

**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
ВИРОБНИЦТВА ДЬОГТЮ**

**AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE TECHNOLOGICAL
PROCESS OF TAR PRODUCTION**

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

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АВ - 41
КРИНИЦЬКА Анастасія Петрівна

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
ФЕДІК Леся Юріївна

(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 комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

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

_____ Криницька Анастасії Петрівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Автоматизована система керування процесом виробництва
дьюгтю

керівник роботи _____ Федік Леся Юріївна, к.т.н., доцент

(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 дьюгтю

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 піролізної реорти,
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>Федік Л. Ю.</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Федік Л. Ю.</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Федік Л. Ю.</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Федік Л. Ю.</i>		
<i>Розділ 5</i>	<i>Федік Л. Ю.</i>		
<i>Розділ 6</i>	<i>Федік Л. Ю.</i>		
<i>Розділ 7</i>	<i>Федік Л. Ю.</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)

Криницька А. П.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Федік Л. Ю.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Криницька А. П. Автоматизована система керування процесом виробництва дьогтю. 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 піролізною установкою для виробництва деревного дьогтю на базі польових модулів ICP DAS серії I-7000, що забезпечує стабільне підтримання температурного профілю чотирьох зон піролізної реторти, контроль тиску пірогенних газів та автоматичне керування процесами конденсації й накопичення готового продукту.

Практична новизна полягає у застосуванні розподіленої системи введення-виведення на базі польових модулів ICP DAS I-7018R та I-7063D, об'єднаних шиною RS-485/Modbus RTU; у розробці де'яти BasicScript-сценаріїв керування контурами маси сировини, температури чотирьох зон реторти, тиску, охолодження та рівнів конденсату і готового продукту; а також у застосуванні методу CHR для розрахунку ПД-регулятора температури зони активного піролізу, що забезпечує нульову статичну похибку та динамічну похибку не більше $1,84^{\circ}\text{C}$ при швидкості нагрівання $5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$.

Обсяг пояснювальної записки становить 58 друкованих сторінок. Об'єм графічної частини кваліфікаційної роботи складає 4 креслення.

Ключові слова: піроліз деревини, деревний дьоготь, піролізна реторта, ПД-регулятор, , ICP DAS I-7000, AdamView, BasicScript.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АКТ-007.00.00.00.000 ПЗ			
Розроб.		Криницька А. П.			Автоматизована система керування виробництва дьогтю	Лім.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Федік Л Ю					4	
Н. контр.		Лапченко Ю.С				ЛНТУ, гр. АВ-41		
Затв.		Гуменюк Л О						

ANNOTATION

Krynytska A. P. Automated control system for tar production process. 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 a pyrolysis unit producing wood tar, based on ICP DAS I-7000 series field modules, ensuring stable maintenance of the temperature profile across four zones of the pyrolysis retort, control of pyrolytic gas pressure, and automatic management of the condensation and finished product accumulation processes.

The practical novelty consists in the application of a distributed input-output system based on ICP DAS I-7018R and I-7063D field modules connected via an RS-485/Modbus RTU bus; in the development of nine BasicScript control scripts for the raw material mass, four-zone retort temperature, pressure, cooling, and condensate and finished product level loops; as well as in the application of the CHR method for tuning the PID controller of the active pyrolysis zone temperature, providing zero steady-state error and a dynamic error not exceeding 1,84°C at a heating rate of 5°C/min.

The volume of the explanatory note is 58 printed pages. The graphic part of the qualification work consists of 4 drawings.

Keywords: wood pyrolysis, wood tar, pyrolysis retort, PID controller, ICP DAS I-7000, AdamView, BasicScript.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	9
1.1 Характеристика об'єкта автоматизації та готова продукція.....	9
1.2 Будова і принцип дії лінії.....	9
1.3 Параметри технологічного процесу.....	10
1.4 Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування.....	12
1.5 Вимоги до системи автоматизації.....	13
РОЗДІЛ 2 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	14
РОЗДІЛ 3 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	17
3.1 Вибір давачів	17
3.2 Вибір виконавчих пристроїв	18
3.3 Вибір пристроїв управління	19
3.4 Вибір джерел живлення	20
РОЗДІЛ 4 ОБГРУНТУВАННЯ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ	23
РОЗДІЛ 5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ	26
5.1 Розробка алгоритму функціонування системи управління	26
5.2 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера	27
РОЗДІЛ 6 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРОЛІЗНОЇ РЕТОРТИ	31
РОЗДІЛ 7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	35
ВИСНОВОК	37
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40
ДОДАТКИ	42

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Деревний дьоготь є продуктом лісохімічного виробництва з тисячолітньою історією застосування. Проте саме в останнє десятиліття інтерес до нього значно зріс: фармацевтична та косметична промисловість потребує натуральних антисептиків і біоцидів без синтетичних добавок, ветеринарія використовує дьоготь як консервант і засіб захисту деревини, а ринок ЄС запроваджує додаткові вимоги до натуральних біопрепаратів, що робить виробництво деревного дьогтю економічно привабливим напрямом для малого та середнього лісохімічного бізнесу [1].

Виробництво деревного дьогтю методом сухої перегонки деревини є складним термохімічним процесом, якість і ефективність якого визначаються насамперед стабільністю температурного режиму піролізної реторти. Навіть незначне відхилення від оптимального профілю нагрівання призводить до зміни фракційного складу продукту, зниження вмісту фенолів або до розкладання цільових компонентів при перегріві. Ручне керування таким процесом потребує значних витрат праці кваліфікованого персоналу та не забезпечує відтворюваності якісних показників від партії до партії [1].

Метою дипломного проекту є розробка автоматизованої системи керування піролізною установкою для виробництва деревного дьогтю, що забезпечує точне підтримання температурного профілю в чотирьох зонах реторти, контроль тиску пірогенних газів, керування процесами конденсації та накопичення готового продукту, а також виконання всіх вимог промислової безпеки.

Об'єктом автоматизації є піролізна установка циклічного типу на базі сталевих реторти з зовнішнім нагріванням об'ємом 0,5-2,0 м³ для виробництва деревного дьогтю з листяних порід деревини.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Предметом дослідження є методи та засоби автоматизації технологічного процесу сухої перегонки деревини, зокрема алгоритми автоматичного регулювання температурного профілю піролізної реторти.

Методи дослідження: системний аналіз технологічного процесу виробництва деревного дьогтю як об'єкта автоматичного керування.

Практична цінність роботи полягає у розробці готового технічного рішення АСК, яке може бути реалізоване на малотоннажних піролізних підприємствах України.

Для досягнення поставленої мети в проекті вирішуються такі завдання:

- аналіз технологічного процесу виробництва деревного дьогтю як об'єкта керування, визначення ключових параметрів і вимог до точності їх підтримання;

- розробка функціональної схеми автоматизації з визначенням переліку контурів вимірювання та керуючих сигналів;

- обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації: первинних перетворювачів, виконавчих механізмів, модулів введення-виведення серії ICP DAS I-7000 та джерела живлення;

- розробка та опис принципових електричних схем підключення датчиків і виконавчих механізмів до модулів ICP;

- розрахунок системи автоматичного регулювання температури зони активного піролізу реторти, визначення параметрів ПД-регулятора методом CHR;

- розробка алгоритму функціонування АСК у вигляді блок-схеми та програмного забезпечення в середовищі AdamView мовою BasicScript;

- техніко-економічне обґрунтування проекту та визначення терміну окупності капіталовкладень.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Характеристика об'єкта автоматизації та готова продукція

Об'єктом автоматизації є піролізна установка для виробництва деревного дьогтю методом сухої перегонки деревини. Дьоготь – це складна суміш органічних сполук (феноли, крезолі, смоли, вуглеводні), що утворюється при конденсації газоподібних продуктів термічного розкладання деревини у безкисневому середовищі при температурах 350-500°C [1].

Основною сировиною є деревина листяних порід – береза, вільха, осика у вигляді колотих дров або технологічної тріски з вологістю не більше 25%. Деревина березова є найбільш цінною сировиною, оскільки забезпечує найвищий вихід дьогтю та найкращі його якісні показники. Допускається використання деревини хвойних порід сосни, ялини для отримання скипидарного дьогтю з підвищеним вмістом терпенових сполук [1].

Споживачами деревного дьогтю є фармацевтичні та косметичні підприємства, ветеринарні компанії, виробники деревозахисних засобів і просочень, а також підприємства народних промислів. В останні роки спостерігається зростання попиту на деревний дьоготь на ринках ЄС як натуральний біоцид і консервант без хімічних добавок [1].

1.2 Будова і принцип дії лінії

Технологічна лінія виробництва дьогтю методом сухої перегонки деревини включає кілька послідовно з'єднаних функціональних вузлів. Розглядається циклічна установка на базі сталеві реторти з зовнішнім нагріванням – найбільш поширений тип для виробництва якісного деревного дьогтю. Процес виробництва є переривчастим (циклічним): тривалість одного

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробничого циклу становить 6-24 год залежно від обсягу завантаження та заданого температурного профілю [2, 3].

Принцип дії базується на зовнішньому нагріванні герметично завантаженої деревини. При температурі 100-200°C відбувається видалення вільної та зв'язаної вологи; при 200-280°C – початок виділення летких органічних речовин; при 280-350°C – активне виділення пірогенних газів і смол (основна зона утворення дьогтю); при 350-500°C – завершення піролізу та стабілізація деревного вугілля. Пірогенні гази відводяться через конденсаційну систему, де важкі фракції конденсуються з утворенням дьогтю, а легкі спрямовуються на спалювання або рекуперацію [2, 3].

Особливою вимогою до процесу є стабільність температурного режиму: перевищення температури вище 500°C призводить до розкладання фенолів та погіршення якості продукту, а недостатній нагрів (нижче 350°C) – до неповного піролізу та зниження виходу дьогтю [2, 3].

1.3 Параметри технологічного процесу

Режим піролізу деревини для отримання дьогтю визначається технологічним регламентом та залежить від породи деревини, розміру завантаження і вимог до якості готового продукту. Правильне підтримання технологічних параметрів є необхідною умовою досягнення стабільного виходу та якості дьогтю [2, 3].

Температура в реторті по зонах ($T_1...T_n$, °C) є основним регульованим параметром. Температурний профіль нагрівання задається ступінчасто: зона сушіння 100-200°C, зона передпіролізу 200-280°C, зона активного піролізу 280-400°C, зона завершення 400-500°C. Швидкість нагрівання (β , °C/хв) є критичним параметром, що визначає вихід і склад дьогтю: оптимальне значення у зоні активного піролізу становить 3-8°C/хв, оскільки надмірно

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкий нагрів призводить до крекінгу важких фракцій та погіршення якості дьогтю [3].

Тиск у реакторі підтримується у межах 0,5-2,0 кПа надлишкового тиску для запобігання підсмоктуванню повітря та забезпечення стабільного відведення пірогенних газів. Температура охолоджуючої води в конденсаторі підтримується у межах 15-25°C та впливає на ефективність конденсації важких фракцій і загальний вихід дьогтю [3]. Концентрація CO у відхідних газах є непрямим показником стадії піролізу та індикатором безпечної роботи установки: при перевищенні 3% у робочій зоні вмикається аварійна сигналізація. Зведені технологічні параметри наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технологічні параметри процесу виготовлення деревного дьогтю

№	Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Діапазон / норма	Точність підтримання
1	Температура у реторті (зона сушіння)	T ₁	°C	100-200	±3
2	Температура у реторті (зона передпіролізу)	T ₂	°C	200-280	±3
3	Температура у реторті (зона активного піролізу)	T ₃	°C	280-400	±3
4	Температура у реторті (зона завершення піролізу)	T ₄	°C	400-500	±3
5	Надлишковий тиск у реакторі	P	кПа	0,5-2,0	±0,05
6	Температура охолоджуючої води в конденсаторі	Тохол	°C	15-25	±1

1.4 Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування

Піролізна реторта для виробництва дьогтю є складним нелінійним об'єктом керування з розподіленими параметрами та суттєвими запізненнями, що зумовлюється тепловою інерційністю системи та складним характером тепломасообмінних процесів у деревині під час піролізу. Для формалізованого опису об'єкта застосовується метод «чорного ящика» – подання у вигляді системи з визначеними входами, виходами, керуючими діями та збуреннями (рис. 1.1).

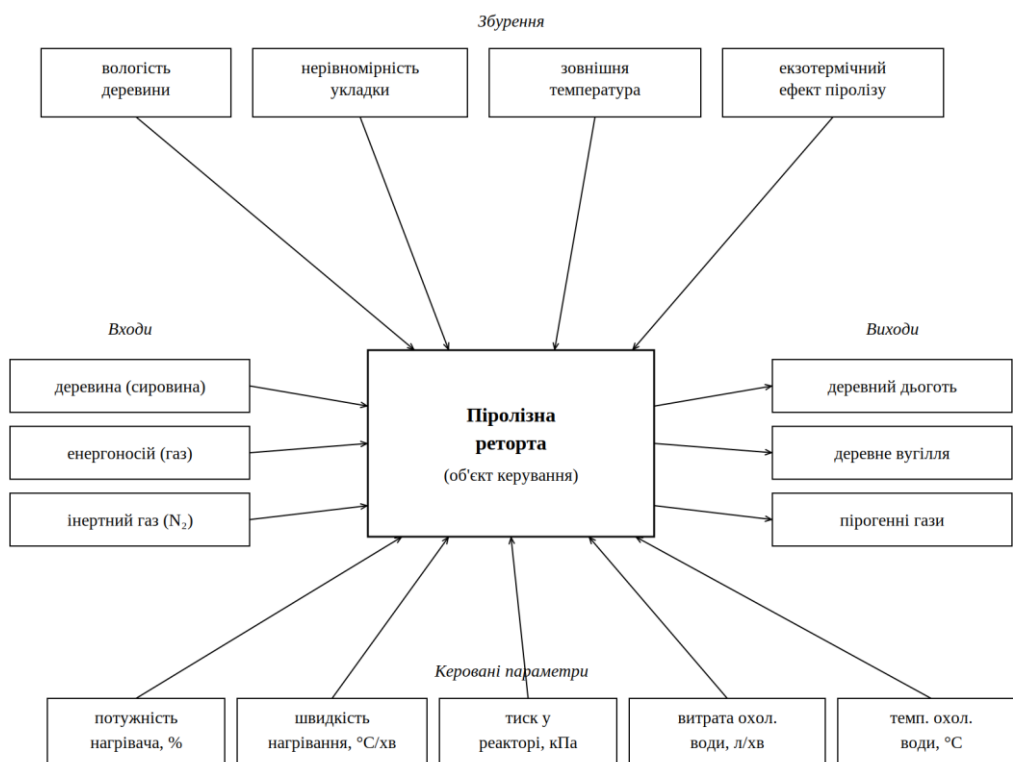


Рисунок 1.1 – Схема взаємозв'язків параметрів системи керування піролізною установкою для виробництва деревного дьогтю

До керуючих сигналів відносяться: u_1 – потужність нагрівача (%), яка визначає темп і глибину нагрівання реторти, та u_2 – витрата охолоджуючої води в конденсаторі (л/хв), що регулює ефективність конденсації пірогенних газів. Вхідними матеріальними потоками є x_1 – завантажена деревина

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

(сировина) та x_2 – енергія нагрівання (газ або електроенергія). Вихідними продуктами процесу є y_1 – деревний дьоготь (кількість і якість), y_2 – деревне вугілля та y_3 – пірогенні гази (CO, CH₄ та ін.). Збурюючими факторами, що діють на об'єкт ззовні і не піддаються безпосередньому регулюванню, є: f_1 – вологість завантаженої деревини; f_2 – теплотвірна здатність газового палива; f_3 – зовнішня температура та нерівномірність укладки деревини; f_4 – екзотермічний ефект піролізу у діапазоні 280-350°C.

1.5 Вимоги до системи автоматизації

На підставі аналізу технологічного процесу виробництва дьогтю та матеріалів, сформульовані вимоги до автоматизованої системи керування піролізною установкою.

Система автоматизації повинна забезпечувати виконання таких функцій:

- автоматичне підтримання температури у реторті (зона сушіння);
- автоматичне підтримання температури у реторті (зона передпіролізу);
- автоматичне підтримання температури у реторті (зона активного піролізу);
- автоматичне підтримання температури у реторті (зона завершення піролізу);
- автоматичне підтримання надлишкового тиску у реакторі;
- автоматичне підтримання температури охолоджуючої води в конденсаторі;
- автоматичне підтримання рівня в відстійнику-сепараторі;
- автоматичне підтримання рівня в резервуарі дьогтю.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Об'єкт автоматизації – піролізна реторта з допоміжним обладнанням є циклічним технологічним агрегатом із суттєвими запізненнями та нелінійними характеристиками.

Відповідно до технологічної схеми та переліку контрольованих параметрів, ФСА охоплює такі технологічні вузли: бункер деревини (Б-1), піролізну реторту (Р-1), конденсатор (К-1), відстійник-сепаратор (С-1), резервуар дьогтю (РД-1).

Датчик WE 1-1 встановлений під опорами бункера деревини Б-1 та вимірює масу завантаженої сировини.

Сигнал датчика WE 1-1 нормалізується та перетворюється у цифровий формат для передачі до ПЛК. За сигналом WE 1-1 ПЛК фіксує масу завантаження на початку кожного виробничого циклу та використовує це значення для розрахунку виходу продукту.

Передача сигналу до ПЛК та формування керуючого впливу здійснюється через блок NS 1-3.

Датчик TE 2-1 розміщений у нижній зоні піролізної реторти Р-1 та вимірює температуру зони сушіння деревини (робочий діапазон 100-200°C). Контроль температури на цій стадії дозволяє визначити момент повного видалення вільної та зв'язаної вологи з деревини та своєчасно перейти до наступної стадії нагрівання.

Сигнал датчика TE 2-1 надходить до ПЛК. При досягненні температури 200°C алгоритм автоматично переходить до програми нагрівання зони передпіролізу.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Передача сигналу до ПЛК та формування керуючого впливу здійснюється через блок NS 2-3.

Датчик TE 3-1 розміщений у другій зоні піролізної реторти P-1 та контролює температуру зони передпіролізу (200-280°C). На цьому етапі починається виділення летких органічних речовин, що є важливим показником готовності деревини до активної стадії піролізу.

Сигнал датчика TE 3-1 надходить до ПЛК для управління нагрівачем другої зони через блок NS 3-3.

Датчик TE 4-1 є найбільш критичним засобом вимірювання на установці та розміщений у зоні активного піролізу реторти P-1 (280-400°C). Саме в цьому діапазоні відбувається основне утворення дьогтю: активне виділення пірогенних газів, смол та конденсованих фракцій. Відхилення температури від заданого профілю в цій зоні безпосередньо впливає на вихід та якість готового продукту.

Сигнал датчика TE 4-1 надходить на ПЛК формує керуючий вплив на нагрівач третьої зони через NS 4-3.

Датчик TE 5-1 розміщений у верхній зоні піролізної реторти P-1 та контролює температуру зони завершення піролізу та стабілізації деревного вугілля (400–500°C). Витримка при максимальній температурі цієї зони визначає ступінь завершеності піролізу та якість деревного вугілля як побічного продукту.

Сигнал датчика TE 5-1 надходить до ПЛК. ПЛК керує нагрівачем четвертої зони через NS 5-3.

Датчик PE 6-1 встановлений у верхній частині піролізної реторти P-1 у зоні збору пірогенних газів та вимірює надлишковий тиск газового простору (робочий діапазон 0-10 кПа). Підтримання надлишкового тиску 0,5-2,0 кПа запобігає підсмоктуванню повітря та забезпечує стабільне відведення пірогенних газів до конденсатора.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Сигнал датчика PE 6-1 надходить до ПЛК. При відхиленні тиску від заданого значення формується керуючий вплив на клапан через NS 6-3. При перевищенні тиску понад 5 кПа спрацьовує аварійна функція – автоматичне відкриття клапана скидання тиску та світлова сигналізація.

Датчик TE 7-1 встановлений на виході охолоджуючої води з конденсатора К-1 та вимірює її температуру (діапазон 0-60°C). Ефективна конденсація важких фракцій дьогтю забезпечується при температурі охолоджуючої води 15-25°C; перевищення цього значення призводить до зниження виходу дьогтю та збільшення частки некондиційних газів.

Сигнал датчика TE 7-1 надходить до ПЛК. За показанням TE 7-1 формується пропорційний керуючий вплив на регулювальний клапан через NS 7-3.

Датчик LE 8-1 встановлений на відстійнику-сепараторі С-1 та вимірює рівень конденсату. Відстійник-сепаратор призначений для розділення сирого конденсату на органічну фазу та водну фазу. Контроль рівня необхідний для своєчасного відведення кожної з фаз та запобігання переповненню апарата.

Сигнал датчика LE 8-1 над передається до ПЛК. Закриття клапанів відбувається при досягненні нижньої межі рівня відповідної фази через NS 8-3.

Датчик LE 9-1 встановлений на резервуарі готового дьогтю РД-1 та вимірює рівень продукту. Контроль рівня в резервуарі необхідний для запобігання переповненню, своєчасного запуску операції фасування та обліку виробленої продукції.

Сигнал датчика LE 9-1 передається до ПЛК. Передача сигналу від ПЛК та формування керуючого впливу здійснюється через NS 9-3.

Специфікація надана в додатку А.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3
ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ
АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір датчиків

Для вимірювання маси завантаженої деревини у бункері Б-1 обрано тензOMETричний ваговий датчик ЗТМК-0,5Т виробництва ТОВ «Завод тензOMETричних приладів» (Україна). Датчик побудований на основі металевого пружного елемента зі встановленими тензорезисторами, що змінюють опір пропорційно до деформації під дією навантаження. Мостова схема підключення забезпечує температурну компенсацію та лінійну характеристику перетворення. Датчик відповідає класу точності 0,05 та придатний для роботи в умовах підвищеної вологості та запиленості промислового середовища [4].

Технічні характеристики датчика ЗТМК-0,5Т наведені в таблиці Б.1 додатку Б.

Для вимірювання температури у чотирьох зонах піролізної реторти Р-1 обрано термоелектричний перетворювач типу К (хромель-алюмель) марки ТХА-1172 виробництва ТОВ «Термоприлад» (Україна). Термопара типу К є найбільш поширеним засобом вимірювання температури у промисловості завдяки широкому діапазону ($-200...+1350$ °С), достатній точності та стійкості до агресивних середовищ. Захисна арматура з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т забезпечує стійкість до впливу пірогенних газів, смол та фенолів [5].

Технічні характеристики датчика ТХА-1172 наведені в таблиці Б.2 додатку Б.

Для вимірювання надлишкового тиску пірогенних газів у реторті Р-1 обрано інтелектуальний перетворювач надлишкового тиску Метран-150 виробництва «Емерсон». Перетворювач побудований на основі п'єзорезистивного сенсорного модуля з заповненням силіконовим маслом та

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мембраною з нержавіючої сталі. Інтелектуальна електроніка забезпечує самодіагностику, коригування похибки від температури та конфігурування через HART-протокол [6].

Технічні характеристики датчика Метран-150 наведені в таблиці Б.3 додатку Б.

Для вимірювання рівня конденсату у відстійнику-сепараторі С-1 та готового дьогтю в резервуарі РД-1 обрано ультразвуковий рівнемір VEGASON 51 виробництва VEGA. Прилад працює за принципом ехолокації: п'єзоелектричний перетворювач генерує ультразвуковий імпульс, який відбивається від поверхні продукту і повертається до датчика; час пробігу сигналу перетворюється у значення рівня. Безконтактний метод вимірювання виключає контакт електронних частин з продуктом, що є важливим для вимірювання агресивного та в'язкого дьогтю. Інтегрований температурний компенсатор забезпечує точність вимірювання незалежно від температури продукту та навколишнього середовища [7].

Технічні характеристики датчика VEGASON 51 наведені в таблиці Б.4 додатку Б.

3.2 Вибір виконавчих пристроїв

Для плавного регулювання подачі компонентів обрано електромеханічний регулювальний клапан HERZ Calis-TM-RD DN20 виробництва HERZ Armaturen GmbH. Клапан з термоелектричним приводом на 24 В DC є спеціалізованим рішенням для систем регулювання потоку рідини у промисловому обладнанні. Термоелектричний привід працює на принципі теплового розширення: при подачі напруги 24 В DC нагрівальний елемент розширює термочутливий матеріал, що переміщує шток клапана та відкриває прохідний переріз. Клапан характеризується відсутністю шуму та вібрацій при роботі, що є перевагою порівняно з електромагнітними

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

клапанами. Корпус із нікельованої латуні стійкий до корозії у системах технічного водопостачання [8].

Технічні характеристики клапана HERZ Calis-TM-RD DN20 наведені у таблиці Б.5 додатку Б.

Для гальванічного розв'язання ланцюгів дискретного виходу ПЛК від силових ланцюгів керування клапанами та сигналізацією застосовано проміжні реле OMRON MY2N виробництва OMRON Corporation. Проміжне реле є обов'язковим елементом схеми між виходом ПЛК (24 В DC, струм до 0,5 А) та котушками пневматичних і електричних клапанів (220 В AC або 24 В DC, струм 0,5-2 А). Крім підсилення сигналу за потужністю, реле забезпечує захист виходів ПЛК від можливих перешкод і комутаційних сплесків напруги, що виникають при перемиканні котушок клапанів [9].

Технічні характеристики реле OMRON MY2N наведені Б.6 додатку Б.

3.3 Вибір пристроїв управління

На підставі аналізу функціональних вимог до АСК (розділ 1) та переліку сигналів ФСА (розділ 2) сформовано технічне завдання на ПЛК. Система керування піролізної установки повинна обробляти такий перелік сигналів введення-виведення:

- аналогові входи – 9 каналів (4-20 мА): WE 1-1, TE 2-1...TE 5-1, PE 6-1, TE 7-1, LE 8-1, LE 9-1;
- дискретні виходи – 10 каналів (24 В DC): пускачі, сигналізація;
- інтерфейси зв'язку.

Для реалізації системи керування піролізною установкою обрано модульну платформу IPC-7000.

Для підключення всіх дев'яти первинних перетворювачів до системи керування обрано модуль аналогового введення I-7018R виробництва ICP DAS Co., Ltd. I-7018R є польовим модулем збору аналогових сигналів серії I-

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7000. Таким чином, один модуль I-7018R перекриває 8 з 9 каналів введення; для дев'ятого каналу використовується другий модуль з одним задіяним каналом та сімома резервними [10].

Технічні характеристики I-7018R наведені В.1 додатку В.

Для формування дискретних керуючих сигналів на виконавчі пристрої обрано модуль I-7063D виробництва ICP DAS (8 релейних виходів SPST + 4 дискретних входи, напруга 24 В DC). Вбудоване поєднання релейних виходів та дискретних входів в одному модулі дозволяє реалізувати зворотний зв'язок по стану реле в межах одного пристрою: кожен релейний вивід комутує котушку проміжного реле OMRON MY2N (24 В DC, 53,6 мА), а відповідний дискретний вхід зчитує стан допоміжного контакту реле, підтверджуючи факт спрацювання [11].

Технічні характеристики I-7063D наведені В.2 додатку В.

Для організації ізольованої польової шини RS-485 між компютером та модулями серії I-7000 застосовано перетворювач інтерфейсів I-7520 виробництва ICP DAS. Модуль I-7520 є рідним для екосистеми I-7000 і повністю сумісний із протоколами Modbus RTU та DCON, що використовуються всіма модулями серії. Перетворювач здійснює двонаправлене перетворення сигналів RS-232 (з боку CPU) ↔ RS-485 з автоматичним керуванням напрямом передачі без апаратного handshaking – це спрощує програмування Master-пристрою (CPU). На одній шині розміщуються всі чотири польових модулі: I-7018R (×2), I-7063D (×2) [12].

Технічні характеристики I-7520 наведені В.3 додатку В.

3.4 Вибір джерел живлення

Електроживлення активних засобів системи автоматизації процесу піролізу організовано від спільної мережі постійного струму з номінальною напругою 24 В. Кількість і номенклатура навантажень визначаються

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структурою прийнятого комплексу технічних засобів, до якого входять процдва модулі I-7018R для приймання аналогових сигналів, два модулі релейного керування I-7063D, інтерфейсний перетворювач I-7520 та дев'ять первинних датчиків контролю технологічних параметрів: WE 1-1, TE 2-1...TE 5-1, PE 6-1, TE 7-1, LE 8-1 і LE 9-1.

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

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

Споживач	Позиція на ФСА	К-ть, шт.	Потужн. одного, Вт	Потужн. сумарна, Вт	Струм сумарний, А
Модуль AI I-7018R	I-7018R	2	1,0	2,0	0,083
Модуль DO I-7063D	I-7063D	2	2,8	5,6	0,233
Перетворювач інтерфейсів I-7520	I-7520	1	0,5	0,5	0,021
Датчики	–	9	0,6	5,4	0,225
РАЗОМ (без запасу)	–	–	4,9	13,5 Вт	0,562 А

Сумарна розрахункова потужність споживачів системи керування складає 13,5 Вт. Відповідний розрахунковий струм навантаження при номінальній напрузі живлення 24 В DC:

$$I_{роз} = P_{заг} / U_{жив} = 13,5 / 24 = 0,562 \text{ А}$$

При виборі промислового блока живлення застосовується коефіцієнт запасу $K_z=1,25$.

Необхідна мінімальна потужність блока живлення з урахуванням коефіцієнта запасу:

$$P_{бж} = P_{заг} \times K_z = 13,5 \times 1,25 = 16,875 \text{ Вт}$$

Відповідний мінімальний струм блока живлення:

$$I_{бж} = P_{бж} / U_{жив} = 16,875 / 24 = 0,70 \text{ А}$$

Отже, необхідний мінімальний номінал блока живлення – не менше 29,5 Вт (1,23 А) при напрузі 24 В DC. Найближчий стандартний номінал серії MEAN WELL-75 Вт / 3,2 А (модель DR-75-24), що забезпечує запас по струму 160% відносно розрахункового значення 1,23 А [14].

Технічні характеристики блока живлення MEAN WELL-75 Вт наведені у таблиці Г.1 додатку Г.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОБГРУНТУВАННЯ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ

Принципові електричні схеми АСК піролізної установки розроблені на підставі функціональної схеми автоматизації (розділ 2) та обраних технічних засобів (розділ 3). Схеми відображають фізичні з'єднання між первинними перетворювачами, польовими модулями I-7018R та I-7063D, модулем інтерфейсу IPC-7520 та виконавчими механізмами.

Перший модуль I-7018R з адресою Modbus 01 приймає сигнали від восьми первинних перетворювачів, що підключаються до каналів СН0-СН7 у такому порядку:

Канал СН0 – ваговий датчик WE 1-1 (ЗТМК-0,5Т, вихід 4-20 мА): вимірювання маси завантаженої деревини у бункері Б-1. Канал налаштований у режим струмової петлі 4-20 мА.

Канали СН1-СН4 – термопари ТХА-1172 типу К: ТЕ 2-1 (зона сушіння), ТЕ 3-1 (зона передпіролізу), ТЕ 4-1 (зона активного піролізу) та ТЕ 5-1 (зона завершення піролізу). Усі чотири канали налаштовані у режим прямого вимірювання термо-ЕРС термопари типу К із вбудованою апаратною компенсацією температури холодного спаю (СJS). Підключення двопровідним компенсаційним кабелем КМТВЕВ безпосередньо до диференційних входів СН+/СН-.

Канал СН5 – датчик тиску РЕ 6-1 (Метран-150, вихід 4-20 мА): вимірювання надлишкового тиску пірогенних газів у реторті Р-1. Режим входу – струмова петля 4-20 мА.

Канал СН6 – термоопір ТЕ 7-1 (ТСПУ-0206, Pt100): вимірювання температури охолоджуючої води на виході конденсатора К-1. Канал налаштований у режим вимірювання RTD Pt100 з чотирипровідним підключенням для виключення похибки з'єднувальних проводів.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Канал СН7 – буйковий рівнемір LE 8-1 (БР-1, вихід 4-20 мА): вимірювання рівня конденсату у відстійнику-сепараторі С-1. Режим входу – струмова петля 4-20 мА.

Другий модуль I-7018R з адресою Modbus 02 задіяний для підключення рівнеміра LE 9-1 та сигналізатора рівня НЛ1. Канали СН2-СН7 залишаються резервними.

Канал СН0 – ультразвуковий рівнемір LE 9-1 (VEGASON 51, вихід 4-20 мА): вимірювання рівня готового дьогтю у резервуарі РД-1. Режим входу – струмова петля 4-20 мА. Модуль I-7018R №2 реалізує функцію нормалізувального блоку NS 9-3.

Канал СН1 – аналоговий сигнал від сигналізатора рівня НЛ1 (вихід 4–20 мА): призначений для контролю аналогового рівня або стану сигналізатора.

Два модулі I-7063D забезпечують формування дискретних керуючих сигналів для всіх дев'яти NS-блоків системи та сигналізатора НЛ1.

Перший модуль I-7063D з адресою Modbus 03 формує керуючі сигнали для восьми NS-блоків контурів автоматичного регулювання – по одному NS-блоку на кожний вихідний канал DO0-DO7.

Вихід DO0 – NS 1-3: керуючий сигнал контуру маси деревини (WE 1-1). Активація виходу DO0 формує команду на виконавчий механізм контуру дозування сировини.

Виходи DO1–DO4 – NS 2-3, NS 3-3, NS 4-3, NS 5-3: керуючі сигнали чотирьох контурів температури реторти (TE 2-1...TE 5-1). Виходи DO1–DO4 через реле керують котушками пускачів зон нагрівання 1–4.

Вихід DO5 – NS 6-3: керуючий сигнал контуру тиску (PE 6-1). Через реле керує соленоїдом клапана скидання тиску.

Вихід DO6 – NS 7-3: керуючий сигнал контуру температури конденсатора (TE 7-1). Через реле керує клапаном охолоджуючої води.

Вихід DO7 – NS 8-3: керуючий сигнал контуру рівня сепаратора (LE 8-1). Через реле керує кульовими клапанами сепаратора.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Другий модуль I-7063D з адресою Modbus 04 формує керуючі сигнали для NS-блоку дев'ятого контуру та сигналізатора HL1. Виходи DO2–DO7 залишаються резервними.

Вихід DO0 – NS 9-3: керуючий сигнал контуру рівня резервуара дьогтю (LE 9-1).

Вихід DO1 – HL1: керування сигналізатором рівня / індикаторною лампою HL1 (24 В DC).

Перетворювач інтерфейсів I-7520 з'єднує послідовний порт RS-232 CPU-01 з двопровідною польовою шиною RS-485. До шини підключені всі чотири польових модулі з унікальними адресами Modbus RTU.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Розробка алгоритму функціонування системи управління

Структурно алгоритм розділений на дві паралельні гілки, які виконуються послідовно в межах одного циклу:

– ліва гілка – контроль процесу піролізу в реторті: вимірювання маси деревини (WE 1-1), температур чотирьох зон реторти (TE 2-1...TE 5-1) та тиску газів (PE 6-1); формування керуючих сигналів NS 1-3...NS 6-3;

– права гілка – контроль процесу конденсації та накопичення продукту: вимірювання температури конденсатора (TE 7-1), рівнів у сепараторі (LE 8-1) та резервуарі дьогтю (LE 9-1); формування керуючих сигналів NS 7-3...NS 9-3.

Ліва гілка алгоритму починається з блоку «Початок», який ініціалізує систему при кожному запуску виробничого циклу.

Перший контур перевіряє відповідність маси завантаженої деревини (WE 1-1) мінімально допустимому значенню $W_{Зад}$. Якщо умова $WE\ 1-1 \geq W_{Зад}$ виконана – активується NS 1-3, що дає дозвіл на запуск. Якщо умова не виконана – NS 1-3 деактивується.

Далі алгоритм послідовно перевіряє температури чотирьох зон реторти, зчитуючи значення з каналів CH1–CH4 модуля I-7018R №1. Для кожної зони (TE 2-1, TE 3-1, TE 4-1, TE 5-1) виконується порівняння поточної температури з профільним значенням $T_{Зад}(k)$ – поточним завданням програмного регулятора рецепта. Результат визначає стан відповідного NS-блоку (NS 2-3 ... NS 5-3) та через нього – стан нагрівача відповідної зони.

Завершальним контуром лівої гілки є перевірка тиску пірогенних газів (PE 6-1, канал CH5 модуля I-7018R №1). Якщо тиск перевищує задане значення $P_{Зад}$ – активується NS 6-3, що через I-7063D №1 (DO5) та реле подає сигнал на клапан для його закриття. При зниженні тиску нижче нижнього

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порогу NS 6-3 деактивується – клапан відкривається. Після виконання цього блоку керування передається до правої гілки через з'єднувач.

Права гілка алгоритму відповідає за керування процесами конденсації парогазової суміші та накопичення готового продукту.

Перший контур правої гілки зчитує температуру охолоджуючої води на виході конденсатора К-1 (ТЕ 7-1, канал СН6 модуля I-7018R №1). Умова перевірки має знак «менше або рівне»: якщо $TE\ 7-1 \leq T_{Охол}$ (нормальна температура конденсації $\leq 25^{\circ}C$) – NS 7-3 залишається деактивованим (витрата охолодження не збільшується); якщо умова не виконана (температура перевищила допустиму) – NS 7-3 активується та через I-7063D №1 (DO6) відкриває клапан для збільшення витрати охолоджуючої води.

Контур рівня сепаратора зчитує показання рівнеміра LE 8-1 (канал СН7 модуля I-7018R №1). При досягненні рівнем верхнього порогу LЗад активується NS 8-3, що через I-7063D №1 (DO7) подає команду на відкриття клапана. При зниженні рівня нижче нижнього порогу NS 8-3 деактивується – клапан закривається.

Останній контур алгоритму перевіряє рівень дьогтю у резервуарі РД-1 (LE 9-1, канал СН0 модуля I-7018R №2). Порогове значення LМакс налаштовується на рівні 80% від об'єму резервуара для попереджувального сигналу та 95% для аварійного блокування. При спрацюванні умови NS 9-3 активується та формує команду на вимкнення клапана. Блок «Кінець циклу» завершує поточну ітерацію.

5.2 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера

Програмне забезпечення системи автоматизації піролізної установки розроблено у середовищі ADAM/APAX .NET Utility та AdamView виробництва Advantech, яке є стандартним інструментом конфігурування та

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програмування для польових модулів серії I-7000 та суміжних платформ. AdamView забезпечує графічне середовище SCADA-типу з підтримкою мови сценаріїв BasicScript, що дозволяє реалізовувати умовну логіку керування безпосередньо на рівні операторського інтерфейсу та конфігурації контролера. Передача керуючих сигналів на виконавчі механізми, пускачі та клапани здійснюється через блоки дискретного виходу DO модулів I-7063D [14].

До каналу AI1 першого модуля I-7018R підключено ваговий тензOMETричний датчик WE 1-1, встановлений під опорами бункера деревини Б-1. Після налаштування каналу у середовищі AdamView у блоці BasicScript описується алгоритм перевірки готовності партії: якщо зважена маса деревини досягає встановленого мінімального значення, формується дозвільний сигнал NS 1-3, при незаповненому бункері сигнал NS 1-3 знімається. Скрипт наведено в додатку Д, лістинг Д.1.

До каналу AI2 підключається термopара TE 2-1 типу К, що вимірює температуру зони сушіння реторти Р-1. У блоці BasicScript описується алгоритм порівняння поточної температури зони з профільним значенням уставки: при досягненні заданого рівня нагріву активується сигнал NS 2-3, що через модуль I-7063D подає команду на пускач нагрівача першої зони. Скрипт наведено в додатку Д, лістинг Д.2.

До каналу AI3 підключається термopара TE 3-1 типу К, що контролює температуру зони передпіролізу реторти. Після налаштування каналу у середовищі AdamView у блоці BasicScript для цього датчика реалізується алгоритм: поточне значення температури зони передпіролізу порівнюється з відповідним профільним значенням уставки, за результатом якого формується керуючий сигнал NS 3-3 на пускач нагрівача другої зони. Скрипт наведено в додатку Д, лістинг Д.3.

До каналу AI4 підключається термopара TE 4-1 типу К, що є основним вимірювальним елементом зони активного піролізу реторти. Ця зона є критичною з точки зору якості готового продукту: саме тут відбувається

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтенсивне утворення дьогтю. У блоці BasicScript описується алгоритм порівняння вимірної температури активного піролізу з уставкою температурного профілю для третьої зони та формується керуючий сигнал NS 4-3 на пускач відповідного нагрівача. Скрипт наведено в додатку Д, лістинг Д.4.

До каналу AI5 підключається термопара TE 5-1 типу К, що вимірює температуру зони завершення піролізу та стабілізації деревного вугілля. Після налаштування каналу у середовищі AdamView у блоці BasicScript описується алгоритм порівняння температури верхньої зони з уставкою та витримки при максимальній температурі відповідно до обраного рецепта; за результатом порівняння формується сигнал NS 5-3 на пускач 4 нагрівача четвертої зони. Скрипт наведено в додатку Д, лістинг Д.5.

До каналу AI6 підключається термоопір TE 7-1, встановлений на виході охолоджуючої води з конденсатора К-1. У блоці BasicScript описується алгоритм регулювання витрати охолоджуючої води: якщо виміряна температура перевищує допустиму межу 25°C, активується сигнал NS 7-3, що відкриває клапан для збільшення витрати охолодження, а при нормалізації температури сигнал знімається. Скрипт наведено в додатку Д, лістинг Д.6.

До каналу AI7 підключається перетворювач тиску PE 6-1. У блоці BasicScript реалізується алгоритм позиційного регулювання тиску пірогенних газів: при перевищенні нормального робочого значення надлишкового тиску активується сигнал NS 6-3, що через реле подає команду на клапан для його закриття та підтримання тиску у встановлених межах 0,5-2,0 кПа. Скрипт наведено в додатку Д, лістинг Д.7.

До каналу AI8 підключається буйковий рівнемір LE 8-1, встановлений на відстійнику-сепараторі С-1. У блоці BasicScript реалізується алгоритм двопозиційного керування зливом фаз. При досягненні рівнем конденсату верхнього порогового значення активується сигнал NS 8-3. Скрипт наведено в додатку Д, лістинг Д.8.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До каналу AI9 другого модуля I-7018R підключається ультразвуковий рівнемір LE 9-1, встановлений на резервуарі готового дьогтю РД-1. У блоці BasicScript описується алгоритм контролю заповнення резервуара. При досягненні рівня активується сигнал NS 9-3. Скрипт наведено в додатку Д, лістинг Д.9.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПІРОЛІЗНОЇ РЕТОРТИ

6.1 Постановка задачі розрахунку

Система автоматичного регулювання (САР) температури піролізної реторти є головним контуром керування всієї установки. Від якості регулювання температури безпосередньо залежать вихід дьогтю та його якісні показники: відхилення температури в зоні активного піролізу більш ніж на $\pm 3^{\circ}\text{C}$ від заданого профілю призводить до зміни фракційного складу продукту [15].

Метою розрахунку є визначення параметрів ПД-регулятора контуру ТІС 1, що забезпечує підтримання температури в зоні активного піролізу реторти Р-1 з точністю $\pm 3^{\circ}\text{C}$ при реалізації заданого температурного профілю (швидкість нагрівання $3-8^{\circ}\text{C}/\text{хв}$). Розрахунок виконується для зони 3 (канал ТЕ 4-1, СНЗ модуля І-7018R №1), яка є критичною – саме в діапазоні $280-400^{\circ}\text{C}$ формується основна маса дьогтю.

6.2 Математична модель об'єкта керування

На основі аналізу об'єкта керування (підрозділ 1.5) канал «потужність нагрівача зони 3 \rightarrow температура ТЕ 4-1» апроксимується передатною функцією аперіодичної ланки другого порядку із транспортним запізненням (6.1) [15]:

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

де K – коефіцієнт підсилення об'єкта, $^{\circ}\text{C}/(\% \text{ потужності})$;

T_1 – велика стала часу (теплова інерція реторти), с;

T_2 – мала стала часу (теплова інерція нагрівача та стінки), с;

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

τ – час чистого запізнення (час теплопередачі до датчика ТЕ 4-1), с.

Числові значення параметрів моделі визначені з технічних характеристик реторти та результатів ідентифікації, наведених у підрозділі 1.5. Вихідні дані для розрахунку зведено в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри математичної моделі об'єкта керування

Параметр об'єкта	Значення
Коефіцієнт підсилення об'єкта K , °C / (%потужності)	0,85 °C/%
Велика стала часу T_1 (теплова інерція реторти)	1680 с (28 хв)
Мала стала часу T_2 (теплова інерція нагрівача)	360 с (6 хв)
Час чистого запізнення τ	720 с (12 хв)
Відношення τ / T_1 (показник складності)	0,429
Тип апроксимації ПФ об'єкта	Аперіодична ланка 2-го порядку із запізненням

Відношення $\tau/T_1=0,429 < 0,5$ означає, що запізнення є помірним відносно основної сталої часу об'єкта. Це дозволяє застосувати класичні інженерні методи налаштування ПД-регулятора без спеціальних алгоритмів компенсації запізнення типу предиктора Сміта [15].

6.3 Вибір структури регулятора

Для регулювання температури реторти обрано ПД-регулятор.

Передатна функція ідеального ПД-регулятора (6.2):

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$$W_p(s) = K_p \cdot (1 + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s), \quad (6.2)$$

де K_p – коефіцієнт підсилення (пропорційна складова);

T_i – час інтегрування, с;

T_d – час диференціювання, с.

6.4 Розрахунок параметрів ПД-регулятора методом CHR

Для налаштування ПД-регулятора застосовується метод Chien–Hrones–Reswick (CHR) – аналітичний метод, що забезпечує мінімальний інтегральний квадратичний критерій якості без перерегулювання. Метод CHR є оптимальним для об'єктів із помірним запізненням ($\tau/T_1 < 0,5$) і дозволяє отримати стійку систему без громіздких частотних розрахунків [15].

Розрахункові формули методу CHR (варіант: без перерегулювання, реакція на збурення) (6.3, 6.4, 6.5):

$$K_p = 0,6 \cdot T_1 / (K \cdot \tau); \quad (6.3)$$

$$T_i = T_1; \quad (6.4);$$

$$T_d = 0,5 \cdot \tau. \quad (6.5).$$

Підставляємо числові значення (6.6, 6.7, 6.8):

$$K_p = 0,6 \cdot 1680 / (0,85 \cdot 720) = 0,6 \cdot 1680 / (0,85 \cdot 720) = 1008 / 612 = 1,65; \quad (6.6)$$

$$T_i = T_1 = 1680 \text{ с} = 28 \text{ хв}; \quad (6.7)$$

$$T_d = 0,5 \cdot \tau = 0,5 \cdot 720 = 360 \text{ с} = 6 \text{ хв}. \quad (6.8)$$

Розраховані параметри ПД-регулятора зведено в таблицю 6.2.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 6.2 – Параметри ПД-регулятора контуру ТІС 1 (зона 3)

Параметр ПД-регулятора	Розраховане значення
Коефіцієнт підсилення K_p (пропорційна складова)	1,65
Час інтегрування T_i , с (інтегральна складова)	1680 с (28 хв)
Час диференціювання T_d , с (диференціальна складова)	360 с (6 хв)
Коефіцієнт інтегрування $K_i = K_p / T_i$, %/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}$)	0,00098
Коефіцієнт диференціювання $K_d = K_p$ $\times T_d$, $\% \cdot \text{с} / ^{\circ}\text{C}$	594,0

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

РОЗДІЛ 7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) впровадження автоматизованої системи керування піролізною установкою для виробництва деревного дьогтю передбачає визначення сукупних капітальних витрат на придбання, монтаж і введення в дію засобів автоматизації, оцінку щорічних експлуатаційних витрат та розрахунок економічної ефективності від скорочення операційних витрат порівняно з ручним режимом керування [16].

Кошторис вартості засобів контролю, вимірювання, автоматизації та приладів (КВПіА) складено на підставі ринкових цін офіційних дистриб'юторів обраного обладнання станом на поточний рік. До переліку включено всі первинні перетворювачі (датчики), виконавчі механізми та модулі системи керування, що визначені у попередніх розділах проекту [16]. Повна відомість вартості КВПіА наведена у таблиці Е.1.

Загальна вартість засобів КВПіА склала 93218 грн.

Загальні капітальні вкладення у впровадження АСК включають не лише вартість придбання засобів КВПіА, а й витрати на монтажні роботи, налагодження системи та розробку проектної документації. Ці складові визначаються коефіцієнтним методом, де база нарахування – вартість придбаного обладнання [16].

Витрати на монтаж і налагодження системи приймаються у розмірі 20% від вартості КВПіА. Ця частка охоплює прокладання кабельних трас від датчиків до шафи керування, монтаж шафи керування з усіма модулями на DIN-рейку, підключення польових приладів, налаштування адрес Modbus RTU модулів I-7018R та I-7063D, завантаження та верифікацію програмного забезпечення AdamView:

$$C_{\text{монт}} = K_{\text{монт}} \times C_{\text{КВП}} = 0,20 \times 93218 = 18644 \text{ грн.}$$

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Витрати на розробку проєктної документації, включаючи технічне завдання, функціональну схему автоматизації, принципові електричні схеми та програмне забезпечення, приймаються у розмірі 10% від вартості КВПіА:

$$C_{\text{проект}} = K_{\text{проект}} \times C_{\text{КВП}} 0,10 \times 93218 = 9322 \text{ грн.}$$

Загальні капітальні вкладення визначаються як сума трьох складових:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{КВП}} + C_{\text{монт}} + C_{\text{проект}} = 93218 + 18644 + 9322 = 121184 \text{ грн.}$$

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У дипломному проекті виконано комплексну розробку автоматизованої системи керування піролізною установкою для виробництва деревного дьогтю методом сухої перегонки деревини. Відповідно до поставлених у вступі завдань отримано такі результати:

1. Виконано аналіз технологічного процесу виробництва деревного дьогтю як об'єкта автоматичного керування. Встановлено, що піролізна реторта є нелінійним об'єктом із розподіленими параметрами та суттєвими запізненнями ($\tau = 818$ хв), що апроксимується аперіодичною ланкою другого порядку із транспортним запізненням. Визначено чотири технологічні зони реторти з температурними діапазонами 100-200°C, 200-280°C, 280-400°C та 400-500°C відповідно, а також вимоги до точності регулювання температури $\pm 3^\circ\text{C}$ та швидкості нагрівання $\pm 0,5^\circ\text{C}/\text{хв}$. Виявлено ключові збурення – вологість деревини, нерівномірність її укладки та екзотермічний ефект піролізу в діапазоні 280-350°C.

2. Розроблено функціональну схему автоматизації відповідно до вимог ДСТУ та ISA-5.1. Схема охоплює дев'ять контурів вимірювання: масу деревини (WE 1-1), температури чотирьох зон реторти (TE 2-1...TE 5-1), тиск пірогенних газів (PE 6-1), температуру конденсатора (TE 7-1), рівні у сепараторі та резервуарі дьогтю (LE 8-1, LE 9-1). Для кожного контуру визначено нормалізувальні блоки NS 1-3...NS 9-3, що забезпечують передачу сигналів до ПЛК.

3. Обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації. Для вимірювання обрано тензометричний датчик ЗТМК-0,5Т, термопари ТХА-1172 типу К, перетворювач тиску Метран-150, термоопір ТСПУ-0206 (Pt100), буйковий рівнемір БР-1 та ультразвуковий рівнемір VEGASON 51. Виконавчі пристрої включають пропорційний клапан HERZ Calis-TM-RD DN20, клапани КПЕГ-50Н та КПЕГ-40НЗ, кульові клапани КЕП-25 з електроприводом.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обґрунтовано використання польових модулів ICP DAS I-7018R (аналоговий ввід) та I-7063D (релейний вивід), об'єднаних шиною RS-485/Modbus RTU через перетворювач I-7520.

4. Розроблено принципові електричні схеми підключення датчиків та виконавчих механізмів. Перший модуль I-7018R (Modbus адреса 01) приймає сигнали від восьми датчиків на каналах CH0-CH7; другий модуль (адреса 02) – від рівнеміра LE 9-1 та сигналізатора HL1. Перший модуль I-7063D (адреса 03) формує керуючі сигнали NS 1-3...NS 8-3 на виходах DO0–DO7; другий модуль (адреса 04) – сигнали NS 9-3 та HL1. Визначено групову схему захисту мережі 24 В DC з чотирма автоматичними вимикачами та блоком живлення Mean Well DR-75-24.

5. Виконано розрахунок системи автоматичного регулювання температури зони активного піролізу реторти (контур ТІС 1, датчик ТЕ 4-1). Об'єкт апроксимовано з параметрами $K=0,85^{\circ}\text{C}/\%$, $T_1=28\text{хв}$, $T_2=6\text{хв}$, $\tau=12\text{хв}$. За методом Chien-Hrones-Reswick (CHR) розраховано параметри ПІД-регулятора: $K_p=1,65$, $T_i=28\text{хв}$, $T_d= \text{хв}$. Перевірка стійкості показала запас по підсиленню 1,78, статична похибка регулювання – 0°C , динамічна похибка при швидкості нагрівання $5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ – $1,84^{\circ}\text{C}$, що не перевищує допустимих $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Час перехідного процесу складає приблизно 42 хвилини.

6. Розроблено алгоритм функціонування АСК у вигляді двогілкової блок-схеми відповідно до ГОСТ 19.701-90. Ліва гілка охоплює контури WE 1-1, TE 2-1...TE 5-1 та PE 6-1 (NS 1-3...NS 6-3); права гілка – контури TE 7-1, LE 8-1 та LE 9-1 (NS 7-3...NS 9-3). Алгоритм реалізовано у вигляді циклічної програми з кроком 10 мс у середовищі AdamView мовою BasicScript. Основний сценарій SCR_MAIN виконує послідовне зчитування AI-тегів датчиків та формування DO-тегів NS-блоків; сценарій аварійного захисту SCR_ALARM перевіряє критичні умови ($T > 550^{\circ}\text{C}$, $P > 5 \text{кПа}$, рівень $> 95\%$) з вищим пріоритетом виконання.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Виконано техніко-економічне обґрунтування проекту. Загальна вартість засобів КВПіА складає 93218 грн.

Таким чином, усі завдання дипломного проекту виконано в повному обсязі. Розроблена автоматизована система керування піролізною установкою забезпечує точне підтримання температурного профілю у чотирьох зонах реторти з точністю $\pm 3^{\circ}\text{C}$, безперервний контроль дев'яти технологічних параметрів, надійний аварійний захист та програмне керування на базі польових модулів серії ICP DAS I-7000, об'єднаних шиною RS-485/Modbus RTU. Запропоноване рішення може бути рекомендовано до впровадження на малотоннажних підприємствах лісохімічної галузі України.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жук Д. В. Технології та технічне устаткування для утилізації і перероблення деревних відходів та отримання синтез-газу, біонафти і деревного вугілля. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2025. № 2. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/46804>. (дата звернення: 20.02.2026).

2. Гайда С. В. Перероблення залишків деревини : методичні вказівки до самостійної роботи студентів. Львів: НЛТУ України, 2023. 40 с. (дата звернення: 20.02.2026).

3. Хрик В. М. Деревинознавство з основами лісового товарознавства : навчальний посібник. Біла Церква: БНАУ, 2023. 248 с. URL: <https://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/9383>. (дата звернення: 20.02.2026).

4. ЗТМК-0,5Т. URL: <https://ztmp.com.ua> (дата звернення: 10.03.2026).

5. Термопара ТХА-1172. URL: <https://ukrpromcentr.com.ua/ua/p249933230-termopreobrazovatel-termopara-tha.html> (дата звернення: 10.03.2026).

6. Датчик тиску Метран-150. LU150 URL: <https://ukrpromcentr.com.ua/ua/p854753881-preobrazovatel-davleniya-datchik.html> (дата звернення: 10.03.2026).

7. Датчик рівня VEGASON 51. URL: <https://ie.rs-online.com/web/p/miscellaneous/3870256> (дата звернення: 10.03.2026). 7 800

8. Клапан HERZ Calis-TM-RD DN20. URL: https://hydra.kh.ua/ua/p767908176-termostaticeskij-dn20-trehhodovyj.html?srsId=AfmBOoq3rZ3vkmbLo6QcdCupoOfL5B4z8vYTPIEWyBBDkCU-6tQT_YJ (дата звернення: 10.03.2026).

9. Реле OMRON MY2N. URL: <https://trade-control.com.ua/ua/products/omron-my2n-j-24vdc> (дата звернення: 10.03.2026).

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. I-7018R. URL: <https://icpdas.com.ua/remote-i-o-modules-units/i-7018r-cr.html> (дата звернення: 15.04.2026).
11. I-7063D. URL: <https://icpdas.com.ua/remote-i-o-modules-units/i-7063d-cr.html> (дата звернення: 15.04.2026).
12. Модуль I-7520. URL: <https://icpdas.com.ua/industrial-communication/i-7520-cr.html> (дата звернення: 15.04.2026).
13. MEAN WELL-75 Вт. URL: <https://meanwell.kiev.ua/ua/p226689364-lrs-blok-pitaniya.html> (дата звернення: 20.04.2026). 708 грн
14. 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).
15. Вибір регуляторів для систем автоматичного керування : методичні вказівки / уклад. В. М. Пилипенко. Мелітополь: ТДАТУ, 2023. 48 с. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ea/wp-content/uploads/sites/27/mu-vybir-rehuljatoriv-dlja-sak.pdf>. (дата звернення: 15.05.2026).
16. Техніко-економічне обґрунтування проектних рішень з автоматизації : навчальний посібник / уклад. В. І. Медведєв, О. В. Мироненко. Харків: ХНУРЕ, 2023. 112 с.

					АтаБС-007.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		