливої уваги заслуговують хімічні виробництва, які є складними з точки зору технології, потребують точного дотримання режимів і характеризуються значним енергоспоживанням та екологічною відповідальністю.

Одним із важливих продуктів хімічної промисловості є технічний вуглець (сажа), що використовується як наповнювач у виробництві шин, гумових виробів, пластмас, а також у металургії, фармацевтиці та лакофарбовій промисловості. Основним методом його отримання є термічний розклад вуглеводневої сировини (метану, природного газу, нафтових фракцій) в умовах високих температур (1200–1600 °С) з обмеженим доступом кисню. Цей процес є складним і енергомістким, вимагає суворого дотримання технологічних параметрів, таких як температура, тиск, витрата сировини, швидкість подачі газу та інші.

У зв'язку з цим проблема забезпечення стабільності процесу та високої якості кінцевого продукту потребує впровадження сучасних засобів автоматизації. Ручне керування, яке ще досі застосовується на багатьох підприємствах, не здатне забезпечити необхідну точність, оперативність та адаптивність до змін зовнішніх умов. Використання автоматизованих систем керування дозволяє не тільки стабілізувати технологічний процес, але й значно зменшити енергоспоживання, знизити аварійність, зменшити кількість браку та покращити умови праці обслуговуючого персоналу.

Таким чином, автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням є актуальним і необхідним завданням, що відповідає загальній тенденції розвитку промислової автоматизації та цифрових технологій.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Метою даної бакалаврської роботи є розробка системи автоматизації процесу термічного розкладу вуглеводнів для отримання технічного вуглецю, що базується на сучасних підходах до проектування систем керування та використанні ефективних технічних засобів автоматизації.

Для досягнення цієї мети в роботі розглянуто:

- особливості та фізико-хімічні основи процесу термічного розкладу сировини;
- типові схеми технологічного процесу виробництва технічного вуглецю;
- вимоги до автоматизації виробництва та критерії вибору об'єктів керування;
- розроблено структурну та принципову схеми автоматизації;
- підібрано технічні засоби автоматизації з урахуванням вимог надійності, точності та економічної доцільності.

Наукова новизна роботи полягає в системному підході до автоматизації специфічного процесу термічного розкладу, врахуванні сучасних технічних рішень та потенціалі їх впровадження у виробничих умовах.

Практичне значення полягає у можливості використання розробленої системи автоматизації на підприємствах хімічної промисловості з метою покращення технологічного процесу, підвищення ефективності виробництва та забезпечення стабільної якості продукції.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ТЕХНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ ТЕРМІЧНИМ РОЗКЛАДАННЯМ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ

1.1 Призначення установки та суть процесу

Технічний вуглець є високодисперсним аморфним вуглецем, який відіграє ключову роль у низці промислових галузей: гумовій, шинній, лакофарбовій, пластмасовій, електротехнічній та ін. Він застосовується як наповнювач для покращення механічних характеристик гуми, як пігмент для чорнил і фарб, як провідникова добавка для полімерів тощо. Виробництво технічного вуглецю є енергоємним процесом, що базується на термічному розкладанні вуглеводневої сировини в умовах високих температур та обмеженого доступу кисню.

Установка для виробництва технічного вуглецю призначена для реалізації процесу піролізу (термодеструкції) органічної сировини з подальшим виділенням і охолодженням вуглецевмісного продукту у вигляді сажі. Зазвичай як сировину використовують газоподібні або рідкі вуглеводні: природний газ, нафтові залишки, піролізні смоли, ароматичні вуглеводні. Процес відбувається у спеціалізованих реакторах — пічного або циклонного типу, які дозволяють досягати необхідних температур (від 1300 до 1600 °С) та забезпечують швидке розкладання молекул вуглеводнів.

Продуктом цього процесу є дрібнодисперсний вуглець у формі сферичних частинок — глобул, що з'єднуються в агрегати та утворюють більш складні структури — флокули. Хімічно технічний вуглець складається переважно з атомів вуглецю, однак також може містити домішки кисню, сірки, азоту. Властивості технічного вуглецю, такі як питома поверхня, сорбційна здатність, електропровідність, дисперсність, безпосередньо залежать від умов протікання процесу — температури, часу перебування сировини в реакторі, співвідношення компонентів у сировинній суміші.

Установка передбачає декілька послідовних етапів:

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- Підготовка сировини — включає її підігрів, зневоднення у вологовипарнику, очищення у фільтрах.
- Подавання в реактор — здійснюється через форсунки, що забезпечують розпилення сировини у високотемпературному середовищі.
- Реакційна зона — відбувається власне термічний розклад у циклонному або трубчастому реакторі.
- Охолодження — подача хімічно очищеної води для миттєвого припинення реакцій і стабілізації структури частинок.
- Сепарація продукту — вловлювання технічного вуглецю за допомогою циклону, фільтрів та зрошувачів.

Типова установка складається з ряду технологічних вузлів: вологовипарника, піновіддільника, безполуменевого підігрівника, циклонного реактора, повітропідігрівача, колектора, холодильника-зрошувача. Усі ці елементи є взаємозалежними в єдиному технологічному потоці. Принцип їхньої роботи полягає у поетапному підвищенні температури сировини до необхідного рівня, її розкладанні в реакторі, а далі — охолодженні продукту та відділенні твердої фази від газів.

Термін «технічний вуглець» не слід плутати зі звичайною сажею, яка утворюється в умовах неконтрольованого горіння. Технічний вуглець — це продукт, який виробляється у точно контрольованих технологічних умовах, із суворим дотриманням температурного режиму, витрат сировини та повітря, що дозволяє отримати продукцію з заданими фізико-хімічними властивостями. Його дисперсність (розмір частинок) може варіюватися в межах 13–120 нм, питома поверхня — від 10 до 500 м²/г, а шорсткість поверхні частинок визначає адсорбційну активність і можливість хімічної модифікації.

Сучасне виробництво технічного вуглецю включає декілька способів: пічний, ламповий, термічний, каналний, а також методи подрібнення твердих залишків піролізу. Найбільш розповсюдженим є пічний спосіб, який забезпечує високу якість продукту, стабільність процесу та можливість гнучкого

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання параметрів. Перевагами цього методу є низькі викиди шкідливих речовин, можливість використання відходів піролізу, а також високий ступінь автоматизації.

У промисловому масштабі виробництво технічного вуглецю здійснюється на спеціалізованих установках, розташованих на підприємствах нафтохімічної промисловості. Потужні виробництва технічного вуглецю існують в Україні — зокрема, Кременчуцький та (раніше) Стаханівський завод технічного вуглецю. Технологічний процес має велике значення для національної економіки, оскільки продукція використовується в шинній та гумотехнічній галузях, на які припадає до 90% всього обсягу застосування.

Таким чином, призначення установки полягає в реалізації керованого та стабільного процесу термічного розкладу вуглеводневої сировини для отримання технічного вуглецю із заданими фізико-хімічними характеристиками. Процес вимагає чіткого регулювання температурних режимів, витрат реагентів, а також ефективного вловлювання та охолодження продукту. Забезпечити ці умови можливо лише за умови впровадження автоматизованої системи керування, що й визначає актуальність дослідження об'єкта як системи автоматичного контролю.

1.2 Характеристика продукції, сировини та реагентів

Основною сировиною для отримання технічного вуглецю є вуглеводневі сполуки, які при високих температурах розкладаються з утворенням аморфного вуглецю. До таких речовин належать природний газ, мазут, дизельне паливо, піролізні смоли, ароматичні вуглеводні, газойлі крекінгу тощо. Процес одержання вуглецю передбачає подачу цих компонентів у реактор, де вони розпилюються пневматичними або механічними форсунками в потік гарячих продуктів згоряння, створюючи умови для термічного розкладу — піролізу.

Технічний вуглець, або вуглецева сажа, є високодисперсним аморфним вуглецем, що виробляється в промислових масштабах. Частинки технічного вуглецю мають форму сферичних глобул, які складаються з деградованих

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

графітоподібних шарів. Міжплощинна відстань у цих шарах становить від 0,35 до 0,365 нм (для порівняння, у кристалічного графіту — 0,335 нм). Величина цієї відстані є показником ступеня аморфності продукту.

Розмір частинок варіюється від 13 до 120 нм, що обумовлює рівень дисперсності. Цей показник впливає на питому поверхню, яка, в свою чергу, визначає адсорбційну активність та інші функціональні властивості матеріалу. Питома поверхня технічного вуглецю становить 5–150 м²/г. Поверхня глобул є шорсткою, що обумовлює високий ступінь зв'язування молекул, наприклад, залишків вуглеводнів або функціональних груп — COOH, OH, C=O тощо.

Окрім атомів вуглецю, у складі технічного вуглецю можуть бути присутні атоми сірки, кисню та азоту. Густина частинок становить 1,76–1,9 г/см³. Насипна густина у пластівцевих агрегатах зазвичай становить 30–70 кг/м³. Для зручності транспортування та зберігання продукт гранулюється до щільності 300–600 кг/м³.

У межах даного дослідження використовувалася сировина для виробництва марки П705, яка відповідає вимогам ГОСТ 7885 і має наступні параметри:

- Питома поверхня — 23×10^3 м²/кг;
- Поглинання масла — 110×10^{-5} м³/кг;
- Насипна густина — 320 кг/м³.

Сама вуглецева сажа формується внаслідок неповного згоряння органічних речовин або їх термічного розкладу в обмежених умовах доступу кисню. При цьому утворюється аерозоль, частинки якого осідають на фільтрах і далі збираються, сушаться, гранулюються. Оскільки в процесі відсутній кисень, вуглець не перетворюється на CO₂, а лишається в твердому стані.

Одним із критичних показників, що визначають придатність сировини, є здатність до коксування. Раніше вітчизняна сировина мала граничне допустиме коксування до 1,5%, що обмежувало використання ароматичних сполук із високою здатністю до утворення коксу. Проте дослідження показали, що при

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

підвищенні температури реакції та швидкості турбулентного потоку в зоні розкладу рівень коксування значно знижується. Це дозволило впровадити нові види сировини: важкі піролізні смоли з коксуванням 8–12% і газойлі крекінгу з показником 4–8%.

Ще один суттєвий параметр — вміст сірки, який у сировині не повинен перевищувати 2,0–2,5%. У готовому технічному вуглеці вміст сірки повинен бути не більше 1%. При цьому варто враховувати, що підвищення дисперсності призводить до зростання вмісту сірки в продукті. Саме тому для високоактивних марок, наприклад, N220, вміст сірки в сировині обмежується 2%. Для середньодисперсних марок, таких як N330 або N550, допустиме значення сягає 2,5%.

Також пред'являються вимоги до вмісту механічних домішок — він не повинен перевищувати 0,05%, а розмір часток — не більше 45 мкм.

У сучасному виробництві понад 96% технічного вуглецю отримується пічним методом, який є найбільш контрольованим і автоматизованим. Переваги цього способу:

- можливість точного регулювання всіх параметрів процесу;
- широкий діапазон регулювання властивостей готового продукту;
- ефективне використання теплоти, зокрема через рекуперацію;
- зменшення обсягів викидів в атмосферу;
- повна автоматизація технологічного циклу.

Існує велика кількість марок технічного вуглецю, які відрізняються за розміром частинок, питомою поверхнею, поглинальною здатністю та сферою застосування. У таблиці нижче наведено приклади таких марок та їх основне призначення.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Таблиця 1.1 — Властивості та напрямки використання деяких марок технічного вуглецю

Марка технічного вуглецю	Рекомендований напрям використання
N220	Додавання підсилюючої домішки до гуми високої зносостійкості сприяє збільшенню межі міцності та опору на розрив. Цей компонент широко використовується для виготовлення високоякісних протекторних шин для всіх видів автомобілів, а також протекторних заготовок для відновлення. Він також застосовується для створення високоякісних гумових формованих виробів, які використовуються в умовах з високими навантаженнями або надмірним зношуванням.
N330	Додавання підсилюючої домішки до гуми високої зносостійкості призводить до підвищення міцності матеріалу і зменшення гістерезису. Використовується для виготовлення протекторних шин для автомобілів, сільськогосподарських машин та транспортерних стрічок. Крім того, він також застосовується для виготовлення кабельної ізоляції та формованих виробів.
N339	Підсилююча домішка застосовується у виробництві протекторних шин для автомобілів та сільськогосподарських машин, транспортерних стрічок, а також для виготовлення кабельної ізоляції і формованих виробів.
N375	Підсилююча домішка, що додає гумам високої зносостійкості, збільшує межу міцності та опір на розрив. Широко використовується для виготовлення брекерних гум, конвеєрних стрічок, для гумовотехнічних ущільнювачів та формувальних виробів.
N550, N650	Напівпідсилююча домішка застосовується для додавання гумам середньої жорсткості та пружності. Вона має відмінні профілюючі властивості. Ця домішка широко використовується у виготовленні каркасних та брекерних шин, а також для виробництва камер, профілюючих виробів і гумових ущільнювачів.

Таким чином, вибір сировини та контроль її параметрів є критично важливим для ефективної роботи установки з виробництва технічного вуглецю. Оптимізація складу, температурних умов та швидкісних характеристик процесу дозволяє не лише отримувати продукт з необхідними властивостями, а й знижувати витрати енергоресурсів, забезпечувати екологічну безпеку та стабільність виробничого циклу.

1.3 Аналіз технологічної схеми установки виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням

Процес отримання технічного вуглецю в даній установці реалізується методом високотемпературного термічного розкладу вуглеводневої сировини за умов неповного турбулентного горіння. Основною метою є утворення дрібнодисперсного аморфного вуглецю — технічного вуглецю, який складається з майже сферичних субмікроскопічних частинок розміром від 9 до 600 нм, що з'єднуються у складні структурні агрегати. Такий матеріал використовується переважно у виробництві шин, гумових виробів, пластмас та іншої продукції, що потребує підвищених механічних характеристик.

Процес організовано у вигляді послідовної обробки сировини у декількох функціональних відділеннях, кожне з яких виконує чітко визначену технологічну функцію. Згідно з технологічною схемою рис. 1.1 (див. додаток А), установка включає наступні вузли:

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

направляється далі на охолодження. Для запобігання вторинному згорянню вуглецю в певній точці реактора подається очищена вода, яка миттєво знижує температуру середовища.

Слід зазначити, що на одному технологічному потоці може бути встановлено до восьми циклонних реакторів з продуктивністю до 500 кг/год сировини. З них, як правило, одночасно працює 5–7, решта перебуває у резерві або на технічному обслуговуванні. При використанні потужніших реакторів (до 1500 кг/год) застосовується три реактори, з яких два — постійно в роботі, а один — резервний.

Надлишок сировини, яка не увійшла до реактора, зворотним трубопроводом повертається у вологовипарник (1), що забезпечує замкненість технологічного циклу та підвищує економічність процесу.

Вловлювання та охолодження продукту. Охолоджена сажегазова суміш із реакторів проходить знову через повітропідігрівник (7), де частково передає тепло потоку повітря, й далі прямує в колектор (8), що виконує функцію об'єднуючого каналу для кількох реакторів. Із колектора суміш надходить у холодильник-зрошувач (9), де остаточно охолоджується до температур, безпечних для подальших стадій механічного відокремлення сажі від газів.

Інші відділення за межами зображеної схеми. У подальшому (за межами базової технологічної схеми) технічний вуглець проходить стадії вловлювання, гранулювання, сушіння, очищення та складування. Для цього використовуються циклони, рукавні фільтри, змішувачі-гранулятори, барабанні сушарки, елеватори та інше обладнання. Готовий продукт подається на зберігання або пакується у відповідну тару.

Таким чином, аналіз технологічної схеми демонструє високий ступінь структурованості та безперервності процесу, що дозволяє ефективно керувати кожною стадією за допомогою автоматизованих засобів. Поділ установки на окремі функціональні блоки забезпечує технологічну гнучкість, можливість

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

локальної оптимізації та високий рівень контролю над кінцевими властивостями продукції.

1.4 Технічна характеристика технологічного обладнання

Технологічна установка для виробництва технічного вуглецю складається з низки функціонально пов'язаних апаратів і вузлів, кожен із яких виконує певну роль у загальному процесі термічного розкладу сировини. Ефективність та стабільність роботи всієї системи залежать від правильного підбору, точного регулювання та технічного стану окремого обладнання. Нижче наведено опис основних елементів технологічної схеми (рис. 1.1) з їх характеристиками та функціональним призначенням.

1.4.1 Вологовипарник

Цей апарат призначений для видалення надлишкової вологи із сировини перед її подальшим нагріванням і розкладом. Конструктивно вологовипарник може бути виконаний у вигляді горизонтального або вертикального резервуара з підігрівом. Його робота забезпечує стабільність подачі сировини в реактор і запобігає виникненню несанкціонованих фазових переходів. Працює у зв'язці з піновіддільником.

1.4.2 Піновіддільник

Встановлюється після вологовипарника й слугує для відділення піни, що утворюється під час дегідратації сировини. Має вихід в атмосферу для виведення пари. Захоплена піна повертається у вологовипарник, що дозволяє зменшити втрати сировини та стабілізувати рівень вологи в системі.

1.4.3 Відцентровий насос

Забезпечує перекачування сировини між стадіями підготовки. Насос створює необхідний тиск і витрату, що підтримує стабільність процесу.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Виготовляється з хімічно стійких матеріалів з урахуванням температурного та абразивного впливу.

1.4.4 Безполумєневий підігрівник

Це високоефективний теплообмінний апарат, який дозволяє підняти температуру сировини до 270–320 °С без відкритого полум'я. Такий тип нагріву забезпечує рівномірність температурного поля, запобігає локальному перегріванню й знижує ризик передчасного розкладання компонентів сировини.

1.4.5 Фільтр тонкого очищення

Призначений для видалення механічних домішок із сировинного потоку перед подачею в реактор. Зазвичай застосовують сітчасті або картриджні фільтри, стійкі до високих температур і тиску. Якість очищення визначає довговічність реакторного обладнання.

1.4.6 Циклонний реактор

Ключовий вузол установки, в якому безпосередньо відбувається розклад вуглеводневої сировини під дією високої температури. Реактор має циклонну геометрію, яка забезпечує турбулентність потоку та інтенсивний теплообмін. Установка передбачає кілька реакторів на одному потоці для забезпечення неперервності виробництва. Для оптимізації якості вуглецю передбачено зони введення води для швидкого охолодження суміші.

1.4.7 Повітропідігрівник

Служить для нагріву повітря, що подається до пальників або безпосередньо в реакційну зону. Це дозволяє покращити горіння палива (паливного газу), зменшити теплові втрати й забезпечити потрібну температуру в зоні розкладу. Зазвичай має рекуперативну конструкцію, яка використовує тепло відхідних газів.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

1.4.8 Колектор

Збирає сажегазову суміш із декількох реакторів і подає її далі до охолодження. Конструкція колектора повинна забезпечувати рівномірність потоку, мінімізувати гідравлічні втрати та витримувати високі температури.

1.4.9 Холодильник-зрошувач

Використовується для швидкого зниження температури суміші після реакції. Забезпечує стабілізацію стану частинок технічного вуглецю, запобігає вторинним реакціям і зносу подальшого обладнання. Вода подається у вигляді дрібнодисперсного розпилення.

Кожен елемент схеми відіграє критичну роль у забезпеченні ефективного, стабільного та безпечного виробництва технічного вуглецю. Саме ретельний підбір технічних параметрів обладнання дозволяє забезпечити відповідність продукції стандартам якості та економічну доцільність процесу.

1.5 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання

У процесі виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням сировини реалізовано автоматичний контроль і регулювання ряду критичних параметрів, які безпосередньо впливають на стабільність технологічного режиму, ефективність перетворення сировини та якість кінцевого продукту.

До параметрів, які підлягають автоматичному регулюванню, належить рівень у піновіддільнику, що визначає стабільність гідравлічного режиму перед подачею сировини до реактора. Регулювання забезпечує запобігання переливанню або недостатньому накопиченню сировини.

Температурні параметри регулюються в кількох зонах: у безполуменовому підігрівнику — для підтримки заданих умов нагрівання сировини; у циклонному реакторі — як основний фактор, що визначає швидкість та ступінь реакції; у холодильнику-зрошувачі — з метою зниження температури продуктів до безпечного рівня перед наступними етапами.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Регулювання витрати сировини після фільтра дозволяє точно дозувати її подачу до реакційної зони. Витрати повітря і паливного газу регулюються для формування оптимального складу робочої суміші, що подається до підігрівача і реактора, та забезпечення необхідного теплового балансу.

Окрім зазначених регульованих параметрів, система забезпечує контроль значень, що не входять до контурів регулювання, але важливі для оперативного моніторингу та діагностики. Зокрема, здійснюється контроль тиску у підігрівнику, температури у вологовипарнику, а також концентрації вуглецю у відхідних газах. Ці параметри не регулюються автоматично, однак їх значення аналізуються оператором і можуть бути підставою для ручної корекції режиму.

Таким чином, вибір параметрів контролю і регулювання здійснено з урахуванням їх впливу на ключові фізико-хімічні процеси, техніко-економічні показники роботи установки, а також вимоги до безпеки та екологічності. Застосування автоматизованих контурів дозволяє знизити похибки регулювання, зменшити вплив людського фактора та забезпечити стабільність технологічного процесу.

Висновки до розділу

У розділі проведено детальний аналіз технологічного процесу виробництва технічного вуглецю методом термічного розкладу. Визначено основні стадії процесу, властивості сировини та вимоги до готового продукту. Розглянуто структуру технологічної установки, склад обладнання та параметри, які підлягають контролю та регулюванню. Обґрунтовано необхідність впровадження автоматизації для підвищення стабільності, ефективності та якості продукції, а також зменшення енерговитрат і впливу людського фактора.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Циклонний реактор як технологічний об'єкт керування

Основним елементом технологічної лінії з отримання технічного вуглецю є реактор або піч, у яких безпосередньо реалізується процес сажоутворення. Конструктивні особливості реактора суттєво впливають на фізико-хімічні характеристики готового продукту, а також на рівень виходу технічного вуглецю. На рисунку 2.1 представлено типовий перелік конструкцій реакторів, що застосовуються у промислових умовах для реалізації цього процесу.

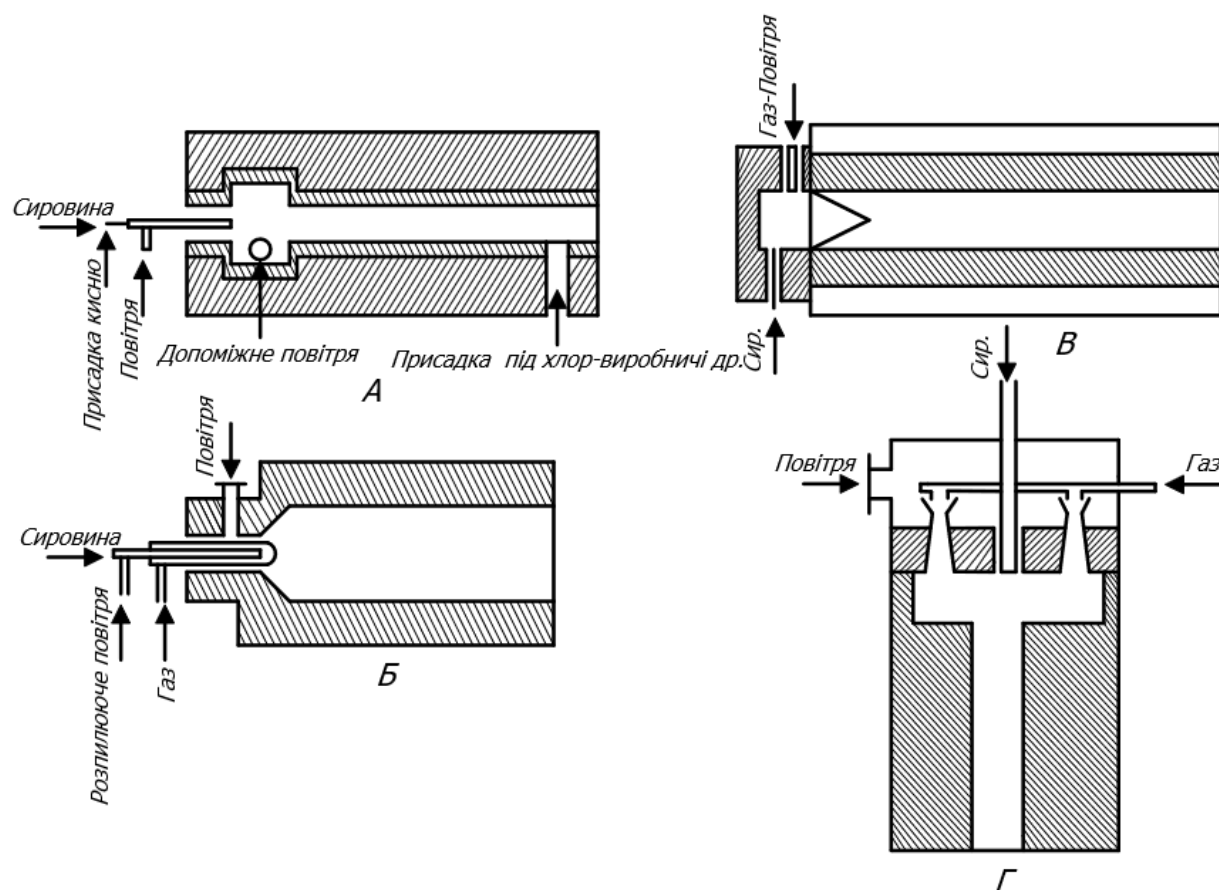


Рисунок 2.1 — Реактори для отримання сажі: А) – циклонного типу з двома каперами; Б) і В) – циліндричного типу; Г) – вертикального типу.

Механізм утворення сажі в реакторі полягає у подачі розпиленого вуглеводневого матеріалу, який зазвичай попередньо нагрівається. Процедура

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

розпилення може здійснюватись двома способами: механічним — за рахунок тиску самої сировини, або пневматичним — за допомогою стисненого повітря.

Необхідна температура в зоні розкладу забезпечується за рахунок часткового згоряння самої сировини або спалюванням окремого горючого газу, який подається в реактор. Для повноцінного розкладу органічних молекул на вуглець і водень необхідно генерувати в реакційному об'ємі теплову потужність в межах 7000–10000 ккал на 1 м³ реакторного простору.

Сировину, повітря і паливо зазвичай подають з декількох напрямків, що створює в реакторі турбулентне змішування і багатозонне полум'я. Саме у центральній зоні інтенсивного теплового поля відбувається основний процес піролізу.

Регулювання співвідношення компонентів (сировини, повітря, пального газу) дозволяє керувати якісними характеристиками одержуваної сажі. Наприклад, збільшення кількості поданого повітря при сталому витратному режимі сировини призводить до підвищення температури реакційного середовища. Це, у свою чергу, спричиняє прискорення процесу розкладу вуглеводнів, що дає більш дисперсний продукт, хоча загальний вихід вуглецю при цьому зменшується.

Таким чином, конструкція реактора, спосіб подачі реагентів та температурний режим є критичними факторами, що визначають ефективність процесу сажоутворення та властивості отриманого технічного вуглецю.

Таблиця 2.1 містить порівняльні дані щодо геометричних розмірів, температури процесу, часу перебування та виходу сухих речовин для реакторів різної конфігурації

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Таблиця 2.1 Порівняльна характеристика реакторів та виготовлюємих у них саж (Кількість сировини, що надходить в реактор – 450 кг / год).

Конфігурація та розміри реакторів	Діаметр реактора, мм	Об'єм реактора, м ³	Об'єм реакційної зони, м ³	Температура в реакторі, °С	Швидкість потоку, м/год	Час перебування в реактрі, год	Вихід сухих речовин, %
	1500	5,264	3,9	2,09	1,42	73,1	1,18
	880	2,690	3,5	5,53	0,8	71,7	1,07
	600	0,198	3,0	45,1	0,063	63,9	0,89

Як видно з наведених у таблиці 2.1 даних, зменшення об'єму реакційної зони при незмінному об'ємі поданої сировини до реактора спричиняє низку суттєвих змін у гідродинаміці процесу. Зокрема, питома витрата повітря на одиницю маси сировини знижується з 3,9 до 3,0 м³/кг. Водночас швидкість газового потоку в реакторі зростає у десятки разів — від 2,03 до 45,1 м/с. Це призводить до різкого скорочення часу перебування сажогазової суміші у реакційній зоні — з 1,42 до 0,063 с.

Подібне скорочення часу контакту реакційної маси зі зоною термічного впливу забезпечує збільшення виходу технічного вуглецю практично без втрати дисперсності частинок. Проте структурованість сажі та шорсткість її поверхні в таких умовах можуть знижуватись, що пов'язано з обмеженим часом формування агрегатів та укрупнення глобул.

З-поміж різних типів термічних апаратів, циклонні реактори вважаються найбільш ефективними та універсальними при реалізації процесів, пов'язаних з

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ				

високотемпературним розкладанням органічних сполук або спалюванням відходів. Їх основною перевагою є унікальна аеродинамічна структура потоку — вихровий рух газової фази, який забезпечує високу турбулентність, стабільність полум'я та інтенсивність теплообміну.

Завдяки такій гідродинаміці, у циклонних реакторах досягається високий ступінь теплового використання палива при мінімальних надлишках повітря. Це суттєво зменшує теплові втрати, порівняно з традиційними барабанними, шахтними або трубчастими печами, і дозволяє створювати малогабаритні конструкції з питомими навантаженнями, що в рази перевищують навантаження класичних реакторів.

Ще однією суттєвою перевагою циклонних реакторів є можливість використання гарнісажного футерування замість цегляної обкладки. Це не лише знижує тепловтрати через стінки, а й дозволяє ефективно обробляти високомінералізовані відходи. До 80–90% мінеральних компонентів таких відходів можуть бути виведені у вигляді розплаву, що спрощує їх утилізацію.

Компактність, термостійкість і високий рівень тепло- та масообміну дозволяють циклонним реакторам тривалий час експлуатуватись без погіршення техніко-економічних показників, що підтверджує доцільність їх використання в системах автоматизованого виробництва технічного вуглецю.

2.2 Математична модель ТОК

Метою побудови математичної моделі є формалізація динаміки об'єкта керування — циклонного реактора, в якому відбувається процес термічного розкладу вуглеводневої сировини в середовищі гарячих продуктів згоряння. Така модель дозволяє дослідити вплив вхідних дій та збурень на вихідні параметри процесу, а також є основою для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання.

У даному випадку, як керуючі впливи виступають:

- $F_{п.г.}$ — витрата паливного газу;
- $F_{сир.}$ — витрата сировини;

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

- $F_{\text{пов.}}$ — витрата повітря.

На виході реактора спостерігаються дві ключові змінні:

- $T_{\text{сум.}}$ — температура сажогазової суміші;
- $Q_{\text{сум.}}$ — концентрація вуглецю у суміші (тобто ступінь перетворення сировини в технічний вуглець).

Крім того, важливим збуренням є:

- $T_{\text{сир.}}$ — температура сировини, що надходить у реактор, яка не контролюється безпосередньо, але істотно впливає на динаміку процесу.

На рисунку 2.2 зображено узагальнену параметричну схему об'єкта керування, побудовану на основі перелічених вхідних та вихідних параметрів.

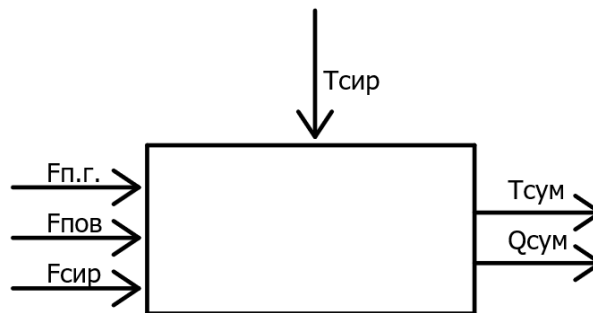


Рисунок 2.2 — Параметрична схема циклонного реактору

Схема ілюструє вплив керуючих дій та збурень на вихідні параметри технологічного процесу. Вона відображає вплив основних вхідних змінних на стан реакційного середовища та на вихідні технологічні показники.

Згідно з представленою схемою, керуючі дії $F_{\text{п.г.}}$, $F_{\text{пов.}}$ та $F_{\text{сир.}}$, а також збурення $T_{\text{сир.}}$, впливають на температуру сажогазової суміші $T_{\text{сум.}}$, яка, у свою чергу, визначає вихідну концентрацію технічного вуглецю $Q_{\text{сум.}}$.

Таким чином, циклонний реактор описується як багатовхідна динамічна система з одним збуренням і двома вихідними змінними, де основним регульованим параметром вважається концентрація вуглецю, а температура суміші — проміжна змінна, що може слугувати каналом для реалізації зворотного зв'язку в системі автоматичного регулювання.

2.3 Рівняння балансів

На рисунку 2.3 подано розрахункову схему циклонного реактора, яка використовується для виведення рівнянь матеріального та енергетичного балансів.

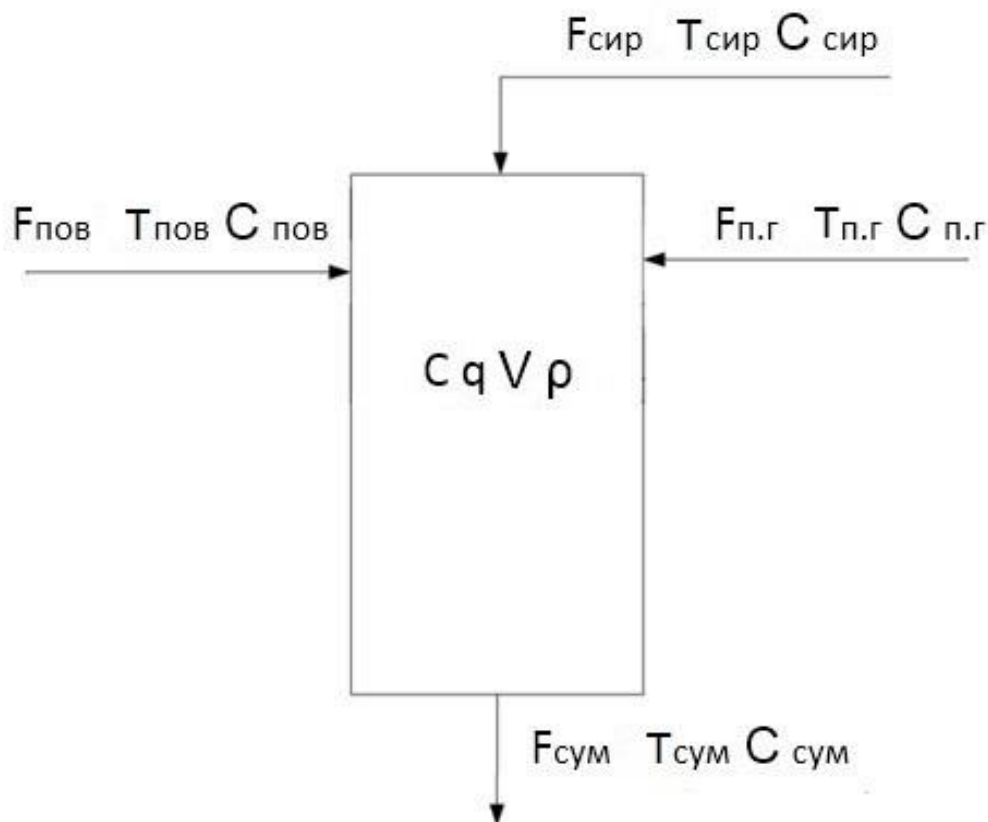


Рисунок 2.3 — Розрахункова схема циклонного реактору

Умовні позначення:

$F_{\text{сир}}$ — масова витрата сировини, що подається до реактора;

$F_{\text{пов}}$ — масова витрата повітря, яке подається для окислення та підтримки горіння;

$F_{\text{п.г.}}$ — масова витрата паливного газу, що надходить до реакційної зони;

$F_{\text{сум}}$ — масова витрата сажогазової суміші на виході з реактора;

$C_{\text{сир}}$ — питома теплоємність сировини, що визначає її здатність акумулювати теплоту;

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

$C_{\text{пов}}$ — питома теплоємність повітря, що враховується при розрахунку теплового балансу;

$C_{\text{п.г.}}$ — питома теплоємність паливного газу, що впливає на ефективність процесу згоряння;

$C_{\text{сум}}$ — питома теплоємність сажегазової суміші на виході з реактора;

$T_{\text{сир}}$ — температура сировини, що подається до реактора;

$T_{\text{пов}}$ — температура повітря на вході в реактор;

$T_{\text{п.г.}}$ — температура паливного газу перед подачею у зону реакції;

$T_{\text{сум}}$ — температура сажегазової суміші на виході з реактора;

$Q_{\text{сир}}$ — концентрація вуглецю у вхідній сировині;

$Q_{\text{сум}}$ — концентрація вуглецю у продуктах реакції на виході з реактора;

V — об'єм реакційної камери, в якій відбувається термічне розкладання;

ρ — густина сажегазової суміші у реакторі;

q — кількість теплоти, яка виділяється в результаті реакції термічного розкладу;

Припущення, прийняті під час моделювання. Під час побудови математичної моделі технологічного процесу термічного розкладу вуглеводневої сировини в циклонному реакторі приймаються такі допущення, які дозволяють спростити опис об'єкта і зосередитися на головних динамічних характеристиках:

– реакційна камера розглядається як об'єм повного перемішування, де температура і концентрація є рівномірно розподіленими у просторі;

– тепло- і масообмін між вхідними потоками відбувається миттєво в межах об'єму реактора;

– теплоємності, густини та витрати усіх потоків вважаються сталими в межах одного режиму;

– вплив концентрації реагентів на швидкість реакції не враховується;

– хімічна реакція відбувається згідно з узагальненою стехіометричною схемою: $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2\text{O} + 18,8 \text{ кДж}$

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження таблиці 2.2

11	Температура паливного газу	$T_{п.г.}$	К	320
12	Температура суміші на виході	$T_{сум}$	К	1800
13	Концентрація вуглецю в сировині	$Q_{сир}$	-	0.015
14	Концентрація вуглецю в суміші	$Q_{сум}$	-	0.95
15	Об'єм реакційної камери	V	$м^3$	2.0
16	Густина сажегазової суміші	ρ	$кг/м^3$	1.8
17	Кількість енергії, що виділяється під час реакції	q	кДж	18800

Типові параметри взято на основі довідкових матеріалів та стандартів, що відповідають умовам промислових реакторів для отримання технічного вуглецю.

Для побудови математичної моделі об'єкта керування — циклонного реактора — необхідно сформулювати рівняння, які описують зміну масових і теплових потоків у реакційному об'ємі. Це дає змогу відобразити залежність між вхідними та вихідними параметрами, а також врахувати внутрішні теплові ефекти процесу.

Масовий баланс у загальному вигляді описується рівністю сумарних потоків речовини:

$$F_{сир} + F_{нов} + F_{н.г.} = F_{сум}, \quad (2.1)$$

де: $F_{сир}$ – витрата сировини;

$F_{нов}$ – витрата повітря;

									Арк.
									32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ				

$F_{n.г}$ – витрата паливного газу;

$F_{сум}$ – витрата суміші на виході з реактора.

Це рівняння означає, що кількість речовини, яка надходить у реактор, дорівнює кількості суміші на виході, за умови відсутності накопичення маси в об'ємі.

Матеріальний баланс по компоненту. Рівняння балансу за вуглецевим компонентом має вигляд:

$$F_{сир} \cdot Q_{сир} = F_{сум} \cdot Q_{сум}, \quad (2.2)$$

де: $Q_{сир}$ — концентрація вуглецю в сировині;

$Q_{сум}$ — концентрація вуглецю у сажогазовій суміші.

Цей баланс дає змогу пов'язати кількість вуглецю, що надійшла в систему, з кількістю вуглецю в продуктах реакції, та використовується при моделюванні концентрації $Q_{сум}$ як вихідної змінної.

Енергетичний баланс реакційного об'єму з урахуванням накопичення теплової енергії в системі має вигляд:

$$\frac{d}{dt}(C_{сум} \cdot \rho \cdot V \cdot T_{сум}) = F_{сир} \cdot C_{сир} \cdot T_{сир} + F_{нов} \cdot C_{нов} \cdot T_{нов} + F_{n.г} \cdot C_{n.г} \cdot T_{n.г} - F_{сум} \cdot C_{сум} \cdot T_{сум} + q. \quad (2.3)$$

Ліва частина описує зміну внутрішньої теплової енергії в об'ємі реактора.

Права частина включає:

- надходження теплоти із сировиною, повітрям та паливом;
- відведення теплоти з вихідною сумішшю;
- додаткове тепло q , що виділяється під час хімічної реакції.

Енергетичний баланс у статичному режимі. У стаціонарному випадку (тобто без змін температури з часом):

$$\frac{dT_{сум}}{dt} = 0 \rightarrow F_{сир} \cdot C_{сир} \cdot T_{сир} + F_{нов} \cdot C_{нов} \cdot T_{нов} + F_{n.г} \cdot C_{n.г} \cdot T_{n.г} + q = F_{сум} \cdot C_{сум} \cdot T_{сум}. \quad (2.4)$$

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Це рівняння використовується при побудові статичної моделі та для подальшої лінеаризації. Всі параметри для цього розрахунку наведені в таблиці 2.2.

Таким чином, сформульовані рівняння балансів дозволяють описати зв'язок між вхідними керуючими діями ($F_{сир}$, $F_{пов}$, $F_{п.г.}$), збуренням ($T_{сир}$) та вихідними змінними моделі — температурою сажегазової суміші ($T_{сум}$) і концентрацією вуглецю ($Q_{сум}$). Ці вирази становлять основу для побудови математичної моделі об'єкта керування у вигляді диференціальних рівнянь у наступному підрозділі.

2.4 Лінеаризація рівнянь

Математична модель циклонного реактора, сформована на основі рівнянь матеріального та теплового балансів, є нелінійною через наявність добутоків змінних, а також дії додаткових джерел тепла q . Для аналізу та побудови системи автоматичного регулювання необхідно лінеаризувати систему в околі робочої точки.

Лінеаризація проводиться методом розкладання у ряд Тейлора першого порядку, де змінні подаються як сума сталого (номінального) значення та відхилення:

$$\Delta F_{сир} = F_{сир} - F_{сир}^0, \Delta F_{пов} = F_{пов} - F_{пов}^0, \Delta F_{п.г.} = F_{п.г.} - F_{п.г.}^0,$$

$$\Delta T_{сир} = T_{сир} - T_{сир}^0, \Delta T_{сум} = T_{сум} - T_{сум}^0, \Delta Q_{сум} = Q_{сум} - Q_{сум}^0.$$

Лінеаризація рівняння теплового балансу. Повна форма теплового балансу в динаміці:

$$\frac{d}{dt}(C_{сум} \cdot \rho \cdot V \cdot T_{сум}) = F_{сир} \cdot C_{сир} \cdot T_{сир} + F_{пов} \cdot C_{пов} \cdot T_{пов} + F_{п.г.} \cdot C_{п.г.} \cdot T_{п.г.} - F_{сум} \cdot C_{сум} \cdot T_{сум} + q.$$

Після підстановки відхилень і нехтування добутками малих величин:

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$V \cdot \rho \cdot C_{\text{сум}}^0 \cdot \frac{d(\Delta T_{\text{сум}})}{dt} = F_{\text{сир}}^0 \cdot C_{\text{сир}} \cdot \Delta T_{\text{сир}} + \Delta F_{\text{сир}} \cdot C_{\text{сир}} \cdot T_{\text{сир}}^0 + \Delta F_{\text{нов}} \cdot C_{\text{нов}} \cdot T_{\text{нов}}^0 + \Delta F_{\text{н.з}} \cdot C_{\text{н.з}} \cdot T_{\text{н.з}}^0 - F_{\text{сум}}^0 \cdot C_{\text{сум}}^0 \cdot \Delta T_{\text{сум}} - \Delta F_{\text{сум}} \cdot C_{\text{сум}}^0 \cdot T_{\text{сум}}^0 + q \quad (2.5)$$

Лінеаризація рівняння матеріального балансу по вуглецю. Початкове рівняння:

$$F_{\text{сир}} \cdot Q_{\text{сир}} = F_{\text{сум}} \cdot Q_{\text{сум}}$$

Після лінеаризації:

$$\Delta F_{\text{сир}} \cdot Q_{\text{сир}} = \Delta F_{\text{сум}} \cdot Q_{\text{сум}}^0 + F_{\text{сум}}^0 \cdot \Delta Q_{\text{сум}} \quad (2.6)$$

Отримана система лінеаризованих рівнянь дозволяє перейти до аналізу динамічних характеристик об'єкта в координатах відхилень від робочої точки. Ці рівняння є основою для подальшої побудови рівнянь у формі Коші, застосування перетворення Лапласа та отримання передатних функцій.

2.5 Рівняння у формі Коші

Після проведеної лінеаризації рівнянь теплового та матеріального балансів у координатах відхилень, систему можна представити у стандартному вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь першого порядку, відомому як форма Коші:

$$\frac{dX(t)}{dt} = A \cdot X(t) + B \cdot U(t), \quad (2.7)$$

де: $X(t)$ — вектор станів (вихідних змінних),

$U(t)$ — вектор вхідних дій (керуючих дій та збурень),

A — матриця динамічних коефіцієнтів системи,

B — матриця впливу вхідних сигналів.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Вектор станів:

$$X(t) = \begin{bmatrix} \Delta T_{\text{сум}}(t) \\ \Delta Q_{\text{сум}}(t) \end{bmatrix}.$$

Вектор входів:

$$U(t) = \begin{bmatrix} \Delta F_{\text{сир}}(t) \\ \Delta F_{\text{н.з.}}(t) \\ \Delta F_{\text{нов}}(t) \\ \Delta T_{\text{сир}}(t) \end{bmatrix}.$$

Формування матриць А та В

На основі коефіцієнтів, отриманих у процесі лінеаризації (розділ 2.4), систему можна подати у вигляді:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta T_{\text{сум}} \\ \Delta Q_{\text{сум}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{\text{сум}} \\ \Delta Q_{\text{сум}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta F_{\text{сир}} \\ \Delta F_{\text{н.з.}} \\ \Delta F_{\text{нов}} \\ \Delta T_{\text{сир}} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Запис рівнянь у формі Коші є необхідним кроком для подальшого:

- перетворення за Лапласом,
- отримання передатних функцій,
- аналізу керованості та стійкості системи.

Ця форма є зручною основою для побудови математичних моделей векторного типу в автоматизованих системах управління.

2.6 Перевірка керованості системи

Для побудови ефективної системи автоматичного регулювання важливо перевірити, чи є об'єкт повністю керованим. Поняття керованості означає, що за допомогою вхідних сигналів можна перевести систему з будь-якого початкового стану в довільний кінцевий за скінченний час.

Перевірка здійснюється за допомогою теореми Калмана для лінійної стаціонарної системи, поданої у формі Коші:

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t).$$

Система вважається повністю керованою, якщо ранг матриці керованості K дорівнює розмірності вектора станів $X(t)$, тобто:

$$K = [B \quad AB], \text{ та } \text{rank}(K) = n,$$

де: $A \in R^{n \times n}$ — матриця динаміки системи,

$B \in R^{n \times n}$ — матриця входів,

$n=2$ — кількість змінних стану (температура та концентрація суміші).

Матриця A :

$$A = \begin{bmatrix} -541.6667 & 0 \\ 0 & -541.6667 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Матриця B :

$$B = \begin{bmatrix} 209.6774 & 63.0824 & 49.2832 & 174.7312 \\ 0.0042 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Добуток AB :

$$AB = \begin{bmatrix} -113575.27 & -34169.64 & -26695.07 & -94646.07 \\ -2.2750 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Матриця керованості $K=[B \quad AB]$:

$$K = \begin{bmatrix} 209.67 & 63.08 & 49.28 & 174.73 & -113575.27 & -34169.64 & -26695.07 & -94646.07 \\ 0.0042 & 0 & 0 & 0 & -2.275 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Обчислення рангу:

Ранг матриці K дорівнює:

$$\text{rank}(K)=2,$$

що відповідає кількості змінних стану ($n=2$).

Оскільки ранг матриці керованості дорівнює кількості станів, система є повністю керованою. Це означає, що входні керуючі дії (витрата сировини, повітря, паливного газу та температура сировини) забезпечують можливість

досягнення будь-якого допустимого стану системи. Отже, побудова ефективної системи автоматичного регулювання для даного об'єкта є теоретично можливою.

2.7 Перетворення за Лапласом змінних часу

З метою переходу від часової до частотної області, для подальшого виведення передатних функцій, виконується операційне перетворення системи рівнянь у формі Коші. Це дозволяє подати математичну модель об'єкта керування у зручному для аналізу вигляді.

Система векторно-матричних рівнянь має вигляд:

$$\frac{dX(t)}{dt} = AX(t) + BU(t),$$

де: $X(t) \in R^2$ — вектор станів (температура та концентрація суміші);

$U(t) \in R^2$ — вектор входів (витрата сировини, паливного газу, повітря, температура сировини);

A — матриця динаміки системи;

B — матриця впливів керуючих дій і збурення.

Операційне перетворення за Лапласом.

Застосовуючи перетворення Лапласа за нульових початкових умов, отримаємо:

$$L\left\{\frac{dX(t)}{dt}\right\} = L\{AX(t) + BU(t)\} \rightarrow pX(p) = AX(p) + BU(p), \quad (2.13)$$

де: $X(p)$, $U(p)$ — Laplace-образи відповідних змінних;

p — комплексна змінна операційного перетворення.

Формування частотної моделі.

Переносимо доданки та виокремлюємо $X(p)$:

$$(pI - A)X(p) = BU(p) \rightarrow X(p) = (pI - A)^{-1} BU(p).$$

Таким чином, передатна матриця системи у частотній області задається як:

$$G(p) = (pI - A)^{-1} B, \quad (2.14)$$

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

де: $G(p)$ — матриця передатних функцій від кожного входу до кожного виходу.

Отриманий вираз дозволяє визначити частотні характеристики об'єкта. У наступному підпункті будуть отримані передатні функції для ключових каналів впливу — зокрема:

- від витрати сировини до температури суміші (канал керування),
- від температури сировини до температури суміші (канал збурення).

2.8 Передатні функції за каналами збурення і керування

Після приведення математичної моделі об'єкта у формі Коші та виконання операційного перетворення (перетворення за Лапласом), отримано систему рівнянь у частотній області:

$$X(p) = (pI - A)^{-1}BU(p), \quad (2.15)$$

де: $X(p) \in R^{2 \times 1}$ — вектор станів у Laplace-образах:

$$X(p) = \begin{bmatrix} \Delta T_{\text{сум}}(p) \\ \Delta Q_{\text{сум}}(p) \end{bmatrix},$$

$U(p) \in R^{4 \times 1}$ — вектор вхідних змінних (керування і збурення):

$$U(p) = \begin{bmatrix} \Delta F_{\text{сир}}(p) \\ \Delta F_{\text{н.з.}}(p) \\ \Delta F_{\text{нов}}(p) \\ \Delta T_{\text{сир}}(p) \end{bmatrix},$$

$A \in R^{2 \times 2}$ — матриця динаміки;

$A \in R^{2 \times 4}$ — матриця впливу входів.

Після підстановки числових значень, отриманих у розділі 2.4, маємо:

$$A = \begin{bmatrix} -541,6667 & 0 \\ 0 & -541,6667 \end{bmatrix},$$

										Арк.
										39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

$$B = \begin{bmatrix} 209.6774 & 63.0824 & 49.2832 & 174.7312 \\ 0.0042 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Обернена матриця $(pI-A)^{-1}$ має вигляд:

$$(pI - A)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{p + 541.6667} & 0 \\ 0 & \frac{1}{p + 541.6667} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Множення матриць дає матрицю передатних функцій:

$$G(p) = (pI - A)^{-1} B = \begin{bmatrix} \frac{209.6774}{p + 541.6667} & \frac{63.0824}{p + 541.6667} & \frac{49.2832}{p + 541.6667} & \frac{174.7312}{p + 541.6667} \\ \frac{0.0042}{p + 541.6667} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Передатні функції по вихідному параметру $T_{\text{сум}}$:

– Від витрати сировини:

$$W_{F_{\text{сир}} \rightarrow T_{\text{сум}}}(p) = \frac{209.6774}{p + 541.6667}; \quad (2.18)$$

– Від витрати паливного газу:

$$W_{F_{\text{п.г.}} \rightarrow T_{\text{сум}}}(p) = \frac{63.0824}{p + 541.6667}; \quad (2.19)$$

– Від витрати повітря:

$$W_{F_{\text{пов}} \rightarrow T_{\text{сум}}}(p) = \frac{49.2832}{p + 541.6667}; \quad (2.20)$$

– Від температури сировини (збурення):

$$W_{T_{\text{сир}} \rightarrow T_{\text{сум}}}(p) = \frac{174.7312}{p + 541.6667}. \quad (2.21)$$

Передатні функції по вихідному параметру $Q_{\text{сум}}$:

– Від витрати сировини:

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$$W_{F_{\text{сир}} \rightarrow Q_{\text{сум}}} (p) = \frac{0.0042}{p + 541.6667} \cdot \quad (2.22)$$

Серед усіх каналів впливу найбільшу динамічну чутливість виявляє температура суміші $T_{\text{сум}}$ до зміни витрати сировини, паливного газу, повітря, а також температури сировини (збурення).

Концентрація вуглецю $Q_{\text{сум}}$ істотно реагує лише на зміну витрати сировини. Інші входи не створюють безпосереднього впливу на цю змінну у рамках лінеаризованої моделі.

Для подальшого аналізу динаміки, побудови перехідних та імпульсних характеристик, а також дослідження стійкості, основну увагу буде приділено двом ключовим передатним функціям:

- по каналу керування: $F_{\text{сир}} \rightarrow T_{\text{сум}}$,
- по каналу збурення: $T_{\text{сир}} \rightarrow T_{\text{сум}}$.

Решта каналів можуть бути враховані у багатоканальному регулюванні або при реалізації компенсаційних алгоритмів.

2.9 Аналіз перехідних та імпульсних характеристик об'єкта керування

З метою аналізу динамічних властивостей об'єкта керування побудовано перехідні та імпульсні характеристики для двох найбільш впливових каналів:

- канал керування: від витрати сировини $F_{\text{сир}} \rightarrow T_{\text{сум}}$,
- канал збурення: від температури сировини $T_{\text{сир}} \rightarrow T_{\text{сум}}$.

Передатні функції цих каналів мають вигляд:

$$W_{F_{\text{сир}} \rightarrow T_{\text{сум}}} (p) = \frac{209.6774}{p + 541.6667}, \quad W_{T_{\text{сир}} \rightarrow T_{\text{сум}}} (p) = \frac{174.7312}{p + 541.6667} \cdot$$

Перехідні характеристики. На рисунку 2.4 наведено графік перехідних характеристик температури суміші при одиничному збуренні витрати сировини та температури сировини.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

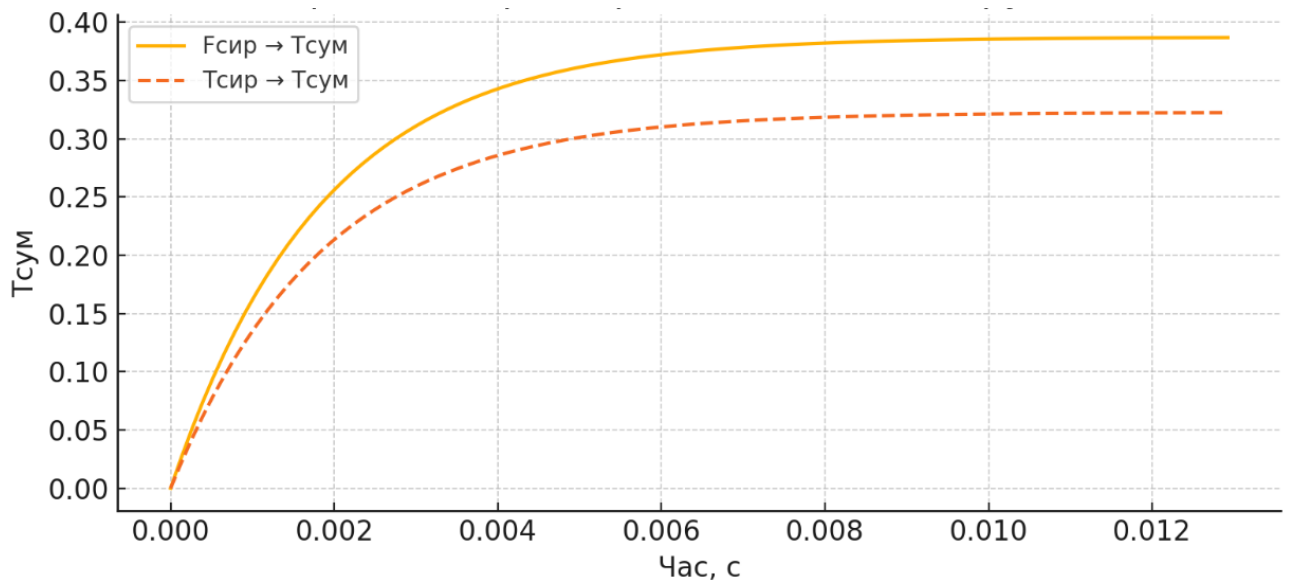


Рисунок 2.4 – Перехідні характеристики об'єкта керування

Як видно з графіка, об'єкт є інерційним, однозв'язним, без коливань. Обидві передатні функції описують ланки першого порядку, що мають однаковий знаменник. Час виходу на усталене значення складає приблизно 5 мс, що свідчить про високу швидкодію системи. Канал від витрати сировини має більший вплив на вихідну змінну $T_{\text{сум}}$, що підтверджує його доцільність як основного керуючого.

Імпульсні характеристики. Імпульсні характеристики об'єкта керування при збуреннях по витраті сировини та температурі сировини подано на рисунку 2.5.

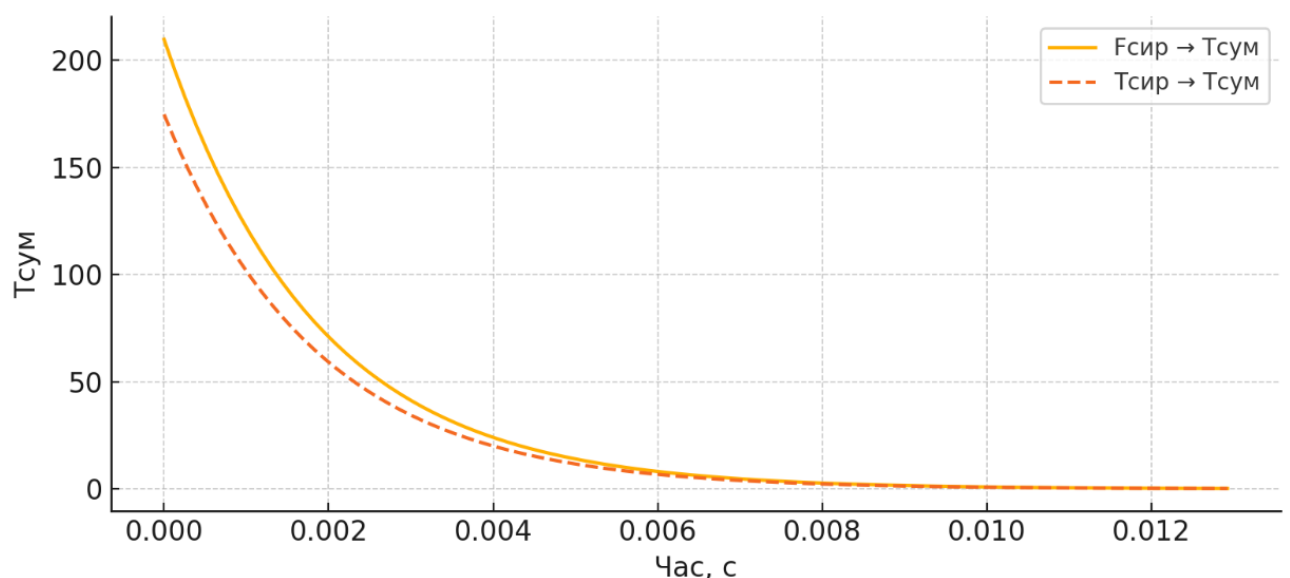


Рисунок 2.5 – Імпульсні характеристики об'єкта керування

Імпульсна реакція системи також є згасаючою експонентою, що підтверджує стійкість об'єкта. З точки зору частотних властивостей, система має вузьку смугу пропускання, що означає низьку чутливість до високочастотних збурень.

Висновки до розділу

У результаті математичного моделювання циклонного реактора сформовано систему рівнянь, що описують динаміку об'єкта за основними змінними. Здійснено лінеаризацію моделі, побудовано матриці стану та проведено перевірку керованості, яка підтвердила можливість ефективного управління процесом. Отримані передатні функції відображають вплив вхідних дій та збурень на вихідні параметри, що дозволяє використовувати модель для подальшого синтезу системи автоматичного керування з урахуванням динамічних характеристик об'єкта.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

3.1. Синтез одноконтурної системи автоматичного керування

Основною метою функціонування системи автоматичного керування є підтримання технологічно необхідного значення температури сажегазової суміші на виході з циклонного реактора незалежно від зміни зовнішніх збурень та коливань режимних параметрів. З урахуванням аналізу математичної моделі об'єкта, виконаного у розділі 2, температура суміші $T_{\text{сум}}$ є основною регульованою змінною. Каналом керування обрано витрату сировини $F_{\text{сир}}$, що має найбільший вплив на регульований параметр відповідно до отриманої матриці передатних функцій.

Передатна функція об'єкта керування має вигляд:

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{209.6774}{p + 541.6667} \quad (3.1)$$

Об'єкт має інерційну динаміку першого порядку, без запізнення, що дозволяє використовувати класичні методи синтезу регулятора. З метою забезпечення відсутності сталої похибки при дії збурень та отримання задовільних динамічних властивостей, для керування обрано ПІ-регулятор.

ПІ-регулятор описується передатною функцією:

$$W_{\text{рег}}(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right), \quad (3.2)$$

де: K_p — коефіцієнт підсилення,

T_i — стала інтегрування.

Такий регулятор забезпечує нульову статичну похибку системи в усталеному режимі, дозволяє ефективно компенсувати збурення та не створює значного перерегулювання, що є критичним для температурних об'єктів з великою теплоємністю.

Структура САК у середовищі Simulink. Структурна схема одноконтурної системи автоматичного керування реалізована в середовищі Simulink (MATLAB) та має наступну архітектуру:

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Таким чином, у підпункті реалізовано повний синтез одноконтурної системи автоматичного керування з використанням ПІ-регулятора. Об'єкт керування описано у вигляді передатної функції першого порядку, а саму систему реалізовано в середовищі Simulink у вигляді структурної схеми із замкненим зворотним зв'язком. Визначено тип регулятора, здійснено його параметричне налаштування, а також виконано інтеграцію всіх елементів у єдину модель, що дозволяє досліджувати динаміку системи та перейти до оцінки її якісних показників.

3.2 Синтез ефективних систем автоматичного керування

У багатьох технологічних процесах класичні одноконтурні САК не завжди забезпечують бажаний рівень точності, швидкодії або стійкості. Тому в сучасних системах автоматизації широко застосовують більш складні та ефективні структури систем автоматичного керування. Найпоширенішими серед них є: інваріантні, каскадні, автономні та оптимальні САК. Вибір конкретної структури системи залежить від характеристик об'єкта керування, типу збурень, вимог до якості перехідного процесу, умов експлуатації та техніко-економічних факторів.

Інваріантні системи автоматичного керування. Інваріантна САК — це система, яка побудована так, щоб у відповідь на дію певного класу збурень вихідна величина залишалася незмінною або мала мінімальне відхилення. Це досягається шляхом введення додаткового зворотного або прямого зв'язку, що компенсує дію збурення. Найчастіше такі системи реалізуються через структури з компенсаційними зв'язками або шляхом введення спеціального регулятора, який враховує характеристики збурення.

Інваріантні системи доцільно застосовувати в умовах постійної присутності збурювального впливу (наприклад, зміни температури навколишнього середовища, коливання тиску в живильних трубопроводах, вітрові навантаження тощо), де важливо зберігати сталість технологічного параметра. Недоліком таких систем є їх чутливість до похибок моделювання

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

збурення: у разі неточної ідентифікації збурювального каналу можлива пере- або недокомпенсація, що призводить до дестабілізації роботи системи.

Каскадні системи автоматичного керування. Каскадна САК складається з двох або більше контурів регулювання, які працюють в ієрархічному зв'язку. Зовнішній контур керує основним параметром об'єкта, тоді як внутрішній регулює проміжну величину, яка впливає на основну. Наприклад, у системі регулювання температури зовнішній контур працює по температурі, а внутрішній — по витраті теплоносія.

Основна перевага каскадних САК полягає у швидкому реагуванні внутрішнього контуру на зміну вхідного сигналу або збурення, що дозволяє знизити інерційність системи в цілому. Крім того, розподіл завдань між регуляторами дозволяє зменшити вплив взаємозв'язаних параметрів і реалізувати більш гнучке керування. Недоліками є більша складність у налаштуванні та необхідність додаткових вимірювачів для проміжної змінної.

Каскадні системи знайшли широке застосування в енергетиці, хімічній промисловості, системах водопостачання, автоматичному регулюванні температури, а також у процесах із високим ступенем динамічного зв'язку між ланками.

Автономні системи автоматичного керування. Автономна САК — це система, яка може працювати без зовнішніх команд або участі оператора. Вона здатна самостійно аналізувати стан об'єкта керування, приймати рішення та адаптувати свою поведінку відповідно до змін зовнішніх умов. До складу таких систем часто входять блоки логічного керування, адаптивні регулятори, вбудовані системи діагностики та елементи штучного інтелекту.

Автономні системи особливо актуальні в робототехніці, аерокосмічних і оборонних системах, безпілотному транспорті, де необхідна повна або часткова самостійність у прийнятті рішень. Основною складністю є високі вимоги до апаратного та програмного забезпечення, необхідність глибокого моделювання об'єкта, а також забезпечення безпеки при автономному функціонуванні.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Оптимальні системи автоматичного керування. Оптимальні САК проектуються на основі заданого критерію якості — найчастіше це мінімізація інтегрального квадратичного відхилення, часу регулювання або енергетичних витрат. Для побудови таких систем використовують методи оптимального керування, такі як принцип максимуму Понтрягіна, метод Беллмана, динамічне програмування, теорія Ляпунова тощо.

Перевагами оптимальних систем є найвищий рівень точності та ефективності у заданих умовах. Вони особливо корисні в системах керування рухом, динамічних механізмах, фінансових та техноекономічних процесах. Недоліками є складність синтезу, необхідність повної математичної моделі об'єкта та обмеження на практичну реалізацію в реальному часі.

Узагальнення. Побудова ефективної системи автоматичного керування вимагає глибокого аналізу характеристик об'єкта, джерел збурень, динаміки процесу та обмежень на реалізацію. Інваріантні, каскадні, автономні й оптимальні САК дозволяють реалізувати більш гнучкі, точні й адаптивні системи керування, ніж класична одноконтурна структура. Розуміння принципів їх побудови дає змогу підвищити надійність і ефективність керування складними об'єктами в різних галузях техніки.

3.3 Аналіз роботи розробленої системи автоматичного керування

Для оцінки ефективності розробленої системи автоматичного керування (САК) було проведено імітаційне моделювання в середовищі MATLAB Simulink. У моделі використано одноконтурну структуру з ПІ-регулятором, параметри якого було автоматично налаштовано за допомогою інструменту PID Tuner.

Вхідним сигналом виступав одиничний стрибок (Step) зі значенням 1, згенерований у момент часу $t = 0$ секунд. Результат моделювання представлено у вигляді графіка вихідної температури суміші на часовому проміжку $t = 0 \dots 0.1$ секунд.

На рисунку 3.3 наведено графік перехідної характеристики одноконтурної замкненої САК.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

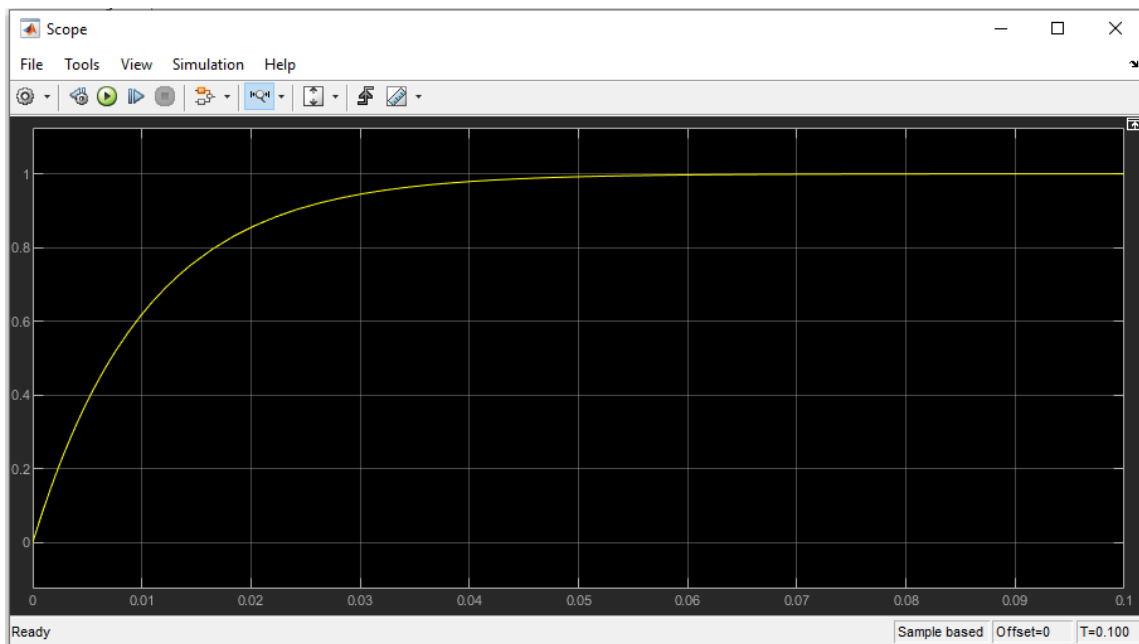


Рисунок 3.3 – Перехідна характеристика одноконтурної замкненої САК

Аналіз отриманих результатів.

Для оцінки якості регулювання в замкненій одноконтурній системі було використано вбудовану функцію `stepinfo` у середовищі MATLAB. Розрахунки проводилися на основі результатів моделювання у Simulink з подальшим експортом сигналу зі Scope.

Характеристики перехідного процесу:

- RiseTime: 0.0228
- SettlingTime: 0.0405
- SettlingMin: 0.9094
- SettlingMax: 0.9999
- Overshoot: 0
- Undershoot: 0
- Peak: 0.9999
- PeakTime: 0.1000

На основі вищенаведених значень можна зробити такі висновки:

- Час наростання становить 0.0228 с, тобто система швидко досягає 90% від усталеного значення.

- Час усталення – 0.0405 с, що вказує на миттєву стабілізацію процесу.
- Перерегулювання (Overshoot) відсутнє — графік не перевищує уставки, що свідчить про монотонну поведінку системи.

- Пікове значення становить 0.9999, отже, похибка практично відсутня.

Таким чином, побудована САК демонструє високу якість регулювання при використанні ПІ-регулятора, параметри якого були автоматично оптимізовані за допомогою PID Tuner. Отримані показники підтверджують ефективність обраної структури регулятора та правильність методики його налаштування.

Імпульсна характеристика одноконтурної замкненої САК.

Крім перехідної характеристики, важливим етапом аналізу системи автоматичного керування є побудова та дослідження імпульсної характеристики, яка дозволяє оцінити реакцію системи на короткочасне збурення. Імпульсна характеристика демонструє, як система реагує на одиничний імпульс на вході, і є важливою для розуміння динамічних властивостей, таких як затухання, стабільність та швидкість реакції.

Для реалізації цього дослідження у середовищі MATLAB Simulink було змінено блок вхідного сигналу: замість Step було використано Continuous Pulse Generator з короткою тривалістю імпульсу (10% від періоду). Структура моделі залишилася ідентичною до тієї, що застосовувалася у випадку перехідної характеристики, лише змінено тип вхідного сигналу.

Параметри блоку Continuous Pulse Generator:

- Amplitude: 1
- Period (secs): 5
- Pulse Width (%): 10
- Phase delay: 0

Структурна схема моделі для дослідження імпульсної характеристики САК представлена на рисунку 3.4.

										Арк.
										51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

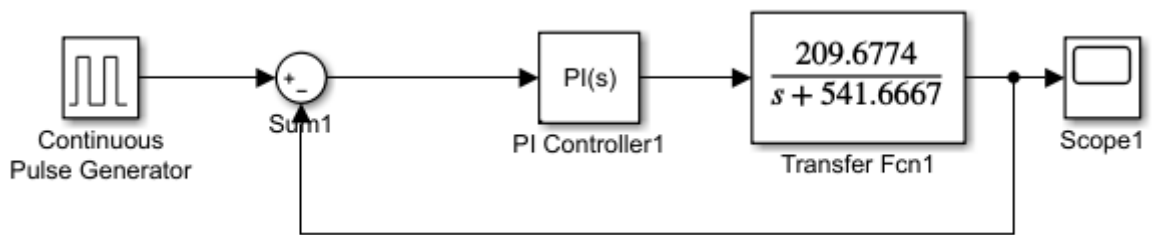


Рисунок 3.4 – Структура одноконтурної замкненої САК при моделюванні реакції на імпульсне збурення

На рисунку 3.5 зображено реакцію одноконтурної замкненої системи автоматичного керування на періодичний імпульсний вплив, реалізований за допомогою блоку імпульсного генератора у Simulink. Графік відображає поведінку вихідного сигналу в часовому діапазоні 0...21 секунд.

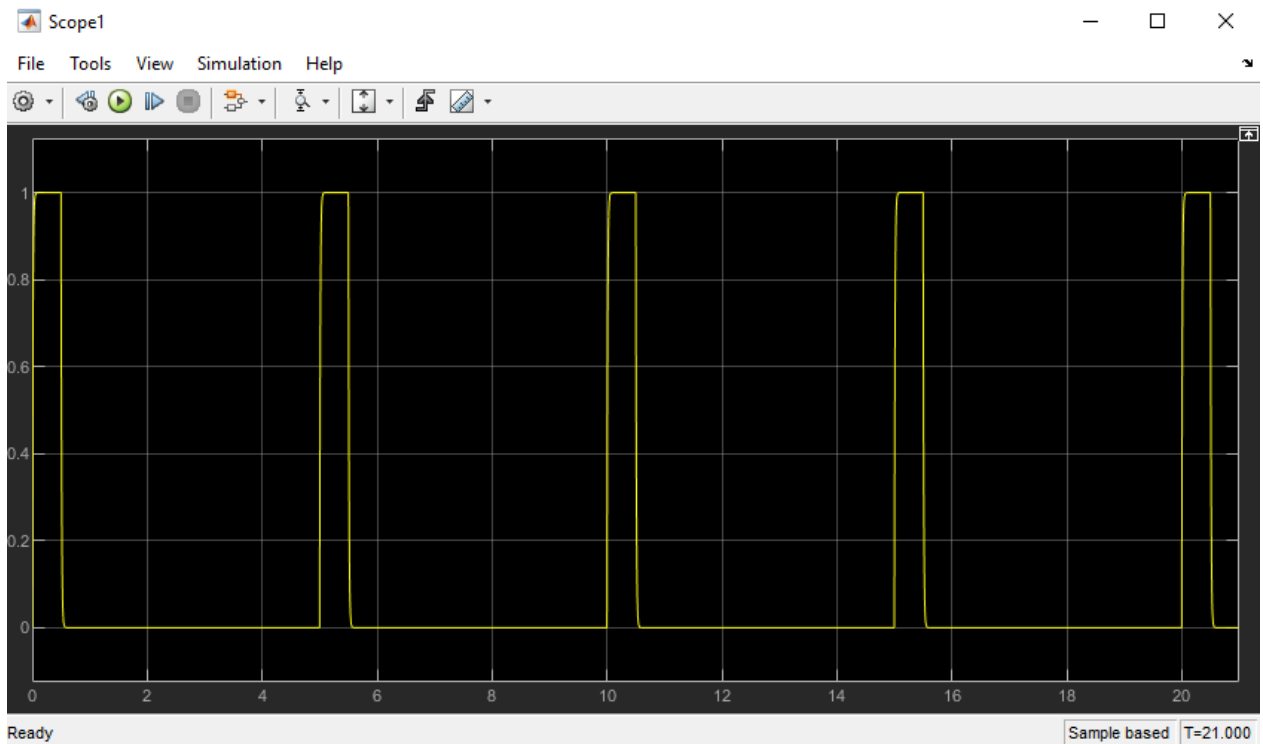


Рисунок 3.5 – Імпульсна характеристика одноконтурної замкненої системи САК

Аналіз отриманої імпульсної характеристики дозволяє зробити наступні висновки:

- Система є стійкою — кожен імпульс викликає чітку реакцію, яка експоненційно згасає до початкового рівня без коливань чи перерегулювання;

– Поведінка є інерційною та повторюваною — форма реакції на кожен імпульс має характерну експоненційну форму з однаковими параметрами згасання;

– Час згасання відповідає динаміці системи, встановленій під час аналізу перехідної характеристики, що свідчить про узгодженість моделі та правильність її побудови.

Таким чином, проведене дослідження підтверджує стабільність САК, її адекватну реакцію на короткочасні збурення та правильний синтез регулятора.

Система автоматичного керування, реалізована на основі ПІ-регулятора, демонструє високу точність, швидкодію та стійку поведінку, що дозволяє рекомендувати її до впровадження в реальному процесі керування температурою сажогозової суміші при виробництві технічного вуглецю.

Аналіз стійкості одноконтурної САК за критерієм Михайлова.

Для перевірки стійкості одноконтурної замкненої системи автоматичного керування використано критерій Михайлова. У моделі реалізовано ПІ-регулятор з параметрами:

$$K_p=0.4601, T_i=249.22,$$

а також об'єкт із передатною функцією:

$$W(s) = \frac{209.6774}{s + 541.6667} \quad (3.3)$$

Розімкнена система має вигляд:

$$W_{розімк}(s) = \frac{K_p (T_i s + 1)}{T_i s} \cdot \frac{209.6774}{s + 541.6667}, \quad (3.4)$$

а характеристичне рівняння замкненої САК має форму:

$$\Delta(s) = 249.22 \cdot s^2 + 159035.92 \cdot s + 96.47 \quad (3.5)$$

Підставивши $s=j\omega$, було побудовано частотну характеристику $\Delta(j\omega)$ та побудовано криву Михайлова (рисунок 3.6).

Графік показує, що крива проходить через I та II квадранти комплексної площини, описуючи поворот на 180° проти годинникової стрілки. Це повністю

						Арк.
					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Модель каскадної САК реалізовано у середовищі Simulink. Принципова структура наведена на рисунку 3.7.

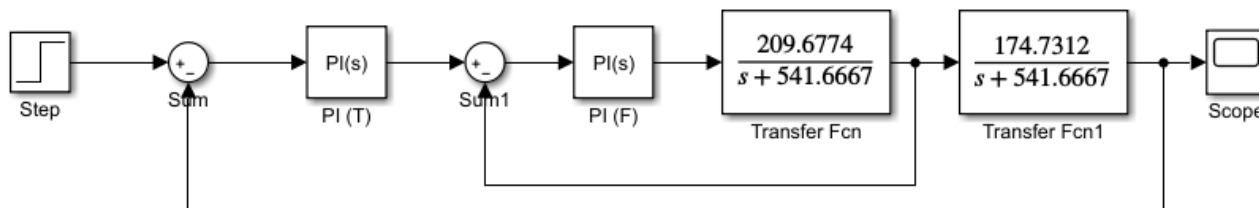


Рисунок 3.7 – Структурна схема каскадної САК у Simulink

Передатна функція об'єкта.

Для моделювання каскадної системи автоматичного керування використано дві передатні функції, які описують вплив відповідних факторів на температуру суміші:

- вплив витрати сировини:

$$W_{F_{сир} \rightarrow T_{сум}}(p) = \frac{209.6774}{p + 541.6667}$$

- вплив температури сировини:

$$W_{T_{сир} \rightarrow T_{сум}}(p) = \frac{174.7312}{p + 541.6667}$$

Обидві функції мають однакову динаміку (однакову сталу часу), але різне підсилення, що відображає різну вагу кожного впливу на температуру суміші. Врахування цих двох каналів дозволяє побудувати адекватну модель для реалізації каскадного регулювання.

Налаштування параметрів ПІ-регуляторів у каскадній системі здійснено за допомогою вбудованого інструменту PID Tuner, доступного в середовищі Simulink. Автоматичний підбір забезпечив оптимальні значення коефіцієнтів пропорційної та інтегральної дії окремо для кожного з контурів регулювання.

Використання автоматичного налаштування дозволило врахувати динаміку об'єкта та забезпечити швидку реакцію системи без перерегулювання. Отримані значення параметрів наведено на рисунках 3.8 та 3.9.

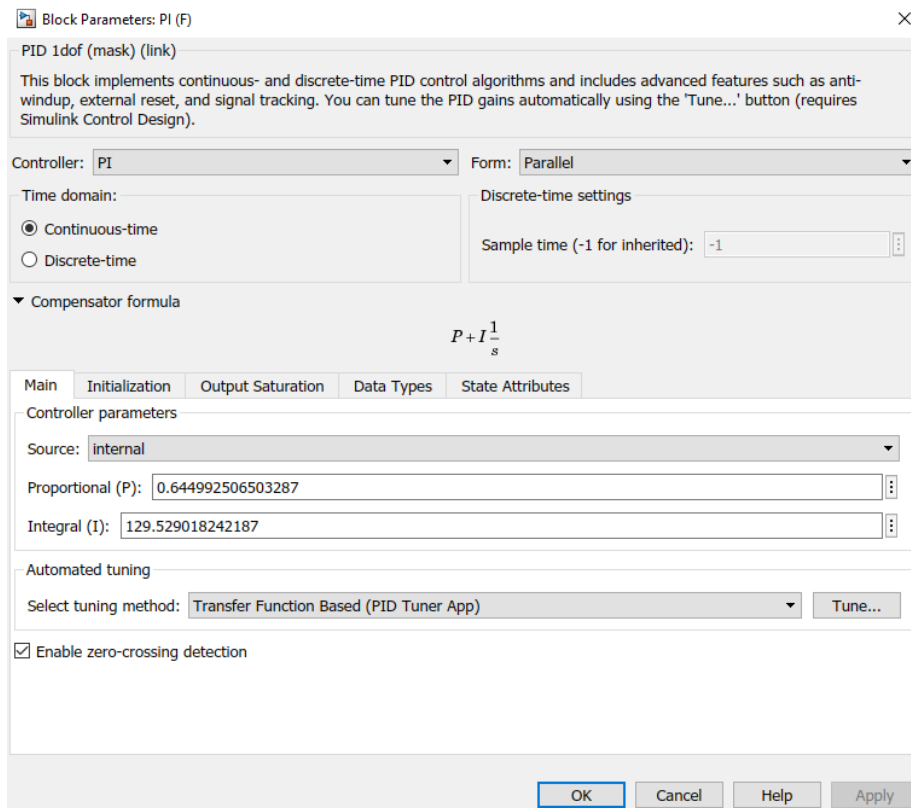


Рисунок 3.8 – Параметри внутрішнього ПІ-регулятора

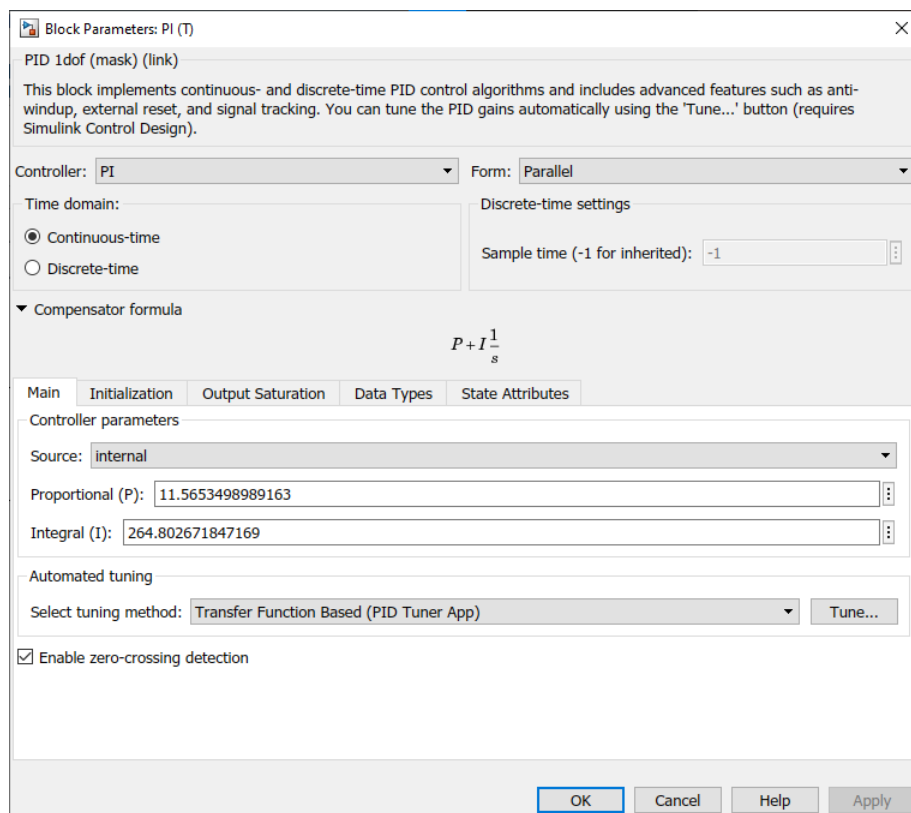


Рисунок 3.9 – Параметри зовнішнього ПІ-регулятора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Графік реакції каскадної системи.

У якості вхідного впливу для аналізу реакції каскадної САК було застосовано одиничний стрибок, реалізований за допомогою блоку Step. Його параметри задавали стрибок із наступними характеристиками:

- Step time = 0 с;
- Initial value = 0;
- Final value = 1;
- Sample time = 0.

Таким чином, одиничний стрибок було подано на вхід зовнішнього ПІ-регулятора температури, починаючи з моменту часу $t=0$ с. Це дозволило чітко зафіксувати динамічну реакцію всієї каскадної системи на зміну уставки температури.

На рисунку 3.10 представлено перехідну характеристику каскадної САК у відповідь на одиничний стрибок уставки температури.

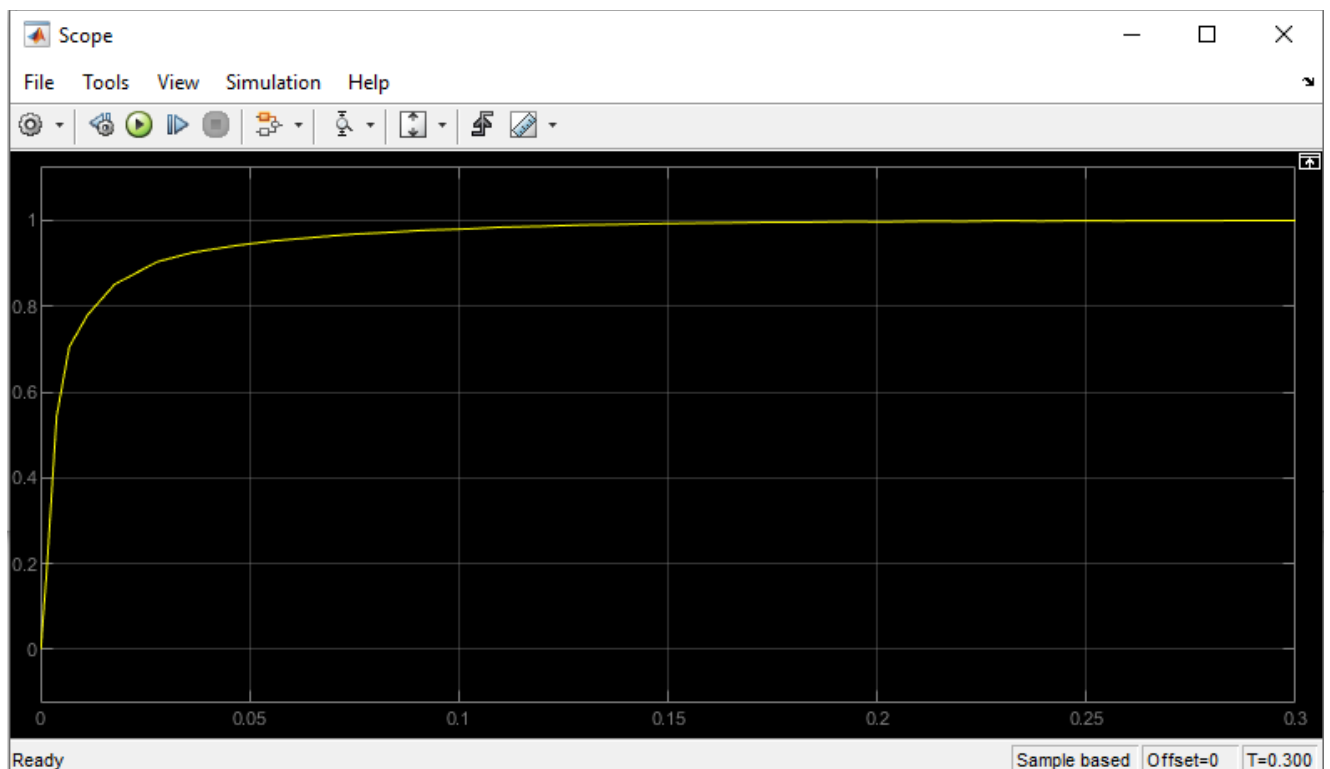


Рисунок 3.10 – Перехідна характеристика каскадної САК

Аналіз отриманих характеристик.

Для кількісної оцінки основних якісних показників регулювання було використано вбудовану функцію `stepinfo` середовища MATLAB, яка дозволяє розрахувати часові характеристики реакції системи. Дані було отримано шляхом експортованого сигналу з модуля Scope після моделювання в Simulink.

Характеристики перехідного процесу:

- RiseTime: 0.0263
- SettlingTime: 0.1013
- SettlingMin: 0.9037
- SettlingMax: 0.9999
- Overshoot: 0
- Undershoot: 0
- Peak: 0.9999
- PeakTime: 0.3000

На основі розрахованих показників перехідного процесу можна зробити такі висновки:

- Час наростання (Rise Time) становить 0.0263 с, що свідчить про дуже швидке досягнення 90% усталеного значення;
- Час усталення (Settling Time) дорівнює 0.1013 с, що вказує на миттєве входження в зону допустимого відхилення ($\pm 5\%$) без затягування процесу;
- Перерегулювання (Overshoot) відсутнє (0%), що свідчить про плавну, монотонну реакцію без коливань або перевищення уставки;
- Пікове значення становить 0.9999, що вказує на мінімальну похибку регулювання;
- Система демонструє стійку поведінку: згладжено реагує на вхідний стрибок, без нестабільності чи осциляцій.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Таким чином, каскадна САК забезпечує високу точність, швидкодію та надійне пригнічення динамічних відхилень, що свідчить про правильний синтез обох регуляторів та узгодженість між внутрішнім і зовнішнім контурами.

Аналіз стійкості каскадної САК.

Для перевірки стійкості каскадної системи автоматичного керування застосовано критерій Михайлова, що ґрунтується на аналізі частотної характеристики характеристичного полінома замкненої системи.

Каскадна САК складається з двох послідовно з'єднаних регуляторів:

Зовнішній контур регулювання температури реалізовано за допомогою ПІ-регулятора з параметрами:

$$K_{p1}=11.5653, \quad T_{i1}=264.8207.$$

Внутрішній контур регулювання витрати також реалізується ПІ-регулятором з параметрами:

$$K_{p2}=0.6450, \quad T_{i2}=129.5290.$$

Об'єкт керування описується двома послідовно з'єднаними інерційними ланками:

$$W(s) = \frac{209.6774}{s + 541.6667} \cdot \frac{174.7312}{s + 541.6667} \quad (3.6)$$

Розрахунок характеристичного рівняння.

Після послідовного замикання внутрішнього та зовнішнього контурів отримано характеристичне рівняння замкненої каскадної САК у вигляді полінома четвертого порядку:

$$\Delta(s) = a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0, \quad (3.7)$$

де:

$$a_4=34301.96,$$

$$a_3=37160460.70,$$

$$a_2=2.024951 \cdot 10^{10},$$

$$a_1=1.140327 \cdot 10^8,$$

$$a_0=273297.42.$$

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Ці коефіцієнти були отримані шляхом аналітичного перемноження передатних функцій двох ПІ-регуляторів та інерційних ланок об'єкта, формування розімкненої системи та застосування правила зворотного зв'язку для побудови замкненої САК.

Побудова кривої Михайлова.

Підставивши у характеристичне рівняння змінну $s=j\omega$ в діапазоні $\omega=10^{-3}\dots 10^4$, побудовано частотну характеристику $\Delta(j\omega)$ та відповідну криву Михайлова.

Як показано на рисунках 3.11–3.13, крива Михайлова починається у першому квадранті, далі послідовно проходить через другий, третій та четвертий квадранти, перетинаючи уявну вісь і обертаючись навколо початку координат. Такий оберт на 360° проти годинникової стрілки відповідає вимогам критерію Михайлова для системи четвертого порядку й підтверджує асимптотичну стійкість каскадної САК.

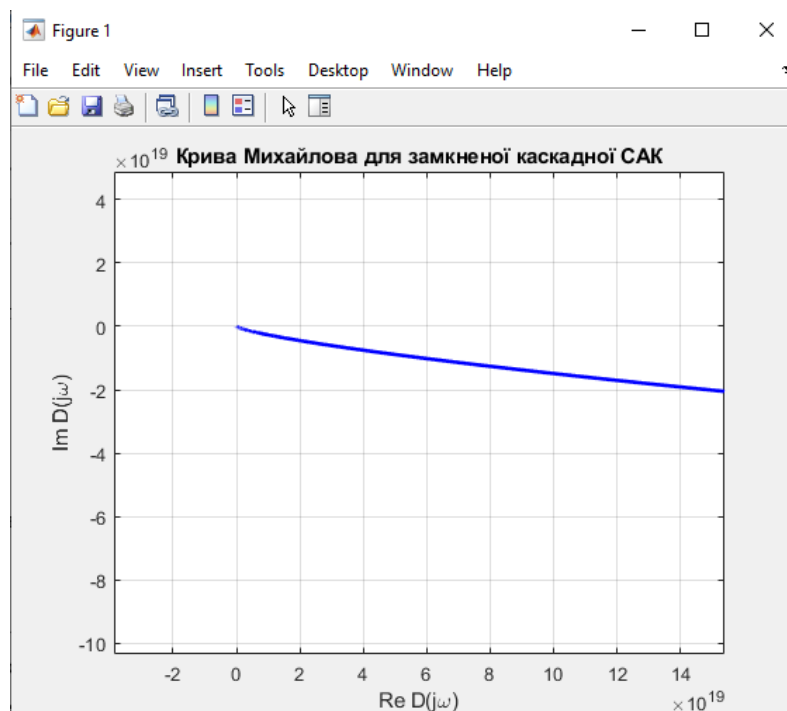


Рисунок 3.11 – Крива Михайлова для замкненої каскадної САК
(загальний вигляд)

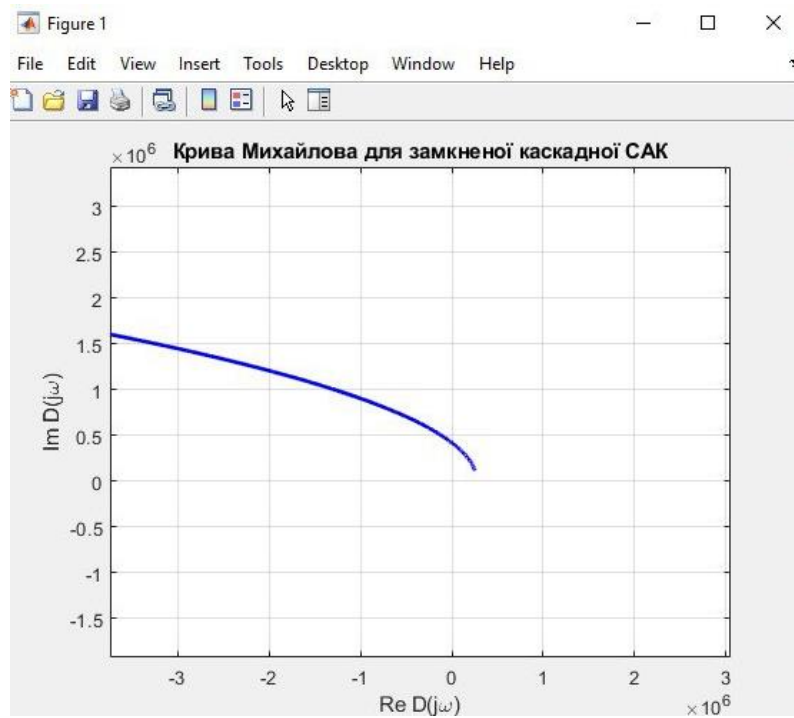


Рисунок 3.12 – Крива Михайлова (початкова ділянка у I та II квадрантах)

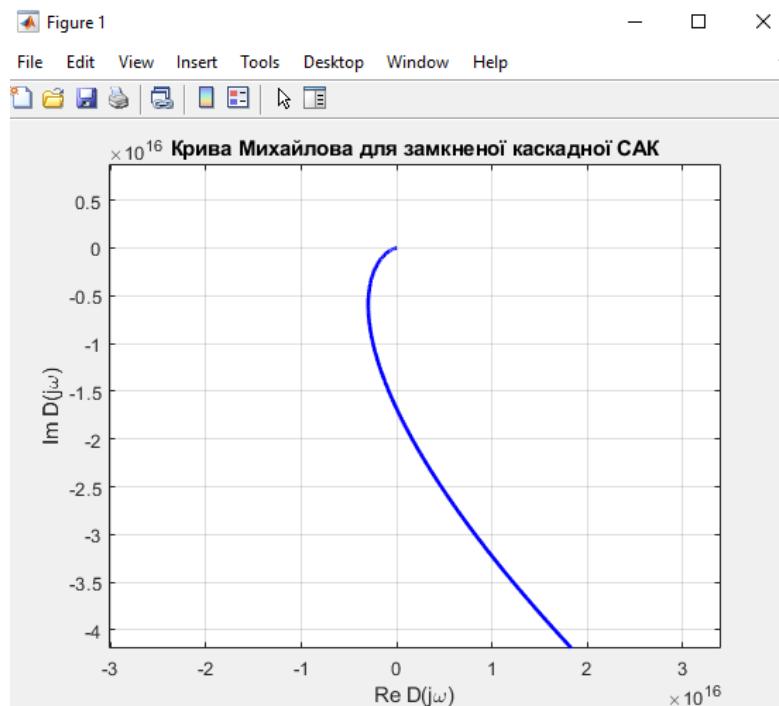


Рисунок 3.13 – Крива Михайлова (фрагмент у III та IV квадрантах)

Таким чином, на основі побудованої кривої Михайлова можна зробити висновок, що каскадна система автоматичного керування є асимптотично стійкою.

Висновки до розділу

У розділі виконано синтез одноконтурної та каскадної САК, побудовано їх структурні моделі в середовищі MATLAB Simulink, проведено моделювання та оцінку якісних показників. Параметри ПІ-регуляторів визначено автоматично. Для обох систем перевірено стійкість за критерієм Михайлова: побудовані криві підтверджують асимптотичну стійкість відповідно до порядку кожної системи. Каскадна САК продемонструвала кращі динамічні характеристики та рекомендована до впровадження.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

4. РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК

4.1 Вибір технічних засобів автоматизації

Автоматизована система керування технологічним процесом потребує надійного інформаційного та виконавчого забезпечення, що реалізується за допомогою технічних засобів автоматизації (ТЗА). До складу ТЗА належать первинні вимірювальні перетворювачі (датчики), регулюючі органи, виконавчі механізми, регулятори та засоби індикації. Правильний вибір таких засобів є важливою передумовою ефективного функціонування системи керування та досягнення заданої якості регулювання.

Під час вибору ТЗА враховуються особливості об'єкта керування — циклонного реактора для виробництва технічного вуглецю — зокрема, агресивне середовище, високі температури та наявність пилу. Також беруться до уваги вимоги до точності вимірювання, швидкодії, надійності, зручності монтажу та можливості інтеграції у SCADA-систему.

Нижче наведено опис вибраних технічних засобів, які забезпечують вимірювання основних параметрів (тиску, рівня, температури, витрати, концентрації), реалізацію регулюючого впливу, а також відображення та обробку інформації у системі автоматизації.

4.1.1 Датчик тиску Siemens SITRANS P DS III

Датчик тиску Siemens SITRANS P DS III призначений для точного вимірювання надлишкового або абсолютного тиску в зонах реактора та теплообмінника, де циркулює сажегазова суміш. Основою приладу є п'єзорезистивний сенсор, який перетворює тиск на електричний сигнал з високою точністю до $\pm 0,075\%$. Датчик має широкий діапазон вимірювання (від 0 до 6 бар) та працює у важких умовах завдяки герметичному корпусу з нержавіючої сталі марки 316L. Завдяки наявності цифрового інтерфейсу HART прилад легко інтегрується в сучасні системи автоматизації, забезпечуючи як передавання виміряного значення, так і функції самодіагностики. Робочий

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

температурний діапазон пристрою становить від -40 до $+100$ °С, живлення — 12–36 В постійного струму. Високий ступінь захисту IP67 дозволяє використовувати датчик у вибухонебезпечних та запилених зонах. Завдяки компактним габаритам і уніфікованому сигналу 4–20 мА, Siemens SITRANS P DS III є надійним елементом контурів вимірювання тиску в хімічній, газовій та енергетичній промисловості.

На рисунку 4.1 зображено датчик тиску Siemens SITRANS P DS III, який широко застосовується в умовах агресивного середовища, високих температур і тиску.



Рисунок 4.1 – Датчик тиску Siemens SITRANS P DS III

4.1.2 Датчик рівня VEGAPULS 64

Датчик рівня VEGAPULS 64 призначений для безконтактного вимірювання рівня сажогозової суміші, а також рідких або пінних продуктів у резервуарах і піновіддільниках. Його робота базується на радарному принципі з використанням мікрохвильового випромінювання на частоті 80 ГГц, що дозволяє досягати високої точності (похибка не перевищує ± 2 мм) навіть в умовах сильного запилення, наявності конденсату чи піни. Датчик має вузький кут розповсюдження сигналу (менше 4°), завдяки чому забезпечується точне вимірювання в апаратах складної геометрії. VEGAPULS 64 виготовлений із

										Арк.
										64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

хімічно стійких матеріалів, зокрема нержавіючої сталі та фторопласту (PTFE), і може працювати в широкому температурному діапазоні від -40 до $+200$ °C. Він підтримує інтерфейси 4–20 мА та HART, що дозволяє його інтеграцію в системи автоматизованого контролю. Дальність вимірювання становить до 30 м, а ступінь захисту корпусу — IP66/IP68, що дає змогу застосовувати пристрій у складних промислових умовах. Завдяки надійності, точності та простоті експлуатації цей датчик широко використовується на підприємствах хімічної, нафтохімічної та енергетичної промисловості.

На рисунку 4.2 представлено безконтактний радарний датчик рівня VEGAPULS 64, що забезпечує високу точність вимірювання навіть у складних умовах експлуатації.



Рисунок 4.2 – Датчик рівня VEGAPULS 64

4.1.3 Високотемпературна термопара WKA TC95-S

Термопара WKA TC95-S призначена для вимірювання високих температур у промислових умовах, зокрема в зонах реакторів, де відбувається термічний розклад вуглеводневої сировини при температурах понад 1000 °C. В основі цього датчика використовується термопара типу S (PtRh10–Pt), що відноситься до благороднометалевих і забезпечує високу точність, довговічність

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

і стабільність вимірювань при температурах до 1600 °С. Датчик має захисну гільзу з оксиду алюмінію (Al_2O_3), яка стійка до впливу агресивних середовищ і високих температур, що робить його придатним для тривалої експлуатації в зонах горіння та піролізу.

WIKA TC95-S може комплектуватись перетворювачем сигналу, що забезпечує вихідний сигнал у форматі 4–20 мА, сумісний із більшістю регуляторів і систем SCADA. Кріплення зазвичай виконується за допомогою різьбового фланця або патрубку із жаростійкого матеріалу, а конструкція передбачає можливість періодичної перевірки або заміни термоелемента. Завдяки своїм характеристикам ця термопара є надійним засобом контролю температури в складних технологічних процесах, включаючи виробництво технічного вуглецю, коксування, спалювання та плавлення.

На рисунку 4.3 показано високотемпературну термопару WIKА TC95-S у захисній гільзі, що використовується для вимірювання температури в умовах агресивного середовища та високих температур.



Рисунок 4.3 – Високотемпературна термопара WIKА TC95-S у захисній гільзі

4.1.4 Витратомір Siemens SITRANS F C MASS 2100

Витратомір Siemens SITRANS F C MASS 2100 призначений для точного вимірювання масової витрати рідин і газів у трубопроводах установки, зокрема

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

сажогозової суміші, палива або сировинних компонентів. Прилад працює на основі кориолісового принципу дії: вимірювання здійснюється шляхом визначення відхилення віброуючих трубок під впливом масового потоку. Цей метод дозволяє отримувати не лише значення витрати, а й густину та температуру речовини. SITRANS F C MASS 2100 відрізняється високою точністю (до $\pm 0,1\%$) та стабільністю показів у широкому діапазоні температур (від -40 до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Прилад може застосовуватись у вибухонебезпечних зонах та має надійний корпус із нержавіючої сталі, стійкий до корозії та хімічних впливів. Вихідний сигнал формується у вигляді уніфікованого $4\text{--}20\text{ mA}$ або за цифровим протоколом Modbus, що дає змогу використовувати витратомір у складі складних автоматизованих систем. Завдяки компактним розмірам, простоті встановлення та обслуговування, він широко застосовується у харчовій, хімічній, фармацевтичній та нафтогазовій галузях для точного контролю витрати технологічних потоків.

На рисунку 4.4 наведено масовий витратомір Siemens SITRANS F C MASS 2100, що застосовується для вимірювання витрати рідин і газів із високою точністю в умовах промислового виробництва.



Рисунок 4.4 – Витратомір Siemens SITRANS F C MASS 2100

4.1.5 Аналізатор концентрації ENOTEC CEMTEC® Smart

Аналізатор ENOTEC CEMTEC® Smart призначений для безперервного вимірювання концентрації вуглецю у вигляді оксиду вуглецю (CO), діоксиду

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

вуглецю (CO₂) та інших компонентів сажегазової суміші. Він застосовується для контролю якості газового середовища в зоні виходу продуктів термічного розкладу та дозволяє оперативно реагувати на зміни складу суміші в режимі реального часу. Пристрій функціонує на основі інфрачервоного (ІЧ) методу аналізу газової фази, що забезпечує високу вибірковість і точність вимірювання. Його чутливі елементи працюють у широкому температурному діапазоні від –20 до +60 °С, а час відгуку не перевищує 3 секунд, що дозволяє оперативно виявляти збурення або відхилення від норми. Конструкція аналізатора передбачає монтаж безпосередньо у потік газу або в спеціальній пробовідбірній камері. Вихідний сигнал формується у вигляді уніфікованого струмового інтерфейсу 4–20 мА або через Ethernet, що забезпечує його сумісність із більшістю систем керування. Завдяки швидкодії, стійкості до впливу температур і пилу, а також простоті обслуговування ENOTEC CEMTEC® Smart використовується в енергетичних, металургійних та хімічних процесах, де потрібен оперативний контроль складу технологічного газу.

На рисунку 4.5 зображено аналізатор газової фази ENOTEC CEMTEC® Smart, який забезпечує безперервний контроль складу технологічного газу в режимі реального часу.



Рисунок 4.5 – Аналізатор газової фази ENOTEC CEMTEC® Smart

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

4.1.6. Контролер Modicon M172 (TM172PDG42SI)

Контролер Schneider Electric Modicon TM172PDG42SI є сучасним багатофункціональним програмованим логічним контролером, призначеним для реалізації систем автоматизації з високою кількістю аналогових сигналів. Його застосування доцільне в задачах регулювання температури, тиску, витрати або інших параметрів у складних технологічних умовах, зокрема у процесах термічного розкладу вуглеводневої сировини.

Контролер підтримує реалізацію алгоритмів ПІ та ПІД-регулювання, що забезпечує високу точність, стабільність та адаптивність при автоматичному керуванні технічними об'єктами. Він може керувати виконавчими механізмами через аналогові сигнали (4–20 мА або 0–10 В), а також збирати дані з широкого спектра уніфікованих датчиків.

Контролер оснащений вбудованим дисплеєм та кнопковою панеллю для локального налаштування параметрів, що дозволяє швидко виконувати діагностику та параметризацію без додаткових пристроїв. Підтримується інтеграція в SCADA-системи завдяки інтерфейсам RS-485 (Modbus RTU) та Ethernet (Modbus TCP).

Живлення пристрою здійснюється від зовнішнього стабілізованого джерела постійного струму 24 В. Монтаж контролера можливий як на DIN-рейку, так і панельний спосіб.

На рисунку 4.6 зображено контролер Schneider Electric Modicon TM172PDG42SI, який виконує функції збору, обробки та керування сигналами у системі автоматизації.

Технічні характеристики контролера наведено в таблиці 4.1.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики контролера Modicon M172
TM172PDG42SI

Параметр	Значення
Кількість аналогових входів	12
Кількість аналогових виходів	6
Кількість цифрових входів	12
Кількість цифрових виходів	12
Тип вихідного сигналу	0–10 В або 4–20 мА (налаштовується)
Тип вхідного сигналу	0–10 В, 4–20 мА, терморезистори (NTC/PT1000)
Інтерфейси зв'язку	RS-485, Ethernet
Протоколи	Modbus RTU, Modbus TCP
Живлення	24 В AC/DC
Тип монтажу	DIN-рейка / панельний
Діапазон робочих температур	від –10 до +55 °С
Клас захисту корпусу	IP20



Рисунок 4.6 – Контролер Schneider Electric Modicon M172 TM172PDG42SI

4.1.7 Багатоканальний індикатор Seneca S604B

Індикатор Seneca S604B застосовується для відображення технологічних параметрів на щиті керування. Пристрій має чотири універсальні аналогові входи для сигналів 4–20 мА або 0–10 В, що дозволяє одночасно підключати декілька вимірювальних перетворювачів. Інформація виводиться на

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

багаторядковий графічний дисплей з можливістю налаштування назв каналів, шкал і одиниць вимірювання. Індикатор може одночасно відобразити до чотирьох незалежних шкал — по одній на кожен активний канал.

Пристрій забезпечує точність не гірше $\pm 0.1\%$ від повної шкали, має компактні габарити ($90 \times 70 \times 60$ мм) і встановлюється на стандартну DIN-рейку. Живлення здійснюється від джерела постійного струму 24 В. Для інтеграції з контролерами та іншими пристроями індикатор оснащений інтерфейсом RS-485 з підтримкою протоколу Modbus RTU.

На рисунку 4.7 представлено багатоканальний індикатор Seneca S604B, призначений для відображення значень технологічних параметрів у системі автоматизації.



Рисунок 4.7 – Багатоканальний індикатор Seneca S604B

4.1.8 Регулюючий клапан Siemens VXF42 з електроприводом SAX61

Регулюючий орган Siemens VXF42 з приводом SAX61 застосовується для змішування або розподілу потоків середовищ у контурі автоматизованого регулювання технологічного процесу. Він забезпечує зміну витрати газоподібних або рідких продуктів у відповідь на керуючий сигнал з регулятора. У системі виробництва технічного вуглецю даний клапан виконує функцію

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

стабілізації подачі сировини, повітря або продукту розкладу, що є критично важливим для забезпечення стабільних умов у реакторі.

Клапан має триходову конструкцію, яка дозволяє виконувати функції як змішування потоків, так і розділення, залежно від обраної схеми ув'язки. Робоча частина виготовлена з латуні або чавуну, що забезпечує довговічність і стійкість до дії середовища. Привід SAX61 забезпечує електричне керування положенням штока клапана та має аналоговий вхід (0–10 В або 4–20 мА), що дозволяє реалізувати плавне регулювання. Завдяки вбудованому зворотному зв'язку та високій точності позиціонування, клапан забезпечує високу динамічну стабільність у контурі керування. Робочий тиск приладу становить до 16 бар, температурний діапазон – від –10 до +130 °С. Монтаж виконується за допомогою фланцевого з'єднання, а управління — через стандартний регулятор або контролер із аналоговим виходом.

На рисунках 4.8 та 4.9 відповідно зображено регулюючий клапан Siemens VXF42 та електропривід Siemens SAX61, які разом утворюють виконавчий механізм для керування потоками в системі автоматизації.



Рисунок 4.8 – Регулюючий клапан Siemens VXF42

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72



Рисунок 4.9 – Електропривід Siemens SAX61 для регулювання положення клапанів типу VXF42.

4.1.9 Блок живлення Mean Well HDR-150-24

Для живлення елементів системи автоматизації обрано блок живлення Mean Well HDR-150-24. Це імпульсний джерело постійної напруги, призначене для монтажу на стандартну DIN-рейку. Пристрій забезпечує стабільну вихідну напругу 24 В постійного струму за наявності змінної напруги живлення в діапазоні 85–264 В. Номінальна вихідна потужність становить 156 Вт, що відповідає струму до 6,5 А, чого цілком достатньо для одночасного живлення всіх обраних пристроїв: контролера, датчиків витрати, температури, тиску, рівня, індикаторів та інших елементів системи.

Блок живлення має компактні габарити (ширина 105 мм), високий коефіцієнт корисної дії, захист від короткого замикання, перевантаження та перенапруги. Діапазон робочих температур пристрою становить від -30 до $+70$ °С, що дозволяє його експлуатацію у стандартних умовах промислових установок.

Таким чином, HDR-150-24 є надійним та достатньо потужним джерелом живлення для всієї автоматизованої системи, описаної в даному проекті.

На рисунку 4.10 показано блок живлення Mean Well HDR-150-24, що забезпечує стабілізовану напругу 24 В для живлення елементів системи автоматизації.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73



Рисунок 4.10 – блок живлення Mean Well HDR-150-24

Отже, на основі аналізу вимог до автоматизованого контролю параметрів у процесі виробництва технічного вуглецю було обґрунтовано вибір основних технічних засобів автоматизації. Запропоновані датчики, регулятор, індикатор та регулюючий орган забезпечують необхідну точність, надійність та сумісність з сучасними системами керування. Такий підбір дозволяє ефективно реалізувати функції вимірювання, регулювання й індикації, що є необхідним для стабільної роботи об'єкта керування.

4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації призначена для графічного подання основних контурів регулювання, контролю та індикації, що забезпечують стабільну та безпечну роботу технологічного процесу термічного розкладу вуглеводневої сировини з утворенням технічного вуглецю. Схема дозволяє наочно представити взаємозв'язки між технологічним обладнанням та технічними засобами автоматизації, а також визначити шляхи передачі сигналів між елементами системи.

На функціональній схемі умовно показано місця встановлення первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків температури, тиску, витрати, рівня та концентрації), регулюючих органів (клапанів з електроприводами) і виконавчих механізмів. Елементи, які реалізують функції автоматичного регулювання (наприклад, ПІСА, РІА, FІСА), позначено за прийнятим стандартом, без явного графічного зображення приладів. Реалізація цих функцій у практичній системі

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

– Контури регулювання

Контур регулювання рівня у піновіддільнику. З радарного рівнеміра VEGAPULS 64 (поз.2-а) сигнал 4–20 мА надходить на мікропроцесорний регулятор Modicon M172 (поз.2-в). Регулятор керує триходовим клапаном Siemens VXF42 з електроприводом SAX61 (поз.2-г), який регулює подачу сировини у піновіддільник, забезпечуючи підтримку необхідного рівня.

Контур регулювання температури у безполуменовому підігрівнику. З високотемпературної термопари WIKA TC95-S (поз.4-а) сигнал 4–20 мА надходить на регулятор Modicon M172 (поз.4-в). Регулятор керує двома клапанами Siemens VXF42 з електроприводами SAX61 (поз.4-г та поз.4-д), які працюють узгоджено як єдиний регулюючий орган. Разом вони забезпечують необхідне співвідношення повітря та паливного газу, що подаються у пальникову систему підігрівника, підтримуючи стабільний температурний режим.

Контур регулювання витрати повітря. Витратомір SITRANS F C MASS 2100 (поз.5-а) формує сигнал 4–20 мА, який надходить на регулятор Modicon M172 (поз.5-в). Регулятор подає вихідний сигнал на клапан Siemens VXF42 з електроприводом SAX61 (поз.5-г), що регулює подачу повітря до циклонного реактора.

Контур регулювання температури у холодильнику-зрошувачі. З високотемпературної термопари WIKA TC95-S (поз.7-а) сигнал 4–20 мА надходить на регулятор Modicon M172 (поз.7-в). Регулятор керує клапаном Siemens VXF42 з приводом SAX61 (поз.7-г), який регулює подачу охолоджуючої води у холодильник зрошувач. Це дозволяє підтримувати стабільну температуру в зоні охолодження після циклонного реактора, що важливо для подальшої стабілізації продуктів реакції.

Контур регулювання витрати сировини після фільтра. Сигнал від витратоміра SITRANS F C MASS 2100 (поз.8-а) надходить на регулятор Modicon

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

M172 (поз.8-в), який керує клапаном Siemens VXF42 з електроприводом SAX61 (поз.8-г). Контур забезпечує дозовану подачу сировини з фільтра до реактора.

Контур регулювання витрати паливного газу. З витратоміра SITRANS F C MASS 2100 (поз.9-а) сигнал 4–20 мА подається на регулятор Modicon M172 (поз.9-в). Вихідний сигнал регулятора подається на клапан Siemens VXF42 з приводом SAX61 (поз.9-г), який регулює подачу паливного газу в реактор, забезпечуючи необхідну теплову енергію для підтримки температурного режиму процесу термічного розкладання.

– Контури індикації

Контур індикації температури у вологовипарнику. З високотемпературної термопари WIKA TC95-S (поз.1-а) уніфікований сигнал у форматі 4–20 мА надходить на мікропроцесорний регулятор Modicon M172, на якому реалізовано індикацію температури.

Контур індикації рівня у піновіддільнику. З радарного рівнеміра VEGAPULS 64 (поз.2-а) сигнал 4–20 мА подається на регулятор Modicon M172, на якому відображається значення рівня.

Контур індикації тиску у нижній зоні безполуменевого підігрівника. З датчика тиску SITRANS P DS III (поз.3-а) уніфікований сигнал 4–20 мА надходить на Modicon M172, де реалізується індикація тиску.

Контур індикації температури у нижній зоні безполуменевого підігрівника. З термопари WIKA TC95-S (поз.4-а) сигнал 4–20 мА подається на регулятор Modicon M172, на якому реалізовано індикацію температури.

Контур індикації витрати повітря до реактора. З витратоміра SITRANS F C MASS 2100 (поз.5-а) уніфікований сигнал 4–20 мА надходить на Modicon M172. Значення витрати додатково дублюється на багатоканальному індикаторі Seneca S604B, встановленому на щиті керування.

Контур індикації температури у циклонному реакторі. З термопари WIKA TC95-S (поз.6-а) сигнал 4–20 мА подається на Modicon M172, на якому

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

реалізовано індикацію температури. Параметр додатково дублюється на індикаторі Seneca S604B.

Контур індикації температури у холодильнику-зрошувачі. З термопари WIKA TC95-S (поз.7-а) уніфікований сигнал 4–20 мА подається на регулятор Modicon M172 з виведенням індикації температури.

Контур індикації витрати сировини після фільтра. З витратоміра SITRANS F C MASS 2100 (поз.8-а) сигнал 4–20 мА надходить на Modicon M172. Індикація витрати додатково дублюється на індикаторі Seneca S604B.

Контур індикації витрати паливного газу. Сигнал з витратоміра SITRANS F C MASS 2100 (поз.9-а) у форматі 4–20 мА подається на регулятор Modicon M172. Значення витрати дублюється на індикаторі Seneca S604B.

Контур індикації концентрації у газовій суміші. З газоаналізатора ENOTEC SEMTEC Smart (поз.10-а) сигнал 4–20 мА подається на регулятор Modicon M172. Індикація концентрації додатково дублюється на багатоканальному індикаторі Seneca S604B.

– Контури сигналізації

Контур сигналізації рівня у піновіддільнику. З радарного рівнеміра VEGAPULS 64 (поз.2-а) подається уніфікований сигнал у форматі 4–20 мА на мікропроцесорний регулятор Modicon M172. Сигнал використовується для спрацювання сигналізації у випадку критичного відхилення рівня від допустимих меж.

Контур сигналізації тиску у нижній зоні безполуменового підігрівника. З датчика тиску SITRANS P DS III (поз.3-а) уніфікований сигнал 4–20 мА надходить на Modicon M172. У разі перевищення або зниження тиску за межі допустимого діапазону активується аварійна сигналізація.

Контур сигналізації температури у нижній зоні безполуменового підігрівника. З високотемпературної термопари WIKA TC95-S (поз.4-а) сигнал 4–20 мА надходить на регулятор Modicon M172. При досягненні критичних температурних значень формується аварійний сигнал про відхилення від норми.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Контур сигналізації температури у циклоному реакторі. З високотемпературної термопари WİKA TC95-S (поз.6-а) уніфікований сигнал 4–20 мА подається на регулятор Modicon M172, який використовується для індикації температури в зоні циклоном реактора. У випадку перевищення або зниження температури за встановлені технологічні межі формується аварійна сигналізація. Цей контур не передбачає автоматичного регулювання — лише контроль і попередження.

Контур сигналізації температури у холодильнику-зрошувачі. З високотемпературної термопари WİKA TC95-S (поз.7-а) сигнал 4–20 мА подається на Modicon M172. У разі критичного відхилення температури від технологічно допустимих значень активується сигналізація.

4.3 Розробка додаткових проектних рішень

Для забезпечення практичної реалізації автоматизованої системи керування процесом виробництва технічного вуглецю, окрім функціональної схеми, необхідно розробити комплекс додаткових проектних рішень. Вони включають організацію електроживлення, підключення первинних вимірювальних та виконавчих пристроїв до контролера, формування структури сигналів та компонування засобів автоматизації в межах монтажної шафи. Усі технічні рішення відповідають вимогам електробезпеки, уніфікації сигналів та забезпечують надійну роботу системи в умовах промислової експлуатації.

Підключення електроживлення до монтажної шафи.

Живлення системи автоматизації здійснюється від однофазної мережі змінного струму 220 В, 50 Гц. Для захисту внутрішніх кіл від перевантаження та коротких замикань передбачено встановлення автоматичного вимикача Q1 номіналом 10 А та вимикача навантаження SF1, які встановлюються на ввіді в монтажну шафу.

Фазний провідник (L), нейтраль (N) та захисний провідник (PE) підключаються до зовнішнього клемника X5, з якого живлення подається на внутрішній клемник X4, розташований на монтажній платі шафи. Після цього

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

логічного контролера Schneider Electric Modicon TM172PDG42SI, який виконує функції збору, обробки та формування керуючих сигналів у системі автоматизації.

Контролер має 12 аналогових входів (AI1 – AI12), з яких у поточній конфігурації використовується 10 входів AI1 – AI10, а AI11 та AI12 зарезервовані для подальшого розширення системи. Всі вхідні сигнали мають уніфікований струмовий інтерфейс 4–20 мА, що дозволяє підключати промислові датчики без додаткових перетворювачів.

Підключення вхідних аналогових сигналів реалізовано наступним чином:

- AI1 – температура у вологовипарнику, вимірюється датчиком WİKA TC95-S (поз. 1-а);
- AI2 – рівень у піновіддільнику, контролюється за допомогою VEGAPULS 64 (поз. 2-а);
- AI3 – тиск у безполуменовому підігрівнику, вимірюється датчиком SITRANS P DS III (поз. 3-а);
- AI4 – температура у безполуменовому підігрівнику, визначається датчиком WİKA TC95-S (поз. 4-а);
- AI5 – витрата повітря високого тиску, що подається до циклонного реактора, контролюється витратоміром SITRANS F C MASS 2100 (поз. 5-а);
- AI6 – температура в циклонному реакторі, вимірюється WİKA TC95-S (поз. 6-а);
- AI7 – температура у холодильнику-зрошувачі, контролюється датчиком WİKA TC95-S (поз. 7-а);
- AI8 – витрата сировини після фільтра перед подачею в циклонний реактор, вимірюється витратоміром SITRANS F C MASS 2100 (поз. 8-а);
- AI9 – витрата паливного газу до циклонного реактора, визначається витратоміром SITRANS F C MASS 2100 (поз. 9-а);

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

- АІ10 – концентрація вуглецю у продуктах реакції на виході з циклонного реатора, аналізується приладом ENOTEC SEMTEC® Smart (поз. 10-а).

Для впливу на технологічний процес використано шість аналогових виходів контролера (АО1 – АО6), до яких підключено сім електроприводів клапанів Siemens SAX61. Формування керуючих сигналів здійснюється уніфікованим струмовим сигналом 4–20 мА відповідно до такого розподілу:

- АО1 – регулювання рівня у піновіддільнику (клапан 2-г);
- АО2 – регулювання витрати повітря високого тиску до циклону реактора (клапан 5-г);
- АО3 – регулювання температури шляхом подачі води у холодильник-зрошувач (клапан 7-г);
- АО4 – регулювання витрати сировини після фільтра до циклону реактора (клапан 8-г);
- АО5 – регулювання температури у безполуменовому підігрівнику шляхом подачі суміші паливного газу та повітря (спільне керування клапанами 4-г та 4-д);
- АО6 – регулювання витрати паливного газу до циклону реактора (клапан 9-г).

Окремо в системі реалізовано дублювання інформації для оперативного спостереження оператором. Для цього використовуються два цифрові багатоканальні індикатори Seneca S604В, які підключаються безпосередньо до виходів відповідних датчиків, минаючи контролер. Це дозволяє виводити параметри на індикатори незалежно від стану або режиму роботи контролера.

Перший індикатор забезпечує виведення значень витрат сировини (8-а), повітря (5-а) та паливного газу (9-а). Другий — відображення температури у циклонному реакторі (6-а) та концентрації вуглецю (10-а). Обидва індикатори мають по чотири аналогові входи 4–20 мА та живляться від джерела постійного струму 24 В DC.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

Принципова схема підключення обладнання системи автоматизації наведена на рисунку 4.13 (див. додаток Г).

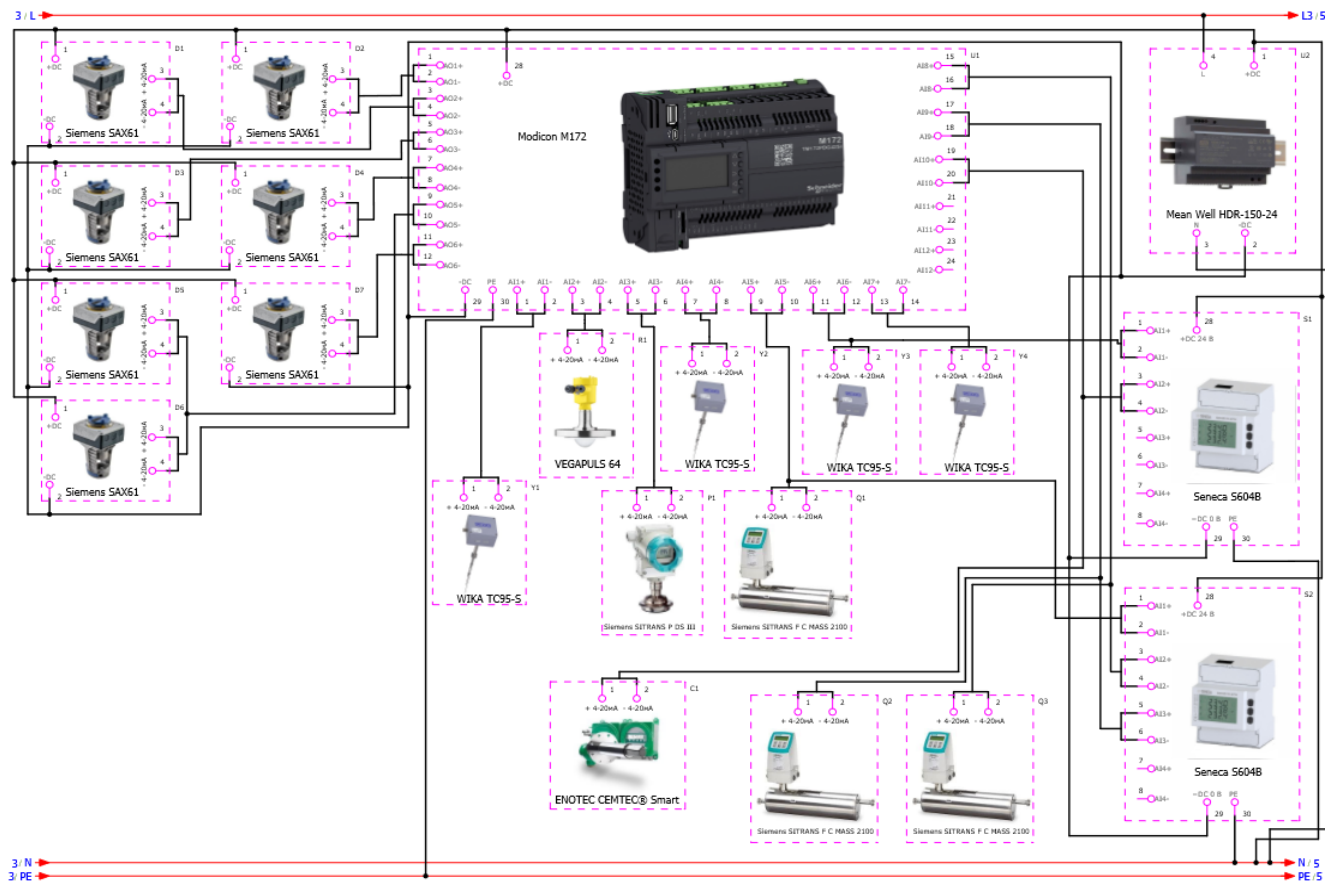


Рисунок 4.13 – Принципова електрична схема підключення обладнання системи автоматизації

Специфікація обладнання.

Для реалізації автоматизованої системи керування виробництвом технічного вуглецю було обрано та сформовано перелік технічних засобів автоматизації, які забезпечують збір, обробку та відображення технологічних параметрів, а також керування виконавчими механізмами. У таблиці 4.2 наведено специфікацію обладнання, використаного в системі.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таблиця 4.2 – Специфікація обладнання

№ п/п	Позначення	Найменування пристрою	Кількість, шт
1	U1	ПЛК Schneider Electric Modicon TM172	1
2	U2	Блок живлення Mean Well HDR-150-24	1
3	S1...S2	Індикатор цифровий Seneca S604B	2
4	D1...D7	Електроприводи Siemens SAX61	7
5	Y1...Y4	Датчики температури WIKA TC95-S	4
6	R1	Датчик рівня VEGAPULS 64	1
7	P1	Датчик тиску Siemens SITRANS P DS III	1
8	Q1...Q3	Витратоміри масові Siemens SITRANS F C MASS 2100	3
9	C1	Аналізатор концентрації вуглецю ENOTEC CEMTEC® Smart	1

Повна креслена специфікація елементів системи автоматизації наведена у Додатку Д.

Щит керування.

У системі автоматизації основні технічні засоби керування та індикації змонтовані в окремому щиті керування. Його конструкція забезпечує централізоване розміщення елементів системи, а також зручність обслуговування та підключення зовнішніх пристроїв.

Габарити щита становлять 400×400×120 мм. Монтаж передбачено настінний або на технологічній опорі. На передній панелі встановлено:

- контролер Schneider Electric Modicon TM172PDG42SI;
- два індикатори Seneca S604B для виведення параметрів технологічного процесу.

Всередині щита на DIN-рейках розміщено:

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

- блок живлення Mean Well HDR-150-24, який формує напругу 24 В DC;
- автоматичні вимикачі та клемні блоки для підключення живлення та сигналів.

Габаритне креслення щита подано на рисунку 4.14 (див. додаток Е), а внутрішнє компонування — на рисунку 4.15 (див. додаток Ж).

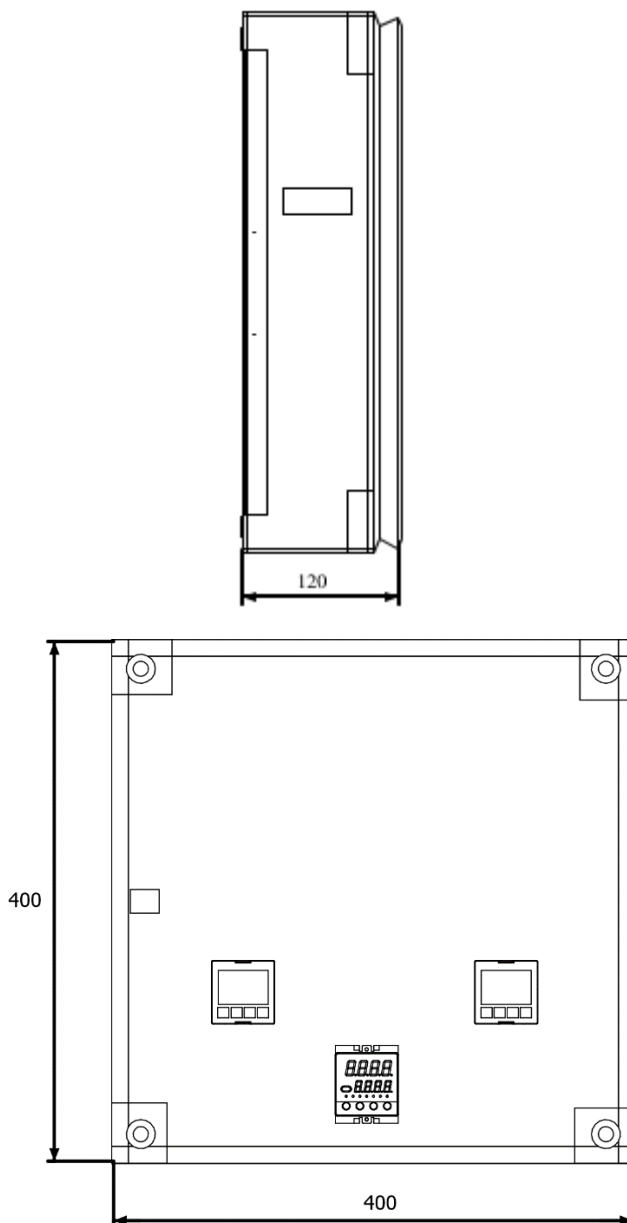


Рисунок 4.14 – Габаритне креслення щита керування

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

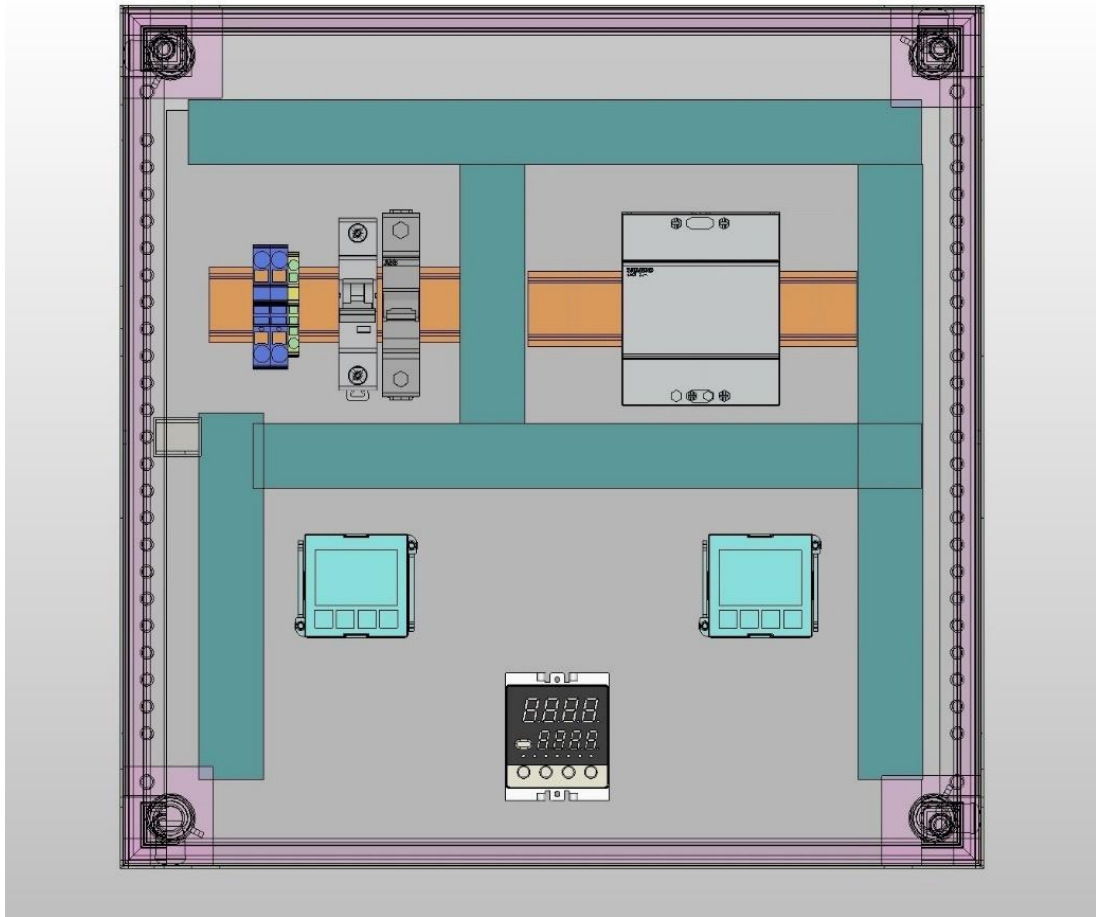
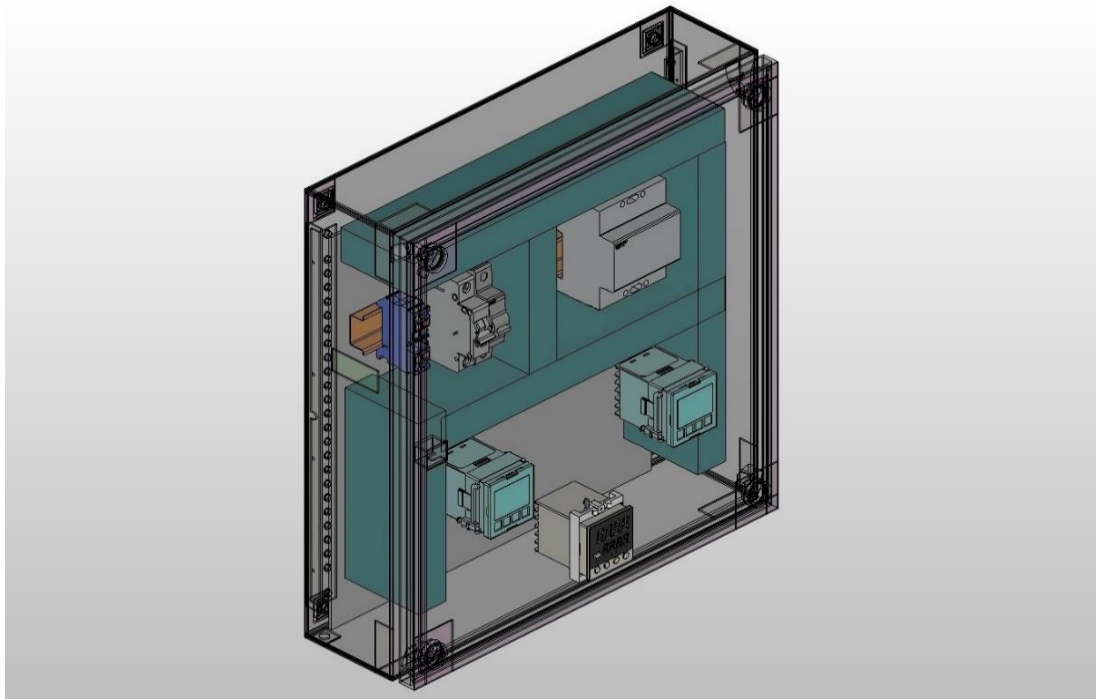


Рисунок 4.15 – 3D-модель внутрішнього компонування щита керування

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ

Арк.

86

Висновки до розділу

У даному розділі виконано вибір технічних засобів автоматизації, необхідних для реалізації системи контролю та керування параметрами технологічного процесу. Побудовано функціональну та принципову схеми, сформовано специфікацію обладнання і представлено компоновку щита керування. Окрему увагу приділено детальному опису контурів регулювання, індикації та сигналізації з урахуванням особливостей кожного технологічного вузла. Розроблена система забезпечує надійне автоматизоване регулювання витрати, температури, тиску, рівня та концентрації вуглецю на основних етапах процесу термічного розкладання сировини.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі було здійснено комплексне дослідження та проектування автоматизованої системи керування процесом виробництва технічного вуглецю методом термічного розкладу. Робота охоплює як теоретичні аспекти моделювання об'єкта керування, так і практичну реалізацію системи автоматизації із застосуванням сучасних технічних засобів.

У першому розділі проаналізовано технологічний процес виробництва, властивості сировини та продукту, а також обґрунтовано доцільність автоматизації на окремих технологічних вузлах.

У другому розділі побудовано математичну модель циклонного реактора, визначено передатні функції, лінеаризовано рівняння, досліджено стійкість та керованість системи.

У третьому розділі здійснено синтез одноконтурної та каскадної систем автоматичного регулювання з використанням ПІ-регуляторів, побудованих у середовищі Simulink. Проведено порівняльний аналіз динамічних характеристик та перевірку стійкості за критерієм Михайлова.

Четвертий розділ присвячено технічному впровадженню: обґрунтовано вибір приладів, побудовано функціональну та принципову схеми, описано контури регулювання, індикації й сигналізації. Розроблено специфікацію обладнання та 3D-модель щита керування з урахуванням вимог електробезпеки, монтажу та обслуговування.

Розроблена система може бути впроваджена у виробництво технічного вуглецю як ефективне та надійне рішення автоматизації. Запропоновані технічні підходи дозволяють підвищити точність регулювання, знизити витрати енергоресурсів і забезпечити стабільну якість кінцевого продукту.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Положення про підготовку бакалаврів в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу: введено в дію наказом ректора від 16 березня 2020 р. № 79. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 12 с.

2. Положення про академічну доброчесність працівників та здобувачів вищої освіти Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу: введено в дію наказом ректора від 13 грудня 2019 р. № 327. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. 21 с.

3. Семенцов Г. Н., Когуч Я. Р., Куровець Я. В., Дранчук М. М. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій та газовій промисловості: навч. посіб. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. — 301 с.

4. Олійник А. П., Незамай Б. С. Математичні основи АСУ: конспект лекцій. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. — 50 с.

5. Олійник А. П., Незамай Б. С. Математичне моделювання процесів розробки нафтових і газових родовищ: лабораторний практикум. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. — 43 с.

6. Качмар Ю. Д., Цьомко В. В., Бабій М. Б. Математичне моделювання продуктивності нафтових свердловин. // Нафтогазова галузь України. — 2013. — № 6. — С. 42–47.

7. Білецький В. С. Моделювання у нафтогазовій інженерії: навч. посіб. — Львів: Новий Світ – 2000, 2021. — 306 с.

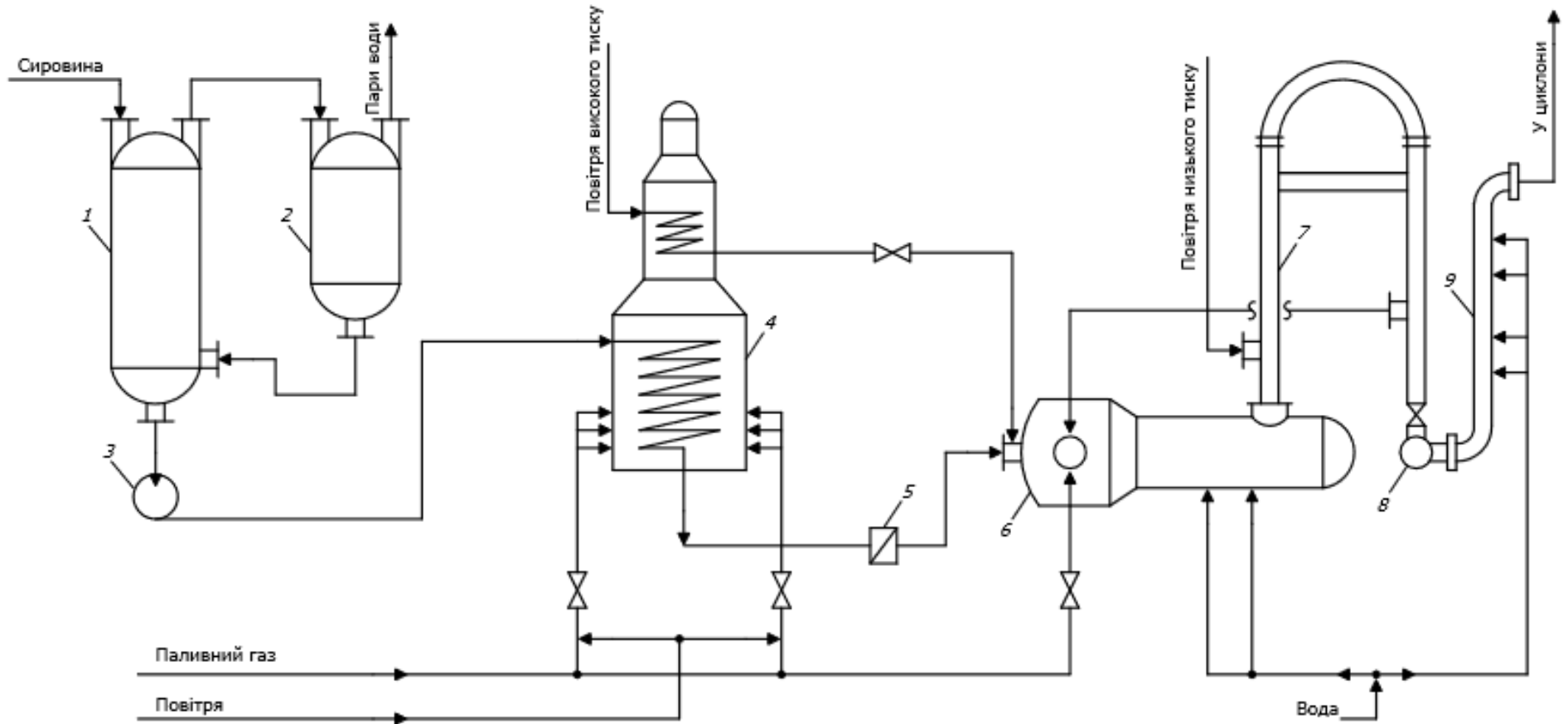
8. Мовчан В. П., Пилипенко М. І. Автоматизація технологічних процесів в нафтогазовій промисловості. — Київ: Видавництво НТУУ «КПІ», 2015. — 320 с.

9. Габітов А. М. Моделювання і автоматизація процесів сепарації нафти і газу. — Київ: Техніка, 2019. — 295 с.

10. Шафран В. П., Король О. П. Автоматизація технологічних процесів нафтогазової галузі. — Харків: Видавництво ХНУ, 2020. — 340 с.

					БР.АКП-16.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

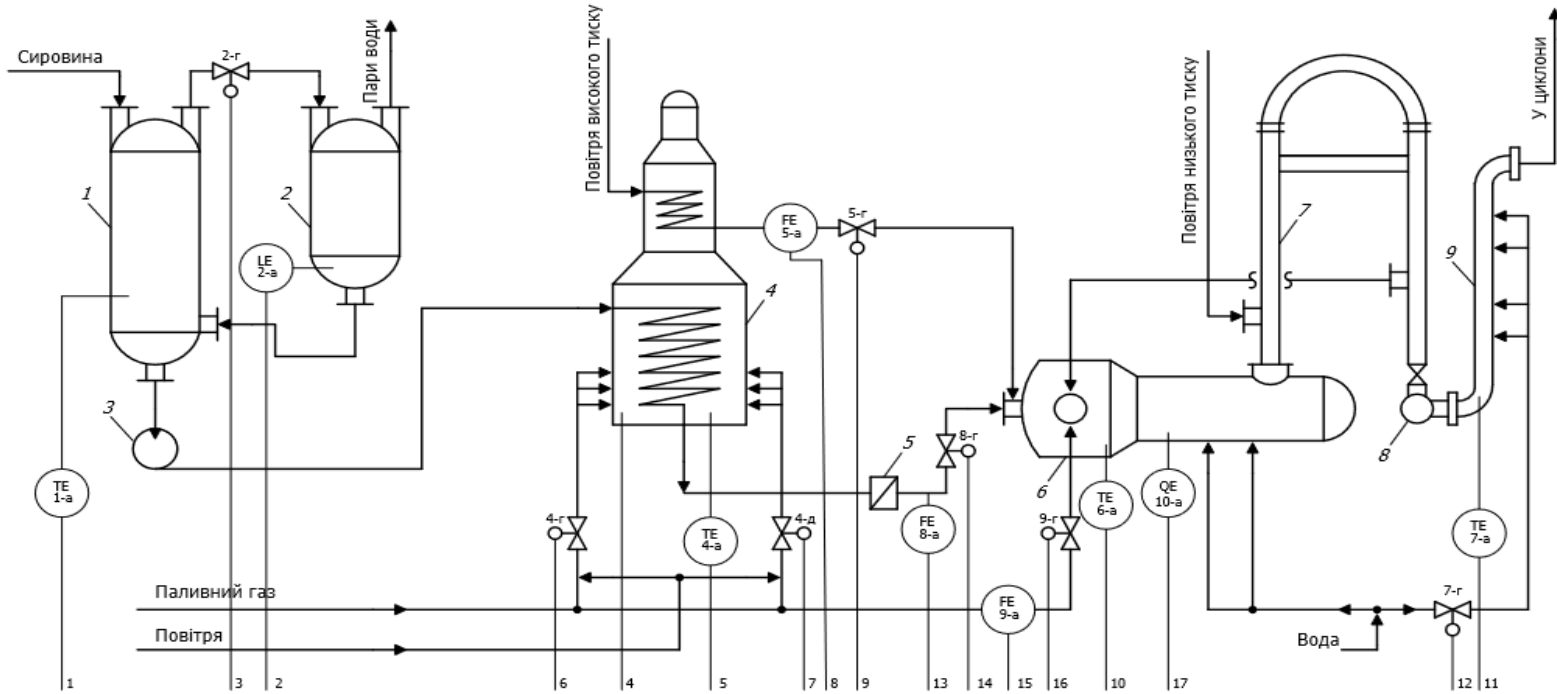
Додаток А



1 – вологовипарник; 2 – піновіддільник; 3 – відцентровий насос; 4 – безполумєний підігрівник; 5 – фільтр; 6 – циклонний реактор; 7 – повітропідігрівник; 8 – колектор; 9 – холодильник-зрошувач

					БР.АКП-16.00.00.001					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням			Літера	Маса	Масштаб
					Технологічна схема виробництва технічного вуглецю			АКП-21-1 ІФНТУНГ		
								Арк. 90	Аркушів 96	

Додаток Б

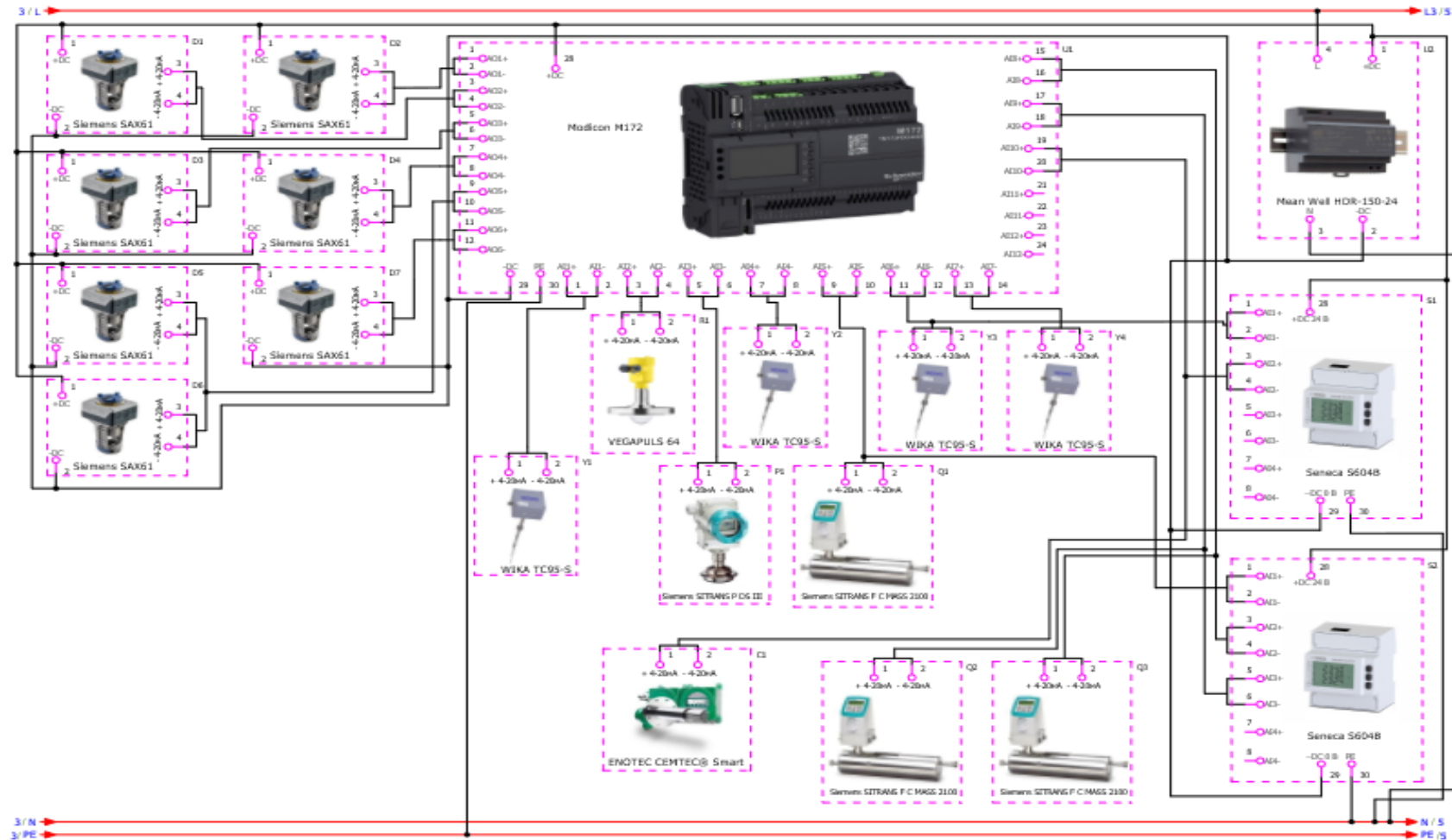


	°C	%	Па	°C	°C	м³/год	°C	°C	°C	м³/год	м³/год	°C	%
По місцю	TI 1-б	LI 2-б	PI 3-а	TI 4-б	FE 5-а	TT 6-б	TI 7-б	FT 8-б	FT 9-б	FT 10-а	FT 10-а	QT 10-б	
На щиті	TI 1-в	LICA 2-в	PICA 3-б	TICA 4-в	FIC 5-в	TIA 6-в	TICA 7-в	FIC 8-в	FIC 9-в	FIC 9-в	FIC 9-в	OI 10-в	

1 – вологовипарник; 2 – піновіддільник; 3 – відцентровий насос; 4 – безполумєневий підігрівник; 5 – фільтр; 6 – циклонний реактор; 7 – повітропідігрівник; 8 – колектор; 9 – холодильник-зрошувач

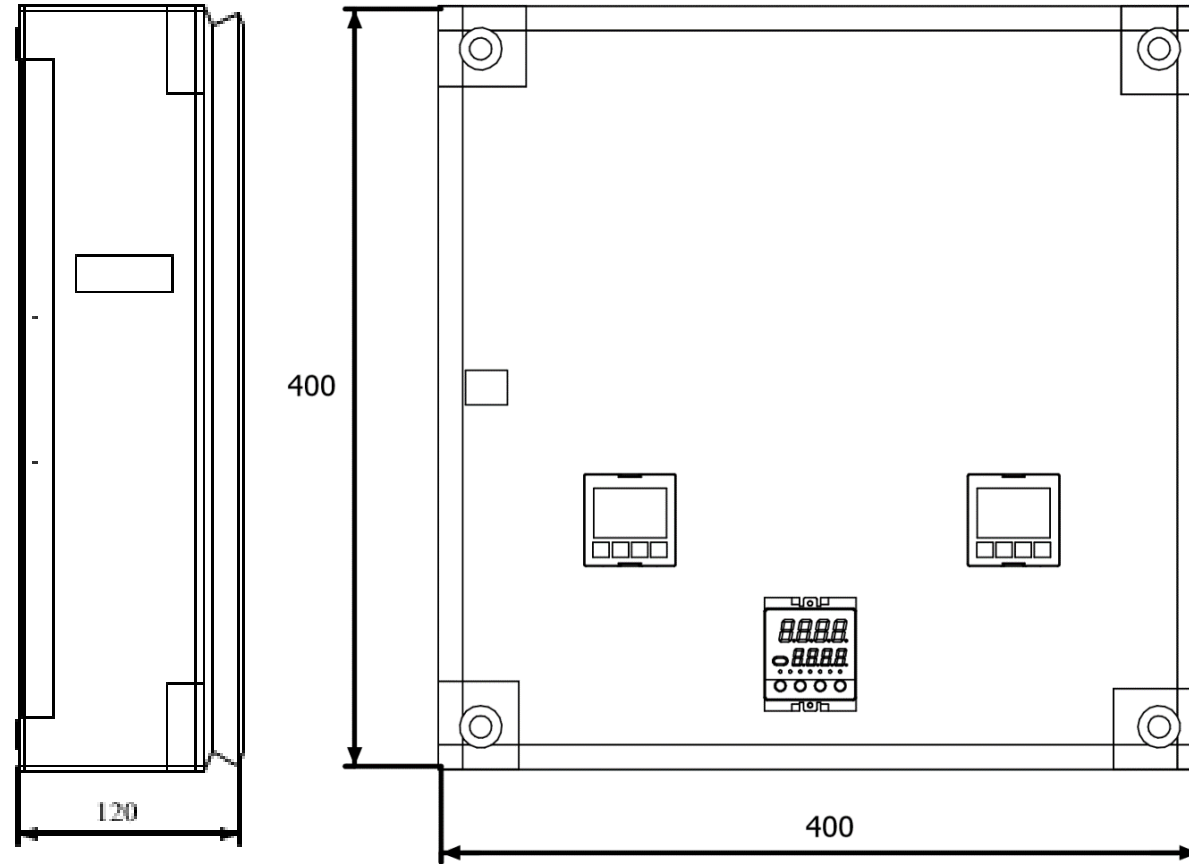
БР.АКП-16.00.00.002									
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням	Літера	Маса	Масштаб	
					Функціональна схема системи автоматизації виробництва технічного вуглецю	АКП-21-1 ІФНТУНГ			
						Арк. 91	Аркушів 96		

Додаток Г



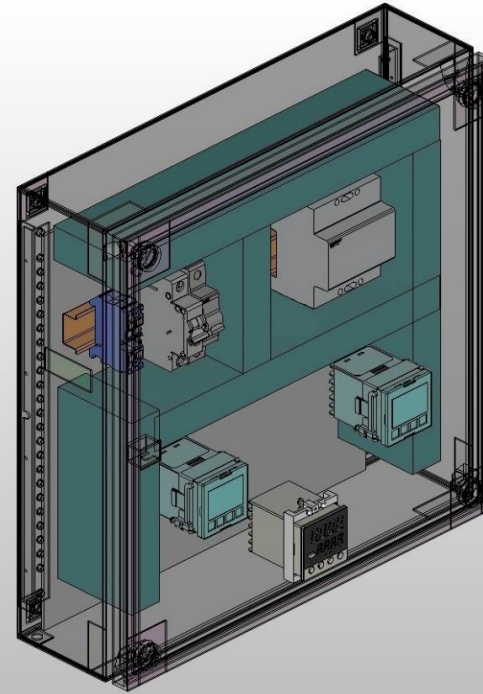
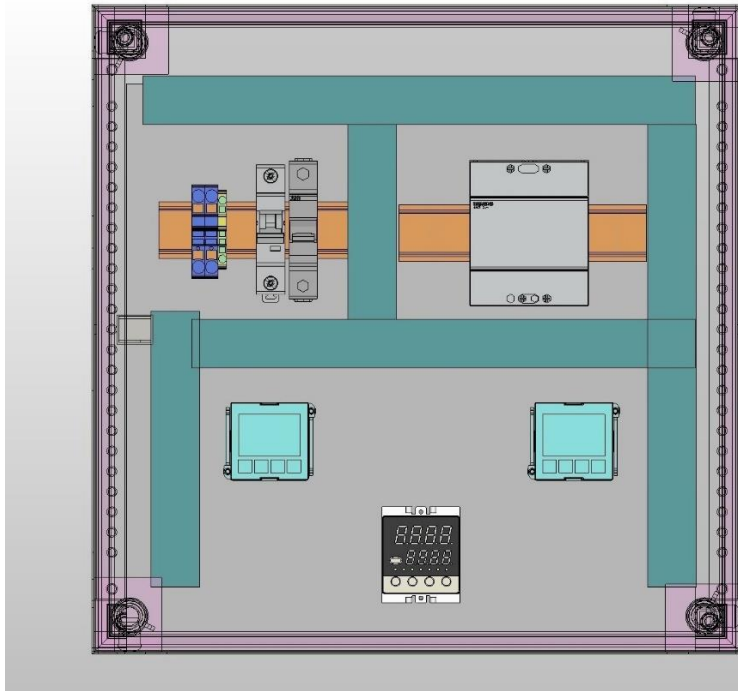
					БР.АКП-16.00.00.004							
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням			Літера	Маса	Масштаб		
					Принципова електрична схема підключення обладнання системи автоматизації			Арк.	93	Аркушів	96	
								АКП-21-1 ІФНТУНГ				

Додаток Е



					БР.АКП-16.00.00.006				
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням	Літера		Маса	Масштаб
Розробив		Парипа О.М.							
Перевірив		Лагойда А.І.							
Т. Контроль									
Рецензент		Кучмистенко О.В.				Арк.	95	Аркушів	96
Н. Контроль		Кучмистенко О.В.			Габаритне креслення щита керування системи автоматизації		АКП-21-1 ІФНТУНГ		
Затвердив		Лагойда А.І.							

Додаток Ж



					БР.АКП-16.00.00.007			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Літера		Маса	Масштаб
					Автоматизація процесу виробництва технічного вуглецю термічним розкладанням			
Розробив		Парипа О.М.						
Перевірив		Лагойда А.І.						
Т. Контроль								
Рецензент		Кучмистенко О.В.			Арк.	96	Аркушів	96
Н. Контроль		Кучмистенко О.В.			3D-модель внутрішнього компонування щита керування		АКП-21-1 ІФНТУНГ	
Затвердив		Лагойда А.І.						