

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-55.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

Ростислав Струк

2026

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

Струк Ростислав Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК _ 681.5.015

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розробка апаратного та методичного забезпечення лабораторного стенда на базі

(назва роботи)

НМІ панелі ЕТ6 та контролера М172

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент

О.В. Кучмистенко

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Рецензент

професор

М.І. Горбійчук

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1

Р.О. Струк

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

М.І. Когутяк

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

А.І. Лагойда

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І. Лагойда.

«___» _____ 2026 року

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

Струку Ростиславу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка апаратного та методичного забезпечення лабораторного стенда на базі НМІ панелі ЕТ6 та контролера М172

керівник роботи Когутяк Мирослав Іванович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від 29 травня 2026 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 12.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Технологічна схема об'єкту, параметри проходження процесу, стандарти, каталоги, методичні вказівки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз предметної області та постановка задачі. 2. Опис об'єкта керування та функціональна схема. 3. Технічні засоби реалізації проекту.

4. Розробка програмного забезпечення. 5. Математична модель та розрахунки.

6. Розробка НМІ панелі та введення системи в експлуатацію. Висновки. Перелік посилань на джерела.

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

Лист 1 - Загальна архітектура лабораторного стенда - БР.АКП-00.00.00.001;

Лист 2 - Функціональна схема автоматизації - БР.АКП-00.00.00.002;

Лист 3 - Схема підключення - БР.АКП-00.00.00.003;

Лист 4 - Блок схема алгоритму управління - БР.АКП-00.00.00.004;

Лист 5 - Головна сторінка панелі оператора ЕТ6 - БР.АКП-00.00.00.005;

Лист 6 - Сторінка конфігурації панелі оператора ЕТ6 - БР.АКП-00.00.00.006.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та постановка задачі	13.05.2026 р.	
2	Опис об'єкта керування та функціональна схема	16.05.2026 р.	
3	Технічні засоби реалізації проекту	19.05.2026 р.	
4	Розробка програмного забезпечення	23.05.2026 р.	
5	Математична модель та розрахунки	26.05.2026 р.	
6	Розробка НМІ панелі та введення системи в експлуатацію	31.05.2026 р.	

Студент _____
(підпис)

Р.О. Струк
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

М.І. Когутяк
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 104 сторінок друкованого тексту, 30 рисунків, 5 таблиць, 6 переліків посилань на джерела і 3 додатків.

Тема: «Розробка апаратного та методичного забезпечення лабораторного стенда на базі НМІ панелі ET6 та контролера M172».

Об'єкт дослідження: система автоматичного керування технологічним процесом нагрівання та двостадійного дозування рідини.

Мета проекту: розробка повнофункціонального лабораторного стенда на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M172 та панелі оператора Harmony ET6 для відпрацювання практичних навичок проектування систем автоматизації.

Методи дослідження: математичне моделювання об'єкта керування, ідентифікація передавальної функції, синтез PID-регулятора, програмна симуляція технологічного процесу в середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC, моделювання перехідних процесів у пакеті Matlab.

Результати кваліфікаційної роботи: у роботі вирішуються наступні питання: проаналізовано предметну область та обґрунтовано актуальність створення лабораторних стендів для підготовки фахівців з автоматизації. Розроблено функціональну схему автоматизації та схему підключення стенда. Обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації на базі обладнання Schneider Electric. Розроблено керуючу програму контролера що складається з семи програмних модулів мовами ST та FBD відповідно до стандарту МЭК 61131-3, включаючи основну логіку керування, PID-регулятор температури на базі блока PIDAdvanced, програмні імітаційні моделі об'єктів керування та модуль реєстрації температури. Виконано математичне моделювання та ідентифікацію об'єкта нагрівання, розраховано параметри PID-регулятора, побудовано діаграму Боде та перехідний процес замкненої системи у середовищі Matlab. Розроблено інтерфейс панелі оператора ET6 з захистом доступу. Виконано завантаження проєктів на реальне обладнання та проведено комплексну перевірку роботи системи.

Ключові слова: автоматичне керування, програмований логічний контролер, PID-регулятор, НМІ-панель, Modbus TCP/IP, моделювання, дозування, EcoStruxure.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains 102 pages of printed text, 30 figures, 5 tables, 9 references, and 3 appendices.

Title: "Development of Hardware and Methodological Support for a Laboratory Stand Based on the ET6 HMI Panel and M172 Controller."

Object of research: automatic control system for the technological process of liquid heating and two-stage dosing.

Purpose of the project: development of a fully functional laboratory stand based on the Schneider Electric Modicon M172 programmable logic controller and Harmony ET6 operator panel for practicing practical skills in automation system design.

Research methods: mathematical modeling of the control object, transfer function identification, PID controller synthesis, software simulation of the technological process in EcoStruxure Machine Expert – HVAC environment, transient process modeling in the Matlab software package.

Results of the qualification work: the following issues are addressed in the thesis: the subject area is analyzed and the relevance of creating laboratory stands for training automation specialists is substantiated. A functional automation diagram and connection diagram of the stand are developed. The selection of technical automation means based on Schneider Electric equipment is justified. A controller program consisting of seven software modules in ST and FBD languages in accordance with the IEC 61131-3 standard is developed, including the main control logic, a temperature PID controller based on the PIDAdvanced block, software simulation models of control objects, and a temperature logging module. Mathematical modeling and identification of the heating object are performed, PID controller parameters are calculated, a Bode diagram and closed-loop transient response are constructed in the Matlab environment. An ET6 operator panel interface with access protection is developed. The projects are loaded onto real equipment and a comprehensive system performance verification is conducted.

Keywords: automatic control, programmable logic controller, PID controller, HMI panel, Modbus TCP/IP, modeling, dosing, EcoStruxure.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	11
1.1 Актуальність створення лабораторних стендів для навчання АСУ ТП.....	11
1.2 Промислові аналоги.....	11
1.3 Постановка задачі та вимоги до стенда	13
1.4 Загальна архітектура стенда.....	14
Висновки до розділу	15
2 ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА	16
2.1 Загальна характеристика технологічного процесу.	16
2.2 Опис об'єкта керування	17
2.3 Аналіз функціональної схеми автоматизації.....	23
2.4 Опис схеми підключення	27
Висновки до розділу	30
3 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ	31
3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації	31
3.2 Контролер Schneider Electric Modicon M172 (TM172PDG28RI).....	35
3.3 Панель оператора Harmony ET6 (HMIET6500).....	37
3.4 Давачі та виконавчі механізми	38
Висновки до розділу	40
4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	41
4.1 Загальна структура програмного забезпечення	41
4.2 Глобальні змінні та змінні статусу.....	42
4.3 Програма Main.....	45
4.4 Програма PID.....	48
4.5 Імітаційні моделі	49
4.6 Програма DataLogger	52
4.7 Програми assign_sync та Assign_p.....	53
Висновки до розділу	55

					БР АКП - 55.00.000 ПЗ						
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка апаратного та методичного забезпечення лабораторного стенда на базі НМІ панелі ET6 та контролера M172	Літ.		Арк.		Аркушів	
Розроб.		Струк Р.О.				н		6		104	
Перевір.		Когутяк М.І.									
Реценз.		Горбійчук М. І.									
Н. Контр.		Кучмистенко О. В.									
Затверд.		Лагойда А.І.									
						ІФНТУНГ АКП-22-1					

5 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА РОЗРАХУНКИ.....	56
5.1 Математична модель об'єкта нагрівання	56
5.2 Ідентифікація об'єкта керування	58
5.3 Розрахунок параметрів PID-регулятора.....	63
5.4 Перехідний процес замкненої системи.....	66
5.5 Частотний аналіз об'єкта нагрівання.....	69
5.6 Верифікація математичної моделі.....	71
Висновки до розділу	72
6 РОЗРОБКА НМІ ПАНЕЛІ ТА ВВЕДЕННЯ СИСТЕМИ В ЕКСПЛУАТАЦІЮ.....	73
6.1 Розробка інтерфейсу панелі оператора ЕТ6.....	73
6.2 Змінні панелі та налаштування підключення.....	75
6.3 Дисплей контролера М172	77
6.4 Завантаження та перевірка роботи системи	77
Висновки до розділу	79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	82
ДОДАТКИ.....	83

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСУ ТП - автоматизована система управління технологічним процесом.

ТП - технологічний процес.

ПЛК - програмований логічний контролер.

HMI - Human-Machine Interface (людино-машинний інтерфейс).

PID - Proportional-Integral-Derivative (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор).

FBD - Function Block Diagram (функціональна блокова діаграма).

ST - Structured Text (структурований текст).

МЕК - Міжнародна електротехнічна комісія.

TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol.

IP - Internet Protocol.

AI - Analog Input (аналоговий вхід).

AO - Analog Output (аналоговий вихід).

DI - Digital Input (дискретний вхід).

DO - Digital Output (дискретний вихід).

АЦП - аналого-цифровий перетворювач.

ПБР - пристрій безконтактний реверсивний.

POU - Program Organization Unit (програмний організаційний блок).

АЧХ - амплітудно-частотна характеристика.

ФЧХ - фазо-частотна характеристика.

ПФ - передавальна функція.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Автоматизація технологічних процесів є одним із ключових напрямків розвитку сучасної промисловості, що забезпечує підвищення продуктивності, точності та надійності виробництва. Підготовка кваліфікованих фахівців у галузі систем автоматичного керування вимагає наявності спеціалізованого лабораторного обладнання, що дозволяє відпрацьовувати практичні навички проектування та налагодження реальних промислових систем [1].

Метою даної бакалаврської роботи є розробка апаратного та методичного забезпечення лабораторного стенда на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M172 та панелі оператора Harmony ET6, що моделює типовий технологічний процес нагрівання рідини з подальшим двостадійним дозуванням під керуванням PID-регулятора.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі задачі: розроблено функціональну схему автоматизації та схему підключення стенда; обрано та обґрунтовано склад технічних засобів автоматизації; розроблено керуючу програму контролера з використанням мов ST та FBD відповідно до стандарту МЕК 61131-3; реалізовано програмні імітаційні моделі об'єктів керування; розроблено інтерфейс панелі оператора з захистом доступу; виконано математичне моделювання та ідентифікацію об'єкта в середовищі Matlab; проведено завантаження проєкту на реальне обладнання та перевірку роботи системи.

Об'єктом дослідження є система автоматичного керування технологічним процесом нагрівання та дозування рідини. Предметом дослідження є методи та засоби реалізації систем керування на базі промислових контролерів серії Modicon M172 з використанням середовища EcoStruxure Machine Expert – HVAC.

Практична цінність роботи полягає у створенні повнофункціонального лабораторного стенда, що може використовуватись у навчальному процесі для вивчення принципів програмування ПЛК, налаштування PID-регуляторів,

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розробки HMI-інтерфейсів та організації комунікації між промисловими пристроями по протоколу Modbus TCP/IP.

Бакалаврська робота складається з шести розділів. У першому розділі проведено аналіз предметної області та сформульовано постановку задачі. Другий розділ присвячено опису об'єкта керування та аналізу функціональної схеми автоматизації. У третьому розділі виконано підбір та характеристику технічних засобів автоматизації. Четвертий розділ містить детальний опис розробленого програмного забезпечення контролера. П'ятий розділ присвячено математичному моделюванню та розрахункам системи керування. У шостому розділі описано розробку інтерфейсу панелі оператора та введення системи в експлуатацію.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Актуальність створення лабораторних стендів для навчання АСУ ТП

Сучасна промисловість висуває високі вимоги до фахівців у галузі автоматизації - вони повинні вміти не лише теоретично обґрунтовувати рішення, але й практично реалізовувати системи керування на реальному обладнанні. Розрив між теоретичною підготовкою та практичними навичками є однією з ключових проблем технічної освіти, вирішення якої досягається шляхом створення спеціалізованих лабораторних стендів на базі промислового обладнання.

Лабораторний стенд на базі реального промислового контролера та панелі оператора дозволяє студентам отримати практичний досвід роботи з тим самим обладнанням та програмним забезпеченням, що використовується на виробництві. На відміну від комп'ютерних симуляторів, робота з реальним обладнанням формує розуміння особливостей промислових протоколів зв'язку, організації введення-виведення, налагодження програм у режимі реального часу та взаємодії між контролером і панеллю оператора.

Використання платформи Schneider Electric Modicon M172 у поєднанні з панеллю Harmony ET6 та середовищем EcoStruxure Machine Expert – HVAC забезпечує відпрацювання повного циклу розробки системи автоматизації - від проектування функціональної схеми до завантаження готового проєкту на реальне обладнання та його тестування, що повністю відповідає реальному виробничому процесу розробки АСУ ТП.

1.2 Промислові аналоги

Технологічний процес, що моделюється у даному лабораторному стенді - нагрівання рідини до заданої температури з подальшим точним дозуванням - є базовим для широкого кола реальних промислових виробництв. Розглянемо основні галузі де подібні системи керування знаходять практичне застосування.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фармацевтична промисловість.

У фармацевтичному виробництві процеси дозування рідких препаратів з одночасним контролем температури є критично важливими для забезпечення якості та безпеки продукції. Наповнення ампул, флаконів та інших первинних упаковок рідкими лікарськими засобами здійснюється автоматизованими дозувальними установками з поршневими насосами - конструктивно аналогічними поршневому дозатору стенда. Температурний контроль є обов'язковим при виробництві термолабільних препаратів, розчинів для ін'єкцій та суспензій. Системи керування такими установками будуються на базі промислових ПЛК з PID-регуляторами температури та розвиненими НМІ-інтерфейсами для контролю параметрів процесу - що повністю відповідає архітектурі розробленого стенда.

Харчова промисловість.

У харчовій промисловості автоматизовані системи дозування з температурним контролем широко застосовуються при виробництві напоїв, соусів, кондитерських виробів та молочної продукції. Типовий приклад - лінія розливу сиропів або соків де рідина попередньо нагрівається до технологічної температури пастеризації, після чого порційно дозується у споживчу тару. Точність дозування та стабільність температури безпосередньо впливають на якість готової продукції та відповідність санітарним нормам. Контролери серії Modicon M172 та аналогічні промислові ПЛК є стандартним рішенням для автоматизації подібних технологічних ліній.

Хімічна промисловість.

У хімічній промисловості точне дозування реагентів з контролем температури реакційного середовища є основою більшості технологічних процесів - від виробництва полімерів та лакофарбових матеріалів до синтезу органічних сполук. Двостадійне дозування, реалізоване у даному стенді (Stage 1 та Stage 2 з різними об'ємами доз), є моделлю реального процесу послідовного введення компонентів реакції у заданих співвідношеннях. Системи керування

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реакторами та змішувачами будуються на тих самих принципах що і розроблений стенд - замкнений контур регулювання температури з PID-регулятором та програмована логіка керування дозуванням на базі ПЛК.

Таким чином, навички отримані при роботі з даним лабораторним стендом - програмування ПЛК мовами ST та FBD, налаштування PID-регулятора, розробка HMI-інтерфейсу, організація комунікації по Modbus TCP/IP - є безпосередньо затребуваними у зазначених галузях промисловості та забезпечують практичну готовність фахівця до роботи на реальному виробництві.

1.3 Постановка задачі та вимоги до стенда

На підставі проведеного аналізу предметної області сформульовано постановку задачі бакалаврської роботи та визначено технічні вимоги до лабораторного стенда.

Постановка задачі.

Розробити апаратне та методичне забезпечення лабораторного стенда що моделює автоматизований технологічний процес нагрівання рідини з подальшим двостадійним дозуванням на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M172 та панелі оператора Harmony ET6. Оскільки реальне технологічне обладнання у складі стенда відсутнє - всі динамічні процеси реалізуються у вигляді програмних імітаційних моделей що виконуються безпосередньо на контролері M172.

Технічні вимоги до стенда.

Розроблена система керування повинна забезпечувати: автоматичне нагрівання рідини від початкової температури 20°C до робочої уставки 49,5°C під керуванням PID-регулятора з можливістю оперативного коригування параметрів регулювання з панелі оператора; автоматичний запуск процесу двостадійного дозування після досягнення порогової температури 49°C; виконання заданої кількості дозувальних циклів для кожної стадії з різними об'ємами доз (Stage 1 - повний хід поршня, Stage 2 - половинний хід); аварійну

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зупинку процесу з повним скиданням усіх параметрів до початкового стану; відображення поточних технологічних параметрів на панелі оператора в режимі реального часу; можливість оперативного коригування технологічних параметрів з панелі оператора без зупинки процесу та зміни керуючої програми; перемикання між керуванням з панелі оператора та фізичними кнопками; реєстрацію температурного профілю процесу для подальшого аналізу.

1.4 Загальна архітектура стенда

Лабораторний стенд являє собою програмно-апаратний комплекс що складається з двох фізичних пристроїв - контролера Schneider Electric Modicon M172 та панелі оператора Harmony ET6 - об'єднаних у локальну мережу Ethernet разом з персональним комп'ютером розробника. Загальну архітектуру стенда наведено на рисунку 1.1.

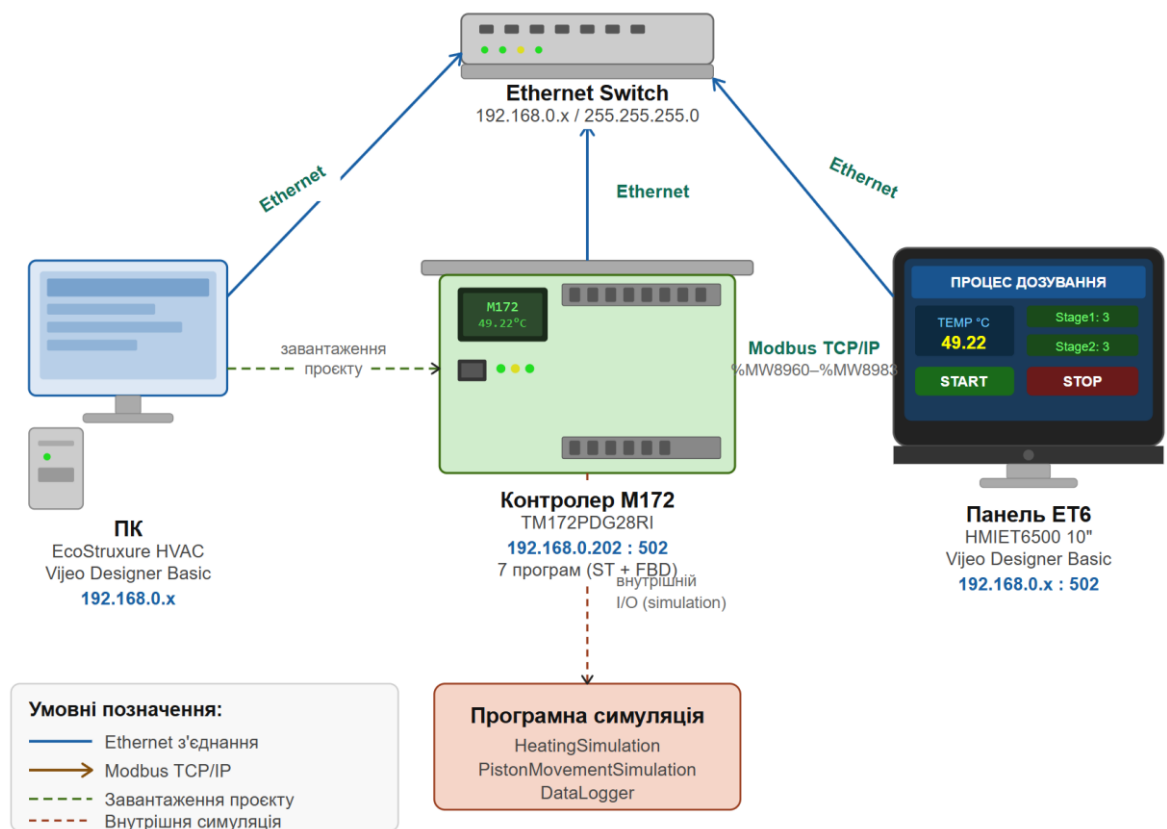


Рисунок 1.1 - Загальна архітектура лабораторного стенда

Персональний комп'ютер з встановленим програмним забезпеченням EcoStruxure Machine Expert – HVAC та Vijeo Designer Basic є робочим місцем

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

розробника і використовується для написання, налагодження та завантаження керуючих програм на контролер та панель відповідно. Після завантаження проєктів ПК може бути відключений від мережі - система працює автономно.

Контролер Modicon M172 є центральним керуючим пристроєм станда і виконує всі керуючі програми в режимі реального часу: основну логіку керування процесом, PID-регулювання температури, програмні імітаційні моделі об'єктів керування та синхронізацію даних з панеллю оператора. Обмін даними між контролером та панеллю здійснюється по протоколу Modbus TCP/IP через інтерфейс Ethernet - панель ET6 виступає у ролі Modbus Master і циклічно зчитує та записує значення змінних через область пам'яті Modbus-регістрів контролера %MW8960–%MW8983.

Панель оператора Harmony ET6 забезпечує людино-машинний інтерфейс системи - відображення поточних технологічних параметрів та керування процесом. Розроблений інтерфейс панелі містить головну сторінку моніторингу процесу та захищену паролем сторінку конфігурації для налаштування технологічних параметрів авторизованим персоналом.

Висновки до розділу

Проаналізовано предметну область автоматизації технологічних процесів, визначено промислові аналоги розробленого станда та сформульовано постановку задачі з вимогами до системи керування.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА

2.1 Загальна характеристика технологічного процесу.

Лабораторний стенд, розроблений у рамках бакалаврської роботи, являє собою програмно-апаратний комплекс, призначений для моделювання та дослідження типових процесів промислової автоматизації - зокрема, керованого нагрівання рідини та її двостадійного дозування з використанням поршневого механізму. Стенд реалізований на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M172 та панелі оператора ET6, що забезпечує повноцінне відпрацювання навичок проєктування систем автоматичного керування (САК) в умовах навчального процесу.

Об'єктом керування є умовний резервуар із рідиною, початкова температура якої становить 20°C, що відповідає температурі навколишнього середовища. Технологічний процес ініціюється оператором шляхом подачі команди «Пуск» (StartButton), після чого система переходить у режим активного керування. Оскільки фізичне технологічне обладнання - резервуар, нагрівальний елемент, поршковий дозатор та первинні перетворювачі - у складі даного стенда відсутні, усі динамічні процеси реалізовані у вигляді програмних імітаційних моделей, що виконуються безпосередньо на центральному процесорі контролера M172. Такий підхід дозволяє в повній мірі відпрацювати логіку керуючої програми, алгоритми перемикання режимів та взаємодію з панеллю оператора без необхідності залучення реального технологічного обладнання.

Технологічний процес, що моделюється, складається з двох функціонально відокремлених етапів. На першому етапі здійснюється нагрівання рідини від початкової температури 20°C до технологічної уставки 49°C. Процес нагрівання описується аперіодичною залежністю з асимптотичним наближенням до цільового значення 49,5°C, що відповідає типовій динаміці теплообмінних об'єктів першого порядку з інерцією. Поточне значення температури контролюється імітаційною моделлю HeatingSimulation та відображається на

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

панелі оператора у режимі реального часу. Паралельно з процесом нагрівання програма DataLogger здійснює дискретну реєстрацію температурних значень із кроком 2 секунди, формуючи масив із точок вимірювання (`g_arrTempLog[1..247]`), що в подальшому використовується для побудови графіка перехідного процесу та верифікації математичної моделі об'єкта.

Після досягнення температурної уставки ($g_rTEz \geq 49^{\circ}\text{C}$) система автоматично переходить до другого етапу - двостадійного циклічного дозування рідини за допомогою поршневого механізму. Процес дозування організований у вигляді двох послідовних стадій (Stage 1 та Stage 2), кожна з яких включає три повторювані цикли. Один цикл складається з трьох послідовних фаз: фази заповнення (`FillingPhase`), фази зливу (`DrainingPhase`) та технологічної паузи (`PausePhase`). На першій стадії поршень здійснює повний хід від початкової позиції (датчик ДЗ, `PistonPosition = 0%`) до кінцевої позиції (датчик Д1, `PistonPosition = 100%`), що відповідає подачі максимального об'єму дози. На другій стадії робочий хід поршня обмежений до 50% від максимального (датчик Д2, `PistonPosition = 50%`), що забезпечує подачу дози зменшеного об'єму. Після успішного завершення трьох циклів кожної стадії система автоматично переходить до наступної стадії, а після виконання всіх шести доз формується сигнал завершення процесу (`ProcessComplete := TRUE`) та система переходить у стан Stage 3 - стан очікування з індикацією завершення на панелі оператора.

Аварійна зупинка процесу реалізована апаратно та програмно через кнопку «Стоп» (`StopButton`), активація якої призводить до негайного знеструмлення всіх виконавчих механізмів, скидання всіх таймерів, обнулення лічильників доз та повернення системи до початкового стану з `CurrentStage := 1`, що забезпечує можливість повторного запуску технологічного циклу без перезавантаження контролера.

2.2 Опис об'єкта керування

Об'єктом керування у розробленій системі автоматизації є технологічний комплекс, що складається з резервуара з рідиною, нагрівального елемента з

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контуром автоматичного регулювання температури на базі PID-регулятора та поршневого дозатора з відповідними виконавчими механізмами. Оскільки лабораторний стенд реалізований у програмно-апаратному вигляді без залучення фізичного технологічного обладнання, всі складові об'єкта керування описуються як віртуальні імітаційні моделі, що функціонують безпосередньо у середовищі контролера Schneider Electric Modicon M172 та повністю відтворюють динамічні характеристики реальних промислових компонентів.

Основним елементом технологічної схеми є резервуар Є-1 - умовна ємність із рідиною, початкова температура якої відповідає температурі навколишнього середовища і становить 20°C. Нагрівання рідини забезпечується електричним нагрівальним елементом, інтенсивність теплового впливу якого визначається вихідним сигналом замкненого контуру автоматичного регулювання температури. Вимірювання поточного значення температури здійснюється датчиком TE_1, сигнал якого у реальній системі надходить на аналоговий вхід контролера AI1 у вигляді уніфікованого струмового сигналу 0–20 мА та перетворюється у значення типу REAL за допомогою функціонального блока TO_REAL. У режимі програмної симуляції роль датчика температури виконує модуль HeatingSimulation, що формує глобальну змінну g_rTEz типу REAL - поточне значення температури рідини у градусах Цельсія, яка підключається безпосередньо до входу rPv PID-регулятора зображеного на рисунку 2.1.

Точність підтримання заданої температури є ключовою вимогою до системи керування нагріванням, оскільки відхилення від робочої уставки безпосередньо впливає на умови запуску процесу дозування. Замкнений контур регулювання з від'ємним зворотним зв'язком за температурою забезпечує автоматичну компенсацію збурень та підтримання температури рідини у допустимому робочому діапазоні 49 - 55°C незалежно від зовнішніх факторів. Реалізація контуру регулювання на базі стандартного функціонального блока бібліотеки EcoStruxure Machine Expert - HVAC забезпечує відповідність алгоритму регулювання вимогам промислових стандартів автоматизації.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

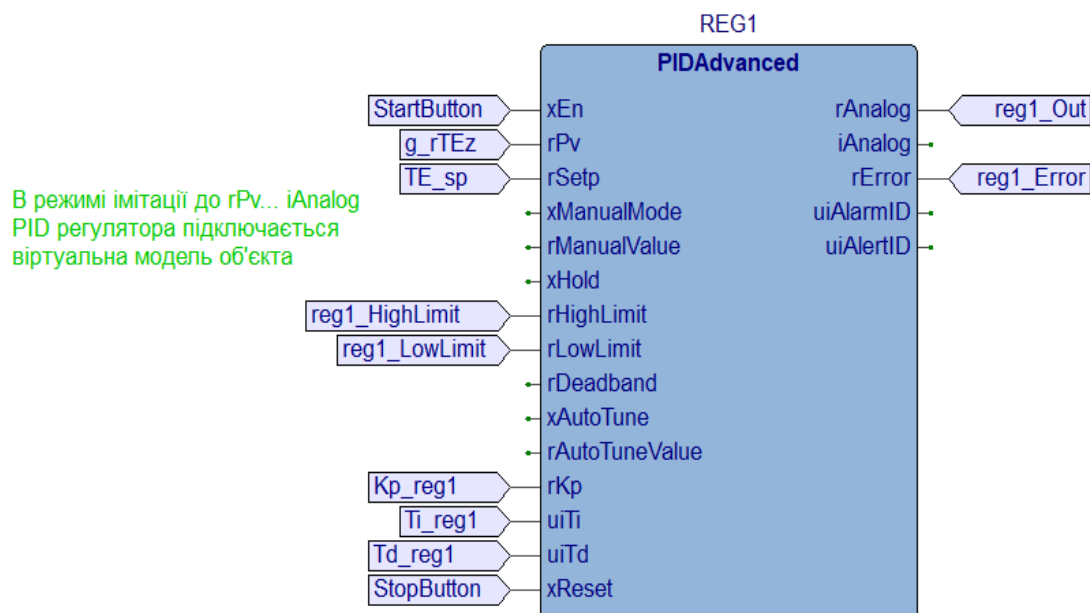


Рисунок 2.1 - PID-регулятор температури (блок PIDAdvanced)

Для забезпечення точного та стійкого керування процесом нагрівання у склад керуючої програми введено функціональний блок PIDAdvanced бібліотеки EcoStruxure Machine Expert – HVAC, що реалізує повноцінний пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання. Використання готового сертифікованого функціонального блока у мові програмування FBD (Function Block Diagram) обумовлено як вимогами до надійності та верифікованості алгоритму регулювання, так і доцільністю поєднання різних мов програмування стандарту MEK 61131-3 в межах одного проєкту - основна керуюча логіка реалізована мовою ST (Structured Text), тоді як контур регулювання виконано у графічному поданні FBD, що підвищує наочність та спрощує налагодження параметрів регулятора.

Функціональний блок PIDAdvanced (екземпляр REG1) має такі основні входи та виходи:

xEn - дозвіл роботи регулятора (підключено до сигналу Push - кнопки «Старт»);

rPv (Process Variable) - поточне значення регульованої величини, тобто температури рідини g_rTEz, що надходить з блока TO_REAL або безпосередньо з імітаційної моделі;

rSetp (Setpoint) - уставка регулювання, підключена до змінної TE_sp, значення якої за замовчуванням становить 49,5°C та може бути скориговане оператором з панелі ET6 перед запуском процесу;

rKp - коефіцієнт пропорційності, задається з панелі оператора через змінну Kp_reg1;

uiTi - час інтегрування (с), задається через змінну Ti_reg1;

uiTd - час диференціювання (с), задається через змінну Td_reg1;

xReset - скидання інтегральної складової, підключено до кнопки Reset;

rAnalog - аналоговий вихід регулятора (0,0–100,0%), що відповідає керуючому впливу U(k) на нагрівальний елемент; у реальній системі цей сигнал подається на аналоговий вихід контролера АО1 для керування тиристорним регулятором потужності нагрівача; в режимі симуляції використовується як вхідний параметр моделі нагрівання;

rError - поточне значення похибки регулювання $e(k) = TE_sp - g_rTEz$.

Класичний ПІД-закон регулювання, реалізований блоком PIDAdvanced, описується таким виразом:

$$U(t) = K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (2.1)$$

де U(t) - керуючий вплив (вихідний сигнал регулятора, %); e(t) = TE_sp – g_rTEz - похибка регулювання (°C); Kp - коефіцієнт пропорційності; Ti - час інтегрування (с); Td - час диференціювання (с).

У дискретній формі, що відповідає реалізації в цифровому контролері з циклом опитування To:

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U(k) = K_p \cdot e(k) + \frac{K_p \cdot T_0}{T_i} \cdot \sum_{i=0}^k e(i) + K_p \cdot \frac{T_d}{T_0} \cdot [e(k) - e(k-1)], \quad (2.2)$$

де k - номер поточного циклу опитування; T_0 - період дискретизації контролера (с).

Похибка регулювання:

$$e(k) = TE_{sp} - g_{rTEz}(k). \quad (2.3)$$

Налаштування параметрів K_p , T_i , T_d здійснюється методом ідентифікації об'єкта керування з подальшим розрахунком оптимальних коефіцієнтів за критерієм мінімуму інтегральної квадратичної похибки, що детально розглядається у розділі математичного моделювання та розрахунків даної роботи. Можливість оперативного коригування параметрів регулятора з панелі оператора ЕТ6 під час роботи стенда забезпечує гнучкість налаштування та дозволяє досліджувати вплив зміни коефіцієнтів на якість перехідного процесу нагрівання.

За результатами налаштування та симуляційного тестування контуру регулювання температури встановлено наступні робочі параметри PID-регулятора: коефіцієнт пропорційності $K_p = 5,0$; час інтегрування $T_i = 15$ с; час диференціювання $T_d = 1$ с; нижня межа вихідного сигналу $rLowLimit = 18\%$; верхня межа $rHighLimit = 100\%$. При даних параметрах перехідний процес нагрівання характеризується часом досягнення уставки ~ 70 секунд, перерегулюванням $\sigma \approx 3,5^\circ\text{C}$ (максимальна температура $\sim 53^\circ\text{C}$) з подальшою стабілізацією у допустимому робочому діапазоні $49\text{--}54^\circ\text{C}$. Встановлення нижньої межі вихідного сигналу регулятора на рівні 18% забезпечує підтримку мінімальної потужності нагрівача навіть при досягненні уставки, що запобігає різкому охолодженню рідини нижче допустимої межі 49°C та забезпечує стабільну роботу системи дозування.

Поршневий дозатор є основним виконавчим механізмом системи дозування і являє собою циліндричний корпус із рухомим поршнем, що здійснює зворотно-поступальний рух під дією електродвигуна М. Керування напрямком

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

руху поршня забезпечується реверсивним пристроєм ПБР-21 (пристрій безконтактний реверсивний), який отримує керуючі сигнали від двох дискретних виходів контролера NS1 та NS2, що відповідають командам руху вліво (MotorDirection = FALSE) та вправо (MotorDirection = TRUE). ПБР-21 забезпечує безконтактне реверсування електродвигуна з апаратним захистом від одночасного ввімкнення обох напрямків обертання, що унеможливорює аварійні режими роботи приводу.

Положення поршня контролюється трьома індуктивними безконтактними датчиками положення типу PNP NO, підключеними до дискретних входів контролера:

Д1 (D1_PositionSensor) - датчик кінцевого положення при повному ході поршня вліво; відповідає максимальному об'єму дози у Stage 1 (PistonPosition = 100%);

Д2 (D2_PositionSensor) - датчик проміжного положення при половинному ході вліво; відповідає зменшеному об'єму дози у Stage 2 (PistonPosition = 50%);

Д3 (D3_PositionSensor) - датчик вихідного положення поршня (крайне праве, PistonPosition = 0%); фіксує готовність дозатора до наступного циклу.

У режимі програмної симуляції функцію датчиків виконує модуль PistonMovementSimulation, що обчислює поточну позицію поршня PistonPosition у діапазоні 0–100% на основі заданої швидкості руху та тривалості активації двигуна, формуючи відповідні булеві сигнали D1_PositionSensor, D2_PositionSensor та D3_PositionSensor при досягненні граничних значень позиції.

Виконавчі механізми - клапани K1 та K2

Гідравлічна частина технологічної схеми включає два електромагнітні клапани:

K1 (K1_DrainValve) - зливний клапан, що керує виходом рідини з циліндра дозатора. Відкривається під час фази зливу (K1_DrainValve = TRUE) та закривається під час фази заповнення і міжциклової паузи;

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

K2 (K2_FillValve) - клапан заповнення, що керує подачею рідини з резервуара Є-1 до циліндра дозатора. Відкривається на початку фази заповнення (**K2_FillValve = TRUE**) та закривається після завершення ходу поршня або спрацювання таймера **TimerFilling**.

Логіка керуючої програми забезпечує взаємне блокування клапанів K1 та K2 - їх одночасне відкриття унеможлиблюється програмними умовами, що виключає некоректні гідравлічні режими. Керування клапанами здійснюється через дискретні виходи контролера M172 з комутацією ланцюгів живлення електромагнітних котушок через проміжні реле.

2.3 Аналіз функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації (Рисунок 2.2) є основним проєктним документом, що визначає структуру системи керування технологічним процесом, склад засобів автоматизації та характер інформаційних і керуючих зв'язків між ними. Схема розроблена відповідно до вимог стандарту ДСТУ та відображає повну сукупність вимірювальних каналів, каналів керування та захисту, що реалізовані в рамках даного лабораторного стенда [5].

Функціональна схема автоматизації є невід'ємною частиною технічної документації будь-якої системи автоматизації і слугує основою для розробки всіх наступних проєктних документів - схеми підключення, специфікації обладнання та програмного забезпечення контролера. На схемі умовними позначеннями відображено технологічне обладнання, засоби вимірювання та контролю, виконавчі механізми та лінії зв'язку між ними відповідно до прийнятих стандартів графічного оформлення. Кожен елемент схеми має унікальне позиційне позначення що однозначно ідентифікує його у складі системи автоматизації та відповідає позначенням у специфікації технічних засобів. Аналіз функціональної схеми дозволяє визначити повний перелік вхідних та вихідних сигналів контролера, необхідну кількість каналів введення-виведення та вимоги до програмного забезпечення системи керування. Розроблена схема охоплює два основних контури керування - контур

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання температури нагрівання рідини та контур позиційного керування поршневим дозатором, що у сукупності забезпечують повну автоматизацію технологічного процесу станда. Взаємодія між контурами керування організована таким чином, що запуск контуру дозування здійснюється лише після досягнення контуром регулювання температури заданої уставки, що забезпечує технологічно коректну послідовність виконання процесу.

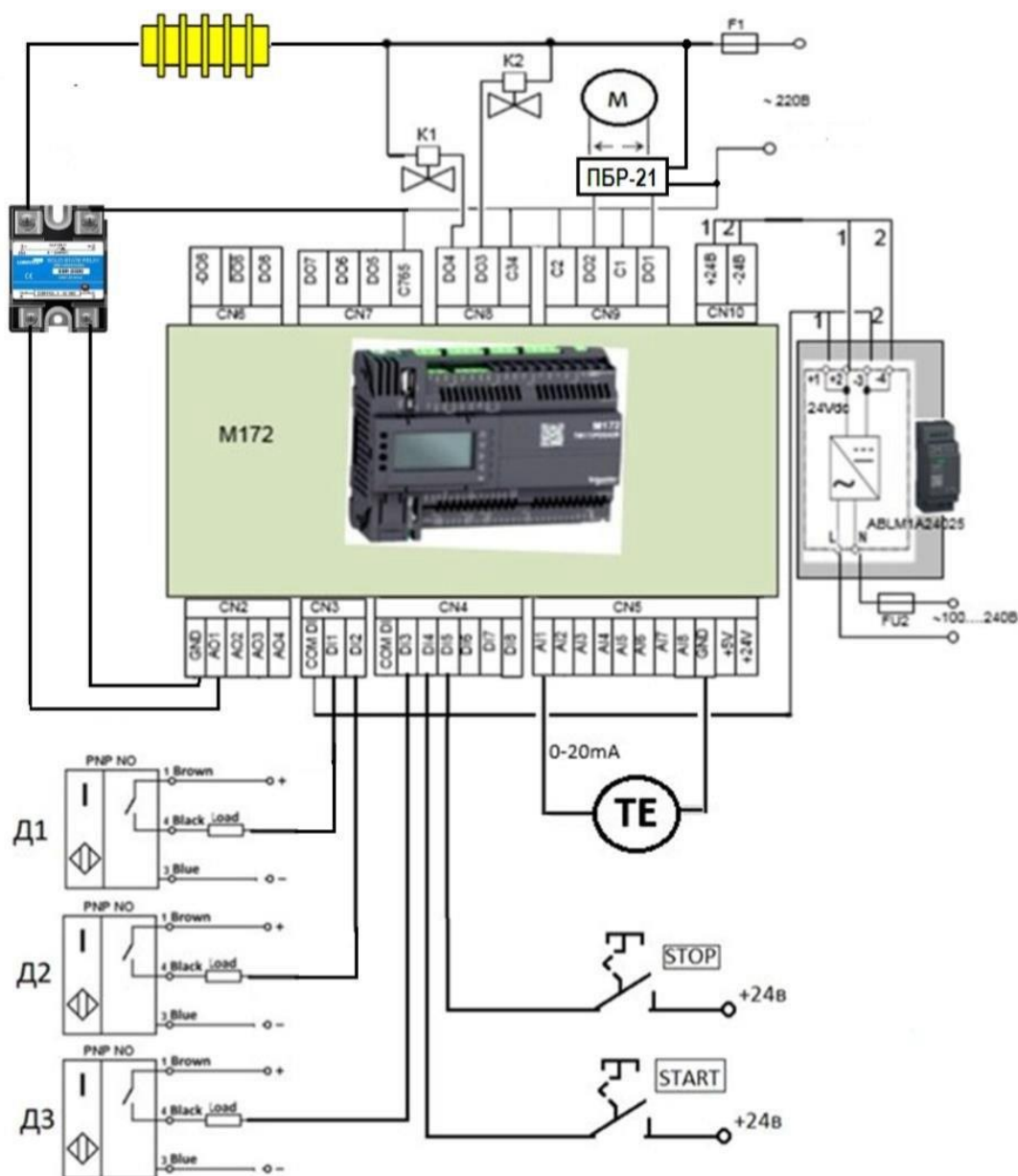


Рисунок 2.2 - Функціональна схема автоматизації лабораторного станда

Центральним елементом функціональної схеми є замкнений контур автоматичного регулювання температури рідини у резервуарі Є-1. Первинним

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

перетворювачем температури слугує датчик TE_1, встановлений безпосередньо у резервуарі Є-1. Аналоговий вихідний сигнал датчика у вигляді уніфікованого струмового сигналу 0–20 мА надходить на аналоговий вхід AI1 контролера Schneider Electric Modicon M172, де перетворюється у значення типу REAL за допомогою функціонального блока TO_REAL. У режимі програмної симуляції, що реалізована в рамках даного стенда, роль датчика температури виконує програмний модуль HeatingSimulation, що формує поточне значення температури g_rTEz на основі фізичної моделі теплового балансу:

$$g_{rTEz}(k) = g_{rTEz}(k-1) + \frac{T_0}{M} \cdot \left[\frac{reg1_Out}{100} \cdot P_{max} - k_{cool} \cdot (g_{rTEz}(k-1) - T_{навк}) \right], \quad (2.4)$$

де T_0 - крок моделювання; M - теплова ємність об'єкта; P_{max} - максимальна потужність нагрівача; k_{cool} - коефіцієнт тепловіддачі; $T_{навк}$ - температура навколишнього середовища.

Поточне значення температури надходить на вхід rPv функціонального блока PIDAdvanced (екземпляр REG1), де порівнюється із заданим значенням уставки $TE_{sp} = 49,5^\circ\text{C}$, що підключена до входу rSetp. За результатами порівняння регулятор формує керуючий вплив reg1_Out у діапазоні 18–100%, який визначає потужність нагрівального елемента. У реальній системі цей сигнал подається на аналоговий вихід AO1 контролера для керування тиристорним регулятором потужності нагрівача. Таким чином реалізується повноцінний замкнений контур регулювання з від'ємним зворотним зв'язком за температурою.

Контур керування поршневым дозатором

Другим функціональним контуром схеми є система позиційного керування поршневым дозатором. Положення поршня контролюється трьома індуктивними датчиками положення Д1, Д2 та Д3, сигнали яких типу PNP NO надходять на дискретні входи контролера M172. Датчик Д1 фіксує положення максимального

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ходу поршня вліво (повна доза, Stage 1), давач Д2 - положення половинного ходу (зменшена доза, Stage 2), давач Д3 - вихідне положення поршня (крайнє праве).

Керуючі сигнали від контролера надходять на пристрій безконтактний реверсивний ПБР-21 через два дискретні виходи NS1 та NS2, що визначають напрямок обертання електродвигуна М поршневого дозатора. Сигнал NS1 (MotorDirection = FALSE) забезпечує обертання двигуна у напрямку руху поршня вліво (фаза заповнення), сигнал NS2 (MotorDirection = TRUE) - у напрямку руху вправо (фаза зливу). ПБР-21 здійснює безконтактне реверсування з апаратним захистом від одночасного ввімкнення обох напрямків, що унеможливорює аварійні режими роботи приводу.

Керування виконавчими механізмами - клапани K1 та K2

Гідравлічна частина технологічної схеми включає два електромагнітні клапани, керування якими здійснюється через дискретні виходи контролера M172. Зливний клапан K1 отримує керуючий сигнал K1_DrainValve з відповідного дискретного виходу контролера і відкривається під час фази зливу кожного дозувального циклу. Клапан заповнення K2 отримує сигнал K2_FillValve і відкривається під час фази заповнення. Логіка керуючої програми забезпечує апаратно-програмне взаємне блокування клапанів - їх одночасне відкриття унеможливорюється як на рівні програмних умов в ST-кодї, так і на рівні електричної схеми підключення через проміжні реле.

Зв'язок з панеллю оператора ET6

Верхнім рівнем системи керування є панель оператора Harmony ET6, підключена до контролера M172 по інтерфейсу Ethernet з використанням протоколу Modbus TCP/IP. Обмін даними між контролером та панеллю реалізується через область пам'яті Modbus-регістрів %MW, до якої відображені статусні змінні системи (VAR_GLOBAL AT %MW). Панель оператора забезпечує відображення поточного стану технологічного процесу в режимі реального часу: поточна температура рідини g_rTEz, поточна стадія процесу CurrentStage, лічильники доз DoseCounter та DoseCounter2, положення поршня

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

PistonPosition, стан клапанів та виконавчих механізмів. Крім того, з панелі оператора здійснюється введення та коригування параметрів технологічного процесу - уставки температури TE_{sp} , коефіцієнтів PID-регулятора Kp_{reg1} , Ti_{reg1} , Td_{reg1} , а також подача команд керування «Пуск» та «Стоп» без необхідності втручання у керуючу програму контролера.

2.4 Опис схеми підключення

Схема підключення лабораторного стенда (Рисунок 2.3) визначає електричні з'єднання між програмованим логічним контролером Schneider Electric Modicon M172, давачами, виконавчими механізмами та панеллю оператора ET6. Схема розроблена з урахуванням технічних характеристик контролера M172, типів сигналів підключених пристроїв та вимог електробезпеки промислових систем автоматизації.

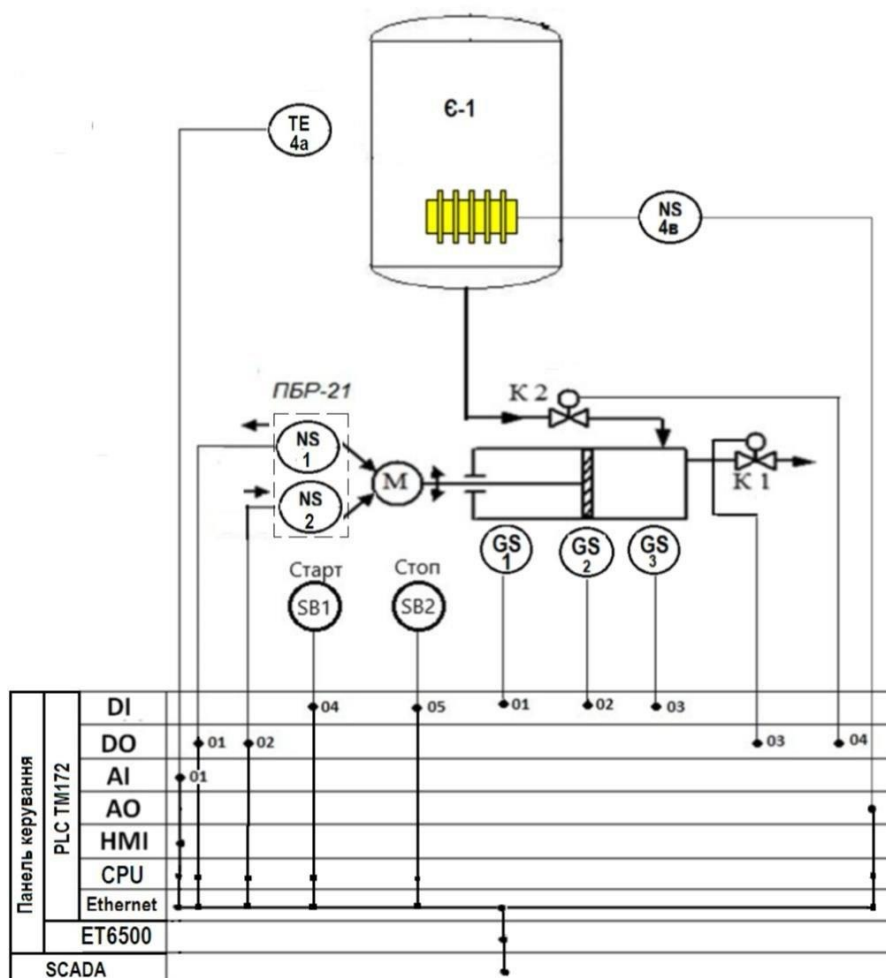


Рисунок 2.3 - Схема підключення лабораторного стенда

Загальна структура схеми підключення

Контролер Schneider Electric Modicon M172 є центральним вузлом схеми підключення і забезпечує обробку всіх вхідних сигналів від давачів та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів. Живлення контролера здійснюється від мережі змінного струму 220В/50Гц через вбудований імпульсний блок живлення, що забезпечує внутрішню напругу живлення 24В постійного струму для підключення давачів та виконавчих механізмів. Всі сигнальні кола мають спільну шину заземлення (GND), що забезпечує коректну роботу вхідних та вихідних кіл контролера і захист від перешкод.

Підключення дискретних входів (DI)

До дискретних входів контролера M172 підключені п'ять дискретних сигнальних пристроїв: три індуктивні давачі положення поршня та дві кнопки керування оператора.

Індуктивні давачі положення Д1, Д2 та Д3 типу PNP NO підключені до дискретних входів контролера за трипровідною схемою: провід живлення (+24В) підключається до клеми живлення давача, провід GND - до клеми нульового потенціалу, вихідний сигнальний провід (OUT) - безпосередньо до відповідного дискретного входу контролера. При спрацюванні давача (наближення металевого об'єкта - поршня до зони чутливості) на виході формується сигнал високого рівня (+24В), що відповідає логічній одиниці на вході контролера. Давач Д1 підключений до входу GS1, давач Д2 - до входу GS2, давач Д3 - до входу GS3 контролера M172.

Кнопки керування SB1 («Пуск») та SB2 («Стоп») підключені до дискретних входів контролера за двопровідною схемою з нормально розімкненими контактами. При натисканні кнопки SB1 на відповідний дискретний вхід контролера подається сигнал +24В (StartButton = TRUE), що ініціює запуск технологічного процесу. Кнопка SB2 аналогічно формує сигнал

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

StopButton = TRUE для аварійної зупинки процесу з повним скиданням усіх параметрів.

Підключення дискретних виходів (DO)

Дискретні виходи контролера M172 забезпечують керування реверсивним пристроєм ПБР-21 та електромагнітними клапанами K1 і K2.

Керування електродвигуном М поршневого дозатора здійснюється через пристрій безконтактний реверсивний ПБР-21, що підключений до двох дискретних виходів контролера NS1 та NS2. Вихід NS1 відповідає сигналу прямого ходу (рух поршня вліво, MotorDirection = FALSE) - при активації даного виходу ПБР-21 забезпечує обертання двигуна М у прямому напрямку. Вихід NS2 відповідає сигналу зворотного ходу (рух поршня вправо, MotorDirection = TRUE) - при активації забезпечується реверс двигуна. Схема підключення ПБР-21 передбачає апаратний захист від одночасної подачі сигналів на обидва входи, що унеможливорює режим короткого замикання силових кіл привода.

Електромагнітні клапани K1 та K2 підключені до окремих дискретних виходів контролера через проміжні реле, що забезпечують гальванічну розв'язку між колами керування контролера (24В DC) та силовими колами живлення котушок клапанів. При активації відповідного дискретного виходу контролера (K1_DrainValve = TRUE або K2_FillValve = TRUE) спрацьовує проміжне реле, що комутує коло живлення електромагнітної котушки клапана та переводить його у відкритий стан.

Підключення аналогового входу (AI)

Давач температури TE_1 підключений до аналогового входу AI1 контролера M172 за двопровідною схемою з уніфікованим струмовим сигналом 0–20 мА. Живлення давача здійснюється від вбудованого джерела живлення контролера (+24В), що підключається послідовно з вимірювальним колом. Струмовий сигнал 0–20 мА, що формується давачем пропорційно до поточного значення температури у діапазоні вимірювання, надходить на аналоговий вхід AI1 контролера, де перетворюється у цифровий код аналого-цифровим

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворювачем (АЦП) з роздільною здатністю 12 біт. Подальше масштабування цифрового коду у фізичні одиниці вимірювання (°C) здійснюється програмно за допомогою функціонального блока TO_REAL керуючої програми контролера. У режимі програмної симуляції фізичне підключення давача не використовується - значення температури формується безпосередньо програмним модулем HeatingSimulation тому блок TO_REAL не використовується.

Підключення панелі оператора ET6

Панель оператора Harmony ET6 підключається до контролера M172 по інтерфейсу Ethernet через стандартний мережевий кабель категорії CAT5e з роз'ємами RJ-45. Для організації мережевої взаємодії контролеру M172 та панелі ET6 призначаються статичні IP-адреси в межах однієї підмережі. Протоколом обміну даними є Modbus TCP/IP - стандартний промисловий протокол на базі стеку TCP/IP, що забезпечує надійну передачу даних у локальній мережі з детермінованим часом відгуку. Панель ET6 виступає у ролі Modbus TCP Master і здійснює циклічне опитування регістрів пам'яті контролера %MW з заданим періодом оновлення, зчитуючи поточні значення технологічних параметрів та записуючи керуючі команди оператора. Живлення панелі ET6 здійснюється від мережі 24В DC, що може бути організовано від того ж блока живлення що і контролер M172, або від окремого джерела живлення.

Висновки до розділу

Описано об'єкт керування, розроблено функціональну схему автоматизації та схему підключення стенда, обґрунтовано структуру замкненого контуру регулювання температури на базі PID-регулятора.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ

3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації

Вибір технічних засобів автоматизації (ТЗА) є одним із ключових етапів проєктування системи керування, що визначає надійність, точність та функціональність усього комплексу в цілому. При виборі ТЗА для лабораторного стенда керуються такими основними критеріями: відповідність типів та рівнів сигналів давачів і виконавчих механізмів вхідним та вихідним каналам контролера; достатня інформаційна потужність контролера для підключення всіх необхідних пристроїв; сумісність обраного обладнання за напругою живлення та інтерфейсами зв'язку; можливість програмування контролера у середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC з підтримкою мов стандарту MEK 61131-3; наявність вбудованого інтерфейсу Ethernet для підключення панелі оператора за протоколом Modbus TCP/IP.

Аналіз вимог до системи керування показав, що для реалізації лабораторного стенда необхідно забезпечити обробку таких сигналів: п'ять дискретних вхідних сигналів (три давачі положення поршня Д1, Д2, Д3 та дві кнопки керування SB1, SB2); чотири дискретні вихідні сигнали (два сигнали керування реверсивним пристроєм ПБР-21 та два сигнали керування електромагнітними клапанами К1 і К2); один аналоговий вхідний сигнал 0–20 мА від давача температури TE_1. Крім того, система повинна забезпечувати реалізацію PID-регулятора температури та комунікацію з панеллю оператора по Ethernet.

На підставі проведеного аналізу вимог до системи керування обрано такий склад технічних засобів автоматизації:

Програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M172 (TM172PDG28RI) (Рисунок 3.1) обраний як центральний керуючий пристрій стенда. Контролер серії M172 розроблений спеціально для задач керування системами HVAC та технологічними процесами, підтримує програмування у

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC усіма мовами стандарту MEK 61131-3, має вбудований інтерфейс Ethernet для комунікації з панеллю оператора та достатню кількість входів/виходів для підключення всіх елементів стенда: 8 дискретних входів, 8 дискретних виходів, 8 аналогових входів та 4 аналогових виходи.



Рисунок 3.1 - Програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M172 (TM172PDG28RI)

Панель оператора Harmony ET6 10" (HMIET6500, Schneider Electric) (Рисунок 3.2) обрана як засіб людино-машинного інтерфейсу. Панель підключається до контролера M172 по інтерфейсу Ethernet з протоколом Modbus TCP/IP, програмується у середовищі Vijeo Designer Basic, має сенсорний екран діагональю 10" з роздільною здатністю достатньою для відображення всіх необхідних технологічних параметрів та елементів керування. Живлення панелі здійснюється від джерела 24В DC.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32



Рисунок 3.2 - Панель оператора Harmony ET6 10" (HMIET6500, Schneider Electric)

Індуктивні датчики положення LJC12A3-5-Z/BY (Рисунок 3.3) обрані для контролю положення поршня дозатора (Д1, Д2, Д3). Датчики типу PNP NO забезпечують безконтактне визначення положення металевих об'єктів з відстанню спрацювання 0–5 мм, що є оптимальним для даної конструкції дозатора. Вихідний сигнал +24В постійного струму безпосередньо сумісний з дискретними входами контролера M172.



Рисунок 3.3 - Індуктивні датчики положення LJC12A3-5-Z/BY

Датчик температури WIKA TR36 (Рисунок 3.4) обраний для вимірювання температури рідини у резервуарі Є-1. Датчик являє собою термометр опору з

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

вбудованим нормуючим перетворювачем, що формує уніфікований вихідний струмовий сигнал 0–20 мА у діапазоні вимірювання $-50...+250^{\circ}\text{C}$, що повністю перекриває робочий діапазон температур стенда ($20-55^{\circ}\text{C}$) та є сумісним з аналоговим входом AI1 контролера M172. У рамках даного стенда давач задіяний у режимі програмної симуляції.



Рисунок 3.4 - Давач температури WIKА TR36

Електромагнітні клапани Hunter PGV-101G-B (Рисунок 3.4) обрані як виконавчі механізми гідравлічної частини стенда (K1, K2). Клапани розраховані на напругу живлення 24В та витрату $0,05-9 \text{ м}^3/\text{год}$, мають регулятор потоку та різьбовий приєднувальний розмір 1" ВР, що відповідає типовим параметрам технологічних трубопроводів малої продуктивності.



Рисунок 3.4 - Електромагнітні клапани Hunter PGV-101G-B

Пристрій безконтактний реверсивний ПБР-21 (Рисунок 3.5) обраний для керування електродвигуном М поршневого дозатора. ПБР-21 забезпечує безконтактне реверсування трифазного асинхронного електродвигуна за

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сигналами від двох дискретних виходів контролера, має вбудований апаратний захист від одночасного ввімкнення обох напрямків обертання.



Рисунок 3.5 - Пристрій безконтактний реверсивний ПБР-21

Кнопки керування «Аско» KCD2-201 В/В (Рисунок 3.6) обрані як органи керування оператора (SB1 «Пуск», SB2 «Стоп»). Кнопки мають номінальну робочу напругу 250В AC, номінальний струм 6А, тип контактів 2NO, що забезпечує надійну комутацію кіл керування при підключенні до дискретних виходів контролера через джерело живлення 24В DC.



Рисунок 3.6 - Кнопки керування «Аско» KCD2-201 В/В

3.2 Контролер Schneider Electric Modicon M172 (TM172PDG28RI)

Програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M172 належить до серії M171/M172/M173 - спеціалізованої лінійки контролерів

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

компанії Schneider Electric, розробленої для керування системами опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (HVAC), а також для автоматизації насосних станцій, компресорних установок та іншого технологічного обладнання. Контролери серії M172 відзначаються компактними габаритами [3], широким набором вбудованих входів/виходів, підтримкою промислових комунікаційних протоколів та розвиненим програмним середовищем, що робить їх оптимальним вибором для реалізації систем автоматичного керування середньої складності у навчальних та виробничих умовах.

Контролер TM172PDG28RI має 8 дискретних входів типу PNP/NPN з напругою логічної одиниці 24В DC, що забезпечує безпосереднє підключення індуктивних датчиків положення типу PNP NO та кнопок керування без додаткових узгоджувальних пристроїв. Дискретні виходи контролера - транзисторні типу PNP з номінальним струмом навантаження до 0,5А на канал, що дозволяє безпосередньо керувати проміжними реле та пристроєм ПБР-21. Аналогові входи контролера підтримують підключення датчиків з уніфікованими сигналами 0–10В, 0–20 мА та 4–20 мА з роздільною здатністю АЦП 12 біт, що забезпечує точність вимірювання аналогових сигналів у межах $\pm 0,1\%$ від діапазону вимірювання.

Середовище програмування EcoStruxure Machine Expert – HVAC

Програмування контролера M172 здійснюється у спеціалізованому інтегрованому середовищі розробки EcoStruxure Machine Expert – HVAC від компанії Schneider Electric. Середовище надає повний набір інструментів для конфігурування апаратної частини контролера, написання керуючих програм, налагодження та симуляції без підключення реального обладнання, а також завантаження готового проєкту у контролер по інтерфейсу Ethernet або USB.

Середовище EcoStruxure Machine Expert – HVAC підтримує всі п'ять мов програмування стандарту MEK 61131-3: структурований текст (ST), рележно-контактна схема (LD), функціональні блокові діаграми (FBD), список інструкцій (IL) та послідовні функціональні схеми (SFC). У рамках даного проєкту основна

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керуюча програма реалізована мовою ST, що забезпечує максимальну гнучкість при написанні складних алгоритмів керування, а контур PID-регулювання температури реалізований мовою FBD з використанням стандартного функціонального блока PIDAdvanced бібліотеки EcoStruxure Machine Expert – HVAC.

Середовище також надає вбудований симулятор контролера, що дозволяє виконувати та налагоджувати керуючу програму без підключення реального обладнання. Для моніторингу стану змінних у режимі реального часу використовується вікно Watch, що дозволяє спостерігати поточні значення всіх глобальних та локальних змінних програми, а також вносити зміни у значення змінних безпосередньо під час виконання програми для тестування різних режимів роботи.

Розподіл входів та виходів контролера

Розподіл фізичних входів та виходів контролера TM172PDG28RI між підключеними пристроями стенда здійснено відповідно до функціональної схеми автоматизації та схеми підключення. Адреси входів/виходів та відповідні змінні керуючої програми наведено у додатку B1.

3.3 Панель оператора Harmony ET6 (HMIET6500)

Панель оператора Harmony ET6 (модель HMIET6500) виробництва компанії Schneider Electric є сучасним засобом людино-машинного інтерфейсу (HMI), призначеним для візуалізації технологічних процесів, відображення поточних параметрів роботи обладнання та забезпечення оперативного керування системою автоматизації в режимі реального часу. Панель відноситься до серії Harmony ET6 - лінійки компактних сенсорних HMI-панелей компанії Schneider Electric, розроблених для спільного використання з контролерами серій M171/M172/M173 та іншими пристроями, що підтримують протокол Modbus TCP/IP.

Сенсорний екран діагональю 10" з роздільною здатністю 800×480 пікселів забезпечує достатній простір для розміщення всіх необхідних елементів

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтерфейсу оператора - числових індикаторів поточних параметрів, графіків зміни температури, індикаторів стану виконавчих механізмів та елементів керування процесом. Ступінь захисту IP65 лицьової панелі забезпечує захист від пилу та бризок води, що є важливим для промислового застосування.

Середовище програмування Vijeo Designer Basic

Розробка інтерфейсу оператора для панелі HMIET6500 здійснюється у спеціалізованому середовищі Vijeo Designer Basic версії 1.2.1 від компанії Schneider Electric. Середовище надає графічний редактор для створення екранів (сторінок) інтерфейсу оператора з бібліотекою стандартних графічних об'єктів (віджетів): числові індикатори та поля введення, кнопки керування, індикатори стану, графіки та тренди, текстові мітки та зображення.

Кожен графічний об'єкт пов'язується зі змінною проєкту через механізм прив'язки (binding). Змінні проєкту Vijeo Designer Basic поділяються на внутрішні (Internal) - для локальної логіки панелі, та зовнішні (External) - для обміну даними з контролером M172 по Modbus TCP/IP. Для зовнішніх змінних у налаштуваннях вказується адреса Modbus-реєстра контролера (%MW), що відповідає відповідній змінній керуючої програми з групи Status Variables. Завантаження готового проєкту у панель HMIET6500 здійснюється по інтерфейсу Ethernet.

3.4 Давачі та виконавчі механізми

Давачі та виконавчі механізми є невід'ємною складовою будь-якої системи автоматичного керування, оскільки забезпечують зв'язок керуючого пристрою з технологічним процесом - отримання інформації про поточний стан об'єкта керування та реалізацію керуючих впливів. У рамках лабораторного стенда всі давачі та виконавчі механізми функціонують у режимі програмної симуляції, однак їх вибір та опис здійснено відповідно до вимог реальної промислової системи, що забезпечує повноцінне відпрацювання навичок проєктування систем автоматизації.

Давачі положення LJC12A3-5-Z/BY

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для контролю положення поршня дозатора у трьох фіксованих точках (Д1, Д2, Д3) обрано індуктивні безконтактні давачі положення LJC12A3-5-Z/BY. Давачі типу PNP NO при спрацюванні формують на виході сигнал високого рівня (+24В), що відповідає логічній одиниці на дискретному вході контролера M172. Підключення здійснюється за трипровідною схемою: провід живлення (+24В), нульовий провід (GND) та сигнальний вихід (OUT). Ступінь захисту IP67 забезпечує стійкість до впливу пилу та короткочасного занурення у рідину, що є важливим при розміщенні давачів поблизу гідравлічних вузлів дозатора.

Давач температури WIKA TR36

Для вимірювання температури рідини у резервуарі С-1 обрано давач температури WIKA TR36 - термометр опору з вбудованим нормуючим перетворювачем. Давач формує уніфікований вихідний струмовий сигнал 0–20 мА пропорційно до поточного значення температури у діапазоні вимірювання -50...+250°C. Струмовий сигнал підключається до аналогового входу AI1 контролера M172 за двопровідною схемою. Діапазон вимірювання -50...+250°C з надлишком перекриває робочий діапазон температур стенда 20–55°C, що забезпечує роботу давача у лінійній зоні характеристики з мінімальною похибкою вимірювання. У рамках даного стенда давач задіяний у режимі програмної симуляції - його роль виконує програмний модуль HeatingSimulation.

Електромагнітні клапани Hunter PGV-101G-B

Для керування потоками рідини у гідравлічній частині стенда обрано електромагнітні клапани Hunter PGV-101G-B (K1 - клапан зливу, K2 - клапан заповнення). Клапани типу нормально закритий (НЗ) у знеструмленому стані залишаються закритими, що забезпечує безпечний стан гідравлічної схеми при відключенні живлення або аварійній зупинці. Керування клапанами здійснюється через дискретні виходи контролера M172 з використанням проміжних реле для гальванічної розв'язки між колами керування (24В DC) та колами живлення котушок клапанів.

Пристрій безконтактний реверсивний ПБР-21

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для керування електродвигуном М поршневого дозатора обрано пристрій безконтактний реверсивний ПБР-21. Пристрій призначений для дистанційного керування реверсивним пуском трифазного асинхронного електродвигуна від сигналів керуючого пристрою (контролера) і є промисловим аналогом реверсивного магнітного пускача на напівпровідниковій елементній базі. ПБР-21 отримує керуючі сигнали від двох дискретних виходів контролера NS1 та NS2. Подача сигналу на вхід NS1 забезпечує пряме обертання двигуна (рух поршня вліво, фаза заповнення), подача на NS2 - зворотнє обертання (рух поршня вправо, фаза зливу). Вбудований апаратний захист від одночасної подачі сигналів на обидва входи унеможливорює аварійний режим роботи привода незалежно від стану керуючої програми контролера.

Кнопки керування KCD2-201 В/В

Для організації ручного керування технологічним процесом оператором обрано двопозиційні перемикачі «Аско» KCD2-201 В/В (SB1 - «Пуск», SB2 - «Стоп»). Перемикачі типу 2NO з фіксацією забезпечують стійке утримання положення «Увімкнено» без постійного натискання оператором, що є зручним для керування тривалими технологічними процесами. Підключення кнопок до дискретних входів контролера здійснюється за двопровідною схемою через джерело живлення 24В DC - при переведенні перемикача у положення «Увімкнено» на відповідний дискретний вхід контролера подається сигнал +24В (логічна одиниця).

Висновки до розділу

Виконано підбір та обґрунтування технічних засобів автоматизації на базі обладнання Schneider Electric, наведено технічні характеристики контролера М172, панелі оператора ЕТ6 та всіх давачів і виконавчих механізмів.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Загальна структура програмного забезпечення

Програмне забезпечення лабораторного стенда розроблено у середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC відповідно до вимог стандарту МЕК 61131-3. Проєкт складається з семи програмних модулів (POU - Program Organization Unit), кожен з яких виконує чітко визначену функцію та обмінюється даними з іншими модулями через глобальні змінні.

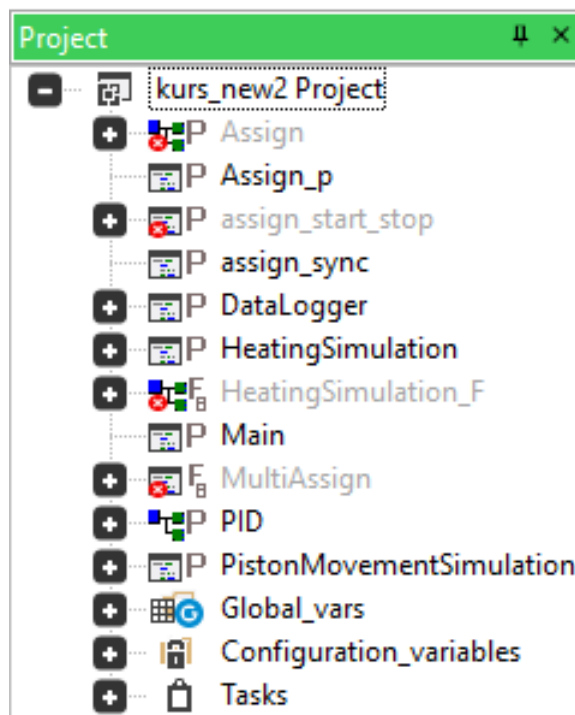


Рисунок 4.1 - Структура програмного забезпечення проєкту в середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC

Програма **Main** реалізована мовою ST і містить основну логіку керування технологічним процесом: послідовне виконання фаз заповнення, зливу та паузи для двох стадій дозування, логіку переходу між стадіями та блок аварійної зупинки.

Програма **PID** реалізована мовою FBD і містить функціональний блок PIDAdvanced (екземпляр REG1), що забезпечує автоматичне регулювання

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури рідини у резервуарі за ПІД-законом з параметрами що задаються з панелі оператора.

Програма **HeatingSimulation** реалізована мовою ST і є імітаційною моделлю нагрівального елемента - обчислює поточне значення температури g_rTEz на основі фізичної моделі теплового балансу з урахуванням вихідного сигналу PID-регулятора.

Програма **PistonMovementSimulation** реалізована мовою ST і є імітаційною моделлю поршневого дозатора - обчислює поточну позицію поршня PistonPosition та формує сигнали давачів положення D1, D2, D3 залежно від стану двигуна та напрямку руху.

Програма **DataLogger** реалізована мовою ST і забезпечує дискретну реєстрацію поточного значення температури g_rTEz з кроком 2 секунди у масив g_arrTempLog[1..260] для подальшого аналізу перехідного процесу та ідентифікації математичної моделі об'єкта.

Програма **assign_sync** реалізована мовою ST і забезпечує двосторонню синхронізацію між внутрішніми змінними керуючої програми та змінними панелі оператора ET6, а також реалізує логіку перемикання між фізичним керуванням (кнопки SB1/SB2) та дистанційним керуванням з панелі залежно від стану змінної HMI_Control.

Програма **Assign_p** реалізована мовою ST і забезпечує прив'язку внутрішніх змінних керуючої програми до фізичних входів та виходів контролера M172. При активованому режимі симуляції (simulation = TRUE) прив'язка фізичних I/O вимикається і всі сигнали формуються імітаційними моделями.

4.2 Глобальні змінні та змінні статусу

Обмін даними між програмними модулями проєкту здійснюється через глобальні змінні (VAR_GLOBAL), що є спільними для всіх програм і доступні для читання та запису з будь-якого модуля. Глобальні змінні згруповані за функціональним призначенням.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий підхід забезпечує чіткий розподіл функцій між модулями та спрощує налагодження програми - кожен модуль працює зі своєю областю змінних і не залежить від внутрішньої реалізації інших модулів. Всі глобальні змінні оголошені у секції VAR_GLOBAL проєкту та ініціалізовані початковими значеннями що відповідають безпечному стану системи перед запуском технологічного процесу.

	Name	Type	Address	Array	Init value	Attribute	Description
1	D1_PositionSensor	BOOL	Auto	No		---	Датчик позиції для заповнення (Stage 1)
2	D2_PositionSensor	BOOL	Auto	No		---	Датчик позиції для Stage 2
3	D3_PositionSensor	BOOL	Auto	No		---	Датчик кінцевої позиції
4	StartButton	BOOL	Auto	No		---	Кнопка Пуск
5	StopButton	BOOL	Auto	No		---	Кнопка Стоп
6	K1_DrainValve	BOOL	Auto	No		---	Клапан для зливу
7	K2_FillValve	BOOL	Auto	No		---	Клапан для заповнення
8	M_PistonMotor	BOOL	Auto	No		---	Мотор для руху поршня
9	MotorDirection	BOOL	Auto	No		---	Напрямок руху мотора: TRUE = вправо, FALSE = вліво
10	TimerFilling	TON	Auto	No		---	Таймер для заповнення
11	TimerDraining	TON	Auto	No		---	Таймер для зливу
12	TimerPause	TON	Auto	No		---	Таймер для паузи між дозами
13	CurrentStage	INT	Auto	No	1	---	Поточний етап: 1 або 2
14	FillingPhase	BOOL	Auto	No	TRUE	---	Початок із фази заповнення
15	DrainingPhase	BOOL	Auto	No	FALSE	---	Фаза зливу
16	PausePhase	BOOL	Auto	No	FALSE	---	Фаза паузи
17	ProcessComplete	BOOL	Auto	No	FALSE	---	Стан завершення процесу
18	DoseCounter	INT	Auto	No	0	---	Лічильник доз
19	DoseCounted	BOOL	Auto	No	FALSE	---	Прапор для фіксації збільшення дози
20	MotorStoppedAtD	BOOL	Auto	No	FALSE	---	Прапор для фіксації зупинки мотора на D1
21	PistonPosition	REAL	Auto	No	0.0	---	Поточна позиція поршня, значення від 0 до 100
22	DoseCounter2	INT	Auto	No	0	---	Лічильник доз2
23	g_iTEz	INT	Auto	No		---	для симуляції нагріву
24	g_rTEz	REAL	Auto	No		---	для симуляції нагріву
25	g_arTempLog	REAL	Auto	[1..260]		---	
26	TE_sp	REAL	Auto	No	49.5	---	Уставка температури для регулятора
27	Kp_reg1	REAL	Auto	No	5	---	Коефіцієнт пропорційності
28	Ti_reg1	UINT	Auto	No	15	---	Час інтегрування, с
29	Td_reg1	UINT	Auto	No	1	---	Час диференціювання, с
30	reg1_Out	REAL	Auto	No	0.0	---	Вихід PID регулятора, %
31	reg1_Error	REAL	Auto	No		---	
32	reg1_HighLimit	REAL	Auto	No	100.0	---	максимальний ліміт під регулятора
33	reg1_LowLimit	REAL	Auto	No	18.0	---	мінімальний ліміт під регулятора
34	DoseLimit_1	INT	Auto	No	10	---	ліміт доз для етапу 1
35	DoseLimit_2	INT	Auto	No	10	---	ліміт доз для етапу 2
36	HMI_Control	BOOL	Auto	No	TRUE	---	керування з панелі
37	Temp_to_start	REAL	Auto	No	49	---	мінімальна температура для старту
38	simulation	BOOL	Auto	No	TRUE	---	режим симуляції

Рисунок 4.2 - Глобальні змінні проєкту (VAR_GLOBAL)

Група сигналів давачів та керування: змінні D1_PositionSensor, D2_PositionSensor, D3_PositionSensor - булеві сигнали давачів положення поршня; StartButton, StopButton - сигнали кнопок керування; K1_DrainValve, K2_FillValve - стани клапанів; M_PistonMotor, MotorDirection - стан та напрямок двигуна.

Група змінних стану процесу: CurrentStage - поточна стадія (1, 2 або 3); FillingPhase, DrainingPhase, PausePhase - прапори активних фаз; ProcessComplete - ознака завершення процесу; DoseCounter, DoseCounter2 - лічильники доз; DoseCounted, MotorStoppedAtD - службові прапори логіки керування; PistonPosition - поточна позиція поршня (0–100%).

Група таймерів: TimerFilling, TimerDraining, TimerPause - таймери типу TON для відліку тривалості фаз заповнення, зливу та паузи між дозами відповідно.

Група температури та PID-регулятора: g_rTEz - поточне значення температури (REAL, °C); g_iTEz - ціле представлення температури для відображення; g_arrTempLog[1..260] - масив реєстрації температури; TE_sp - уставка PID-регулятора; Kp_reg1, Ti_reg1, Td_reg1 - параметри регулятора; reg1_Out - вихідний сигнал регулятора (0–100%); reg1_Error - поточна похибка регулювання; reg1_HighLimit, reg1_LowLimit - межі вихідного сигналу регулятора.

Група налаштувань процесу: DoseLimit_1, DoseLimit_2 - ліміти кількості доз для кожної стадії; Temp_to_start - мінімальна температура для запуску дозування; HMI_Control - прапор пріоритету керування з панелі; simulation - прапор режиму симуляції.

Змінні статусу (Status Variables)

Змінні статусу є окремою групою змінних, що прив'язані до конкретних адрес пам'яті Modbus-регістрів контролера M172 через механізм AT %MW. Саме ці змінні є точкою обміну даними між контролером та панеллю оператора ET6 по протоколу Modbus TCP/IP - панель зчитує та записує значення безпосередньо за цими адресами.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

STATUS VARIABLES

#	Address	Name	Installer type	IEC type	Size	Read only	Default value	
1	8960	Stage_Status	Signed 16-bit	INT		False	0	
2	8961	start_st	Boolean	BOOL		False		
3	8962	stop_st	Boolean	BOOL		False		
4	8963	Dose_Status	Signed 16-bit	INT		False	0	
5	8964	K1_st	Boolean	BOOL		False		
6	8965	Complete_Status	Boolean	BOOL		False		
7	8966	Pause_st	Boolean	BOOL		False		
8	8967	PistonPos_Status	Real	REAL		False	0	
9	8969	Dose_Status2	Signed 16-bit	INT		False	0	
10	8970	TE_sp_st	Real	REAL		False	49.5	
11	8972	DoseLimit_1_st	Signed 16-bit	INT		False	10	
12	8973	DoseLimit_2_st	Signed 16-bit	INT		False	10	
13	8974	Temp_to_start_st	Real	REAL		False	49	
14	8976	Kp_reg_st	Real	REAL		False	5	
15	8978	Ti_reg_st	Signed 16-bit	UINT		False	15	
16	8979	Td_reg_st	Signed 16-bit	UINT		False	1	
17	8980	HMI_Control_st	Boolean	BOOL		False	True	
18	8981	K2_st	Boolean	BOOL		False		
19	8982	simulation_st	Boolean	BOOL		False	True	
20	8983	rTez_st	Real	REAL		False		

Рисунок 4.3 -Змінні статусу проекту (Status Variables)

Усього визначено 20 змінних статусу з адресами у діапазоні 8960–8983, що охоплюють усі параметри необхідні для повноцінного моніторингу та керування процесом з панелі оператора: поточна стадія, стани кнопок та клапанів, лічильники доз, положення поршня, параметри PID-регулятора, уставки температури та ліміти доз. Значення за замовчуванням (Default value) визначають початковий стан системи при першому увімкненні - зокрема TE_sp_st = 49.5, DoseLimit_1_st = DoseLimit_2_st = 10, Temp_to_start_st = 49, Kp_reg_st = 5, Ti_reg_st = 15, Td_reg_st = 1, HMI_Control_st = TRUE, simulation_st = TRUE.

4.3 Програма Main

Програма Main є центральним модулем керуючого програмного забезпечення і реалізує повну логіку управління технологічним процесом двостадійного дозування. Програма написана мовою структурованого тексту (ST) відповідно до стандарту МЕК 61131-3 [2] і складається з трьох функціональних блоків: логіки керування Stage 1, логіки керування Stage 2 та блоку аварійної зупинки.

Умови запуску процесу

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконання кожної стадії дозування захищене трьома умовами одночасного виконання: активний сигнал кнопки «Пуск» (StartButton = TRUE), відповідний номер поточної стадії (CurrentStage = 1 або CurrentStage = 2) та досягнення мінімальної температури рідини ($g_rTEz \geq Temp_to_start$). Остання умова забезпечує неможливість запуску дозування до завершення нагріву рідини до робочої температури. Використання змінної Temp_to_start замість фіксованого числового значення дозволяє оперативно коригувати поріг запуску з панелі оператора без зміни керуючої програми.

Блок Stage 1 зображений у додатку A1 реалізує три послідовні фази одного дозувального циклу першої стадії.

Фаза заповнення (FillingPhase) активується при FillingPhase = TRUE. На початку фази закривається зливний клапан K1 (K1_DrainValve := FALSE) та відкривається клапан заповнення K2 (K2_FillValve := TRUE). Одночасно задається напрямок руху поршня вліво (MotorDirection := FALSE) та вмикається двигун (M_PistonMotor := TRUE) за умови що прапор MotorStoppedAtD = FALSE. Паралельно запускається таймер заповнення TimerFilling з витримкою 6000 мс.

У процесі руху поршня вліво контролюється спрацювання датчика D1 (D1_PositionSensor = TRUE). При спрацюванні та умові NOT DoseCounted лічильник доз збільшується на одиницю (DoseCounter := DoseCounter + 1), двигун зупиняється (M_PistonMotor := FALSE) і встановлюється прапор MotorStoppedAtD := TRUE - фіксація зупинки двигуна у позиції D1. Прапор DoseCounted запобігає повторному збільшенню лічильника при тривалому знаходженні поршня у позиції D1 і скидається при виході поршня з зони датчика (D1_PositionSensor = FALSE).

Після спрацювання таймера (TimerFilling.Q = TRUE) клапан K2 закривається, двигун зупиняється, таймер скидається (TimerFilling(IN := FALSE)), прапор FillingPhase скидається і встановлюється DrainingPhase := TRUE - перехід до фази зливу.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фаза зливу (DrainingPhase) активується при DrainingPhase = TRUE. Відкривається зливний клапан K1 (K1_DrainValve := TRUE), задається напрямок руху вправо (MotorDirection := TRUE) та вмикається двигун (M_PistonMotor := TRUE). Запускається таймер зливу TimerDraining з витримкою 5000 мс. При досягненні поршнем позиції Д3 (D3_PositionSensor = TRUE) двигун зупиняється. Після спрацювання таймера клапан K1 закривається, таймер скидається і відбувається перехід до фази паузи (PausePhase := TRUE).

Фаза паузи (PausePhase) активується при PausePhase = TRUE. Запускається таймер паузи TimerPause з витримкою 10000 мс. Після спрацювання таймера перевіряється умова завершення стадії: якщо DoseCounter = DoseLimit_1 - всі клапани та двигун вимикаються і відбувається перехід на наступну стадію (CurrentStage := 2). В іншому випадку встановлюється FillingPhase := TRUE і розпочинається новий дозувальний цикл.

Блок Stage 2 зображений в додатку А2 структурно ідентичний блоку Stage 1 з двома принциповими відмінностями. По-перше, контрольною точкою положення поршня у фазі заповнення є давач Д2 (D2_PositionSensor) замість Д1 - це забезпечує менший хід поршня (50% від максимального) і відповідно менший об'єм дози другої стадії. По-друге, лічильником доз є DoseCounter2 і перевірка завершення стадії виконується відносно DoseLimit_2. При досягненні DoseCounter2 = DoseLimit_2 встановлюється ProcessComplete := TRUE і система переходить у стан CurrentStage := 3 - завершення процесу.

Блок аварійної зупинки зображений в додатку А3 виконується при StopButton = TRUE незалежно від поточного стану процесу. Блок виконує повне скидання системи до початкового стану: деактивується StartButton та start_st (блокування повторного запуску), закриваються всі клапани (K1_DrainValve := FALSE, K2_FillValve := FALSE), зупиняється двигун (M_PistonMotor := FALSE), скидаються всі три таймери (TimerFilling, TimerDraining, TimerPause з IN := FALSE). Далі скидаються всі змінні стану процесу: встановлюється початкова фаза (FillingPhase := TRUE, DrainingPhase := FALSE, PausePhase := FALSE),

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обнуляються лічильники доз (DoseCounter := 0, DoseCounter2 := 0), скидаються службові прапори (MotorStoppedAtD := FALSE, DoseCounted := FALSE), повертається початкова стадія (CurrentStage := 1), обнуляється позиція поршня (PistonPosition := 0) та скидається ознака завершення (ProcessComplete := FALSE). Такий підхід гарантує що після будь-якої аварійної зупинки система повертається у повністю визначений початковий стан і готова до повторного запуску без перезавантаження контролера.

4.4 Програма PID

Програма PID реалізована мовою функціональних блокових діаграм (FBD) відповідно до стандарту MEK 61131-3 і забезпечує автоматичне регулювання температури рідини у резервуарі за пропорційно-інтегрально-диференціальним законом. Використання мови FBD для реалізації контуру регулювання обумовлено наочністю графічного представлення інформаційних зв'язків між сигналами та функціональним блоком, що спрощує налагодження та верифікацію алгоритму регулювання. Поєднання мов ST (основна логіка) та FBD (контур регулювання) в межах одного проєкту є прикладом раціонального використання можливостей стандарту MEK 61131-3.

Ядром програми є функціональний блок PIDAdvanced бібліотеки EcoStruxure Machine Expert – HVAC (Рисунок 2.1), що реалізує повний ПІД-алгоритм регулювання з підтримкою обмеження вихідного сигналу, ручного режиму керування та автоматичного налаштування. Екземпляр блока названо REG1. Підключення входів та виходів блока здійснено наступним чином.

Вхід **xEn** (Enable) підключено до змінної StartButton - регулятор активний лише при запущеному процесі. Вхід **rPv** (Process Variable) підключено до змінної g_rTEz - поточне значення температури рідини, що надходить з імітаційної моделі HeatingSimulation або з реального давача TE_1 при вимкненому режимі симуляції. Вхід **rSetp** (Setpoint) підключено до змінної TE_sp - уставка температури регулювання, значення якої задається з панелі оператора ET6 (за замовчуванням 49,5°C). Входи **rHighLimit** та **rLowLimit** підключено до змінних

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

reg1_HighLimit = 100.0 та reg1_LowLimit = 18.0 відповідно - обмеження вихідного сигналу регулятора в діапазоні 18–100%, що запобігає повному вимкненню нагрівача та різкому охолодженню рідини нижче допустимої межі. Вхід **rKp** підключено до змінної Kp_reg1, входи **uiTi** та **uiTd** - до змінних Ti_reg1 та Td_reg1 відповідно. Вхід **xReset** підключено до StopButton - скидання інтегральної складової при аварійній зупинці запобігає накопиченню інтегральної похибки між циклами роботи.

Вихід **rAnalog** підключено до глобальної змінної reg1_Out - аналоговий вихідний сигнал регулятора у діапазоні 0–100%, що використовується моделлю HeatingSimulation як керуючий вплив на нагрівач, а при вимкненому режимі симуляції подається на аналоговий вихід АОЗ контролера M172 для керування реальним нагрівачем. Вихід **rError** підключено до змінної reg1_Error - поточне значення похибки регулювання $e(k) = TE_sp - g_rTEz$, що відображається на панелі оператора для моніторингу якості регулювання.

Параметри регулятора

За результатами налаштування та симуляційного тестування встановлено такі робочі параметри PIDAdvanced: Kp_reg1 = 5.0, Ti_reg1 = 15 с, Td_reg1 = 1 с. При даних параметрах забезпечується час виходу на уставку ~70 секунд з перерегулюванням $\sigma \approx 3,5^{\circ}\text{C}$ та подальшою стабілізацією температури у робочому діапазоні 48,5–55°C. Всі параметри регулятора винесені до змінних статусу і можуть оперативно коригуватись оператором з панелі ET6 без зупинки процесу та зміни керуючої програми.

4.5 Імітаційні моделі

Оскільки лабораторний стенд не має реального технологічного обладнання, для тестування та відпрацювання керуючої програми розроблено два програмні імітаційні модулі - HeatingSimulation та PistonMovementSimulation. Обидва модулі виконуються циклічно разом з основною програмою і формують віртуальні сигнали датчиків та параметрів

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесу, що дозволяє повністю відтворити динаміку реального технологічного процесу в середовищі симулятора контролера M172.

Програма HeatingSimulation (додаток А4) реалізує фізичну модель нагрівання рідини у резервуарі на основі рівняння теплового балансу. На відміну від спрощених моделей з фіксованими коефіцієнтами, обрана модель враховує два конкуруючі теплових процеси - підведення теплоти від нагрівача та природне тепловіддачу в навколишнє середовище, що забезпечує реалістичну динаміку нагрівання з перерегулюванням та подальшою стабілізацією температури під дією PID-регулятора.

Диференціальне рівняння теплового балансу об'єкта має вигляд:

$$M \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{reg1_Out}{100} \cdot P_{max} - k_{cool} \cdot (T - T_{навк}), \quad (4.1)$$

де M - теплова ємність об'єкта ($M = 400$ ум. од.); T - поточна температура рідини ($^{\circ}\text{C}$); P_{max} - максимальна потужність нагрівача ($P_{max} = 200$ ум. од.); k_{cool} - коефіцієнт тепловіддачі ($k_{cool} = 1,5$); $T_{навк}$ - температура навколишнього середовища ($T_{навк} = 20^{\circ}\text{C}$); $reg1_Out$ - вихідний сигнал PID-регулятора (0–100%).

У дискретній формі з кроком моделювання $T_0 = 0,01$ с рівняння набуває вигляду:

$$g_rTEz(k) = g_rTEz(k-1) + \frac{T_0}{M} \cdot \left[\frac{reg1_Out}{100} \cdot P_{max} - k_{cool} \cdot (g_rTEz(k-1) - T_{навк}) \right]. \quad (4.2)$$

Другий доданок $k_{cool} \cdot (g_rTEz - T_{навк})$ є ключовим - він моделює природне охолодження об'єкта пропорційно різниці температур з навколишнім середовищем згідно із законом Ньютона-Рихмана. Завдяки цьому при зменшенні вихідного сигналу PID-регулятора $reg1_Out$ температура не залишається на досягнутому рівні, а природно знижується, що забезпечує реалістичну поведінку об'єкта та коректну роботу замкненого контуру регулювання.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ініціалізація моделі виконується при першому запуску (NOT InitDone) або при натисканні кнопки «Стоп» (StopButton = TRUE) - температура примусово встановлюється на рівні навколишнього середовища $g_rTEz := AmbientTemp = 20^{\circ}C$. При активному процесі (StartButton = TRUE AND NOT ProcessComplete) виконується основне рівняння моделі. При зупиненому процесі реалізовано лінійне охолодження зі швидкістю $0,002^{\circ}C$ за цикл до досягнення температури навколишнього середовища.

Вибір параметрів моделі обґрунтовується наступним чином: співвідношення $P_max/M = 200/400 = 0,5$ визначає максимальну швидкість нагріву при повній потужності регулятора; коефіцієнт тепловіддачі $k_cool = 1,5$ забезпечує рівноважну температуру об'єкта при повній потужності нагрівача на рівні:

$$T_{\text{рівн}} = T_{\text{навк}} + \frac{P_{\text{max}}}{k_{\text{cool}}} = 20 + \frac{200}{1.5} \approx 153^{\circ}C, \quad (4.3)$$

що значно перевищує робочу уставку $49,5^{\circ}C$ і гарантує здатність регулятора досягти та утримати задану температуру при будь-якому значенні reg1_Out в діапазоні 18–100%.

Програма PistonMovementSimulation (додаток А5) реалізує кінематичну модель руху поршня дозатора та формує сигнали давачів положення D1, D2, D3 залежно від поточної позиції поршня. Модель побудована на основі рівномірного руху поршня з постійною швидкістю, що розраховується з умови проходження повного ходу за заданий час.

Швидкість руху поршня розраховується як:

$$Speed = \frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{T_{\text{total}}/T_{\text{step}}}, \quad (4.4)$$

де X_max , X_min - максимальна та мінімальна позиція поршня; T_total - загальний час ходу (мс); T_step - часовий крок симуляції (мс).

Модель реалізує різну поведінку для двох стадій процесу. У Stage 1 поршень здійснює повний хід у діапазоні 0–100% ($X_min = 0$, $X_max = 100$), де позиція 100% відповідає спрацюванню давача Д1, а позиція 0% - давача Д3. У

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Stage 2 робочий діапазон обмежений до 0–50% ($X_{\max} = 50$), що моделює менший хід поршня до позиції давача Д2 і відповідно менший об'єм дози другої стадії.

При русі вліво ($\text{MotorDirection} = \text{FALSE}$) позиція поршня збільшується на величину швидкості за кожен цикл виконання програми до досягнення максимального значення, після чого двигун автоматично зупиняється. При русі вправо ($\text{MotorDirection} = \text{TRUE}$) позиція зменшується до нульового значення з аналогічною автоматичною зупинкою. Сигнали давачів положення формуються за умовами граничних значень позиції: $\text{D3_PositionSensor} = \text{TRUE}$ при $\text{PistonPosition} = 0$, $\text{D1_PositionSensor} = \text{TRUE}$ при $\text{PistonPosition} = 100$ (Stage 1), $\text{D2_PositionSensor} = \text{TRUE}$ при $\text{PistonPosition} = 50$ (Stage 2).

4.6 Програма DataLogger

Програма DataLogger зображена у додатку А5, призначена для дискретної реєстрації поточного значення температури рідини g_rTEz та змінних reg1_Out і reg1_Error , у процесі роботи стенда з метою отримання масиву даних для подальшого аналізу перехідного процесу нагрівання, верифікації математичної моделі об'єкта та розрахунку параметрів PID-регулятора у середовищі Matlab.

Логіка програми побудована на основі таймера TON (LogTimer) з періодом спрацювання 2000 мс. Запис розпочинається автоматично при активації сигналу $\text{StartButton} = \text{TRUE}$ за умови що індекс запису знаходиться на початковій позиції ($\text{LogIndex} = 1$) і запис ще не розпочато (NOT Recording). Прапор $\text{Recording} := \text{TRUE}$ фіксує активний стан реєстрації. При натисканні кнопки «Стоп» логер скидається - $\text{Recording} := \text{FALSE}$ та $\text{LogIndex} := 1$.

Кожні 2 секунди при спрацюванні таймера ($\text{LogTimer.Q} = \text{TRUE}$) поточне значення температури записується у відповідну комірку масиву $g_arrTempLog[\text{LogIndex}] := g_rTEz$ після чого індекс збільшується на одиницю ($\text{LogIndex} := \text{LogIndex} + 1$). Після заповнення всіх визначених комірок ($\text{LogIndex} > 260$) запис автоматично зупиняється ($\text{Recording} := \text{FALSE}$).

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За результатами експериментального тестування повного технологічного циклу з 20 дозами (по 10 на кожную стадію) встановлено що загальний час виконання процесу становить понад 8 хвилин. При кроці реєстрації 2 секунди масив g_arrTempLog[1..260] забезпечує повне покриття циклу з запасом. Експериментально визначено що запис з індексом ~247 відповідає моменту завершення процесу дозування та початку охолодження рідини - саме діапазон записів від 1 до 247 містить повну картину роботи системи під керуванням PID-регулятора і використовується як основний масив експериментальних даних у розрахунковому розділі бакалаврської роботи.

4.7 Програми assign_sync та Assign_p

Програма assign_sync (додаток А6) забезпечує двосторонній обмін даними між внутрішніми змінними керуючої програми та змінними статусу, що використовуються для комунікації з панеллю оператора ЕТ6 по протоколу Modbus TCP/IP. Програма виконується циклічно та складається з трьох функціональних частин.

Перша частина - передача інформаційних змінних від контролера до панелі (напрямок читання для панелі). Поточні значення технологічних параметрів копіюються у відповідні змінні статусу.

Завдяки цьому панель оператора в режимі реального часу відображає поточну стадію процесу, стан клапанів, лічильники доз, положення поршня та температуру рідини.

Друга частина - передача параметрів від панелі до контролера (напрямок запису для панелі). Значення що оператор задає з панелі копіюються у відповідні робочі змінні керуючої програми.

Такий підхід дозволяє оператору з панелі ЕТ6 оперативно змінювати параметри PID-регулятора (Kp, Ti, Td), уставку температури, поріг запуску дозування, ліміти кількості доз та перемикати режим симуляції без зупинки процесу та втручання у керуючу програму контролера.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Третя частина - логіка перемикання пріоритету керування між фізичними кнопками та панеллю оператора. При HMI_Control = TRUE сигнали StartButton та StopButton формуються зі змінних статусу start_st та stop_st що керуються з панелі ET6. При HMI_Control = FALSE сигнали формуються від фізичних кнопок h_bStart та h_bStop підключених до дискретних входів контролера DI4 та DI5. Це забезпечує гнучкість системи керування - оператор може обрати зручний спосіб керування залежно від умов роботи станда.

Програма Assign_p (додаток А7) забезпечує прив'язку внутрішніх змінних керуючої програми до фізичних каналів входів та виходів контролера M172 відповідно до таблиці розподілу I/O. Виконання прив'язки захищене умовою IF NOT simulation - при активованому режимі симуляції (simulation = TRUE) програма не виконує жодних присвоєнь і всі сигнали формуються виключно імітаційними моделями HeatingSimulation та PistonMovementSimulation.

LOCAL I/O MAPPING				
#	Name	Variable	Type	Description
1	AIL1	h_iTEz	INT	AIL1 analogue input
13	DIL1	h_bD1	BOOL	DIL1 digital input
14	DIL2	h_bD2	BOOL	DIL2 digital input
15	DIL3	h_bD3	BOOL	DIL3 digital input
16	DIL4	h_bStart	BOOL	DIL4 digital input
17	DIL5	h_bStop	BOOL	DIL5 digital input
25	DOL1	h_bMleft	BOOL	DOL1 digital output
26	DOL2	h_bMright	BOOL	DOL2 digital output
27	DOL3	h_bKlapan2	BOOL	DOL3 digital output
28	DOL4	h_bKlapan1	BOOL	DOL4 digital output
39	AOL3	h_reg1_Out	INT	AOL3 analogue output

Рисунок 4.4 - Таблиця розподілу фізичних I/O контролера M172 (LOCAL I/O MAPPING)

При вимкненому режимі симуляції (simulation = FALSE) виконуються такі операції прив'язки. Аналоговий вхід: g_rTEz := TO_REAL(h_iTEz) - перетворення цілочисельного значення з аналогового входу AI1 (давач температури TE_1) у тип REAL для використання в керуючій програмі та PID-регуляторі. Аналоговий вихід: h_reg1_Out := reg1_Out - передача вихідного сигналу PID-регулятора на аналоговий вихід АО3 контролера для керування реальним нагрівачем. Дискретні входи: змінні D1_PositionSensor,

D2_PositionSensor, D3_PositionSensor отримують значення від фізичних каналів h_bD1, h_bD2, h_bD3 (давачі положення Д1/Д2/Д3 на входах DIL1/DIL2/DIL3). Дискретні виходи клапанів: h_bKlapan1 := K1_DrainValve та h_bKlapan2 := K2_FillValve - передача сигналів керування клапанами K1/K2 на фізичні виходи DOL4/DOL3. Дискретні виходи двигуна: напрямок обертання визначається комбінацією сигналів M_PistonMotor та MotorDirection - при русі вліво активується вихід h_bMleft (DOL1), при русі вправо - h_bMright (DOL2), при зупиненому двигуні обидва виходи деактивуються.

Така архітектура програми Assign_p забезпечує повну апаратну незалежність основної керуючої логіки від типу підключення - перемикання між режимом симуляції та роботою з реальним обладнанням здійснюється зміною однієї булевої змінної simulation з панелі оператора без будь-яких змін у керуючій програмі.

Висновки до розділу

Розроблено керуючу програму контролера що складається з семи програмних модулів мовами ST та FBD, включаючи основну логіку керування, PID-регулятор, імітаційні моделі та модулі синхронізації з панеллю оператора.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА РОЗРАХУНКИ

5.1 Математична модель об'єкта нагрівання

Об'єктом керування є резервуар Є-1 із рідиною, що нагрівається електричним нагрівачем. Математична модель об'єкта побудована на основі рівняння теплового балансу, яке відображає закон збереження енергії: потужність підведеного тепла дорівнює сумі потужності, що витрачається на нагрів теплової маси об'єкта, та потужності теплових втрат у навколишнє середовище (закон Ньютона-Ріхмана):

$$M \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{u}{100} \cdot P_{\max} - k_{\text{cool}} \cdot (T - T_{\text{навк}}), \quad (5.1)$$

де M - теплова ємність об'єкта, ум. од.; T - поточна температура об'єкта, °C; t - час, с; u - вихідний сигнал регулятора (reg1_Out), %; $P_{\max}$ - максимальна потужність нагрівача, ум. од.; k_{cool} - коефіцієнт тепловіддачі, ум. од./°C; $T_{\text{навк}}$ - температура навколишнього середовища, °C.

Чисельні значення параметрів моделі об'єкта нагрівання визначені відповідно до програми HeatingSimulation, реалізованої в середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC для контролера M172.

Теплова ємність об'єкта (M) становить 400 ум. од., максимальна потужність нагрівача ($P_{\max}$) - 200 ум. од., а коефіцієнт тепловіддачі (k_{cool}) дорівнює 1.5 ум. од./°C. Крок моделювання (T_0) встановлено на рівні 0.01 с, температура навколишнього середовища ($T_{\text{навк}}$) складає 20.0 °C, а уставка температури (T_{sp}) - 49.5 °C.

Для реалізації у програмованому логічному контролері M172 неперервне рівняння (5.1) приведено до дискретної форми методом явного рівняння Ейлера з кроком дискретизації $T_0 = 0.01$ с:

$$g_r \text{TEz}(k) = g_r \text{TEz}(k-1) + \frac{T_0}{M} \cdot \left[\frac{u(k-1)}{100} \cdot P_{\max} - k_{\text{cool}} \cdot (g_r \text{TEz}(k-1) - T_{\text{навк}}) \right], \quad (5.2)$$

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $g_{rTEz}(k)$ - розрахункове значення температури на k -му кроці, °C;
 $g_{rTEz}(k-1)$ - розрахункове значення температури на попередньому кроці, °C;
 $u(k-1)$ - вихідний сигнал PID-регулятора на попередньому кроці, %.

При повній потужності нагрівача ($u = 100\%$) система прагне до рівноважної температури, яка визначається з умови $dT/dt = 0$:

$$T_{\text{рівн}} = T_{\text{навк}} + \frac{P_{\text{max}}}{k_{\text{cool}}} = 20 + \frac{200}{1.5} \approx 153^{\circ}\text{C}. \quad (5.3)$$

Оскільки реальна уставка температури $T_{sp} = 49.5^{\circ}\text{C}$ значно менша за рівноважну ($49.5^{\circ}\text{C} \ll 153^{\circ}\text{C}$), PID-регулятор не допускає виходу системи на максимальну потужність у сталому режимі, що забезпечує стійку роботу замкненої системи керування.

Для аналізу динамічних властивостей об'єкта у частотній області виконано лінеаризацію рівняння (5.1). Лінеаризована модель об'єкта описується передавальною функцією аперіодичної ланки першого порядку:

$$W(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1}, \quad (5.4)$$

де K - статичне підсилення об'єкта; T - стала часу об'єкта, с; s - оператор Лапласа.

Теоретичні значення параметрів передавальної функції, розраховані на основі параметрів моделі:

$$K = \frac{P_{\text{max}}}{k_{\text{cool}}} = \frac{200}{1.5} \approx 133.33 \text{ ум. од./}^{\circ}\text{C}, \quad (5.5)$$

$$T = \frac{M}{k_{\text{cool}}} = \frac{400}{1.5} \approx 266.67 \text{ с}. \quad (5.6)$$

Таким чином, теоретична передавальна функція об'єкта нагрівання має вигляд:

$$W(s) = \frac{133.33}{266.67 \cdot s + 1}. \quad (5.7)$$

Слід зазначити, що наведені теоретичні параметри відповідають розімкненому об'єкту при повній потужності нагрівача. В умовах реальної роботи замкненої системи з PID-регулятором ефективні параметри об'єкта

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суттєво відрізняються від теоретичних, що потребує проведення експериментальної ідентифікації, описаної у підрозділі 5.2. Також увесь код програми з Matlab розміщено в додатку Б.

5.2 Ідентифікація об'єкта керування

Ідентифікація об'єкта керування виконана з метою визначення ефективних параметрів передавальної функції, що адекватно описують динаміку реальної замкненої системи нагрівання резервуара Є-1. Експериментальні дані отримані за допомогою програмного модуля DataLogger, реалізованого в середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC на контролері M172. Модуль здійснював паралельну реєстрацію трьох масивів з кроком дискретизації $dt = 2$ с протягом повного технологічного циклу:

- $g_arrTempLog[1..247]$ - поточне значення температури рідини g_rTEz , °C;
- $g_arrOutLog[1..247]$ - вихідний сигнал PID-регулятора $reg1_Out$, %;
- $g_arrErrLog[1..247]$ - похибка регулювання $reg1_Error = T_{sp} - T$, °C.

Загальна тривалість реєстрації склала $247 \times 2 = 494$ с (~8.2 хвилини), що охоплює повний перехідний процес від початкової температури $T_{навк} = 20^\circ\text{C}$ до усталеного режиму підтримання уставки $T_{sp} = 49.5^\circ\text{C}$.

Верифікація математичної моделі.

На першому етапі виконано верифікацію дискретної моделі (5.2) шляхом підстановки реального профілю вихідного сигналу регулятора $u(k) = g_arrOutLog(k)$ у різницеве рівняння та порівняння розрахованої температури з експериментальними даними DataLogger. Симуляція виконувалась з кроком $T_0 = 0.01$ с з лінійною інтерполяцією сигналу u між записами DataLogger. Результати верифікації наведені на рисунку 5.1.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

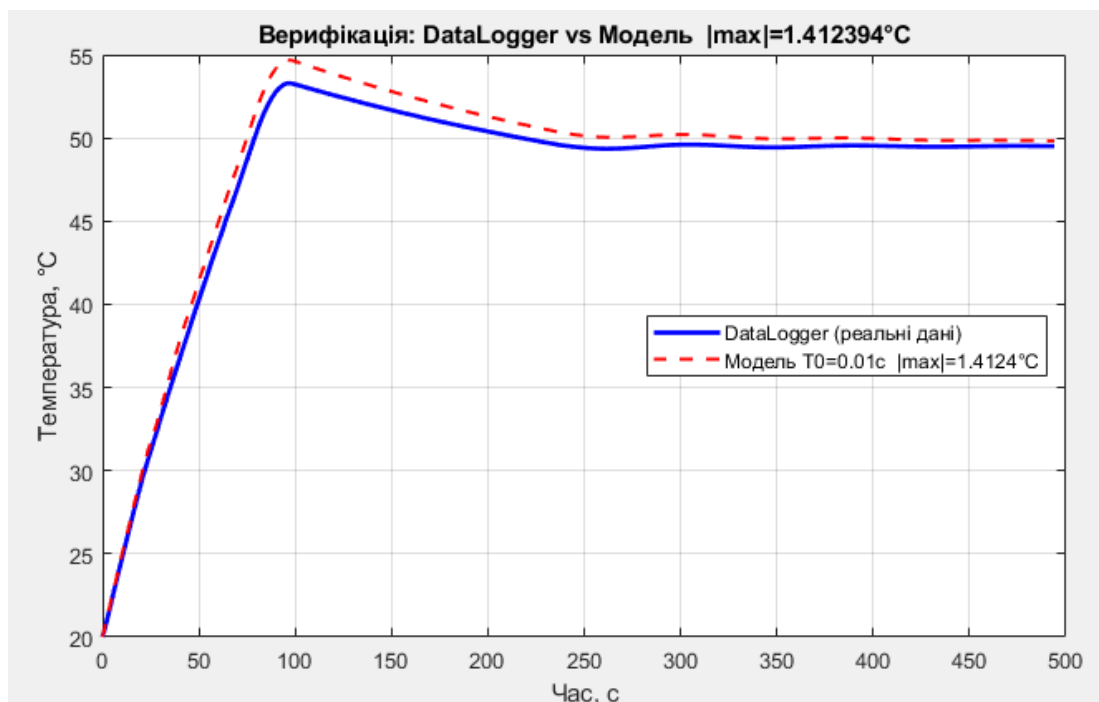


Рисунок 5.1 – Верифікація моделі

Абсолютна похибка верифікації визначалась як:

$$\Delta T_{\text{вер}}(k) = T_{\text{DataLogger}}(k) - T_{\text{модель}}(k). \quad (5.8)$$

Максимальна абсолютна похибка верифікації склала 1.41°C , середньоквадратичне відхилення - 0.82°C . Виявлена похибка обумовлена дискретністю реєстрації сигналу керування (крок $dt = 2$ с), що унеможливило точне відтворення реальної динаміки зміни `reg1_Out` між суміжними записами. Незважаючи на це, модель коректно відтворює загальну форму перехідного процесу, що підтверджує її придатність для подальшого аналізу.

Ідентифікація методом найменших квадратів.

На другому етапі виконано ідентифікацію передавальної функції $W(s)$ методом найменших квадратів (МНК) по експериментальних даних фази нагріву (записи [1..49], час 0–98 с). Апроксимуюча модель має вигляд аперіодичної ланки першого порядку:

$$T(t) = T_{\text{навк}} + K_{\text{eff}} \cdot (1 - e^{-t/T_{\text{eff}}}), \quad (5.9)$$

де K_{eff} - ефективне підсилення, що дорівнює приросту температури від початкового стану до уставки:

$$K_{\text{eff}} = T_{\text{sp}} - T_{\text{навк}} = 49.5 - 20.0 = 29.5^{\circ}\text{C}. \quad (5.10)$$

Стала часу T_{eff} визначалась мінімізацією функціоналу МНК:

$$J(T_{\text{eff}}) = \sum_{k=0}^N [T_{\text{DataLogger}}(k) - T_{\text{навк}} - K_{\text{eff}} \cdot (1 - e^{-t_k/T_{\text{eff}}})]^2 \rightarrow \min. \quad (5.11)$$

Розв'язок задачі мінімізації (5.11) виконано чисельним методом (функція `fminsearch` пакету MATLAB) з початковим наближенням $T_{\text{eff}}^{(0)} = 30\text{c}$.

В результаті оптимізації отримано:

$$T_{\text{eff}} = 38.17\text{ c}. \quad (5.12)$$

Таким чином, ефективна передавальна функція об'єкта нагрівання, отримана методом МНК:

$$W_{\text{МНК}}(s) = \frac{29.5}{38.17 \cdot s + 1}. \quad (5.13)$$

Результати ідентифікації МНК наведені на рисунку 5.2.

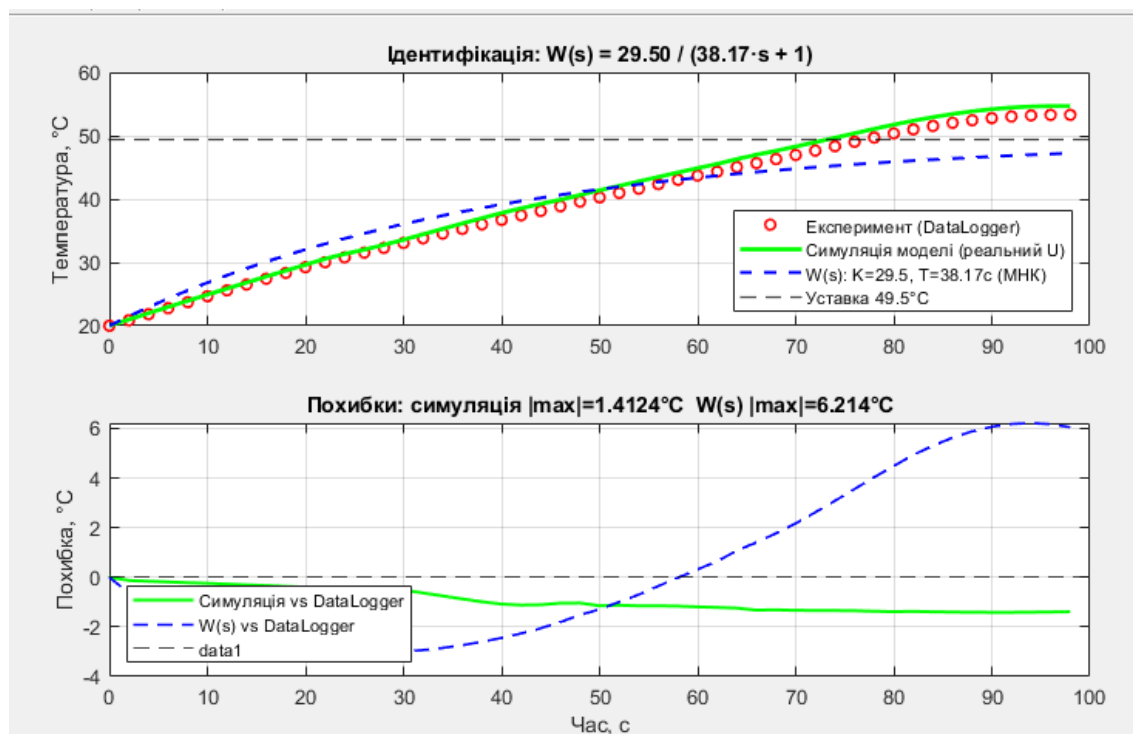


Рисунок 5.2 - Результати ідентифікації об'єкта методом МНК

Максимальна похибка апроксимації склала 1.41°C , що обумовлено S-подібною формою кривої нагріву замкненої системи з PID-регулятором, яка відрізняється від чистої експоненти розімкненого об'єкта.

Ідентифікація засобами System Identification Toolbox.

На третьому етапі ідентифікація виконана з використанням вбудованих засобів пакету System Identification Toolbox середовища MATLAB. Для ідентифікації використовувався об'єкт iddata, сформований з пари вхід-вихід: вхідний сигнал - reg1_Out (%), вихідний сигнал - температура Т ($^{\circ}\text{C}$), крок дискретизації $dt = 2$ с:

Ідентифікація проводилась двома методами:

1. Process Models (PROCEST) - ідентифікація процесної моделі виду $K/(T_{p1} \cdot s + 1)$ з автоматичним підбором параметрів К та T_{p1} .
2. Transfer Function (TFEST) - ідентифікація передавальної функції з одним полюсом і нульовим числом нулів у неперервному часі.

Вікна налаштування та результати ідентифікації наведені на рисунках 5.3–5.5.

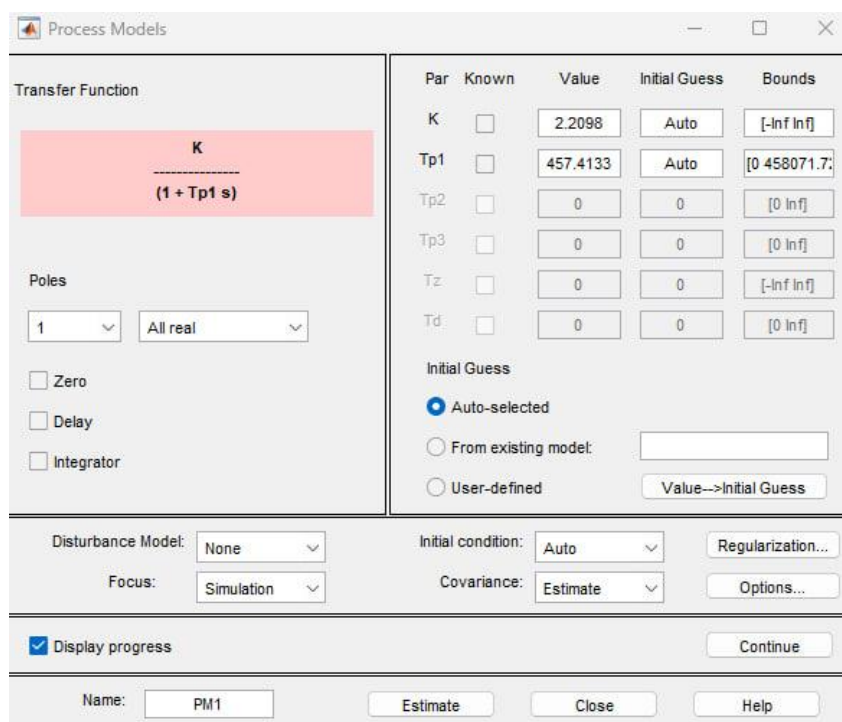


Рисунок 5.3 - Налаштування Process Models у System Identification Toolbox

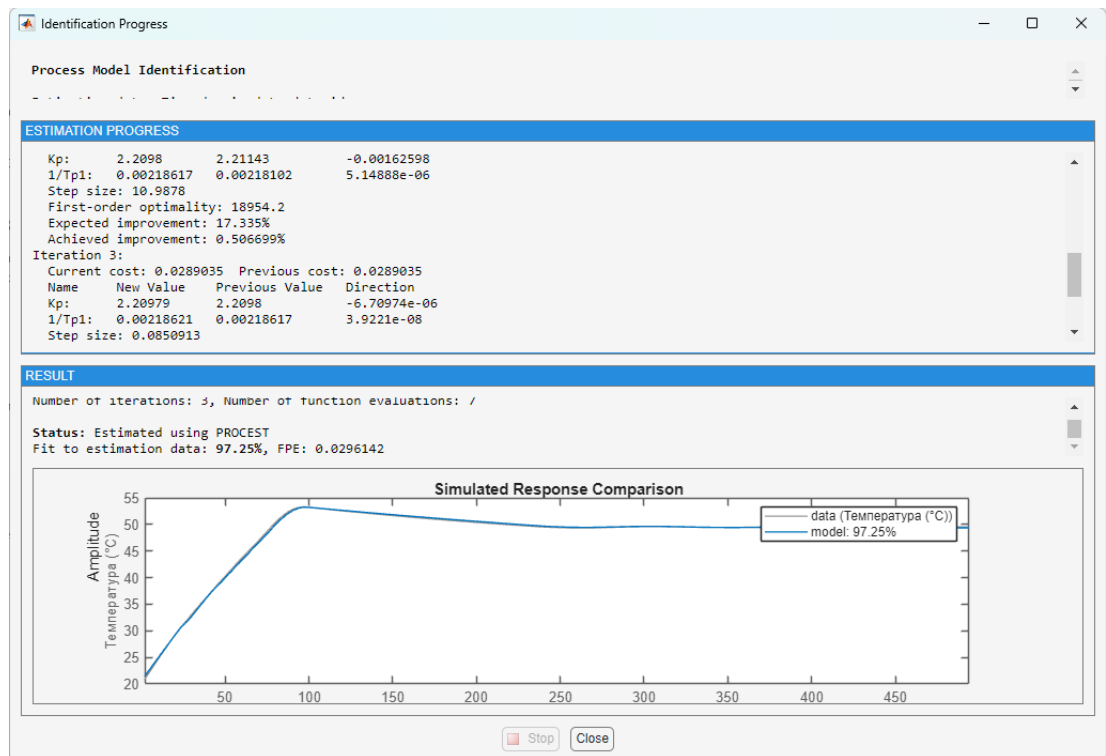


Рисунок 5.4 - Результати ідентифікації Process Models

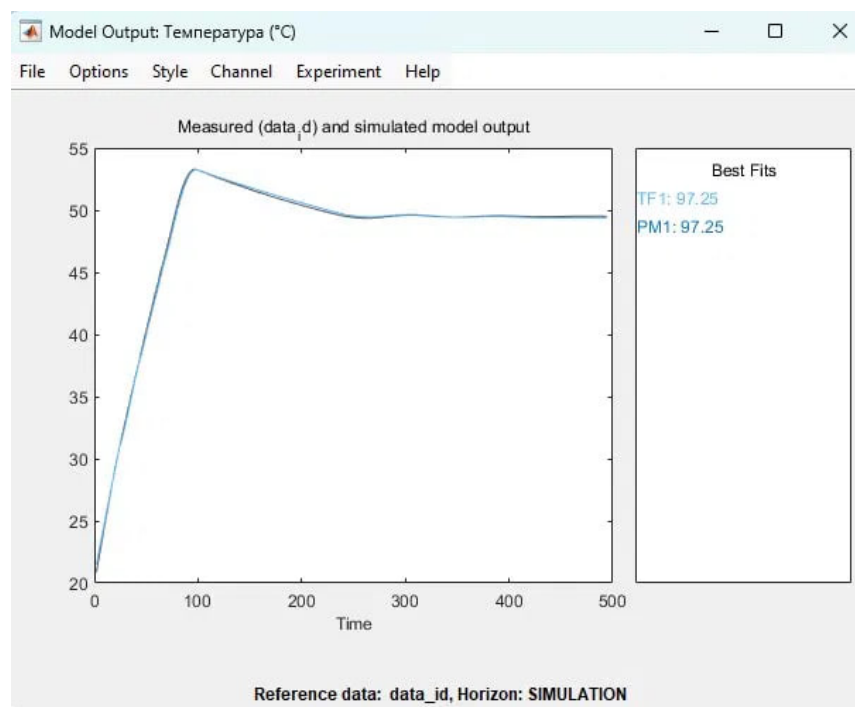


Рисунок 5.5 - Порівняння моделей TF1 та PM1 з експериментальними даними

Обидва методи збіглися до єдиного результату з точністю відповідності експериментальним даним 97.25%:

$$W_{id}(s) = \frac{2.2098}{457.41 \cdot s + 1}. \quad (5.14)$$

Порівняння результатів ідентифікації різними методами наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняння результатів ідентифікації об'єкта нагрівання

Метод	К	Т, с	Точність
Теоретичний (розімкнений об'єкт)	133.33 ум.од./°C	266.67	-
МНК (фаза нагріву)	29.50 °C	38.17	-
Process Models (PROCEST)	2.2098 °C/%	457.41	97.25%
Transfer Function (TFEST)	2.2098 °C/%	457.41	97.25%

Розбіжність між теоретичними параметрами та результатами ідентифікації пояснюється тим, що теоретична модель описує розімкнений об'єкт при повній потужності нагрівача, тоді як ідентифікація виконувалась на даних замкненої системи з активним PID-регулятором. Передавальна функція $W_{id}(s)$, отримана засобами System Identification Toolbox, відображає еквівалентну динаміку замкненої системи у відповідь на зміну вихідного сигналу регулятора і використовується для аналітичного розрахунку параметрів PID у підрозділі 5.3.

5.3 Розрахунок параметрів PID-регулятора

У системі керування нагріванням резервуара Є-1 реалізовано цифровий ПІД-регулятор на базі функціонального блоку PIDAdvanced середовища EcoStruxure Machine Expert – HVAC (екземпляр REG1). Закон керування ПІД-регулятора у неперервній формі має вигляд:

$$u(t) = K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (5.15)$$

де $u(t)$ - вихідний сигнал регулятора (reg1_Out), %; $e(t)$ - похибка регулювання (reg1_Error) = $T_{sp} - T(t)$, °C; K_p - коефіцієнт пропорційності; T_i - час інтегрування, с; T_d - час диференціювання, с.

Для реалізації у контролері M172 неперервний закон (5.15) приведено до дискретної форми:

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + \frac{K_p \cdot T_0}{T_i} \cdot \sum_{j=0}^k e(j) + K_p \cdot \frac{T_d}{T_0} \cdot [e(k) - e(k-1)], \quad (5.16)$$

де $T_0 = 0.01$ с - крок дискретизації контролера; $e(k) = T_{sp} - g_r T E z(k)$ - похибка на k -му кроці, °С.

Вихідний сигнал регулятора обмежується у межах:

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}, \quad (5.17)$$

де $u_{\min} = 18\%$ - мінімальне обмеження (запобігає охолодженню об'єкта нижче робочого діапазону); $u_{\max} = 100\%$ - максимальне обмеження.

Аналітичний розрахунок параметрів.

Аналітичний розрахунок параметрів PID-регулятора виконано на основі передавальної функції замкненої системи, отриманої у підрозділі 5.2 за результатами ідентифікації засобами System Identification Toolbox:

$$W_{id}(s) = \frac{2.2098}{457.41 \cdot s + 1}, \quad (5.18)$$

де $K_{id} = 2.2098^\circ\text{C}/\%$ - статичне підсилення ідентифікованої моделі; $T_{id} = 457.41$ с - стала часу ідентифікованої моделі; $\tau = 2.0$ с - транспортне запізнення, що відповідає кроку дискретизації DataLogger.

Розрахунок виконано двома аналітичними методами.

Метод Циглера-Нікольса (розімкнений контур)

Метод Циглера-Нікольса для об'єкта типу аперіодична ланка з запізненням передбачає визначення параметрів за формулами:

$$K_p^{3H} = \frac{1.2}{K_{id}} \cdot \frac{T_{id}}{\tau} = \frac{1.2}{2.2098} \cdot \frac{457.41}{2.0} \approx 124.20, \quad (5.19)$$

$$T_i^{3H} = 2.0 \cdot \tau = 2.0 \cdot 2.0 = 4.0 \text{ с}, \quad (5.20)$$

$$T_d^{3H} = 0.5 \cdot \tau = 0.5 \cdot 2.0 = 1.0 \text{ с}, \quad (5.21)$$

Метод ІМС (Internal Model Control)

Метод ІМС забезпечує робастне налаштування регулятора через параметр

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

λ , що визначає бажану швидкість замкненої системи. При $\lambda = 0.2 \cdot T_{id}$:

$$K_p^{IMC} = \frac{T_{id}}{K_{id} \cdot (\lambda + \tau)} = \frac{457.41}{2.2098 \cdot (91.48 + 2.0)} \approx 2.21, \quad (5.22)$$

$$T_i^{IMC} = T_{id} = 457.41 \text{ с}, \quad (5.23)$$

$$T_d^{IMC} = \frac{\tau}{2} = \frac{2.0}{2} = 1.0 \text{ с}, \quad (5.24)$$

Зведена порівняльна таблиця результатів аналітичного розрахунку та реальних параметрів регулятора наведена у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Порівняння параметрів PID-регулятора

Метод розрахунку	K _p	T _i , с	T _d , с
Циглера-Нікольса	124.20	4.00	1.00
ІМС ($\lambda=0.2 \cdot T$)	2.21	457.41	1.00
Реальні (М172, експериментально)	5.00	15.00	1.00

Аналіз результатів таблиці 5.2 показує суттєве розходження між аналітично розрахованими та реально застосованими параметрами регулятора. Метод Циглера-Нікольса дає надмірно велике значення $K_p = 124.20$, що є характерним для даного методу при малому відношенні $\tau/T_{id} = 2.0/457.41 \approx 0.004$ - значення, за якого метод розроблявся для суттєво інших умов. Метод ІМС дає прийнятне значення $K_p = 2.21$, однак надмірно великий час інтегрування $T_i = 457.41$ с призводить до неприйнятно повільного усунення статичної похибки.

Зазначені обмеження класичних аналітичних методів зумовлені тим, що ідентифікована модель $W_{id}(s)$ описує динаміку замкненої системи, а не розімкненого об'єкта, для якого розроблені формули Циглера-Нікольса та ІМС. Крім того, реальний об'єкт керування має нелінійні характеристики (обмеження виходу регулятора 18–100%, нелінійний характер теплообміну), які не враховуються лінійними методами розрахунку.

З урахуванням наведених обмежень параметри PID-регулятора були визначені експериментально методом послідовного наближення безпосередньо в середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC із спостереженням перехідного процесу в реальному часі через панель оператора ET6. Підібрані параметри $K_p = 5.0$, $T_i = 15.0$ с, $T_d = 1.0$ с забезпечують задовільні показники якості перехідного процесу, що підтверджується результатами аналізу, наведеними у підрозділі 5.4.

5.4 Перехідний процес замкненої системи

Аналіз перехідного процесу замкненої системи керування нагріванням резервуара Є-1 виконано на основі експериментальних даних, зареєстрованих модулем DataLogger контролера M172. Перехідний процес охоплює повний цикл від початкової температури $T_{\text{навк}} = 20.0^\circ\text{C}$ до усталеного режиму підтримання уставки $T_{\text{sp}} = 49.5^\circ\text{C}$ та відображає реальну поведінку замкненої системи з PID-регулятором в умовах роботи лабораторного стенда.

Графік перехідного процесу наведено на рисунку 5.6.

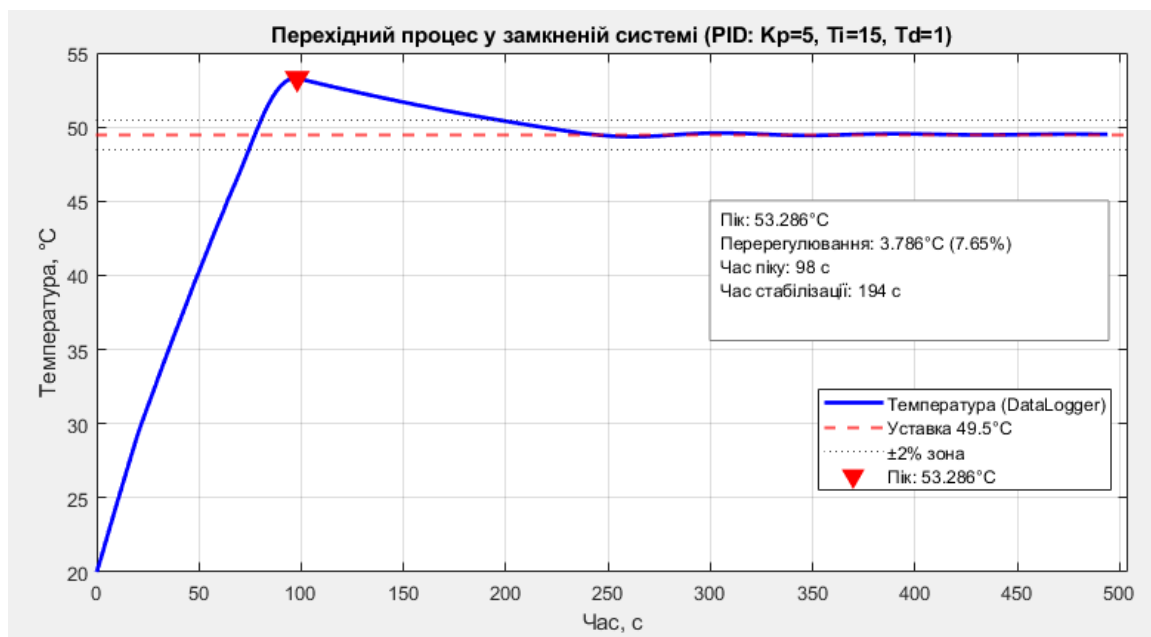


Рисунок 5.6 - Перехідний процес замкненої системи

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На графіку виділено три характерні фази:

- фаза інтенсивного нагріву (0–98 с): PID-регулятор утримує вихідний сигнал на рівні ~85–100%, забезпечуючи максимально можливу швидкість нагріву об'єкта;

- фаза перерегулювання (98–194 с): температура перевищує уставку внаслідок накопиченої інтегральної складової регулятора (integral windup), після чого PID знижує потужність нагрівача до мінімального обмеження 18% і повертає температуру до зони $\pm 2\%$;

- фаза стабілізації (194–494 с): PID-регулятор підтримує температуру в зоні допуску $\pm 2\%$ від уставки з вихідним сигналом ~21–23%.

Показники якості перехідного процесу визначені відповідно до стандартних критеріїв оцінки систем автоматичного керування та наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Показники якості перехідного процесу

Показник	Позначення	Значення
Пікова температура	$T_{\max}$	53.286°C
Абсолютне перерегулювання	$\sigma, ^\circ\text{C}$	3.786°C
Відносне перерегулювання	$\sigma, \%$	7.65%
Час досягнення піку	$t_{\text{пik}}$	98 с
Час стабілізації ($\pm 2\%$)	$t_{\text{ст}}$	194 с
Усталене значення	$T_{\text{уст}}$	49.5°C
Статична похибка	$e_{\text{ст}}$	0°C

Абсолютне перерегулювання визначається як:

$$\sigma = T_{\max} - T_{\text{sp}} = 53.286 - 49.5 = 3.786^\circ\text{C}. \quad (5.25)$$

Відносне перерегулювання:

$$\sigma\% = \frac{T_{\max} - T_{\text{sp}}}{T_{\text{sp}}} \cdot 100\% = \frac{3.786}{49.5} \cdot 100\% \approx 7.65\%. \quad (5.26)$$

Час стабілізації визначається як момент часу, після якого відхилення температури від уставки не перевищує $\pm 2\%$:

$$|T(t) - T_{sp}| \leq 0.02 \cdot T_{sp} = 0.02 \cdot 49.5 = 0.99^\circ\text{C}, \quad \forall t \geq t_{\text{ст}}. \quad (5.27)$$

Отримане відносне перерегулювання $\sigma = 7.65\%$ знаходиться в межах допустимих значень для теплових об'єктів керування ($\sigma \leq 10\text{--}15\%$), що свідчить про задовільну якість налаштування PID-регулятора. Статична похибка регулювання в усталеному режимі дорівнює нулю завдяки наявності інтегральної складової у законі керування (5.15).

Динаміка вихідного сигналу PID-регулятора reg1_Out та похибки регулювання reg1_Error протягом перехідного процесу наведена на рисунку 5.7.

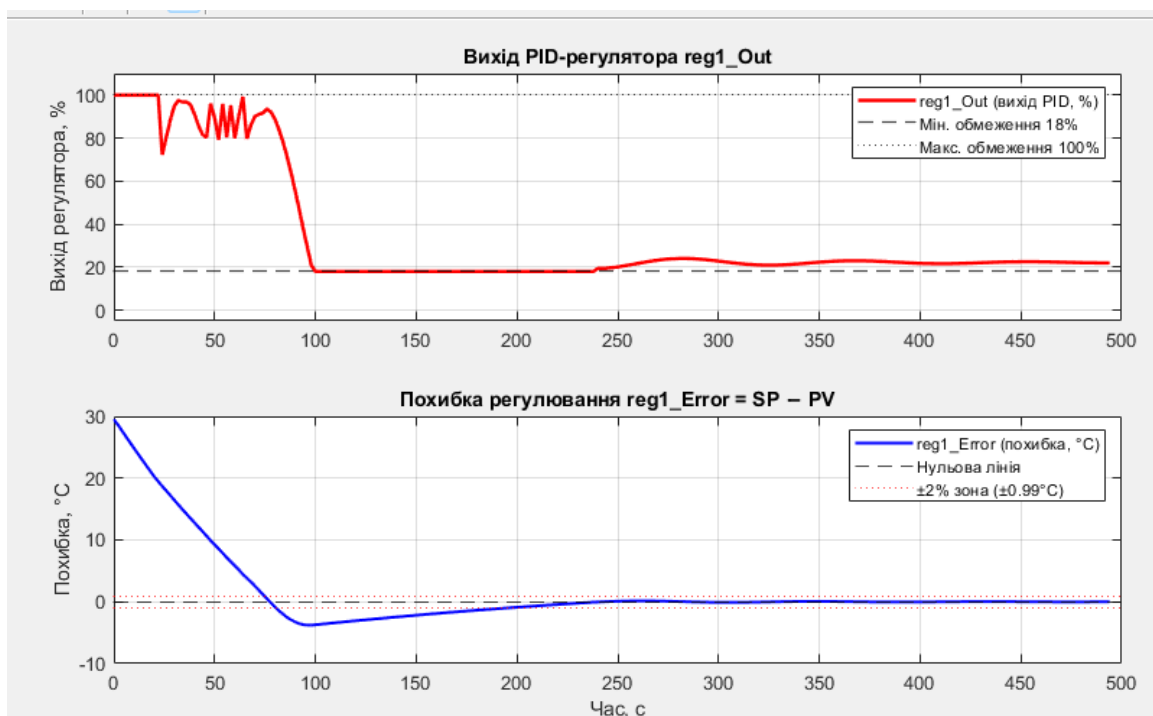


Рисунок 5.7 - Профіль PID-регулятора

З графіку видно, що у фазі інтенсивного нагріву регулятор працює в режимі насичення ($u \approx 100\%$), після досягнення піку різко знижує потужність до мінімального обмеження $u_{\min} = 18\%$, а в усталеному режимі стабілізується на рівні $\sim 22\%$, що відповідає балансу між підведеним теплом та тепловими втратами об'єкта в навколишнє середовище.

Схема замкненої системи керування, реалізована у середовищі MATLAB Simulink, наведена на рисунку 5.8.

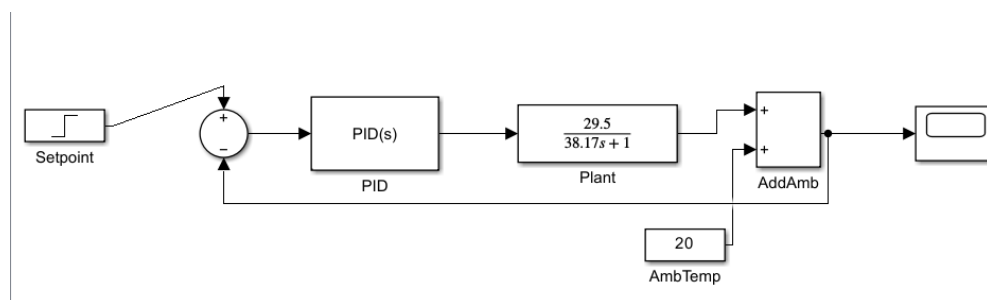


Рисунок 5.8 - Схема Simulink

Схема містить такі функціональні блоки: джерело задавального впливу (Setpoint), суматор зворотного зв'язку (Sum), PID-регулятор (PID(s)) з параметрами $K_p = 5.0$, $T_i = 15.0$ с, $T_d = 1.0$ с, передавальна функція об'єкта нагрівання (Plant) $W_{\text{МНК}}(s) = 29.5/(38.17 \cdot s + 1)$, блок додавання початкової температури (AddAmb) та блок відображення (Scope).

5.5 Частотний аналіз об'єкта нагрівання

Частотний аналіз виконано для оцінки динамічних характеристик об'єкта нагрівання та запасів стійкості замкненої системи керування. Аналіз базується на передавальній функції об'єкта, отриманій методом МНК у підрозділі 5.2:

$$W_{\text{МНК}}(s) = \frac{29.5}{38.17 \cdot s + 1}. \quad (5.28)$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) об'єкта визначається як:

$$A(\omega) = \frac{K_{\text{eff}}}{\sqrt{T_{\text{eff}}^2 \cdot \omega^2 + 1}} = \frac{29.5}{\sqrt{38.17^2 \cdot \omega^2 + 1}}. \quad (5.29)$$

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) об'єкта:

$$\varphi(\omega) = -\arctg(T_{\text{eff}} \cdot \omega) = -\arctg(38.17 \cdot \omega), \quad (5.30)$$

де ω - кутова частота, рад/с.

Діаграма Бode об'єкта нагрівання наведена на рисунку 5.9.

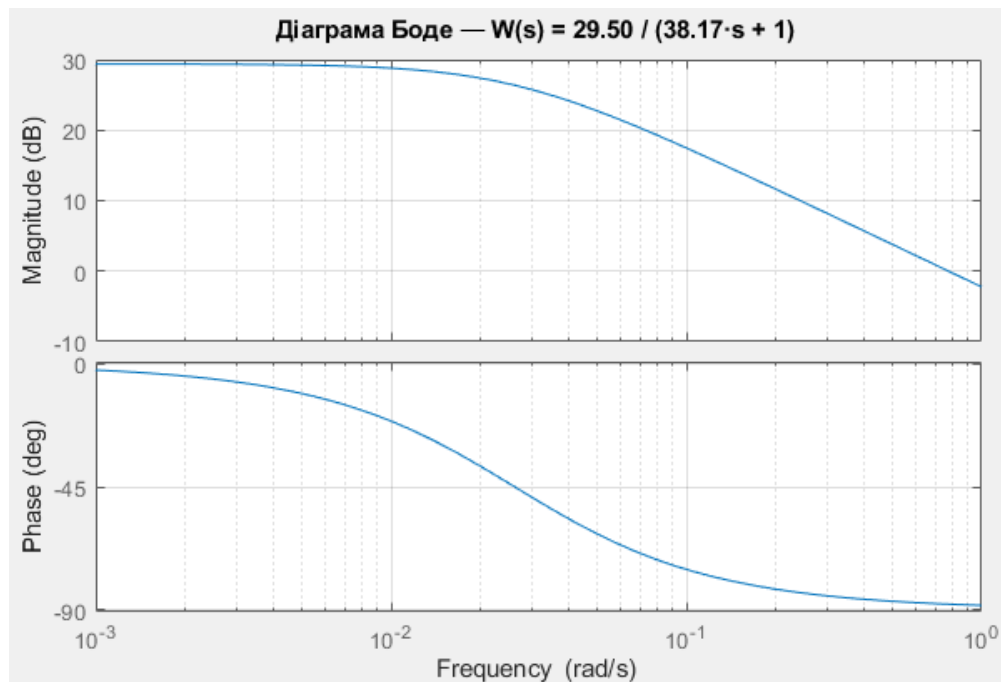


Рисунок 5.9 – Діаграма Бode

АЧХ показує, що на низьких частотах ($\omega \rightarrow 0$) підсилення об'єкта становить:

$$A(0) = 20 \cdot \lg(K_{\text{eff}}) = 20 \cdot \lg(29.5) \approx 29.4 \text{ дБ}, \quad (5.31)$$

Гранична частота об'єкта (частота зрізу -3 дБ):

$$\omega_{\text{гр}} = \frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{38.17} \approx 0.026 \text{ рад/с}, \quad (5.32)$$

Запаси стійкості замкненої системи визначені за допомогою функції margin пакету MATLAB та наведені у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Запаси стійкості замкненої системи

Характеристика	Значення
Запас по амплітуді	∞ дБ
Запас по фазі	91.94°
Частота зрізу по фазі	0.7724 рад/с

Нескінченний запас по амплітуді є характерною властивістю аперіодичної ланки першого порядку - така система не має частоти фазового зрізу (фаза ніколи не досягає -180°), що гарантує абсолютну стійкість розімкненої системи. Запас по фазі 91.94° значно перевищує мінімально допустиме значення $30-45^\circ$, що

свідчить про високу робастність замкненої системи керування до параметричних збурень та запізнення сигналів.

5.6 Верифікація математичної моделі

Верифікація математичної моделі об'єкта нагрівання виконана шляхом порівняння результатів числового моделювання з експериментальними даними DataLogger контролера M172. Метою верифікації є підтвердження адекватності дискретної моделі (5.2) реальному технологічному процесу.

Верифікація здійснювалась у два етапи. На першому етапі реальний профіль вихідного сигналу регулятора $U(k) = g_arrOutLog(k)$ підставлявся у різницеве рівняння моделі з кроком $T_0 = 0.01$ с. Оскільки DataLogger реєструє U з кроком $dt = 2$ с, між суміжними записами виконувалась лінійна інтерполяція:

$$U_{interp}(t) = U(k) + \frac{U(k+1) - U(k)}{dt} \cdot (t - t_k), \quad t_k \leq t < t_{k+1}. \quad (5.33)$$

На другому етапі розраховані значення температури моделі зіставлялись з експериментальними даними в моменти реєстрації DataLogger. Абсолютна похибка верифікації:

$$\Delta T(k) = T_{DataLogger}(k) - T_{модель}(k). \quad (5.34)$$

Результати верифікації наведені на рисунку 5.1. Кількісні показники верифікації наведені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Показники верифікації математичної моделі

Показник	Значення
Максимальна абсолютна похибка	1.41°C
Середньоквадратичне відхилення	0.82°C
Кількість точок порівняння	248
Крок реєстрації DataLogger	2 с
Крок моделювання	0.01 с

Виявлена похибка 1.41°C обумовлена обмеженням дискретності реєстрації сигналу керування - між суміжними записами DataLogger (інтервал 2 с) реальний вихідний сигнал $reg1_Out$ змінюється нелінійно відповідно до дискретного PID-

закону з кроком 0.01 с, тоді як лінійна інтерполяція вносить систематичну похибку апроксимації. Зменшення кроку реєстрації DataLogger до 0.1–0.5 с дозволило б знизити похибку верифікації до рівня менше 0.1°C.

Незважаючи на наявну похибку, модель коректно відтворює всі якісні характеристики перехідного процесу: фазу інтенсивного нагріву, величину та момент перерегулювання, динаміку стабілізації PID-регулятора в усталеному режимі. Це підтверджує адекватність розробленої математичної моделі та її придатність для аналізу та синтезу системи керування нагріванням резервуара Є-1 на базі контролера M172 [4].

Висновки до розділу

Виконано математичне моделювання об'єкта нагрівання, ідентифіковано передавальну функцію, розраховано параметри PID-регулятора та верифіковано модель шляхом порівняння з експериментальними даними у середовищі Matlab.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6 РОЗРОБКА НМІ ПАНЕЛІ ТА ВВЕДЕННЯ СИСТЕМИ В ЕКСПЛУАТАЦІЮ

6.1 Розробка інтерфейсу панелі оператора ET6

Інтерфейс оператора розроблено у середовищі Vijeo Designer Basic 1.2.1 для панелі Harmony ET6 (HMIET6500). Проект містить дві сторінки - головну (Main Page) та сторінку конфігурації (Config) [6].

Головна сторінка (Main Page)

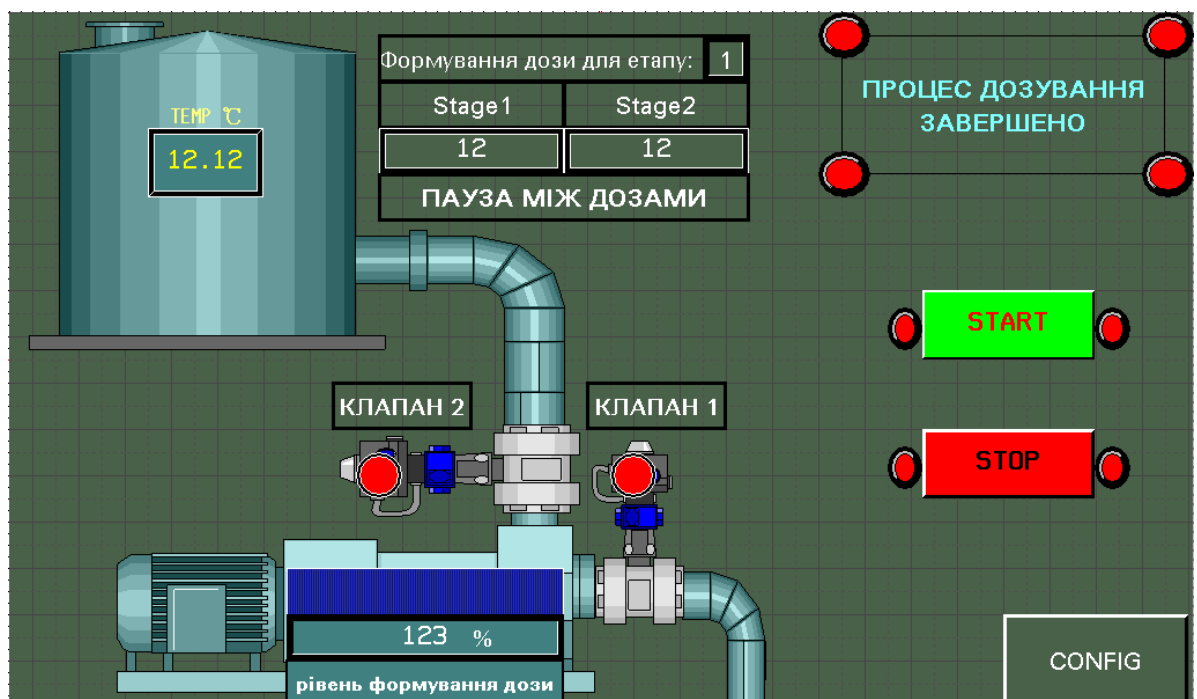


Рисунок 6.1- Головна сторінка панелі оператора ET6

Головна сторінка відображає поточний стан технологічного процесу в режимі реального часу та містить такі елементи: числовий індикатор поточної температури рідини (TEMP °C); таблиця лічильників доз для Stage 1 та Stage 2; індикатор поточного етапу процесу; індикатор стану паузи між дозами (ПАУЗА МІЖ ДОЗАМИ); індикатор позиції поршня у відсотках (рівень формування дози); індикатори стану клапанів K1 та K2; текстовий індикатор завершення процесу (ПРОЦЕС ДОЗУВАННЯ ЗАВЕРШЕНО); кнопки START та STOP для керування процесом; кнопка переходу до сторінки конфігурації (CONFIG).

Сторінка конфігурації (Config)

Встановити ліміт доз для етапів		Мінімальна температура для старту дозування	1234
Stage1	Stage2	Налаштування PID регулятора	
12	12	Задана температура для врегулювання PID регулятором	1234
HMI CONTROL 		коефіцієнт пропорційності - rKp	12
Симуляція On/Off 		час інтегрування (с) - uiTi	12
Main Page 		час диференціювання (с) - uiTd	12

Рисунок 6.2 - Сторінка конфігурації панелі оператора ET6

Доступ до сторінки конфігурації захищено паролем - при натисканні кнопки CONFIG оператору відображається діалог введення логіна та пароля (логін: NAFTA, пароль: 1111). Такий підхід моделює реальну промислову практику розмежування прав доступу - оперативне керування доступне будь-якому оператору з головної сторінки, тоді як зміна технологічних параметрів доступна лише авторизованому персоналу.

Сторінка конфігурації містить поля введення та відображення таких параметрів: ліміти кількості доз для Stage 1 та Stage 2; перемикач режиму керування HMI Control (пріоритет панелі або фізичних кнопок); перемикач режиму симуляції (Simulation On/Off); мінімальна температура для старту дозування; уставка температури для PID-регулятора; коефіцієнт пропорційності rKp; час інтегрування uiTi (с); час диференціювання uiTd (с). Кнопка Main Page забезпечує повернення на головну сторінку, а поруч Logout – дозволяє розлогітись користувачу після завершення потрібних налаштувань та подальшого безпечного користування.

6.2 Змінні панелі та налаштування підключення

Змінні панелі

Для обміну даними між панеллю ET6 та контролером M172 у проєкті Vijeo Designer Basic створено 20 змінних типу External, прив'язаних до відповідних Modbus-регістрів контролера з групи Status Variables.

	Name	Data Type	Data Source	Scan Group	Device Address
1	 complete	BOOL	External	ModbusEquip...	%MW8965:X0
2	 dose	INT	External	ModbusEquip...	%MW8963
3	 dose2	INT	External	ModbusEquip...	%MW8969
4	 DoseLimit_1	INT	External	ModbusEquip...	%MW8972
5	 DoseLimit_2	INT	External	ModbusEquip...	%MW8973
6	 HMI_Control_st	BOOL	External	ModbusEquip...	%MW8980:X0
7	 k1	BOOL	External	ModbusEquip...	%MW8964:X0
8	 K2_st	BOOL	External	ModbusEquip...	%MW8981:X0
9	 Kp_reg_st	REAL	External	ModbusEquip...	%MW8976
10	 pause	BOOL	External	ModbusEquip...	%MW8966:X0
11	 piston	REAL	External	ModbusEquip...	%MW8967
12	 rTez_st	REAL	External	ModbusEquip...	%MW8983
13	 simulation_st	BOOL	External	ModbusEquip...	%MW8982:X0
14	 stage	INT	External	ModbusEquip...	%MW8960
15	 start	BOOL	External	ModbusEquip...	%MW8961:X0
16	 stop	BOOL	External	ModbusEquip...	%MW8962:X0
17	 Td_reg_st	UINT	External	ModbusEquip...	%MW8979
18	 TE_sp	REAL	External	ModbusEquip...	%MW8970
19	 Temp_to_start_st	REAL	External	ModbusEquip...	%MW8974
20	 Ti_reg_st	UINT	External	ModbusEquip...	%MW8978

Рисунок 6.3 - Таблиця змінних проєкту Vijeo Designer Basic

Усі змінні мають джерело даних External та належать до групи сканування ModbusEquip, що забезпечує їх циклічне оновлення по протоколу Modbus TCP/IP. Адреси змінних відповідають адресам Status Variables контролера у діапазоні %MW8960–%MW8983.

Налаштування підключення панелі ET6.

У розділі Equipment Configuration середовища Vijeo Designer Basic налаштовано підключення до контролера M172 з такими параметрами: IP-адреса контролера - 192.168.0.202, порт - 502 (стандартний порт Modbus TCP), Unit ID -

1, протокол - TCP, режим адресації - 1-based (Unity Quantum), порядок слів для змінних типу REAL - Low word first, довжина кадру - Custom 120 байт.

Рисунок 6.4 - Вікно Equipment Configuration у Vijeo Designer Basic

Параметр Double Word word order - Low word first є критичним для коректного відображення змінних типу REAL на панелі, оскільки визначає порядок передачі двох 16-бітних Modbus-регістрів що складають 32-бітне число з плаваючою комою.

Налаштування IP контролера M172.

IP-адреса та мережеві параметри контролера M172 налаштовуються через системні (BIOS) параметри у середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC. Встановлено такі значення: IP-адреса - 192.168.0.202 (Ip_1_ETH_PI=192, Ip_2_ETH_PI=168, Ip_3_ETH_PI=0, Ip_4_ETH_PI=202), порт - 502 (Port_ETH_PI=502), шлюз за замовчуванням - 192.168.0.1.

45	Port_ETH_PI	502
46	Ip_1_ETH_PI	192
47	Ip_2_ETH_PI	168
48	Ip_3_ETH_PI	0
49	Ip_4_ETH_PI	202
50	DefGtwy_1_ETH_PI	192
51	DefGtwy_2_ETH_PI	168
52	DefGtwy_3_ETH_PI	0
53	DefGtwy_4_ETH_PI	1

Рисунок 6.5 - Налаштування мережевих параметрів контролера M172

6.3 Дисплей контролера M172

Контролер Modicon M172 оснащений вбудованим монохромним дисплеєм, який програмується безпосередньо у середовищі EcoStruxure Machine Expert – HVAC. Для відображення основних технологічних параметрів без необхідності звертатись до панелі ET6 розроблено екран дисплея контролера з трьома інформаційними полями.

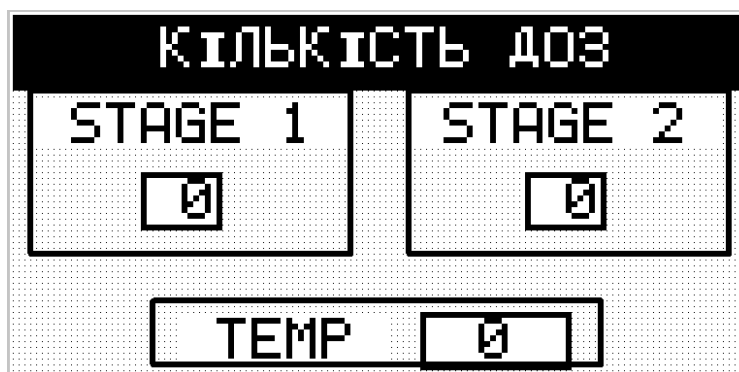


Рисунок 6.6 - Екран вбудованого дисплея контролера M172

Екран містить заголовок "КІЛЬКІСТЬ ДОЗ" та відображає три параметри: поточний лічильник доз Stage 1, поточний лічильник доз Stage 2 та поточне значення температури рідини TEMP. Такий мінімалістичний інтерфейс дозволяє оператору оперативно контролювати хід процесу безпосередньо на контролері без використання панелі оператора.

6.4 Завантаження та перевірка роботи системи

Завантаження керуючої програми на контролер M172 здійснюється по інтерфейсу Ethernet з середовища EcoStruxure Machine Expert – HVAC після успішної компіляції проекту. Завантаження проекту Vijeo Designer Basic на панель HMIET6500 виконується аналогічно - по інтерфейсу Ethernet з середовища Vijeo Designer Basic.

Для перевірки роботи системи використано вбудований осцилограф середовища EcoStruxure Machine Expert – HVAC, що дозволяє відображати зміну значень змінних у реальному часі в графічному вигляді. Для тестування встановлено ліміт доз 3 для кожного етапу та виведено на осцилограф три змінні:

g_rTEz (температура, жовтий), DoseCounter (лічильник доз Stage 1, блакитний), DoseCounter2 (лічильник доз Stage 2, рожевий).

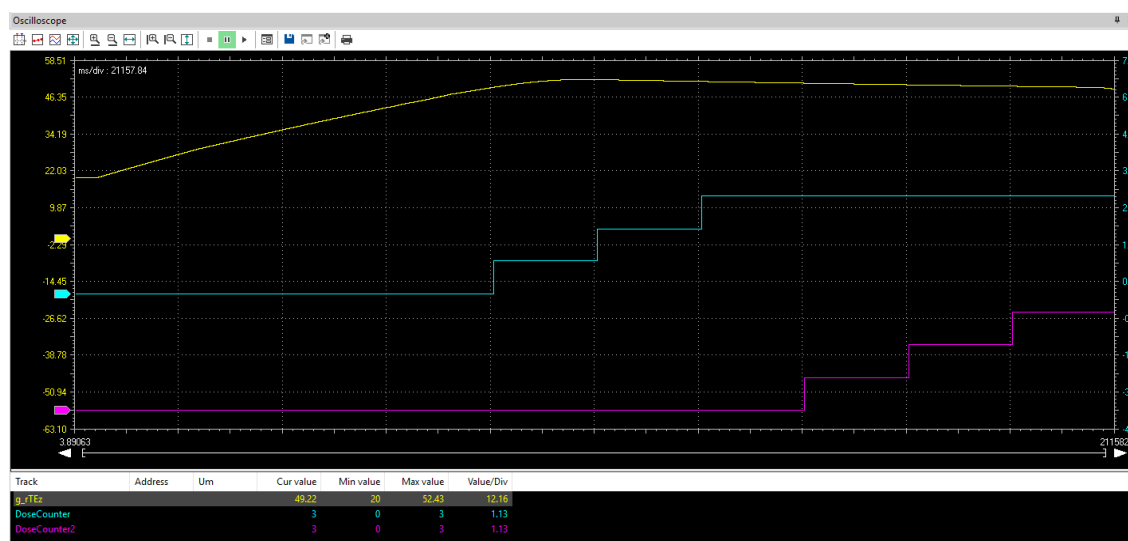


Рисунок 6.7 - Осцилограма роботи системи

Осцилограма підтверджує коректну роботу всіх функціональних блоків системи. На графіку температури (жовта крива) чітко видно фазу нагріву від початкового значення 20°C до робочої температури з перерегулюванням до максимуму 52,43°C та подальшою стабілізацією PID-регулятором на рівні ~49,5°C. Ступінчасті криві лічильників доз (DoseCounter - блакитний, DoseCounter2 - рожевий) відображають послідовне накопичення доз по 3 для кожного етапу з характерними часовими паузами між дозами. Лічильник Stage 2 починає відлік після завершення Stage 1, що підтверджує коректну логіку переходу між стадіями (CurrentStage := 2).

Після завантаження обох проєктів виконано комплексну перевірку роботи системи на реальному обладнанні. Встановлено що контролер M172 та панель ET6 успішно обмінюються даними по протоколу Modbus TCP/IP. Перевірено коректність роботи обох сторінок панелі, захист паролем сторінки конфігурації, функціонування кнопок START та STOP, відображення всіх технологічних параметрів. Всі параметри що задаються з панелі - уставки температури, параметри PID-регулятора, ліміти доз - коректно передаються до контролера та впливають на роботу керуючої програми.

Висновки до розділу

В даному розділі розроблено інтерфейс панелі оператора ЕТ6 з захистом доступу, налаштовано підключення по протоколу Modbus TCP/IP та виконано завантаження проєктів на реальне обладнання з підтвердженням коректності роботи системи.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розроблено апаратне та методичне забезпечення лабораторного стенда на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M172 та панелі оператора Harmony ET6 (HMIET6500), що моделює автоматизований технологічний процес нагрівання рідини з двостадійним дозуванням під керуванням PID-регулятора.

У ході виконання роботи отримано такі результати:

Розроблено функціональну схему автоматизації та схему підключення стенда. Обрано та обґрунтовано склад технічних засобів автоматизації на базі обладнання Schneider Electric.

Розроблено керуючу програму контролера що складається з семи програмних модулів мовами ST та FBD відповідно до стандарту МЕК 61131-3, включаючи основну логіку керування двостадійним дозуванням, PID-регулятор температури на базі блока PIDAdvanced, програмні імітаційні моделі нагрівача та поршневого дозатора, модуль реєстрації температури та модулі синхронізації з панеллю оператора.

Виконано математичне моделювання об'єкта нагрівання у середовищі Matlab - ідентифіковано передавальну функцію об'єкта, розраховано параметри PID-регулятора, побудовано діаграму Боде та перехідний процес замкненої системи.

Розроблено інтерфейс панелі оператора ET6 у середовищі Vijeo Designer Basic з двома сторінками - головною сторінкою моніторингу та захищеною паролем сторінкою конфігурації технологічних параметрів.

Виконано завантаження розроблених проєктів на реальне обладнання та проведено комплексну перевірку роботи системи, що підтвердила коректність реалізованих алгоритмів керування.

Практична цінність роботи полягає у створенні повнофункціонального лабораторного стенда що може використовуватись у навчальному процесі для

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підготовки фахівців у галузі автоматизації. Отримані навички програмування ПЛК, налаштування PID-регуляторів та розробки HMI-інтерфейсів є безпосередньо затребуваними у фармацевтичній, харчовій та хімічній промисловості.

Подальший розвиток стенда може включати реалізацію віддаленого доступу до системи керування через мережу Tailscale, підключення реального технологічного обладнання замість програмної симуляції, а також розширення функціональності HMI-інтерфейсу.

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Когутяк М. І., Лагойда А. І. Мікропроцесорні технічні засоби автоматизації. Ч. 1. Програмовані логічні контролери: навчальний посібник. Івано-Франківськ: Факел, 2013. 236 с.
2. Ельперін І. В. Промислові контролери: навчальний посібник. К.: НУХТ, 2003. 320 с.
3. Програмований логічний контролер Modicon M171/M172. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product-range/62420-програмований-логічний-контролер-modicon-m171-m172/#products> (дата звернення: 22.05.2026).
4. Когутяк М. І., Лагойда А. І., Майкович Є. П., Джурич А. В., Строган С. М. Мікроконтролери та програмовані логічні контролери. Частина 1: Лабораторний комплекс по дослідженню контролера МИК-51: лабораторний практикум. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. 61 с.
5. Когутяк М. І., Когуч Я. Р., Лещій Р. М. та ін. Автоматизація неперервних технологічних процесів в нафтовій та газовій промисловості: навч. посіб. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2006. 286 с.
6. Дранчук М. М., Фешанич Л. І. Проектування систем автоматизації: практикум. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. 138 с.

ДОДАТКИ

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А1
Блок керування Stage 1

```
// Основний код програми для Stage 1
IF StartButton = TRUE AND CurrentStage = 1 AND g_rTEz >= Temp_to_start THEN
  // Фаза Заповнення
  IF FillingPhase = TRUE THEN
    K1_DrainValve := FALSE; // Закрити зливний клапан
    K2_FillValve := TRUE;   // Відкрити клапан заповнення
    MotorDirection := FALSE; // Рух вліво

    // Ввімкнути мотор, якщо він не був зупинений на D1
    IF NOT MotorStoppedAtD THEN
      M_PistonMotor := TRUE;
    END_IF;

    TimerFilling(IN := TRUE, PT := 6000); // 6 секунд - активація таймера на
    заповнення

    IF D1_PositionSensor = TRUE AND NOT DoseCounted THEN // Якщо
    поршень досяг потрібної позиції
      DoseCounter := DoseCounter + 1; // Збільшити лічильник доз
      DoseCounted := TRUE; // Фіксація, що доза була врахована
      M_PistonMotor := FALSE; // Зупинити мотор (рух поршня завершено)
      MotorStoppedAtD := TRUE; // Фіксація, що мотор зупинився на D1
    END_IF;

    IF D1_PositionSensor = FALSE THEN

      DoseCounted := FALSE; // Скидання прапора, коли поршень залишає позицію
      D1
    END_IF;

    IF TimerFilling.Q THEN
      K2_FillValve := FALSE; // Закрити клапан заповнення
      M_PistonMotor := FALSE; // Зупинити мотор
      TimerFilling(IN := FALSE); // Скидання таймера після завершення
      FillingPhase := FALSE; // Завершення фази заповнення
      DrainingPhase := TRUE; // Початок фази зливу
      MotorStoppedAtD := FALSE; // Скидання прапора зупинки мотора
    END_IF;
  END_IF;

  // Фаза Зливу
```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

Продовження додатку А1

```
IF DrainingPhase = TRUE THEN
    K1_DrainValve := TRUE;    // Відкрити зливний клапан
    MotorDirection := TRUE;    // Рух вправо
    M_PistonMotor := TRUE;    // Ввімкнути мотор для руху поршня вправо
    TimerDraining(IN := TRUE, PT := 5000); // 5 секунд - активація таймера на
    злив

    IF D3_PositionSensor = TRUE THEN // Якщо поршень досяг кінцевої позиції
        M_PistonMotor := FALSE; // Зупинити мотор (рух поршня завершено)
    END_IF;

    IF TimerDraining.Q THEN
        K1_DrainValve := FALSE; // Закрити зливний клапан
        M_PistonMotor := FALSE; // Зупинити мотор
        TimerDraining(IN := FALSE); // Скидання таймера після завершення
        DrainingPhase := FALSE; // Завершення фази зливу
        PausePhase := TRUE;    // Початок фази паузи
    END_IF;
END_IF;

// Фаза Пауза
IF PausePhase = TRUE THEN
    TimerPause(IN := TRUE, PT := 10000); // 10 секунд - активація таймера на
    паузу

    IF TimerPause.Q THEN
        TimerPause(IN := FALSE);    // Скидання таймера після завершення
        PausePhase := FALSE;        // Завершення фази паузи
        FillingPhase := TRUE;        // Початок нового циклу заповнення

        // Перевірка на завершення процесу після паузи
        IF DoseCounter = DoseLimit_1 THEN
            K1_DrainValve := FALSE;
            K2_FillValve := FALSE;
            M_PistonMotor := FALSE;
            CurrentStage := 2;    // Перехід на наступний етап
            //DoseCounter := 0;    // Скидання лічильника доз
        END_IF;
    END_IF;
END_IF;
END_IF;
```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А2
Блок керування Stage 2

```
// Основний код програми для Stage 2
IF StartButton = TRUE AND CurrentStage = 2 AND g_rTEz >= Temp_to_start THEN
  // Фаза Заповнення
  IF FillingPhase = TRUE THEN
    K1_DrainValve := FALSE; // Закрити зливний клапан
    K2_FillValve := TRUE;   // Відкрити клапан заповнення
    MotorDirection := FALSE; // Рух вліво

    // Ввімкнути мотор, якщо він не був зупинений на D1
    IF NOT MotorStoppedAtD THEN
      M_PistonMotor := TRUE;
    END_IF;

    TimerFilling(IN := TRUE, PT := 6000); // 6 секунд - активація таймера на
    заповнення

    IF D2_PositionSensor = TRUE AND NOT DoseCounted THEN // Якщо
    поршень досяг потрібної позиції
      DoseCounter2 := DoseCounter2 + 1; // Збільшити лічильник доз
      DoseCounted := TRUE; // Фіксація, що доза була врахована
      M_PistonMotor := FALSE; // Зупинити мотор (рух поршня завершено)
      MotorStoppedAtD := TRUE; // Фіксація, що мотор зупинився на D1
    END_IF;

    IF D2_PositionSensor = FALSE THEN
      DoseCounted := FALSE; // Скидання прапора, коли поршень залишає
      позицію D1
    END_IF;

    IF TimerFilling.Q THEN
      K2_FillValve := FALSE; // Закрити клапан заповнення
      M_PistonMotor := FALSE; // Зупинити мотор
      TimerFilling(IN := FALSE); // Скидання таймера після завершення
      FillingPhase := FALSE; // Завершення фази заповнення
      DrainingPhase := TRUE; // Початок фази зливу
      MotorStoppedAtD := FALSE; // Скидання прапора зупинки мотора
    END_IF;
  END_IF;

  // Фаза Зливу
  IF DrainingPhase = TRUE THEN
```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Продовження додатку А2

```
K1_DrainValve := TRUE;    // Відкрити зливний клапан
MotorDirection := TRUE;    // Рух вправо
M_PistonMotor := TRUE;    // Ввімкнути мотор для руху поршня вправо
TimerDraining(IN := TRUE, PT := 5000); // 5 секунд - активація таймера на
злив

IF D3_PositionSensor = TRUE THEN // Якщо поршень досяг кінцевої позиції
    M_PistonMotor := FALSE; // Зупинити мотор (рух поршня завершено)
END_IF;

IF TimerDraining.Q THEN
    K1_DrainValve := FALSE; // Закрити зливний клапан
    M_PistonMotor := FALSE; // Зупинити мотор

    TimerDraining(IN := FALSE); // Скидання таймера після завершення
    DrainingPhase := FALSE; // Завершення фази зливу
    PausePhase := TRUE;    // Початок фази паузи
END_IF;
END_IF;

// Фаза Пауза
IF PausePhase = TRUE THEN
    TimerPause(IN := TRUE, PT := 10000); // 10 секунд - активація таймера на
паузу

IF TimerPause.Q THEN
    TimerPause(IN := FALSE);    // Скидання таймера після завершення
    PausePhase := FALSE;        // Завершення фази паузи
    FillingPhase := TRUE;        // Початок нового циклу

    // Перевірка на завершення процесу після паузи
    IF DoseCounter2 = DoseLimit_2 THEN
        K1_DrainValve := FALSE;
        K2_FillValve := FALSE;
        ProcessComplete := TRUE;
        CurrentStage := 3;    // Перехід на наступний етап
        //DoseCounter := 0;    // Скидання лічильника доз
    END_IF;
END_IF;
END_IF;
END_IF;
```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

Додаток АЗ
Блок аварійної зупинки

```
// Блок логіки аварійної зупинки
IF StopButton = TRUE THEN
  StartButton := FALSE;    // Блокування кнопки старт
  start_st := FALSE;       // Блокування кнопки старт
  K1_DrainValve := FALSE;  // Закриття всіх клапанів
  K2_FillValve := FALSE;
  M_PistonMotor := FALSE;  // Зупинка мотору
  TimerFilling(IN := FALSE); // Скидання всіх таймерів
  TimerDraining(IN := FALSE);
  TimerPause(IN := FALSE);

  // Скидання всіх змінних процесу
  FillingPhase := TRUE;
  DrainingPhase := FALSE;
  PausePhase := FALSE;
  MotorStoppedAtD := FALSE;
  DoseCounted := FALSE;
  DoseCounter := 0;
  DoseCounter2 := 0;
  CurrentStage := 1;
  PistonPosition := 0;
  ProcessComplete := FALSE;
END_IF;
```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А4 **Програма HeatingSimulation**

PROGRAM HeatingSimulation

VAR

AmbientTemp : REAL := 20.0;

InitDone : BOOL := FALSE;

P_max : REAL := 200; (* макс потужність нагрівача (ум. одиниці) *)

ThermalMass : REAL := 400; (* теплова ємність об'єкта *)

k_cool : REAL := 1.5; (* коефіцієнт тепловіддачі *)

T0 : REAL := 0.01; (* крок моделювання (с) *)

END_VAR

IF NOT InitDone OR StopButton THEN

g_rTEz := AmbientTemp;

InitDone := TRUE;

END_IF;

IF StartButton AND NOT ProcessComplete THEN

g_rTEz := g_rTEz + (T0 / ThermalMass) *

((reg1_Out / 100.0) * P_max - k_cool * (g_rTEz - AmbientTemp));

ELSE

IF g_rTEz > AmbientTemp THEN

g_rTEz := g_rTEz - 0.002;

END_IF;

END_IF;

g_iTEz := TO_INT(g_rTEz);

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А4

Програма PistonMovementSimulation

PROGRAM PistonMovementSimulation

VAR

PistonMaxPosition : REAL := 100.0; (* Максимальна позиція поршня *)

PistonMaxPosition2 : REAL := 50.0; (* Максимальна позиція поршня Stage2 *)

PistonMinPosition : REAL := 0.0; (* Мінімальна позиція поршня *)

TotalTime_Left_Stage1 : REAL := 3000.0; (* Загальний час у мілісекундах для Stage 1 *)

TotalTime_Right_Stage1 : REAL := 3000.0; (* Загальний час у мілісекундах для Stage 1 *)

TotalTime_Left_Stage2 : REAL := 3000.0; (* Загальний час у мілісекундах для Stage 2 *)

TotalTime_Right_Stage2 : REAL := 3000.0; (* Загальний час у мілісекундах для Stage 2 *)

TimeStep : REAL := 10.0; (* Часовий крок для симуляції у мілісекундах *)

Speed_Left : REAL; (* Швидкість руху поршня вліво (зміна позиції за один крок) *)

Speed_Right : REAL; (* Швидкість руху поршня вправо (зміна позиції за один крок) *)

END_VAR

// Симуляція руху поршня для Stage 1

IF CurrentStage = 1 THEN

// Обчислення швидкості для Stage 1

Speed_Left := (PistonMaxPosition - PistonMinPosition) / (TotalTime_Left_Stage1 / TimeStep);

Speed_Right := (PistonMaxPosition - PistonMinPosition) / (TotalTime_Right_Stage1 / TimeStep);

IF M_PistonMotor THEN

IF MotorDirection THEN

// Рух вправо (від Д1 до Д3)

PistonPosition := PistonPosition - Speed_Right;

IF PistonPosition <= PistonMinPosition THEN

PistonPosition := PistonMinPosition;

M_PistonMotor := FALSE; // Автоматична зупинка при досягненні кінцевої точки

END_IF;

ELSE

// Рух вліво (від Д3 до Д1)

PistonPosition := PistonPosition + Speed_Left;

IF PistonPosition >= PistonMaxPosition THEN

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження додатку А4

```

        PistonPosition := PistonMaxPosition;
        M_PistonMotor := FALSE; // Автоматична зупинка при досягненні
кінцевої точки
        END_IF;
        END_IF;
        END_IF;

// Оновлення стану сенсорів для Stage 1
IF PistonPosition = PistonMinPosition THEN
    D3_PositionSensor := TRUE;
    D1_PositionSensor := FALSE;
ELSIF PistonPosition = PistonMaxPosition THEN
    D1_PositionSensor := TRUE;
    D3_PositionSensor := FALSE;
ELSE
    D1_PositionSensor := FALSE;
    D3_PositionSensor := FALSE;
END_IF;
END_IF;

// Симуляція руху поршня для Stage 2
IF CurrentStage = 2 THEN
    // Обчислення швидкості для Stage 2
    Speed_Left := (PistonMaxPosition2 - PistonMinPosition) / (TotalTime_Left_Stage2
/ TimeStep);
    Speed_Right := (PistonMaxPosition2 - PistonMinPosition) /
(TotalTime_Right_Stage2 / TimeStep);

    IF M_PistonMotor THEN
        IF MotorDirection THEN
            // Рух вправо (від Д2 до Д3)
            PistonPosition := PistonPosition - Speed_Right;
            IF PistonPosition <= PistonMinPosition THEN
                PistonPosition := PistonMinPosition;
                M_PistonMotor := FALSE; // Автоматична зупинка при досягненні
кінцевої точки
            END_IF;
        ELSE
            // Рух вліво (від Д3 до Д2)
            PistonPosition := PistonPosition + Speed_Left;
            IF PistonPosition >= PistonMaxPosition2 THEN
                PistonPosition := PistonMaxPosition2;
            END_IF;
        END_IF;
    END_IF;
END_IF;

```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження додатку А4

```
        M_PistonMotor := FALSE; // Автоматична зупинка при досягненні
кінцевої точки
        END_IF;
        END_IF;
        END_IF;

// Оновлення стану сенсорів для Stage 2
IF PistonPosition = PistonMinPosition THEN
    D3_PositionSensor := TRUE;
    D2_PositionSensor := FALSE;
ELSIF PistonPosition = PistonMaxPosition2 THEN
    D2_PositionSensor := TRUE;
    D3_PositionSensor := FALSE;
ELSE
    D2_PositionSensor := FALSE;
    D3_PositionSensor := FALSE;
END_IF;
END_IF;
```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А5

Програма DataLogger

PROGRAM DataLogger

VAR

LogTimer : TON; (* Таймер інтервалу сек *)

LogIndex : INT := 1; (* Поточний номер заміру (від 1 до ...) *)

Recording : BOOL := FALSE; (* Чи йде запис *)

END_VAR

// Старт запису

IF StartButton AND NOT Recording AND LogIndex = 1 THEN

Recording := TRUE;

END_IF;

// Скидання

IF StopButton THEN

Recording := FALSE;

LogIndex := 1;

END_IF;

IF Recording AND LogIndex <= 260 THEN

LogTimer(IN := NOT LogTimer.Q, PT := 2000);

IF LogTimer.Q THEN

// Масив 1 - температура (вже існує)

g_arrTempLog[LogIndex] := g_rTEz;

// Масив 2 - вихід PID-регулятора (0..100%)

g_arrOutLog[LogIndex] := reg1_Out;

// Масив 3 - похибка PID-регулятора (SP - PV)

g_arrErrLog[LogIndex] := reg1_Error;

LogIndex := LogIndex + 1;

END_IF;

IF LogIndex > 260 THEN

Recording := FALSE;

END_IF;

END_IF;

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А6
Програма assign_sync

```

Complete_Status := ProcessComplete;
Dose_Status := DoseCounter;
Dose_Status2 := DoseCounter2;
K1_st := K1_DrainValve;
K2_st := K2_FillValve;
Pause_st := PausePhase;
PistonPos_Status := PistonPosition;
Stage_Status := CurrentStage;
rTez_st := g_rTez;
//для синхронізації кнопок HMI та внутрішніх змінних
HMI_Control := HMI_Control_st;
Kp_reg1 := Kp_reg_st;
Td_reg1 := Td_reg_st;
Ti_reg1 := Ti_reg_st;
TE_sp := TE_sp_st; //регулювання темп для PID
DoseLimit_1 := DoseLimit_1_st;
DoseLimit_2 := DoseLimit_2_st;
Temp_to_start := Temp_to_start_st; //регулювання мінімальної темп для старту
simulation := simulation_st;
//для увімкнення пріоритетного керування з HMI
IF HMI_Control THEN
    StartButton := start_st;
    StopButton := stop_st;
ELSE
    StartButton := h_bStart;
    StopButton := h_bStop;
END_IF;

```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А7
Програма Assign_p

```
IF NOT simulation THEN
    g_rTEz := TO_REAL(h_iTEz);
    h_reg1_Out := reg1_Out;
    // Прив'язка датчиків положення
    D1_PositionSensor := h_bD1;
    D2_PositionSensor := h_bD2;
    D3_PositionSensor := h_bD3;

    // Керування клапанами
    h_bKlapan1 := K1_DrainValve;
    h_bKlapan2 := K2_FillValve;

    // Логіка роботи двигуна поршня
    IF M_PistonMotor AND NOT MotorDirection THEN
        h_bMleft := TRUE;
        h_bMright := FALSE;
    ELSIF M_PistonMotor AND MotorDirection THEN
        h_bMleft := FALSE;
        h_bMright := TRUE;
    ELSE
        h_bMleft := FALSE;
        h_bMright := FALSE;
    END_IF;
END_IF;
```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток Б

Програма для розрахунків з matlab

```

%% =====
%% АНАЛІЗ СИСТЕМИ НАГРІВАННЯ З PID-РЕГУЛЯТОРОМ
%% ПЛК Schneider Electric M172 | Об'єкт: Резервуар Є-1
%% =====

clear; clc; close all;

%% 1. ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ
M      = 400;
P_max  = 200;
k_cool = 1.5;
T_amb  = 20.0;
T_sp   = 49.5;
dt     = 2.0;    % крок DataLogger (с)

%% 2. МАСИВ ТЕМПЕРАТУРИ g_arrTempLog [1..247]
T_log = [
20.867, 21.827, 22.780, 23.721, 24.666, 25.593, 26.514, 27.433, ...
28.336, 29.242, 30.037, 30.804, 31.548, 32.285, 33.068, 33.810, ...
34.549, 35.278, 36.000, 36.711, 37.422, 38.128, 38.858, 39.591, ...
40.252, 40.953, 41.636, 42.347, 43.031, 43.695, 44.334, 45.061, ...
45.674, 46.309, 46.961, 47.646, 48.339, 49.031, 49.709, 50.357, ...
50.993, 51.539, 52.028, 52.440, 52.777, 53.031, 53.201, 53.285, ...
53.286, 53.221, 53.154, 53.087, 53.022, 52.957, 52.892, 52.828, ...
52.761, 52.695, 52.633, 52.570, 52.508, 52.447, 52.386, 52.325, ...
52.262, 52.202, 52.143, 52.081, 52.023, 51.962, 51.904, 51.847, ...
51.788, 51.731, 51.675, 51.617, 51.562, 51.504, 51.450, 51.396, ...
51.343, 51.287, 51.232, 51.177, 51.124, 51.073, 51.022, 50.971, ...
50.920, 50.871, 50.821, 50.772, 50.723, 50.675, 50.626, 50.578, ...
50.530, 50.483, 50.436, 50.389, 50.343, 50.297, 50.252, 50.206, ...
50.161, 50.116, 50.072, 50.028, 49.984, 49.941, 49.898, 49.855, ...
49.812, 49.770, 49.728, 49.687, 49.646, 49.603, 49.562, 49.534, ...
49.506, 49.480, 49.455, 49.432, 49.410, 49.392, 49.377, 49.366, ...
49.357, 49.352, 49.351, 49.353, 49.357, 49.365, 49.375, 49.388, ...
49.402, 49.418, 49.435, 49.453, 49.471, 49.489, 49.507, 49.524, ...
49.540, 49.554, 49.566, 49.577, 49.586, 49.592, 49.597, 49.599, ...
49.599, 49.597, 49.592, 49.586, 49.579, 49.570, 49.560, 49.549, ...
49.537, 49.525, 49.513, 49.501, 49.490, 49.479, 49.469, 49.460, ...
49.452, 49.445, 49.440, 49.437, 49.435, 49.434, 49.435, 49.438, ...
49.441, 49.446, 49.452, 49.458, 49.466, 49.474, 49.482, 49.490, ...
49.498, 49.506, 49.513, 49.520, 49.526, 49.531, 49.536, 49.539, ...
49.542, 49.543, 49.544, 49.543, 49.542, 49.540, 49.537, 49.533, ...
49.529, 49.524, 49.519, 49.514, 49.509, 49.504, 49.499, 49.494, ...
49.489, 49.484, 49.481, 49.478, 49.475, 49.473, 49.472, 49.471, ...
49.471, 49.472, 49.473, 49.475, 49.477, 49.480, 49.482, 49.486, ...
49.489, 49.493, 49.497, 49.501, 49.504, 49.507, 49.510, 49.512, ...
49.515, 49.516, 49.518, 49.519, 49.519, 49.519, 49.519, 49.518, ...
49.517, 49.515, 49.514, 49.512, 49.509, 49.507, 49.505
];

%% 3. МАСИВ ВИХОДУ PID g_arrOutLog [1..247]
U_log = [
100.000, 100.000, 100.000, 100.000, 100.000, 100.000, 100.000, 100.000, ...
100.000, 100.000, 100.000, 72.303, 80.320, 88.412, 94.908, 97.527, ...
96.793, 96.804, 95.578, 91.192, 85.785, 81.665, 80.328, 96.085, ...
89.411, 79.275, 95.935, 80.355, 95.279, 79.940, 90.367, 99.263, ...
79.742, 86.011, 90.165, 91.049, 91.759, 93.604, 92.006, 88.659, ...
83.770, 77.978, 71.176, 63.604, 55.427, 46.760, 37.676, 29.287, ...
20.814, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, ...
];

```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

Продовження додатку Б

```

18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, ...
18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, ...
18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, ...
18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, ...
18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, ...
18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, ...
18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, ...
18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, ...
18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 18.000, 19.397, ...
19.384, 19.468, 19.711, 19.827, 20.085, 20.401, 20.731, 21.067, ...
21.364, 21.739, 22.076, 22.410, 22.713, 23.012, 23.237, 23.489, ...
23.694, 23.823, 23.898, 24.004, 24.037, 24.028, 23.980, 23.898, ...
23.748, 23.611, 23.436, 23.226, 23.024, 22.804, 22.573, 22.345, ...
22.112, 21.908, 21.700, 21.522, 21.341, 21.236, 21.102, 21.014, ...
20.947, 20.954, 20.902, 20.939, 20.994, 21.048, 21.150, 21.260, ...
21.392, 21.549, 21.688, 21.850, 22.001, 22.161, 22.297, 22.428, ...
22.547, 22.668, 22.781, 22.861, 22.900, 22.948, 22.981, 22.986, ...
22.981, 22.955, 22.868, 22.846, 22.758, 22.672, 22.601, 22.504, ...
22.387, 22.295, 22.205, 22.100, 22.012, 21.904, 21.828, 21.766, ...
21.720, 21.691, 21.644, 21.628, 21.603, 21.608, 21.630, 21.651, ...
21.699, 21.746, 21.794, 21.844, 21.900, 21.961, 22.043, 22.110, ...
22.171, 22.243, 22.295, 22.355, 22.408, 22.435, 22.483, 22.475, ...
22.500, 22.521, 22.519, 22.522, 22.516, 22.474, 22.438, 22.419, ...
22.368, 22.337, 22.291, 22.245, 22.215, 22.151, 22.126, 22.068, ...
22.049, 22.007, 21.997, 21.971, 21.940, 21.924, 21.920

```

];

%% 4. МАСИВ ПОХИБКИ PID g_arrErrLog [1..247]

```

E_log = [
28.638, 27.678, 26.725, 25.783, 24.839, 23.912, 22.990, 22.071, ...
21.168, 20.262, 19.468, 18.699, 17.956, 17.219, 16.437, 15.694, ...
14.956, 14.227, 13.505, 12.793, 12.082, 11.375, 10.646, 9.913, ...
9.252, 8.550, 7.868, 7.156, 6.472, 5.808, 5.170, 4.443, ...
3.830, 3.195, 2.542, 1.858, 1.164, 0.473, -0.206, -0.854, ...
-1.490, -2.012, -2.525, -2.938, -3.275, -3.530, -3.700, -3.785, ...
-3.786, -3.721, -3.654, -3.588, -3.522, -3.457, -3.393, -3.328, ...
-3.262, -3.196, -3.133, -3.070, -3.008, -2.947, -2.886, -2.826, ...
-2.762, -2.703, -2.643, -2.582, -2.523, -2.462, -2.405, -2.348, ...
-2.288, -2.232, -2.176, -2.117, -2.062, -2.004, -1.950, -1.896, ...
-1.843, -1.788, -1.732, -1.677, -1.625, -1.573, -1.522, -1.471, ...
-1.421, -1.371, -1.321, -1.272, -1.223, -1.175, -1.126, -1.078, ...
-1.031, -0.983, -0.936, -0.889, -0.843, -0.798, -0.752, -0.706, ...
-0.661, -0.616, -0.572, -0.528, -0.484, -0.441, -0.398, -0.355, ...
-0.312, -0.270, -0.229, -0.187, -0.146, -0.103, -0.063, -0.034, ...
-0.006, 0.020, 0.045, 0.068, 0.089, 0.108, 0.123, 0.134, ...
0.143, 0.148, 0.149, 0.147, 0.143, 0.135, 0.125, 0.112, ...
0.098, 0.082, 0.065, 0.047, 0.029, 0.011, -0.007, -0.024, ...
-0.040, -0.054, -0.066, -0.077, -0.086, -0.092, -0.097, -0.099, ...
-0.099, -0.097, -0.092, -0.086, -0.079, -0.070, -0.060, -0.049, ...
-0.037, -0.025, -0.013, -0.001, 0.010, 0.021, 0.031, 0.040, ...
0.048, 0.055, 0.060, 0.063, 0.065, 0.066, 0.065, 0.062, ...
0.059, 0.054, 0.048, 0.042, 0.034, 0.026, 0.018, 0.010, ...
0.002, -0.006, -0.013, -0.020, -0.026, -0.031, -0.036, -0.039, ...
-0.042, -0.043, -0.044, -0.043, -0.042, -0.040, -0.037, -0.033, ...
-0.029, -0.024, -0.019, -0.014, -0.009, -0.004, 0.001, 0.006, ...
0.011, 0.016, 0.019, 0.022, 0.025, 0.027, 0.028, 0.029, ...
0.029, 0.028, 0.027, 0.026, 0.023, 0.021, 0.018, 0.014, ...
0.011, 0.007, 0.003, -0.001, -0.004, -0.007, -0.010, -0.012, ...
-0.015, -0.016, -0.018, -0.019, -0.019, -0.019, -0.019, -0.018, ...
-0.017, -0.015, -0.014, -0.012, -0.009, -0.007, -0.005];

```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

Продовження додатку Б

```

%% 5. ОСІ ЧАСУ
N      = length(T_log);           % = 247
t_log  = (1:N) * dt;              % 247 точок
t_full = [0, t_log];              % 248 точок
T_full = [T_amb, T_log];          % 248 точок
U_full = [100.0, U_log];          % 248 точок
E_full = [T_sp-T_amb, E_log];     % 248 точок

% Перевірка розмірів
fprintf('N=%d | t=%d T=%d U=%d E=%d\n',...
        N, length(t_full), length(T_full), length(U_full), length(E_full));

%% 6. ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ (дрібний крок T0=0.01c)
T0_sim = 0.01;
t_sim  = 0:T0_sim:(N*dt);
n_sim  = length(t_sim);

% Інтерполюємо реальний U_log на дрібний крок
U_interp = interp1(t_full, U_full, t_sim, 'linear');

% Симуляція різницевого рівняння з T0=0.01c (як в M172)
T_verif = zeros(1, n_sim);
T_verif(1) = T_amb;
for k = 1:n_sim-1
    T_verif(k+1) = T_verif(k) + (T0_sim/M) * ...
        ((U_interp(k)/100)*P_max - k_cool*(T_verif(k) - T_amb));
end

% Порівнюємо з DataLogger - беремо значення моделі в моменти DataLogger
T_verif_at_log = interp1(t_sim, T_verif, t_full, 'linear');
err_verif = T_full - T_verif_at_log;

fprintf('=== ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ (T0=0.01c) ===\n');
fprintf('Макс. похибка : %.6f°C\n', max(abs(err_verif)));
fprintf('СКВ похибки   : %.6f°C\n', rms(err_verif));

%% 7. ІДЕНТИФІКАЦІЯ W(s) - симуляція з реальним U на фазі нагріву
idx_peak_log = find(T_log == max(T_log), 1);
t_heat_log   = [0, t_log(1:idx_peak_log)];
T_heat_log   = [T_amb, T_log(1:idx_peak_log)];

% Беремо симульовану модель на фазі нагріву
t_heat_sim = 0:T0_sim:(idx_peak_log*dt);
T_heat_sim = interp1(t_sim, T_verif, t_heat_sim, 'linear');

% W(s) = K_eff / (T_eff*s + 1) - МНК підбирає T_eff
K_eff = T_sp - T_amb; % 29.5°C
cost = @(Teff) sum((T_heat_log - ...
    (T_amb + K_eff*(1-exp(-t_heat_log/Teff))))).^2);
T_eff = fminsearch(cost, 30.0);
T_model_heat = T_amb + K_eff*(1 - exp(-t_heat_log/T_eff));
err_id = T_heat_log - T_model_heat;

% Для графіку також будуємо симульовану криву
T_sim_heat = interp1(t_sim, T_verif, t_heat_log, 'linear');
err_sim_id = T_heat_log - T_sim_heat;
K_obj = P_max/k_cool;
T_obj = M/k_cool;

```

					Арк.
					98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Продовження додатку Б

```

fprintf('\n=== ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТА ===\n');
fprintf('Теоретичні : K=%.2f, T=%.2f c\n', K_obj, T_obj);
fprintf('МНК      : K_eff=%.2f°C, T_eff=%.2f c\n', K_eff, T_eff);

W_obj = tf(K_eff, [T_eff, 1]);
band = 0.02 * T_sp;

%% 8. ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ (реальні дані)
[T_peak, idx_pk] = max(T_full);
t_peak          = t_full(idx_pk);
oversh_C        = T_peak - T_sp;
oversh_pct      = (oversh_C/T_sp)*100;
out_band        = find(abs(T_full(idx_pk:end)-T_sp) > band, 1, 'last');
t_settle        = t_full(idx_pk + out_band - 1);

fprintf('\n=== ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ===\n');
fprintf('Пікова температура   : %.3f°C\n', T_peak);
fprintf('Перерегулювання      : %.3f°C (%.2f%%)\n', oversh_C, oversh_pct);
fprintf('Час піку              : %.1f c\n', t_peak);
fprintf('Час стабілізації ±2% : %.1f c\n', t_settle);

%% =====
%% ГРАФІК 1: ІДЕНТИФІКАЦІЯ
figure('Name','Ідентифікація та похибка',...
      'NumberTitle','off','Position',[50 430 820 480]);

subplot(2,1,1);
plot(t_heat_log, T_heat_log,'ro','MarkerSize',5,'LineWidth',1.2,...
     'DisplayName','Експеримент (DataLogger)'); hold on;
plot(t_heat_log, T_sim_heat,'g-','LineWidth',2,...
     'DisplayName','Симуляція моделі (реальний U)');
plot(t_heat_log, T_model_heat,'b--','LineWidth',1.5,...
     'DisplayName',sprintf('W(s): K=%.1f, T=%.2fc (МНК)',K_eff,T_eff));
yline(T_sp,'--k','LineWidth',1,'DisplayName','Уставка 49.5°C');
grid on; ylabel('Температура, °C');
legend('Location','southeast');
title(sprintf('Ідентифікація: W(s) = %.2f / (%.2f·s + 1)',K_eff,T_eff));

subplot(2,1,2);
plot(t_heat_log, err_sim_id,'g-','LineWidth',1.5,...
     'DisplayName','Симуляція vs DataLogger'); hold on;
plot(t_heat_log, err_id,'b--','LineWidth',1.2,...
     'DisplayName','W(s) vs DataLogger');
yline(0,'--k','LineWidth',0.8);
grid on; ylabel('Похибка, °C'); xlabel('Час, c');
legend('Location','southwest');
title(sprintf('Похибки: симуляція |max|=%.4f°C W(s) |max|=%.3f°C',...
             max(abs(err_sim_id)), max(abs(err_id))));

%% =====
%% ГРАФІК 2: ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС (повний DataLogger)
%% =====
figure('Name','Перехідний процес замкненої системи',...
      'NumberTitle','off','Position',[50 30 900 430]);
plot(t_full, T_full,'b-','LineWidth',2,...
     'DisplayName','Температура (DataLogger)'); hold on;
yline(T_sp,'--r','LineWidth',1.5,'DisplayName','Уставка 49.5°C');
yline(T_sp+band,':k','LineWidth',0.8,'DisplayName','±2% зона');

```

					Арк.
					БР.АКП-55.00.000 ПЗ
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	99

Продовження додатку Б

```

yline(T_sp-band, 'k', 'LineWidth', 0.8, 'HandleVisibility', 'off');
plot(t_peak, T_peak, 'rv', 'MarkerSize', 10, 'MarkerFaceColor', 'r', ...
     'DisplayName', sprintf('Пік: %.3f°C', T_peak));

annotation('textbox', [0.62 0.65 0.30 0.22], 'String', ...
    {sprintf('Пік: %.3f°C', T_peak), ...
     sprintf('Перерегулювання: %.3f°C (%.2f%%)', oversh_C, oversh_pct), ...
     sprintf('Час піку: %.0f c', t_peak), ...
     sprintf('Час стабілізації: %.0f c', t_settle)}, ...
    'EdgeColor', [0.5 0.5 0.5], 'BackgroundColor', 'white', 'FontSize', 9);

grid on; xlabel('Час, c'); ylabel('Температура, °C');
xlim([0 t_full(end)+10]);
title('Перехідний процес у замкненій системі (PID: Kp=5, Ti=15, Td=1)');
legend('Location', 'east');

%% =====
%% ГРАФІК 3: ПРОФІЛЬ reg1_Out + reg1_Error
%% =====
figure('Name', 'Профіль PID-регулятора', ...
     'NumberTitle', 'off', 'Position', [50 30 900 500]);

subplot(2,1,1);
plot(t_full, U_full, 'r-', 'LineWidth', 1.8, ...
     'DisplayName', 'reg1_Out (вихід PID, %)'); hold on;
yline(18, '--k', 'LineWidth', 1, 'DisplayName', 'Мін. обмеження 18%');
yline(100, ':k', 'LineWidth', 0.8, 'DisplayName', 'Макс. обмеження 100%');
grid on; ylabel('Вихід регулятора, %');
legend('Location', 'northeast'); ylim([-5 110]);
title('Вихід PID-регулятора reg1_Out');

subplot(2,1,2);
plot(t_full, E_full, 'b-', 'LineWidth', 1.5, ...
     'DisplayName', 'reg1_Error (похибка, °C)'); hold on;
yline(0, '--k', 'LineWidth', 0.8, 'DisplayName', 'Нульова лінія');
yline(band, ':r', 'LineWidth', 0.8, 'DisplayName', '±2% зона (±0.99°C)');
yline(-band, ':r', 'LineWidth', 0.8, 'HandleVisibility', 'off');
grid on; ylabel('Похибка, °C'); xlabel('Час, c');
legend('Location', 'northeast');
title('Похибка регулювання reg1_Error = SP - PV');

%% =====
%% ГРАФІК 4: ВЕРИФІКАЦІЯ
figure('Name', 'Верифікація моделі', ...
     'NumberTitle', 'off', 'Position', [900 30 750 430]);

plot(t_full, T_full, 'b-', 'LineWidth', 2, ...
     'DisplayName', 'DataLogger (реальні дані)'); hold on;
plot(t_full, T_verif_at_log, 'r--', 'LineWidth', 1.5, ...
     'DisplayName', sprintf('Модель T0=0.01c |max|=%.4f°C', ...
         max(abs(err_verif))));
grid on; xlabel('Час, c'); ylabel('Температура, °C');
legend('Location', 'east');
title(sprintf('Верифікація: DataLogger vs Модель |max|=%.6f°C', ...
    max(abs(err_verif))));

%% =====
%% ГРАФІК 5: ДІАГРАМА БОДЕ
%% =====
figure('Name', 'Частотний аналіз', ...

```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження додатку Б

```

    'NumberTitle','off','Position',[900 30 700 430]);
bode(W_obj); grid on;
title(sprintf('Діаграма Бode - W(s) = %.2f / ( %.2f*s + 1)', K_eff, T_eff));

[Gm,Pm,~,Wcp] = margin(W_obj);
fprintf('\n=== ЗАПАСИ СТІЙКОСТІ ===\n');
fprintf('Запас по амплітуді : %.2f дБ\n', 20*log10(Gm));
fprintf('Запас по фазі      : %.2f°\n', Pm);
fprintf('Частота зрізу      : %.4f рад/с\n', Wcp);

%% ІДЕНТИФІКАЦІЯ через tfest (System Identification Toolbox)
% Підготовка даних: вхід U_log (%), вихід T_log (°C), крок 2с
% Використовуємо E_log як вхід (розімкнений еквівалент)
data_id = iddata(T_log', U_log', dt);
data_id.InputName = 'reg1\Out (%)';
data_id.OutputName = 'Температура (°C)';
data_id.TimeUnit = 'seconds';

sys_id = tfest(data_id, 1, 0);

[num, den] = tfdata(sys_id, 'v');
K_tfest = num(end) / den(end);      % = 0.0048/0.0022
T_tfest = den(end-1) / den(end);   % = 1/0.0022

fprintf('\n=== ІДЕНТИФІКАЦІЯ tfest ===\n');
fprintf('W_id(s) = %.4f / ( %.2fs + 1)\n', K_tfest, T_tfest);
fprintf('Точність (FitPercent): %.2f%%\n', sys_id.Report.Fit.FitPercent);

% Графік порівняння
figure('Name','Ідентифікація tfest','NumberTitle','off',...
    'Position',[50 50 800 400]);
compare(data_id, sys_id);
title('Порівняння: модель tfest vs DataLogger');
grid on;

%% РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ PID (аналітичний, за параметрами tfest)
K_pid = K_tfest;      % 2.2098 °C/%
T_pid = T_tfest;      % 457.41 с
tau    = 2.0;         % с (крок DataLogger = мінімальне визначуване запізнення)

fprintf('\n=== АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК PID (за tfest) ===\n');
fprintf('Об'єкт: K=%.4f°C/%, T=%.2fc, tau=%.1fc\n', K_pid, T_pid, tau);

% Метод 1: Циглера-Нікольса
Kp_ZN = (1.2/K_pid) * (T_pid/tau);
Ti_ZN = 2.0 * tau;
Td_ZN = 0.5 * tau;

% Метод 2: IMC (lambda = 0.2*T - помірне налаштування)
lambda = 0.2 * T_pid;
Kp_IMC = T_pid / (K_pid * (lambda + tau));
Ti_IMC = T_pid;
Td_IMC = tau / 2;
% Порівняльна таблиця
fprintf('\n%-25s %8s %8s %8s\n', 'Метод', 'Kp', 'Ti(с)', 'Td(с)');
fprintf('%s\n', repmat('-',1,52));
fprintf('%-25s %8.4f %8.4f %8.4f\n', 'Циглера-Нікольса', Kp_ZN, Ti_ZN, Td_ZN);
fprintf('%-25s %8.4f %8.4f %8.4f\n', 'IMC (lambda=0.2T)', Kp_IMC, Ti_IMC, Td_IMC);
fprintf('%-25s %8.4f %8.4f %8.4f\n', 'Реальні (M172)', 5.0, 15.0, 1.0);

```

					БР.АКП-55.00.000 ПЗ	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження додатку Б

N=247 | t=248 T=248 U=248 E=248

=== ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ (T0=0.01c) ===

Макс. похибка : 1.412394°C

СКВ похибки : 0.819280°C

=== ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТА ===

Теоретичні : K=133.33, T=266.67 c

МНК : K_eff=29.50°C, T_eff=38.17 c

=== ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ===

Пікова температура : 53.286°C

Перерегулювання : 3.786°C (7.65%)

Час піку : 98.0 c

Час стабілізації ±2%: 194.0 c

=== ЗАПАСИ СТІЙКОСТІ ===

Запас по амплітуді : Inf дБ

Запас по фазі : 91.94°

Частота зрізу : 0.7724 рад/с

=== ІДЕНТИФІКАЦІЯ tfest ===

W_id(s) = 2.2098 / (457.41s + 1)

Точність (FitPercent): 97.25%

=== АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК PID (за tfest) ===

Об'єкт: K=2.2098°C/%, T=457.41c, tau=2.0c

Метод	Kp	Ti(c)	Td(c)
Циглера-Нікольса	124.1963	4.0000	1.0000
IMC (lambda=0.2T)	2.2142	457.4132	1.0000
Реальні (M172)	5.0000	15.0000	1.0000

Арк.

БР.АКП-55.00.000 ПЗ

102

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Додаток В1
Розподіл входів/виходів контролера TM172PDG28RI

Тип сигналу	Джерело / Виконавчий пристрій	Позначення на СА	Адреса	Змінна
Вхідний	Кнопка «ПУСК»	SB1 / ВДО4	DI4	h_bPusk
Вхідний	Кнопка «СТОП»	SB2 / ВДО5	DI5	h_bStop
Вхідний	Датчик кінцевої позиції Д1	Д1 / ВДО1	DI1	h_bD1
Вхідний	Датчик формування дози Д2	Д2 / ВДО2	DI2	h_bD2
Вхідний	Датчик формування дози Д3	Д3 / ВДО3	DI3	h_bD3
Вхідний	Датчик температури води	TE / ВАО1	AI1	h_iTE
Вихідний	Магнітний пускач двигуна вліво	М ← / ДВО1	DO1	h_bMleft
Вихідний	Нагрівальний елемент	NS / АВО1	AO1	h_reg1_Out
Вихідний	Магнітний пускач двигуна вправо	М → / ДВО2	DO2	h_bMright
Вихідний	Клапан подачі сировини	К2 / ДВО4	DO3	h_bKlapan2
Вихідний	Клапан зливу	К1 / ДВО3	DO4	h_bKlapan1