

**Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет робототехніки та штучного інтелекту
Кафедра автоматизації та безпілотних систем**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ
КАРБОНІЗАЦІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ АКТИВОВАНОГО ВУГІЛЛЯ
AUTOMATED CARBONIZATION PROCESS CONTROL SYSTEM FOR
ACTIVATED CARBON PRODUCTION**

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АВ - 41
Боришкевич Тарас Олександрович

(підпис)

Керівник: ст.викладач
Смолянкін Олег Олексійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«___» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Решетило О. М.

(підпис)

Луцьк – 2026

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

Кафедра автоматизації та безпілотних систем

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 15 Автоматизація та приладобудування

Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О. Ю. Повстяной

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

_____ Боришкевич Тараса Олександровича _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Автоматизована система керування процесом карбонізації
при виробництві активованого вугілля _____

керівник роботи _____ Смолянкін Олег Олексійович, ст. викладач _____

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від "31" 12 2025 року N 1307/01-04

2. Строк подання студентом роботи _____ 1.06.2026 р. _____

3. Вихідні дані до роботи _____ технологічний процес виробництва активованого вугілля _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
_____ Аналіз об'єкта керування, Обґрунтування ФСА, Обґрунтування ТЗА, Обґрунтування та
опис принципових електричних схем, Програмне забезпечення системи автоматизації,
Розрахунок системи автоматичного регулювання температури реактора карбонізації.
Техніко-економічне обґрунтування _____

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

_____ Функціональна схема, Схема електрична, Блок схема, Програма роботи
контролера _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Смолянкін О. О.</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Смолянкін О. О.</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Смолянкін О. О.</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Смолянкін О. О.</i>		
<i>Розділ 5</i>	<i>Смолянкін О. О.</i>		
<i>Розділ 6</i>	<i>Смолянкін О. О.</i>		
<i>Розділ 7</i>	<i>Смолянкін О. О.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>			
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Лапченко Ю. С.</i>		

7. Дата видачі завдання 18.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

N з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів випускної кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Аналіз об'єкта керування</i>	<i>20.02.2026 р.</i>	
2	<i>Обґрунтування вибору функціональної схеми</i>	<i>10.03.2026 р.</i>	
3	<i>Обґрунтування вибору ТЗА</i>	<i>20.03.2026 р.</i>	
4	<i>Обґрунтування і опис принципів електричних схем</i>	<i>1.04.2026 р.</i>	
5	<i>Програмне забезпечення систем автоматизації</i>	<i>10.04.2026 р.</i>	
6	<i>Розрахункова частина</i>	<i>20.04.2026 р.</i>	
7	<i>Техніко-економічне обґрунтування</i>	<i>1.05.2026 р.</i>	
8	<i>Оформлення роботи</i>	<i>1.06.2026 р.</i>	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Боришкевич Т. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Смолянкін О. О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Боришкевич Т. О. Автоматизована система керування процесом карбонізації при виробництві активованого вугілля. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування карбонізаційною лінією виробництва активованого вугілля на базі модулів Advantech ADAM-6000, що забезпечує стабільне підтримання температурного профілю шахтного реактора.

Практична новизна полягає у застосуванні розподіленої системи введення-виведення на базі модулів ADAM-6000 у розробці семи BasicScript-сценаріїв керування контурами температури, тиску, рівня та дозування; а також у застосуванні методу SIMC для розрахунку ПІД-регулятора температури зони карбонізації, що забезпечує перерегулювання не більше 12% та нульову статичну похибку.

Обсяг пояснювальної записки становить 60 друкованих сторінок. Об'єм графічної частини кваліфікаційної роботи складає 3 креслення.

Ключові слова: карбонізація, активоване вугілля, шахтний реактор, ПІД-регулятор, SIMC.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Боришкевич Т.			Автоматизована система керування процесом карбонізації при виробництві активованого вугілля	Лім.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Смолянкін О.О.					4	60
Н. контр.		Лапченко Ю.С.				ЛНТУ, гр. АВ-41		
Затв.		Гуменюк Л.О.						

ANNOTATION

Boryshekvych T. O. Automated control system for the carbonization process in activated carbon production. Manuscript.

Qualification work for bachelor's degree in "Automation and computer-integrated technologies". Lutsk National Technical University, Lutsk, 2026.

The bachelor's thesis consists of an introduction, seven chapters, conclusions and suggestions, a list of references and appendices.

The aim of the work is to develop an automated control system for the activated carbon production carbonization line based on Advantech ADAM-6000 modules, ensuring stable maintenance of the shaft reactor temperature profile.

Practical novelty consists in the application of a distributed I/O system based on ADAM-6000 modules; in the development of seven BasicScript control scripts for temperature, pressure, level and dosing loops; as well as in the application of the SIMC method for PID controller tuning of the carbonization zone temperature, providing overshoot no more than 12% and zero steady-state error.

The volume of the explanatory note is 60 printed pages. The graphic part of the qualification work consists of 3 drawings.

Keywords: carbonization, activated carbon, shaft reactor, PID controller, SIMC.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	9
1.1 Загальна характеристика технологічного процесу карбонізації	9
1.2 Будова та принцип роботи карбонізаційної лінії.....	10
1.3 Параметри технологічного процесу.....	11
1.4 Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування.....	12
1.5 Вимоги до системи автоматизації.....	15
РОЗДІЛ 2 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	16
РОЗДІЛ 3 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	19
3.1 Вибір давачів	19
3.2 Вибір виконавчих пристроїв	21
3.3 Вибір пристроїв управління	22
3.4 Вибір джерел живлення	23
РОЗДІЛ 4 ОБГРУНТУВАННЯ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ	25
РОЗДІЛ 5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ	30
5.1 Розробка алгоритму функціонування системи управління	30
5.2 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера	32
РОЗДІЛ 6 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РЕАКТОРА КАРБОНІЗАЦІЇ.....	34
РОЗДІЛ 7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	39
ВИСНОВОК	41
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44
ДОДАТКИ	47

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Активоване вугілля займає особливе місце серед промислових адсорбентів: його унікальна розвинена мікропориста структура з питомою поверхнею 800-1500 м²/г робить цей матеріал незамінним у водопідготовці, фармацевтичній та харчовій промисловості, хімічній технології та системах екологічного захисту. Попит на активоване вугілля у світі стабільно зростає, а вимоги до відтворюваності його якісних показників постійно посилюються. За таких умов надійне автоматичне керування виробничим процесом перестає бути конкурентною перевагою і стає обов'язковою умовою роботи на ринку [1].

Ключовим і найбільш відповідальним етапом виробництва активованого вугілля є карбонізація – термічне розкладання вуглецевмісної сировини без доступу кисню при температурах 600-900°C. Саме на цій стадії формується первинна мікропориста структура карбонізату, від якої безпосередньо залежать адсорбційні властивості кінцевого продукту. Будь-яке відхилення від заданого температурного профілю, порушення герметичності реактора або нестабільна подача сировини призводять до браку, підвищеного виходу летких речовин і, у гіршому випадку, до виникнення аварійних ситуацій через вибухонебезпечні пірогенні гази [1].

Метою дипломного проекту є розробка автоматизованої системи керування карбонізаційною лінією виробництва активованого вугілля на базі модулів Advantech ADAM-6000 і системи AdamView, що забезпечує стабільне підтримання температурного профілю реактора, безпечне відведення пірогенних газів та автоматичне дозування сировини.

Об'єктом дослідження є технологічний процес карбонізації вуглецевмісної сировини у шахтній печі безперервної дії.

Предметом дослідження – методи та засоби автоматизації теплових процесів піролізу на базі модульних розподілених систем введення-виведення.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи дослідження: аналіз технологічного процесу карбонізації, системний підхід, структурно-функціональний метод, методи теорії автоматичного керування, метод ідентифікації за перехідною характеристикою, метод SIMC для розрахунку регулятора.

Практична цінність роботи полягає у розробці комплексного технічного рішення, орієнтованого на реальне впровадження на підприємствах, що спеціалізується на виробництві обладнання для термічної переробки вуглецевмісних матеріалів.

У процесі виконання роботи необхідно вирішити такі задачі:

- виконати аналіз технологічного процесу карбонізації вуглецевмісної сировини як об'єкта керування;
- розробити функціональну схему автоматизації карбонізаційної лінії;
- виконати вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації (давачів, виконавчих механізмів, модулів введення-виведення, джерела живлення);
- розробити принципову електричну схему підключення мікропроцесорних модулів ADAM-6000 до польових приладів та виконавчих механізмів;
- розробити програмне забезпечення системи керування у середовищі AdamView мовою BasicScript;
- виконати розрахунок системи автоматичного регулювання температури реактора: визначити параметри математичної моделі об'єкта, розрахувати налаштування ПІД-регулятора та оцінити показники якості перехідного процесу;
- виконати розрахунок капітальних витрат на впровадження автоматизованої системи керування карбонізаційною лінією.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Загальна характеристика технологічного процесу карбонізації

Серед промислових адсорбентів активоване вугілля посідає особливе місце: завдяки унікально розвиненій питомій поверхні та регульованій пористій структурі воно залишається незамінним у задачах очищення рідин і газів, вилучення мікробруднювачів та рекуперації цінних розчинників. Попит на цей матеріал стабільно зростає, що висуває жорсткі вимоги до відтворюваності його якісних показників від партії до партії [1].

Промисловий маршрут виготовлення активованого вугілля охоплює два послідовних етапи термічної обробки вуглецевмісної сировини. Перший – карбонізація, або піроліз без доступу кисню, – формує так званий карбонізаційний твердий залишок зі вмістом вуглецю 75-90% та зародковою пористою структурою. Другий етап – активація парою або CO_2 – розвиває цю структуру до адсорбційних характеристик, придатних для практичного застосування. Таким чином, якість карбонізату фактично задає стелю досяжних властивостей готового продукту, що робить управління процесом карбонізації визначальним чинником конкурентоспроможності виробника [1].

Сировинна база виробництва є широкою: від деревини листяних і хвойних порід (береза, дуб, сосна) та кокосової шкаралупи – до торфу, кам'яновугільного пеку й аграрних відходів (лузга соняшнику, кукурудзяний стрижень). Кожен вид сировини характеризується власним вмістом целюлози, лігніну та золи, що безпосередньо визначає оптимальний температурний профіль карбонізації і, зрештою, пористу структуру продукту [1].

На підприємствах, переважає деревна сировина берези та дуба, а також відходи переробки соняшнику. Для цих матеріалів діапазон температур карбонізації становить 600-900°C, а вихід карбонізату – від 25 до 40% від маси абсолютно сухої сировини. Отримуваний напівфабрикат повинен

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

задовольняти таким показникам: вміст вуглецю не менше 75%, вихід летких речовин не більше 8%, питома поверхня 200-400 м²/г. Ці параметри безпосередньо корелюють із адсорбційними характеристиками кінцевої продукції: питома поверхня БЕТ 800-1500 м²/г, активність за йодом не менше 60%, зольність не вище 5% [1, 2].

1.2 Будова та принцип роботи карбонізаційної лінії

Для безперервного виробництва активованого вугілля з деревної сировини найбільш широко застосовується шахтна карбонізаційна піч – вертикальний реактор, у якому матеріал переміщується зверху вниз під дією власної ваги, послідовно проходячи через температурні зони різного призначення. Така конструкція забезпечує відносно рівномірне прогрівання шматків сировини та спрощує організацію безперервного завантаження і вивантаження без порушення герметичності робочого простору [3].

Конструктивно лінія включає такі функціональні вузли:

– шахтний реактор – сталевий циліндр із вогнетривкою футеровкою, висота якого становить 4-8 м, а внутрішній діаметр – 0,5-1,5 м; геометричні розміри обираються виходячи з проектної продуктивності та типу сировини. По висоті реактора виділяють три функціональні зони: сушіння (100-200°С), передкарбонізації (200-400°С) та безпосередньо карбонізації (400-900°С);

– система нагрівання – зовнішні газові пальники або електричні нагрівачі, що передають теплоту через стінку реактора. Пряме спалювання у робочому просторі виключене: внутрішнє середовище реактора повинно залишатися інертним, тому до нього подається азот або рециркульовані відхідні гази зі зниженим вмістом кисню;

– система газовідведення – трубопроводи відбору пірогенних газів (СО, СО₂, Н₂, СН₄, пари смол), конденсатор смолистих речовин та факельна установка або рекуперативний теплообмінник для утилізації горючих

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компонентів; наявність цієї системи є обов'язковою умовою вибухопожежної безпеки;

– система завантаження-вивантаження – бункер сировини з регульованим дозатором, шлюзові клапани, що забезпечують подачу матеріалу без підсмоктування повітря, а також охолоджувач карбонізату в нижній частині реактора;

– вимірювально-контрольний блок – термопари типу К та S, розташовані у 7-12 точках по висоті реактора, датчики тиску і витрати газів, аналізатори концентрації O₂ та CO у газових потоках.

Механізм карбонізації реалізується поетапно в міру опускання матеріалу крізь реактор. У зоні сушіння (100-200°C) видаляється вільна та адсорбційно зв'язана волога. При подальшому нагріванні до 200-350°C починається термічна деструкція нестійких органічних фрагментів з виділенням летких речовин. Діапазон 350-600°C є найінтенсивнішим з точки зору хімічних перетворень: саме тут відбувається глибокий розпад целюлозно-лігнінового матриксу з формуванням первинного вуглецевого каркасу та зародкових мікропор. Завершальна стадія (600-900°C) забезпечує стабілізацію кристалічної структури вуглецю та досягнення нормованого виходу летких речовин [2, 3]. Пірогенні гази, що виділяються на всіх стадіях, відводяться через систему газовідведення і є вибухонебезпечними, що висуває підвищені вимоги до протиаварійного захисту.

1.3 Параметри технологічного процесу

Сукупність параметрів, що підлягають вимірюванню та регулюванню, визначається як технологічним регламентом конкретного підприємства, так і маркою активованого вугілля, що виробляється. Аналіз виробничого досвіду дозволяє виокремити дев'ять ключових параметрів, наведених у таблиці 1.1.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Основні параметри технологічного процесу карбонізації

№	Параметр	Познач.	Діапазон / Норма	Точність підтримання
1	Температура у зоні сушіння	$T_1, ^\circ\text{C}$	100-200	$\pm 10 ^\circ\text{C}$
2	Температура у зоні передкарбонізації	$T_2, ^\circ\text{C}$	200-400	$\pm 5 ^\circ\text{C}$
3	Температура у зоні карбонізації	$T_3, ^\circ\text{C}$	400-900	$\pm 5 ^\circ\text{C}$
4	Швидкість нагрівання	$\beta, ^\circ\text{C}/\text{хв}$	5-15	$\pm 1 ^\circ\text{C}/\text{хв}$
5	Тиск у реакторі	$P, \text{Па}$	$\pm 50 \text{ Па}$ від атм. або 100-500 Па надлишку	$\pm 10 \text{ Па}$
6	Температура охолоджувачі	$T_0, ^\circ\text{C}$	70	$\pm 5 ^\circ\text{C}$

Особливої уваги заслуговує швидкість нагрівання при надто швидкому підйомі температури в зоні карбонізації утворюється надмірна кількість мікротріщин у вуглецевому каркасі, що погіршує механічну міцність гранул карбонізату. Занадто повільне нагрівання, навпаки, знижує продуктивність лінії. Оптимальне значення $5-15^\circ\text{C}/\text{хв}$ для деревної сировини отримано емпірично і може відрізнятися для інших видів сировини [3]. Вихід готового карбонізату становить 25-40% від маси абсолютно сухої сировини і є інтегральним показником правильності ведення процесу.

1.4 Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування

Розглянемо карбонізаційну піч з позицій теорії автоматичного керування. Вже перший погляд на конструкцію реактора виявляє низку властивостей, що суттєво ускладнюють задачу синтезу ефективної системи регулювання і водночас роблять її технічно цікавою.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 1.1 наведено структурну схему взаємозв'язків параметрів карбонізаційної печі у вигляді моделі «чорного ящика». Схема наочно показує, що один і той самий вихідний показник – якість карбонізату формується під впливом трьох груп вхідних сигналів: керованих (потужність нагрівача, витрата інертного газу, тиск), некерованих вхідних (характеристики сировини, параметри режиму) та збурюючих (мінливість сировини, теплота реакцій, коливання теплотворності газу). Така багатофакторність є типовою для об'єктів хімічної технології.

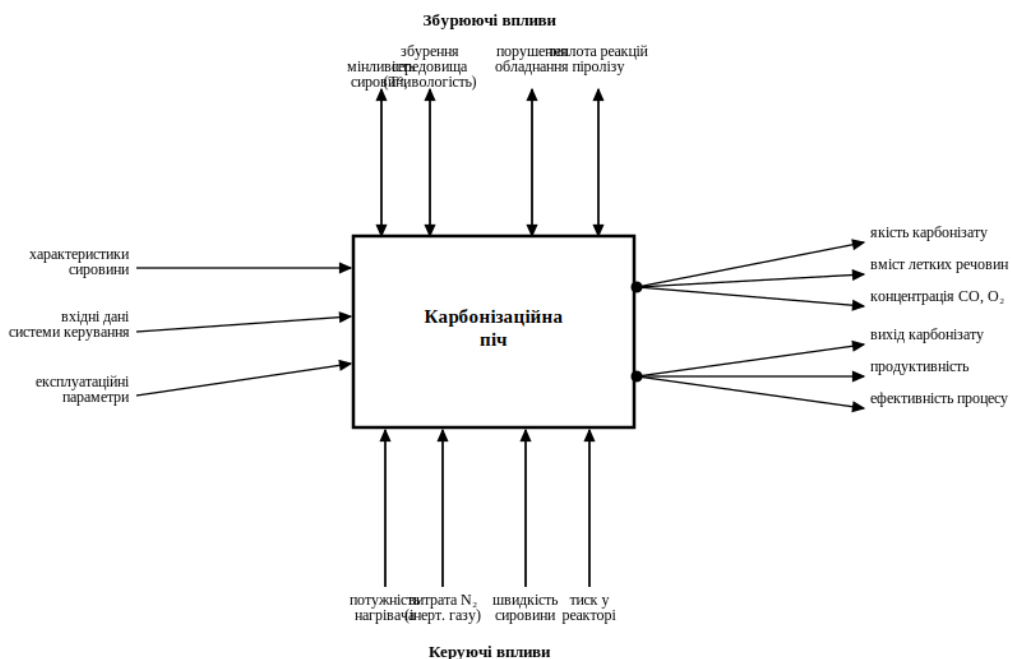


Рисунок 1.1 – Схема взаємозв'язків параметрів карбонізаційної печі як об'єкта керування

З точки зору класичної теорії керування об'єкт характеризується такими визначальними властивостями:

– розподіленість параметрів – температурне поле реактора є неоднорідним у просторі та описується диференціальними рівняннями в частинних похідних. Вимірювання ведуться лише у 7-12 дискретних точках, тому між сусідніми датчиками завжди існує зона з невідомим температурним станом. Це означає, що регулятор оперує неповною інформацією про реальний

стан об'єкта – принципове обмеження, яке необхідно враховувати при налаштуванні;

– нелінійність – теплоємність, теплопровідність матеріалу та ентальпія реакцій піролізу суттєво змінюються в міру прогрівання сировини, тому лінійна апроксимація об'єкта справедлива лише в обмеженому околі робочої точки. При зміні сировини або переході на інший температурний режим параметри моделі об'єкта зсуваються, і фіксовані налаштування регулятора можуть виявитися неоптимальними;

– значні транспортні запізнення – зміна потужності нагрівача у зовнішній зоні реактора досягає центральної частини шару матеріалу через 15–45 хв, залежно від розміру реактора та теплофізичних властивостей конкретної сировини. Таке запізнення є найсерйознішою перешкодою для якісного регулювання – будь-яка корекція «дійде» до об'єкта із значним часовим зсувом [7];

– перехресні зв'язки між зонами – нагрів або охолодження однієї зони реактора через теплопровідність стінок і матеріалу неминуче впливає на сусідні зони. Спроба одночасно й незалежно регулювати всі температурні зони без урахування цих зв'язків призводить до конкуренції між регуляторами та погіршення якості перехідних процесів;

– характер збурень – ендо- та екзотермічні реакції піролізу генерують непередбачувані теплові потоки всередині реактора; нерівномірність завантаження, зміна вологості сировини між партіями і коливання теплотворної здатності газу-палива діють як постійні зовнішні збурення, здатні вивести температурний профіль із заданих меж.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5 Вимоги до системи автоматизації

Сформульовані нижче вимоги є результатом аналізу як технологічних особливостей процесу карбонізації, так і обмежень, що впливають із властивостей об'єкта як об'єкта керування.

Вимоги до системи керування:

- регулювання рівня в бункері-дозаторі;
- підтримання температури у зоні сушіння;
- підтримання температури у зоні передкарбонізації;
- підтримання температури у зоні карбонізації;
- підтримання тиску у реакторі;
- підтримання температури в охолоджувачі;
- підтримання швидкості нагрівання.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Проектована автоматизована система керування (АСК) карбонізаційної лінії охоплює чотири основних технологічних вузли: конвеєр подачі сировини, бункер-дозатор, шахтний реактор та охолоджувач карбонізату. Кожен з вузлів виконує строго визначену функцію у загальному технологічному ланцюзі, і відповідно до цього для кожного вузла визначено власний набір засобів вимірювання, сигналізації та виконавчих механізмів.

Особливістю даної лінії порівняно з класичними конфігураціями є заміна зовнішніх газових пальників на систему подачі гарячих технологічних газів безпосередньо до реактора, а також наявність окремого апарата охолоджувача карбонізату з незалежним контуром подачі холодного повітря. Це накладає специфічні вимоги на конфігурацію контурів регулювання, що відображено у функціональній схемі автоматизації (ФСА).

Конвеєр є першою ланкою лінії: він транспортує вуглецевмісну сировину від складу до бункера-дозатора. З точки зору автоматизації конвеєр є дискретним об'єктом керування – необхідно лише забезпечити надійний пуск, зупинку та захист від перевантаження.

Керування приводом конвеєра здійснюється через ключ-пускач NS 1-1, сигнал на який надходить від ПЛК. Блокування передбачають автоматичну зупинку конвеєра при досягненні максимального рівня у бункері-дозаторі (сигнал від LE 1-1) або при аварійному зупиненні лінії. Пуск конвеєра можливий лише за відсутності аварійних сигналів і при підтвердженому стані шлюзового живильника бункера.

Бункер-дозатор виконує дві функції: накопичення буферного запасу сировини та дозованої її подачі до реактора. Для реалізації обох функцій встановлено два первинних перетворювачі.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Датчик рівня LE 1-1 контролює заповнення бункера. При досягненні мінімального рівня формується сигнал до ПЛК, що запускає конвеєр подачі. При досягненні максимального рівня конвеєр автоматично зупиняється. Таким чином реалізується двопозиційний контур регулювання рівня з гістерезисом, що є достатнім для буферного бункера з нерівномірним споживанням матеріалу.

Ваговий перетворювач (тензодатчик) WE 2-1 вимірює масу поточної порції сировини у дозувальній частині бункера. Сигнал від WE 2-1 надходить до ПЛК, де реалізовано алгоритм порційного дозування: шлюзовий живильник (NS 2-1) відкривається до досягнення заданої маси дози, після чого закривається.

Реактор є центральним і найбільш складним об'єктом керування в лінії. Теплоносієм слугують гарячі технологічні гази, що подаються до реактора через регулюючий клапан NS 3-1. Температурний профіль по висоті реактора контролюється трьома термопарами, розташованими у характерних зонах.

Датчик температури TE 3-1 вимірює температуру у зоні сушіння. Цей датчик забезпечує найнижній температурний контур – його сигнал використовується переважно для моніторингу та формування сигналізації при відхиленні від норми. Датчик температури TE 4-1 розташований у зоні передкарбонізації і є проміжним вимірювальним каналом каскадного контуру регулювання. Датчик температури TE 5-1 вимірює температуру у зоні карбонізації і є основною регульованою змінною зовнішнього контуру каскадного регулятора.

Контур стабілізації тиску побудовано за одноконтурною схемою: датчик PE 7-1 безперервно вимірює надлишковий тиск у реакторі та передає сигнал 4–20 мА до ПЛК. Регулятор тиску РС 7-1 формує керуючий вплив на виконавчий механізм NS 7-3 – регулюючий клапан скидання або підпору газів.

Охолоджувач являє собою окремий апарат, розташований після вивантажувального шлюза реактора. До охолоджувача подається холодне

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

атмосферне повітря, витрата якого регулюється клапаном NS 6-3. Мета охолодження знизити температуру карбонізату до рівня, безпечного для транспортування та зберігання.

Термопара ТЕ 6-1 вимірює температуру карбонізату на виході охолоджувача. Сигнал надходить до ПЛК, де реалізовано одноконтурний ПД-регулятор температури з виконавчим органом NS 6-3. На відміну від реактора, об'єкт охолоджувача має значно менші запізнення (час теплообміну 3-8 хв), що дозволяє обмежитися стандартним одноконтурним контуром без каскадного включення. При перевищенні температури вище 100°C формується аварійний сигнал НА і клапан подачі повітря переводиться у положення «повністю відкрито».

Специфікація надана в додатку А.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір датчиків

Вибір технічних засобів автоматизації (ТЗА) для карбонізаційної лінії здійснюється на підставі аналізу функціональної схеми автоматизації, розробленої у розділі 2, та вимог до точності й надійності, сформульованих у розділі 1. Відповідно до ФСА, до складу АСК входять такі групи польових приладів: датчики температури (ТЕ 3-1, ТЕ 4-1, ТЕ 5-1, ТЕ 6-1), датчик тиску (РЕ 7-1), датчик рівня (LE 1-1), ваговий перетворювач (WE 2-1), а також виконавчі механізми – регулюючі клапани та приводи з ключами-пусками NS.

Для вимірювання температури у зонах сушіння (100-200°C), передкарбонізації (200-400°C), карбонізації (600-900°C) та на виході охолоджувача (до 200°C) обрано термоелектричний перетворювач Omnigrad M TC10 виробництва Endress+Hauser із термопарою типу К (хромель-алюмель). Прилад призначений саме для промислових термічних процесів і відрізняється модульною конструкцією: чутливий елемент розміщено у захисній гільзі зі сталі 316L, яка забезпечує механічну стійкість в умовах запиленого середовища реактора [4].

Технічні характеристики датчика Omnigrad M TC10 наведені в таблиці Б.1 додатку Б.

Контур стабілізації тиску в реакторі вимагає вимірювання надлишкового тиску у діапазоні 0-2 кПа (0-20 мбар) з похибкою не більше ± 5 Па. Це надзвичайно малий діапазон тиску, тому вимоги до перетворювача є значно жорсткішими, ніж для стандартних промислових застосувань. Після порівняльного аналізу обрано інтелектуальний датчик надлишкового тиску Yokogawa EJA110E серії EJA-E. Ця серія побудована на технології

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

монокристалічного кремнієвого резонатора, що забезпечує основну похибку вимірювання $\pm 0,04\%$ від діапазону – значно кращий результат порівняно з п'єзорезистивними перетворювачами аналогічного цінового класу [5].

Технічні характеристики датчика EJA110E наведені в таблиці Б.2 додатку Б.

Бункер-дозатор заповнюється сипким матеріалом – деревною сировиною або агровідходами фракційного складу 5-50 мм. Вимірювання рівня такого матеріалу потребує безконтактного методу, стійкого до запиленості та нерівномірності поверхні насипу. Контактні методи (поплавцевий, мембранний) виключені через ризик механічного застрягання в сипкому середовищі [6].

Для позиції LE 1-1 обрано ультразвуковий рівнемір Siemens SITRANS LU150. Прилад випромінює імпульси ультразвуку частотою 40 кГц і вимірює час відлуння від поверхні насипу [6].

Технічні характеристики датчика Siemens SITRANS LU150 наведені в таблиці Б.3 додатку Б.

Ваговий контроль дози сировини (WE 2-1) є ключовим елементом концепції попереджувального керування, обґрунтованої у розділі 2. Точність дозування безпосередньо впливає на стабільність теплового навантаження реактора.

Обрано тензодатчик Mettler-Toledo PowerCell MTX у комплекті з нормувальним перетворювачем IND560. Тензодатчик типу PowerCell MTX побудований на принципі деформації пружного елемента зі сталі та зміни опору дротяних тензорезисторів [7].

Технічні характеристики датчика Mettler-Toledo PowerCell MTX наведені в таблиці Б.4 додатку Б.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Вибір виконавчих пристроїв

Гарячі технологічні гази, що подаються до реактора, мають температуру 600-900°C, тому до матеріалів клапана висуваються жорсткі вимоги за жаростійкістю. Обрано регулюючий клапан Fisher Controls серії 461 (Emerson) у виконанні з корпусом зі сплаву Alloy 6 та сідлом/пробкою із нітриду кремнію Si₃N₄. Привід пневматичний мембранний Fisher 657, що забезпечує час повного ходу менше 3 с і положення «закрито» при втраті тиску живлення (fail-closed) критична функція безпеки для контуру подачі гарячого теплоносія [8].

Технічні характеристики клапана Fisher Controls серії 461 (Emerson) наведені у таблиці Б.5 додатку Б.

Усі виконавчі механізми карбонізаційної лінії – регулюючі клапани з пневматичними приводами (NS 3-1, NS 7-3, NS 4-1) та електроприводи шлюзів (NS 1-1, NS 2-1) підключаються до виходів ПЛК не безпосередньо, а через проміжні комутаційні пристрої: реле-модулі або електромагнітні пускачі.

Для всіх позицій обрано реле-модуль Phoenix Contact PLC-RSC-24DC/21-ATEX (артикул 2902955). Ця модель сертифікована за ATEX Zone 2 (II 3G Ex nA IIC T4), що відповідає умовам роботи поблизу реактора з пірогенними газами. Модуль встановлюється на DIN-рейку NS 35 і підключається до клем ПЛК стандартними проводами перерізом 0,5-2,5 мм². [9].

Технічні характеристики реле-модуль Phoenix Contact PLC-RSC-24DC/21-ATEX наведені Б.6 додатку Б.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Вибір пристроїв управління

Модулі серії ADAM-6000 виробництва Advantech Co., Ltd. обрано як розподілену систему введення-виведення між польовими приладами та ПЛК. Вибір зумовлений кількома принциповими перевагами цієї серії над традиційними дротяними модулями розширення ПЛК [10].

Кожен модуль ADAM-6000 має власний HTTP-сервер з динамічними сторінками моніторингу. Оператор або технік може підключитися до будь-якого модуля через стандартний браузер, переглянути поточні значення каналів, налаштувати алармові пороги і оновити прошивку – без встановлення спеціального ПЗ [10].

Для карбонізаційної лінії підбрано чотири моделі модулів ADAM-6000, кожна з яких виконує конкретну функцію відповідно до ФСА.

Для збору сигналів від чотирьох термопар – трьох у реакторі (TE 3-1, TE 4-1, TE 5-1) та однієї в охолоджувачі (TE 6-1) – обрано модуль Advantech ADAM-6018+. Цей модуль є найактуальнішою версією лінійки термопарних модулів серії 6000 з розширеною підтримкою IoT-протоколів MQTT і SNMP, доданих у 2022-2023 роках [11].

ADAM-6018+ підтримує всі стандартні типи термопар: J, K, T, E, R, S, B – тобто охоплює одночасно термопари типу K (TE 3-1, TE 4-1, TE 6-1) і типу S (TE 5-1) без потреби в окремих модулях. Кожен з 8 каналів є ізольованим і налаштовується незалежно, що виключає взаємний вплив між каналами різних типів. Вбудована компенсація температури холодного спаю здійснюється апаратно за показаннями вбудованого датчика температури кінцевого блоку, що усуває похибку від коливань температури навколишнього середовища [11].

Технічні характеристики ADAM-6018+ наведені В.1 додатку В.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конвеєр та шлюзові приводи керуються дискретними сигналами «пуск/стоп» і «відкрити/закрити». Для передачі цих команд від ПЛК до пускачів Schneider TeSys D, а також для збору сигналів зворотного зв'язку від кінцевих вимикачів, обрано модуль Advantech ADAM-6060 – шестиканальний модуль з ізольованими реле на виході та ізольованими дискретними входами [12].

Вихідні реле ADAM-6060 комутують безпосередньо котушку керування пускача TeSys D напругою 24 В DC з струмом до 5 А – без проміжних підсилювачів. Ізоляція між каналами реле і між реле та логічною частиною модуля становить 2000 В AC, що забезпечує надійне розділення між слабкострумівими ланцюгами ПЛК та ланцюгами керування пускачами. Вбудований watchdog-таймер переводить реле у безпечний стан («розімкнено») при втраті зв'язку з ПЛК – апаратна реалізація принципу fail-safe для дискретних виходів [12].

Технічні характеристики ADAM-6060 наведені В.2 додатку В.

Для підключення модулів до комп'ютера обираємо ADAM-4520 [13].

Технічні характеристики ADAM-4520 наведені В.3 додатку В.

3.4 Вибір джерел живлення

Усі модулі і пристрої системи автоматизації карбонізаційної лінії, живляться від єдиного джерела постійного струму напругою 24 В DC. До цих споживачів належать: п'ять модулів ADAM-6000, конвертер інтерфейсу ADAM-4520, чотири реле-модулі Phoenix Contact PLC-RSC, а також котушки керування електромагнітних пускачів Schneider TeSys D та соленоїдних клапанів Burkert і Festo.

Перелік споживачів із зазначенням номінальних струмів та потужностей наведено в таблиці 3. 1.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3. 1 – Відомість електричних навантажень шини 24 В DC

№	Споживач	Uн, В	Ін, А	Рн, Вт	Кз	Ррозр, Вт
1	ADAM-6018+ (термопари)	24	0,10	2,4	1,0	2,4
2	ADAM-6017 (аналог. вхід 4-20мА)	24	0,08	2,0	1,0	2,0
3	ADAM-6024 №1 (аналог. вих.)	24	0,17	4,0	1,0	4,0
4	ADAM-6024 №2 (аналог. вих.)	24	0,17	4,0	1,0	4,0
5	ADAM-6060 (реле виходи)	24	0,15	3,6	1,0	3,6
6	ADAM-4520 (конвертер RS-485/232)	24	0,05	1,2	1,0	1,2
7	Phoenix Contact PLC-RSC × 4 шт.	24	0,10	2,4	1,0	2,4
8	Schneider LC1D12BD (котушка)	24	0,29	7,0	1,0	7,0
9	2 × LC1D09BD (котушки, реверс)	24	0,46	11,0	1,0	11,0
10	Котушка Festo VZWM (розп.)	24	0,10	2,4	1,0	2,4
11	Burkert 2000 (соленоїд)	24	0,33	8,0	1,0	8,0
12	Резерв 20%	–	–	–	0,2	9,6
	РАЗОМ (з урахуванням резерву 20%)	–	–	48,0	–	57,6

3.5 Розрахунок необхідної потужності джерела живлення

Розрахунок необхідної потужності БЖ виконується у такій послідовності.

Визначення сумарної номінальної потужності всіх споживачів :

$$P_{\Sigma} = 2,4 + 2,0 + 4,0 + 4,0 + 3,6 + 1,2 + 2,4 + 7,0 + 11,0 + 2,4 + 8,0 = 48,0 \text{ Вт.}$$

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Введення коефіцієнта запасу на можливе розширення системи та нестационарні пікові навантаження при одночасному вмиканні кількох котушок ($k_{\text{зап}} = 1,20$, тобто запас 20%):

$$P_{\text{БЖ}} \geq P_{\Sigma} \times k_{\text{зап}} = 48,0 \times 1,20 = 57,6 \text{ Вт.}$$

Визначення мінімального вихідного струму БЖ при напрузі 24 В:

$$I_{\text{мін}} = P_{\text{БЖ}} / U_{\text{вих}} = 57,6 / 24 = 2,40 \text{ А.}$$

Вибір стандартного типоміналу. Найближчий стандартний вихідний струм серійних промислових БЖ – 5,0 А (120 Вт). Це забезпечує додатковий запас потужності понад розрахованого мінімуму:

$$I_{\text{БЖ}} = 5,0 \text{ А} \Rightarrow P_{\text{БЖ}} = 24 \times 5,0 = 120 \text{ Вт};$$

$$K_{\text{запфакт}} = 57,6 / 120 \times 100\% = 48,0\%$$

За результатами розрахунку необхідний БЖ з вихідними параметрами 24 В DC / 5 А (120 Вт) у форматі для монтажу на DIN-рейку. Після аналізу ринкових пропозицій обрано блок живлення Mean Well SDR-120-24 – промисловий одновихідний БЖ серії SDR потужністю 120 Вт [14].

Технічні характеристики блока живлення Mean Well SDR-120-24 наведені у таблиці Г.1 додатку Г.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОБГРУНТУВАННЯ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ

Принципова електрична схема системи автоматизації карбонізаційної лінії виконана відповідно до вимог ГОСТ 2.702 та ДСТУ ГОСТ 2.710. Схема відображає з'єднання польових датчиків і виконавчих механізмів (ключів-пускатів NS) з трьома модулями серії ADAM-6000, що розміщені на DIN-рейці у розподільній шафі, а також підключення блока живлення 24 В DC.

Згідно зі схемою у шафі встановлено такі пристрої:

– ADAM-6018+ – верхній лівий модуль; до нього підключено всі датчики лінії: чотири термопари (TE 3-1, TE 4-1, TE 5-1, TE 6-1) через аналогові входи AI, а також датчики з уніфікованим виходом 4–20 мА (PE 7-1, LE 1-1, WE 2-1) через аналогові входи. Модуль є єдиним вимірювальним вузлом системи;

– ADAM-6060 №1 – нижній лівий модуль; реле-виходи DO керують пускачами NS конвеєра (NS 1-1) та шлюзових живильників (NS 2-1, NS 10); дискретні входи DI приймають сигнали зворотного зв'язку від кінцевих вимикачів і теплових реле;

– ADAM-6060 №2 – нижній правий модуль; реле-виходи DO керують соленоїдами клапанів (NS 3-1, NS 4-1, NS 7-3) та аварійним розподільником; дискретні входи DI – сигнали стану клапанів і моніторинг живлення;

– Mean Well SDR-120-24 – блок живлення 24 В DC / 5 А, що розміщений у правій верхній частині шафи; живить усі три модулі ADAM та котушки пускачів і соленоїдів через загальну шинку +24 В.

Всі три модулі ADAM з'єднані спільною шиною RS-485 (D+/D-) і через конвертер ADAM-4520 підключаються до COM-порту комп'ютера.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модуль ADAM-6018+ є єдиним вимірювальним модулем системи і підтримує одночасне підключення термопар типів К і S (входи AI 0-AI 7 у режимі термопари) та сигналів 4-20 мА від датчиків тиску, рівня та ваги. Переключення типу вхідного сигналу виконується програмно для кожного каналу незалежно через налаштування Modbus-регістрів.

Особливість підключення сигналів 4-20 мА до ADAM-6018+: модуль налаштовується у режим вимірювання напруги 0-150 мВ або 0-1 В, а зовнішній прецизійний шунт 100 Ом встановлюється паралельно до вхідних клем відповідного каналу. При струмі 20 мА падіння напруги на шунті 100 Ом складає 2,0 В (або 1,0 В при шунті 50 Ом) – значення, що входить у вимірювальний діапазон модуля. Такий підхід є стандартним для серії ADAM-6018+ і задокументований у технічній документації виробника.

Вісім аналогових входів ADAM-6018+ розподілені між датчиками таким чином: канали AI 0–AI 3 задіяні під термопари, канали AI 4-AI 6 – під датчики 4-20 мА, канал AI 7 залишається резервним (табл. 4.1). Вісім дискретних виходів DO використовуються для апаратної аварійної сигналізації, що реалізується через вбудовану логіку GCL модуля незалежно від комп'ютера.

Таблиця 4.1 – Підключення входів ADAM-6018+ (датчики температури)

Клема	Тег	Тип сигналу	Прилад / пристрій	Примітка
1	2	3	4	5
AI 0+/-	LE 1-1	Рівнемір	Siemens SITRANS LU150 – рівень у бункері (0–6 м)	Зовнішній шунт 100 Ом паралельно до клем; живлення датчика від шини +24 В
AI 1+/-	WE 2-1	Тензодатчик	Mettler-Toledo IND560 – вага порції (0–2000 кг)	4-дротове підключення: окремі проводи живлення (+24 В / GND) та сигналу; шунт 100 Ом
AI 2+/-	TE 3-1	Термопара тип S	Е+Н Omnigrad М TC10-S – зона карбонізації (400–900°C)	Компенсаційний кабель тип S (платинородій); клема зовнішнього холодного спаю
AI 3+/-	TE 4-1	Термопара тип К	Е+Н Omnigrad М TC10 – охолоджувач карбонізату (до 200°C)	Компенсаційний кабель тип К; мінімальна відстань від силових кабелів 100 мм

Продовження таблиць 4.1

1	2	3	4	5
AI 4+/-	TE 5-1	Термопара тип S	Е+Н Omnigrad M TC10-S – зона карбонізації (400–900°C)	Компенсаційний кабель тип S (платинородій); клема зовнішнього холодного спаю
AI 5+/-	TE 6-1	Термопара тип К	Е+Н Omnigrad M TC10 – охолоджувач карбонізату (до 200°C)	Компенсаційний кабель тип К; мінімальна відстань від силових кабелів 100 мм
AI 6+/-	PE 7-1	4–20 мА (2-дрот.)	Yokogawa EJA110E – тиск у реакторі (0–2 кПа)	Зовнішній шунт 100 Ом паралельно до клем; петля: +24 В → (+)AI → датчик → GND
AI 7	–	Резерв	–	Канал не задіяний; клеми залишити розімкненими або підключити майбутній датчик

На модуль ADAM-6060 №1 підключені реле згідно таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Реле-виходи ADAM-6060 №1

Клема	Тег	Тип сигналу	Прилад / пристрій	Примітка
DO 0 (NO)	NS 1-3	Реле 24 В DC / 5 А	Котушка пускача A1-A2 Schneider LC1D12BD (конвеєр: ПУСК)	NO → A1; A2 → GND; автомат QF-K1 (10 А) у силовому ланцюзі двигуна
DO 1 (NO)	NS 2-3	Реле 24 В DC / 5 А	Котушка LC1D09BD №1 (шлюз бункера: ВІДКРИТИ)	Реверсивний комплект; блокування LAD9R1 між DO1 та DO2
DO 2 (NO)	NS 3-3	Реле 24 В DC / 5 А	Котушка LC1D09BD №2 (шлюз бункера: ЗАКРИТИ)	GCL: DO1 і DO2 не можуть бути ввімкнені одночасно
DO 3 (NO)	NS 4-3	Реле 24 В DC / 5 А	Котушка LC1D09BD №3 (шлюз вивантаження: ВІДКРИТИ)	Реверсивний комплект; блокування LAD9R1 між DO3 та DO4
DO 4 (NO)	NS 5-3	Реле 24 В DC / 5 А	Котушка LC1D09BD №4 (шлюз вивантаження: ЗАКРИТИ)	GCL: DO3 і DO4 не можуть бути ввімкнені одночасно
DO 5 (NO)	NS 6-3	Реле 24 В DC / 5 А	Котушка LC1D09BD №4 (шлюз вивантаження: ЗАКРИТИ)	GCL: DO3 і DO4 не можуть бути ввімкнені одночасно

На модуль ADAM-6060 №2 підключені реле згідно таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Реле-виходи ADAM-6060 №2

Клема	Тег	Тип сигналу	Прилад / пристрій	Примітка
DO 0 (NO)	NS 7-3	Реле 24 В DC / 5 А	Ланцюг дозволу Phoenix Contact PLC- RSC – клапан гарячих газів (Fisher DVC6200)	NO → котушка PLC-RSC; PLC-RSC комутує сигнальний ланцюг позиціонера fail-closed
DO 1 (NO)	NS 8-1	Реле 24 В DC / 5 А	Соленоїд клапана холодного повітря Burkert 2000	NO → (+) соленоїд; (-) соленоїд → GND; fail-closed при розімкнутому реле
DO 2 (NO)	HL1	Реле 24 В DC / 5 А	Лампочка 24 В	-
DO 3 (NC)	HL2	Реле 24 В DC / 5 А	Лампочка 24 В	-
DO 4–DO 5	-	Резерв	-	Вільні реле; зарезервовані для майбутнього розширення

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Розробка алгоритму функціонування системи управління

Програмне забезпечення системи автоматизації карбонізаційної лінії реалізує циклічний алгоритм опитування датчиків і керування виконавчими механізмами.

Блок-схема алгоритму складається з двох паралельних гілок, що виконуються незалежно і циклічно:

- основна гілка (ліва частина) – керування подачею сировини та температурним режимом реактора; охоплює датчики LE 1-1, WE 2-1, TE 3-1, TE 4-1, TE 5-1 та виконавчі механізми NS 1-3, NS 2-3, NS 3-3, NS 4-3, NS 5-3;
- допоміжна гілка (права частина) – керування тиском у реакторі та температурою охолоджувача; охоплює датчики PE 7-1, TE 6-1 та виконавчі механізми NS 7-3, NS 6-3.

Обидві гілки завершуються на загальному вузлі об'єднання і переходять до нового циклу опитування.

Основна гілка починається з блоку «Початок» і реалізує послідовну обробку сигналів від датчиків рівня, ваги та температури реактора.

Крок 1 – опитування датчика рівня LE 1-1. Алгоритм зчитує поточне значення рівня сировини у бункері-дозаторі. Виконується умовна перевірка: якщо поточний рівень перевищує задане уставне значення LE 1-1-Tsetting – умова «ТАК», конвеєр подачі сировини (NS 1-3) вмикається; якщо рівень нижче або дорівнює уставці – умова «НІ», конвеєр вимикається (NS 1-3 вимкнено).

Крок 2 – опитування вагового перетворювача WE 2-1. Після обробки сигналу рівня алгоритм зчитує поточну масу порції сировини у дозувальній частині бункера. Умовна перевірка WE 2-1 – Tsetting: якщо маса порції досягла

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заданого значення – шлюзовий живильник (NS 2-3) вмикається, подаючи відміряну порцію до реактора; якщо маса ще не досягла уставки – шлюз залишається закритим (NS 2-3 вимкнено).

Крок 3 – паралельна обробка трьох температурних датчиків реактора. Після завершення кроків 1 і 2 алгоритм переходить до одночасного (або послідовного з малим інтервалом) опитування трьох термопар шахтного реактора. Кожен з трьох каналів обробляється незалежно за однаковою логікою:

– TE 3-1 – температура зони сушіння (100–200°C). Якщо $T3 \geq T3-T_{setting}$ – клапан або нагрівач NS 3-3 вмикається (подача теплоносія збільшується або увімкнено нагрів); якщо $T3 < T3-T_{setting}$ – NS 3-3 вимикається. Умова ТАК відповідає нормальному робочому режиму, умова НІ – перегріву або необхідності зниження температури;

– TE 4-1 – температура зони передкарбонізації (200-400°C). Аналогічна логіка: порівняння $T4$ з $T4-T_{setting}$; результат – ввімкнення або вимкнення NS 4-3;

– TE 5-1 – температура зони карбонізації (400-900°C). Критичний параметр: порівняння $T5$ з $T5-T_{setting}$; управління NS 5-3 – основним виконавчим органом контуру регулювання температури карбонізації.

Допоміжна гілка виконується паралельно з основною і обробляє два параметри: тиск у реакторі (PE 7-1) та температуру карбонізату на виході охолоджувача (TE 6-1).

Крок 1 допоміжної гілки – опитування датчика тиску PE 7-1. Алгоритм зчитує поточний надлишковий тиск у шахтному реакторі. Умовна перевірка PE 7-1 – $T_{setting}$: якщо тиск перевищує задане уставне значення (наприклад, 500 Па) – умова «ТАК», скидний клапан NS 7-3 вмикається (відкривається), знижуючи тиск у реакторі; якщо тиск нижче або дорівнює уставці – умова «НІ», клапан NS 7-3 залишається закритим.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крок 2 допоміжної гілки – опитування термопари охолоджувача ТЕ 6-1. Після обробки сигналу тиску алгоритм зчитує температуру карбонізату на виході охолоджувача. Умовна перевірка ТЕ 6-1 – Tsetting: якщо температура продукту на виході перевищує задане значення (зазвичай 80°C) – умова «ТАК», клапан подачі холодного повітря NS 6-3 вмикається, збільшуючи витрату повітря охолодження; якщо температура нижче уставки – умова «НІ», клапан NS 6-3 вимикається (або прикривається).

5.2 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера

Для створення програми керування обрано програмне середовище AdamView, яке забезпечує зручні інструменти для роботи з модулями сімейства ADAM та реалізації логіки автоматизації. Отримання значень від аналогових давачів здійснюється за допомогою функціональних блоків AI, тоді як для обробки сигналів дискретного типу застосовуються блоки DI. Логічна послідовність роботи обладнання та умови спрацьовування окремих елементів формуються у блоці SCR, де програмний код описується мовою BasicScript. Усі керуючі сигнали на виконавчі механізми, клапани та пускачі подаються через блоки дискретного виходу DO [15].

До каналу AI 0 підключається давач рівня LE 1-1. Після налаштування каналу у середовищі AdamView у блоці BasicScript описується алгоритм двопозиційного керування конвеєром подачі сировини залежно від поточного рівня та заданої уставки. Скрипт наведений в додатку Д, лістинг Д.1.

До каналу AI 1 підключається ваговий перетворювач WE 2-1. У блоці BasicScript реалізується алгоритм порційного дозування: шлюзовий живильник вмикається після досягнення заданої маси порції та вимикається після її подачі до реактора. Скрипт наведений в додатку Д, лістинг Д.2.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До каналів AI 2, AI 3, AI 4 та AI 5 підключаються датчики температури TE 3-1, TE 4-1, TE 5-1 та TE 6-1 відповідно. Після налаштування каналів у середовищі AdamView у блоці BasicScript для кожного датчика описується алгоритм порівняння поточного значення з уставкою та формування керуючого сигналу на відповідний виконавчий орган. Скрипти наведені в додатку Д, лістинги Д.3, Д.4, Д.5 та Д.6.

До каналу AI 6 підключається датчик тиску PE 7-1. У блоці BasicScript реалізується алгоритм одноконтурного позиційного регулювання тиску з аварійним рівнем: при тиску понад 600 Па скидний клапан примусово відкривається і формується аварійне повідомлення. Скрипт наведений в додатку Д, лістинг Д.7.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РЕАКТОРА КАРБОНІЗАЦІЇ

Метою розрахунку є визначення оптимальних налаштувань регулятора системи автоматичного регулювання (САР) температури зони карбонізації шахтного реактора та оцінка показників якості замкненої системи. Обраний контур є найбільш критичним з точки зору якості готового продукту: відхилення температури у зоні карбонізації (ТЕ 5-1) від заданого значення безпосередньо впливає на вихід летких речовин, пористість та міцність карбонізату [16].

Контур регулювання охоплює такі елементи: давач температури ТЕ 5-1 (термопара типу S, канал AI 4 модуля ADAM-6018+), регулятор у BasicScript-сценарії AdamView, виконавчий механізм – реле DO 0 модуля ADAM-6060 №2, що керує клапаном гарячих газів NS 3-3 (Fisher 461). Регульована змінна – температура T_5 (°C), завдання – $T_5_SP = 750^\circ\text{C}$, допустиме відхилення $\pm 5^\circ\text{C}$.

6.2 Математична модель об'єкта регулювання

Зона карбонізації шахтного реактора апроксимується зосередженою тепловою моделлю з урахуванням транспортного запізнення, обумовленого інерційністю теплопередачі від стінок реактора до центру шару матеріалу. Вхідний вплив – відносне відкриття клапана гарячих газів u (% відкриття), вихідна змінна – температура T_5 (°C). Передавальна функція каналу «відкриття клапана – температура зони карбонізації» у лінеаризованому вигляді (6.1):

$$W_0(s) = K \cdot e^{-s} / [(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)], \quad (6.1)$$

де K – статичний коефіцієнт підсилення (°C/%);

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

T_1, T_2 – сталі часу (хв); τ – транспортне запізнення (хв);

s – оператор Лапласа.

Параметри передавальної функції визначаються за результатами ідентифікації – знімання перехідної характеристики реактора методом ступінчастого збурення. Клапан NS 3-3 переводиться з положення 40% у положення 60% (збурення $\Delta u = 20\%$) і реєструється відгук $T_5(t)$. Параметри моделі, визначені за даними ідентифікації та підтверджені літературними джерелами [17], наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри математичної моделі об'єкта регулювання

Параметр	Значення
Статичний коефіцієнт підсилення K	0,8 °C / % відкриття клапана
Велика стала часу T_1	30 хв (1800 с)
Мала стала часу T_2	7 хв (420 с)
Транспортне запізнення τ	10 хв (600 с)
Відношення τ / T_1	0,33 (середнє запізнення)
Гранична частота об'єкта ω_{pt}	0,1165 рад/хв
Гранична амплітуда K_u	5,86 (критичне посилення)
Робоча точка T_5_SP	750 °C

Передавальна функція об'єкта з підставленими числовими значеннями у хвилинах (6.2):

$$W_o(s) = 0,8 \cdot e^{-10s} / [(30 \cdot s + 1) \cdot (7 \cdot s + 1)]. \quad (6.2)$$

Відношення $\tau/T_1=0,33$ свідчить про те, що об'єкт відноситься до категорії об'єктів із середнім запізненням (0,2- 0,4), для яких одноконтурне ПД-регулювання є достатнім при правильному налаштуванні [3].

6.3 Вибір та обґрунтування структури регулятора

З урахуванням транспортного запізнення та двох постійних часу об'єкта для регулювання температури зони карбонізації обирається ПД-регулятор. Диференціальна складова необхідна для компенсації впливу запізнення: вона формує випереджуючий керуючий вплив, що зменшує перерегулювання порівняно з П-регулятором [18].

Передавальна функція ідеального ПД-регулятора у паралельній формі 6.3:

$$W_r(s) = K_p \cdot [1 + 1/(T_i \cdot s) + T^d \cdot s], \quad (6.3)$$

де K_p – коефіцієнт пропорційності;

T_i – час інтегрування (хв);

T^d – час диференціювання (хв).

У середовищі AdamView ПД-регулятор реалізується у блоці BasicScript у дискретному вигляді з часом дискретизації $T_t = 0,5$ с (Scan Rate 500 мс). Дискретний аналог у формі різницевих рівнянь 6.4:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k-1) + q_2 \cdot e(k-2), \quad (6.4)$$

де $e(k) = T_s_SP - T_s(k)$ – відхилення температури на k-му кроці; коефіцієнти (6.5):

$$\begin{aligned} q_0 &= K_p(1 + T_t/T_i + T^d/T_t); \\ q_1 &= -K_p(1 + 2 \cdot T^d/T_t); \\ q_2 &= K_p \cdot T^d/T_t. \end{aligned} \quad (6.5)$$

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.4 Розрахунок параметрів ПІД-регулятора

Для розрахунку параметрів ПІД-регулятора застосовується метод SIMC (Simple Internal Model Control), запропонований Скогестадам [18]. Цей метод забезпечує робастне налаштування і є рекомендованим для об'єктів теплоенергетики з великим запізненням. Розрахункові формули для ПІД-регулятора по формулах (6.6, 6.7) та (6.8):

$$K_p = 0,5 \cdot T_i / (K \cdot \tau); \quad (6.6)$$

$$T_i = \min(T_i; 8 \tau); \quad (6.7)$$

$$T^d = \tau / 2. \quad (6.8)$$

Підставляємо значення параметрів об'єкта з таблиці 6.1:

$$K_p = 0,5 \cdot 30 / (0,8 \cdot 10) = 15 / 8 = 1,88;$$

$$T_i = \min(30; 8 \cdot 10) = \min(30; 80) = 30 \text{ хв} = 1800 \text{ с};$$

$$T^d = 10 / 2 = 5 \text{ хв} = 300 \text{ с}.$$

Розраховані параметри ПІД-регулятора наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Розраховані параметри ПІД-регулятора

Параметр	Значення
Коефіцієнт пропорційності K_p	1,88
Час інтегрування T_i	30 хв (1800 с)
Час диференціювання T^d	5 хв (300 с)
Час дискретизації T_t	0,5 с (Scan Rate AdamView)
Діапазон виходу регулятора u	0-100 % відкриття клапана NS 3-3

Підставляємо $K_p = 1,88$; $T_i = 1800 \text{ с}$; $T^d = 300 \text{ с}$; $T_t = 0,5 \text{ с}$ у формули (6.5):

$$q_0 = 1,88 \cdot (1 + 0,5/1800 + 300/0,5) = 1,88 \cdot 601,00 = 1129,88;$$

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

$$q_1 = -1,88 \cdot (1 + 2 \cdot 300 / 0,5) = -1,88 \cdot 1201 = -2257,88;$$

$$q_2 = 1,88 \cdot 300 / 0,5 = 1128,0.$$

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 7

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Об'єктом дипломного проекту є автоматизована система керування технологічним процесом виробництва активованого вугілля методом карбонізації вуглецевмісної сировини. Реалізація системи базується на застосуванні сучасних промислових засобів автоматизації модулів серії Advantech ADAM-6000, давачів температури, тиску, рівня та ваги, виконавчих механізмів і блока живлення, об'єднаних у єдиний комплекс під управлінням SCADA-системи AdamView.

Впроваджена система забезпечує стабільне підтримання температурних профілів у трьох зонах шахтного реактора, контроль тиску пірогенних газів, дозування порцій сировини та керування охолодженням карбонізату. Точне дотримання технологічного регламенту підвищує якість готового продукту, зменшує питомі витрати сировини та знижує ризик аварійних ситуацій.

Повний перелік засобів автоматизації з зазначенням кількості, одиничної та загальної вартості кожної позиції наведено у таблиці Е.1 додатку Е. На підставі зведених даних таблиці Е.1 визначено, що загальна вартість контрольно-вимірювальних приладів та засобів автоматизації становить:

$$ВП = 48549,00 \text{ грн.}$$

Транспортно-заготівельні витрати V_{T-M} приймаються на рівні 20% від вартості контрольно-вимірювальних приладів відповідно до нормативів галузевого кошторисоутворення [19]:

$$V_{T-M} = V_{п} \times 0,20 = 489549,00 \times 0,20 = 97909,80 \text{ грн.}$$

Витрати на монтаж системи автоматизації V_m разом з вартістю матеріалів для монтажу приймаються на рівні 35% від вартості засобів автоматизації [19]:

$$V_m = V_{п} \times 0,35 = 489549,00 \times 0,35 = 171342,15 \text{ грн.}$$

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Витрати на пусконаладжувальні роботи V_n визначаються у розмірі 15% від вартості засобів автоматизації [19]:

$$V_n = V_p \times 0,15 = 489549,00 \times 0,15 = 73432,35 \text{ грн.}$$

Загальні капітальні інвестиції на впровадження автоматизованої системи керування карбонізаційною лінією складаються з чотирьох основних статей витрат: вартості засобів автоматизації, транспортно-заготівельних витрат, витрат на монтаж та витрат на пусконаладження. Сумарні капітальні вкладення V_c (7.1):

$$V_c = V_p + V_{T_m} + V_m + V_n. \quad (7.1)$$

$$V_c = 489549,00 + 97909,80 + 171342,15 + 73432,35 = 832233,30 \text{ грн}$$

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У даній кваліфікаційній проекті розроблено автоматизовану систему керування карбонізаційною лінією виробництва активованого вугілля на базі модулів Advantech ADAM-6000 і SCADA-системи AdamView. В результаті виконання роботи вирішено всі поставлені задачі, а саме:

– виконано аналіз технологічного процесу карбонізації вуглецевмісної сировини як об'єкта керування. Визначено, що реактор є складним розподіленим об'єктом із транспортним запізненням 10 хв, двома сталими часу ($T_1=30$ хв, $T_2=7$ хв) та нелінійними теплофізичними характеристиками. Виявлено дев'ять ключових технологічних параметрів, що підлягають вимірюванню та регулюванню, і сформульовано вимоги до системи автоматизації (точність підтримання температури $\pm 5^\circ\text{C}$ у зоні карбонізації, концентрація $\text{O}_2 < 1\%$, тиск ± 50 Па);

– розроблено функціональну схему автоматизації карбонізаційної лінії, що охоплює чотири технологічні вузли: конвеєр подачі сировини (поз. 1), бункер-дозатор з ваговим і рівневим контролем (поз. 2), шахтний реактор з трьома температурними контурами та контуром стабілізації тиску PE 7-1/NS 7-3 (поз. 3), охолоджувач карбонізату (поз. 4). Обґрунтовано структуру контурів регулювання та призначення ключів-пускачів NS для всіх виконавчих механізмів;

– виконано вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації. Підібрано давачі температури Endress+Hauser Omnicard M TC10 (тип K) та TC10-S (тип S), датчик тиску Yokogawa EJA110E, рівнемір Siemens SITRANS LU150, ваговий перетворювач Mettler-Toledo PowerCell MTX, модулі Advantech ADAM-6018+, ADAM-6060 №1 та №2, конвертер інтерфейсу ADAM-4520, регулюючі клапани Fisher 461, Samson 3241 та Burkert 2000, пускачі Schneider Electric TeSys D, реле-модулі Phoenix Contact PLC-RSC та блок живлення Mean Well SDR-120-24. Виконано розрахунок потужності

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

блока живлення: загальна розрахункова потужність 57,6 Вт, обраний БЖ 120 Вт забезпечує завантаження 48% у оптимальному режимі;

– розроблено принципову електричну схему підключення мікропроцесорних модулів ADAM-6000. Термопари ТЕ 3-1, ТЕ 4-1, ТЕ 5-1 та ТЕ 6-1 підключено до каналів АІ 2–АІ 5 модуля ADAM-6018+; датчики 4-20 мА (РЕ 7-1, LE 1-1, WE 2-1) – до каналів АІ 4-АІ 6 через шунти 100 Ом. Пускачі та соленоїди підключено через реле-виходи DO двох модулів ADAM-6060. Реалізовано трирівневу систему апаратного аварійного захисту: логіка GCL модуля ADAM-6018+, watchdog-таймер модулів ADAM-6060 та апаратне знеструмлення при відмові живлення;

– розроблено програмне забезпечення системи керування у середовищі AdamView мовою BasicScript. Сформовано базу тегів із 28 позицій для всіх аналогових і дискретних каналів трьох модулів ADAM. Реалізовано сім BasicScript-сценаріїв (лістинги Д.1-Д.7): контури рівня (LE 1-1), дозування (WE 2-1), трьох температурних зон реактора (ТЕ 3-1, ТЕ 4-1, ТЕ 5-1), охолоджувача (ТЕ 6-1) та тиску (РЕ 7-1). Кожен сценарій реалізує двопозиційний алгоритм керування з гістерезисом і багаторівневим аварійним захистом;

– виконано розрахунок системи автоматичного регулювання температури зони карбонізації. Об'єкт апроксимовано аперіодичною ланкою другого порядку із запізненням $W_{об}(s)=0,8 \cdot e^{-10s}/[(30s+1)(7s+1)]$. За методом СИМС розраховано параметри ПІД-регулятора: $K_p=1,88$; $T_i=30$ хв; $T^d=5$ хв. Оцінка стійкості підтвердила достатні запаси: $G_m=+9,5$ дБ та $\gamma=56,9^\circ$ (обидва в допустимих межах). Показники якості: перерегулювання $\sigma=12\%$, час регулювання $t_r=160$ хв, статична похибка 0°C ;

– виконано розрахунок капітальних витрат на впровадження автоматизованої системи керування карбонізаційною лінією. Загальна вартість засобів автоматизації становить 489549 грн. З урахуванням транспортно-заготівельних витрат (20%), витрат на монтаж (35%) та

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пусконаладження (15%) сукупні капітальні інвестиції складають $V_c=832233,30$ грн, що є економічно обґрунтованим для ліній продуктивністю 500-5000 т/рік.

Розроблена система автоматизації дозволяє стабільно підтримувати температурний профіль реактора у трьох зонах з точністю $\pm 5^\circ\text{C}$, здійснювати безпечно відведення та контроль пірогенних газів, автоматичне дозування порцій сировини та керування охолодженням карбонізату. Впровадження системи підвищує відтворюваність якісних показників продукту, знижує питомі витрати теплоносія на 8-12% та забезпечує промисловий рівень безпеки виробництва.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технології одержання та застосування вуглецевих адсорбентів: монографія / за ред. українських науковців профільних кафедр хімічної технології. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. 68 с.
2. Томін О. Виробництво і модифікація активованого біовугілля з локально-доступної біомаси для очищення води / *Екологія. Людина. Суспільство : матеріали ХХІІІ Міжнародної науково-практичної конференції*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
3. Виробництво активованого вугілля: сировина та етапи виробництва. URL: <http://greenpower.com.ua/clients/articles/2017-04-05-12-48-05//> (дата звернення: 10.02.2026).
4. Endress+Hauser Omnigrad M TC10. URL: <https://trade-control.com.ua/ua/products/endress-hauser-omnigrad-m-tc10> (дата звернення: 10.02.2026).
5. Датчик тиску Yokogawa EJA110E. URL: <https://trade-control.com.ua/ua/products/yokogawa-eja110e> (дата звернення: 10.02.2026).
6. Ультразвуковий рівнемір Siemens SITRANS LU150. URL: https://www.aloinfousa.com/products/siemens-sitrans-lr150-radar-level-transmitter-7ml5340?currency=USD&country=US&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Google%20Shopping&stkn=e9174bb7751a&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw54nRBhDCARIsAMcY_SC-XotEXRKK6_bQl4OdaDEhgRdi8iLMhYRE1QF015KWsaQnNot1WoUaAnyzEALw_wcB (дата звернення: 10.02.2026).
7. Тензодатчик Mettler-Toledo PowerCell MTX. URL: <https://www.otec-industry.com.ua/en/brand/mettler-toledo/mtx-25t-c4-powercell> (дата звернення: 10.02.2026).

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Клапан Fisher Controls серії 461 (Emerson). URL: <https://www.emerson.com/is/content/emerson/en/final-control/flow-controls/documents/d100036x012.pdf> (дата звернення: 10.02.2026).

9. Реле-модуль Phoenix Contact PLC-RSC-24DC/21-ATEX. URL: https://electrocontact.com.ua/modul-rele-plc-rsc-24dc-21-2966171-phoenix-contact/?srsltid=AfmBOoo5FqodHVSTI6-CKMc5nFwXCYLvyja9FtgkGGqnrUUhGef_yYWz (дата звернення: 10.02.2026).

10. Модулі розподіленого вводу/виводу серії ADAM-6000. URL: <https://logicon.ua/products/41611/41613/42520/42522/> (дата звернення: 10.02.2026).

11. ADAM-6018+. URL: https://www.proxis.ua/uk/product/ethernet-analog-input-modules-advantech-ADAM-6010/?gad_source=1&gad_campaignid=22525073475&gbraid=0AAAAADpxF_sXjH6F5R-tY_Q-meeKl6q-n&gclid=Cj0KCQjw54nRBhDCARIsAMcY_SDHALaDBjxr83J_cBQrHWaRGPMjtZiNaArrpFWpCTKVYymRzVpFLogaAiQfEALw_wcB (дата звернення: 10.02.2026).

12. ADAM-6060. URL: https://www.proxis.ua/uk/product/ethernet-relay-modules-advantech-ADAM-6060/?gad_source=1&gad_campaignid=22525073475&gbraid=0AAAAADpxF_sXjH6F5R-tY_Q-meeKl6q-n&gclid=Cj0KCQjw54nRBhDCARIsAMcY_SDPdy1Z5EBFvDugYhz6Y3FY6hK7O9uEiyLiXJCBZNETbU7ksteduvwaAonGEALw_wcB (дата звернення: 10.02.2026).

13. ADAM-4520. URL: <https://www.ucs.co.uk/pdf/ADAM-4525.pdf> (дата звернення: 10.02.2026).

14. Mean Well SDR-120-24. URL: https://www.tme.eu/ua/details/ndr-120-24/bloki-zhivlennia-dlia-shini-din/mean-well/?brutto=0¤cy=USD&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=UKRAINA%20%5BPMAX%5D%20UK&utm_content=&campaign_id=20545768065&gad_source=1&gad_campaignid=20551720772&gbraid=0AAAAADyylhL2vRFXC08Totf7qo6f8U6u4&gclid=Cj0KCQjw54nRBhDCARIsAMcY_SDaNQeJ07pdn8pdJVcKghhJYU0pC

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

c7cWn9OX0AFjx8HlhnNvjggZdwaAtVoEALw_wcB (дата звернення:
20.04.2026).

15. Advantech Co., Ltd. ADAMView User Manual. Version 3.05. New Taipei City, 2022. URL: <http://www.agatnet.com/advantech/section9pdfs/ADAMView.pdf>. (дата звернення: 15.05.2026).

16. Ge L., Zhao C., Zhou T. et al. An analysis of the carbonization process of coal-based activated carbon at different heating rates. Energy. 2023. Vol. 267. Article 126557.

17. Jannah A. M., Pambudi A. S., Isnaini M. Pyrolysis Process Control: Temperature Control Design and Application for Optimum Process Operation. IJECSE. 2024. Vol. 14, No. 2. P. 1765-1774.

18. Ziegler J. B., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers. Transactions of the ASME. URL: https://davidr.no/iiav3017/papers/Ziegler_Nichols_%201942.pdf (дата звернення: 15.05.2026).

19. Техніко-економічне обґрунтування проектних рішень з автоматизації : навчальний посібник / уклад. В. І. Медведєв, О. В. Мироненко. Харків: ХНУРЕ, 2023. 112 с.

					АтаБС-002.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		