

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**МАГІСТРА**

**КРМ.АКС<sub>м</sub> - 03.00.00.000 ПЗ**

**група АКС<sub>м</sub>-24-1**

**Олексій БОДНАРУК**

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Боднарук Олексій Андрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.516  
(індекс)

## **МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

Апаратно-програмний комплекс для імітаційного моделювання систем  
телемеханіки для газорозподільних пунктів  
(назва роботи)

Комп'ютеризовані системи управління та автоматика  
(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:**

Здобувач освітнього ступеня О.А.Боднарук  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник к.т.н. доц. М.Я. Николайчук  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри

д.т.н., проф. Л.М. Заміховський  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ – 2025**

# Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Освітній рівень магістр

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

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІТТС

д.т.н. проф. Л.М. Заміховський

«    »                      2025 року

## **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

Боднаруку Олексію Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Апаратно-програмний комплекс для імітаційного моделювання систем телемеханіки для газорозподільних пунктів

керівник роботи к.т.н., доц. Николайчук Микола Ярославович,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 30 » жовтня 2025 року № 690 / 7

2. Строк подання здобувачем роботи грудень 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Honeywell RTU2020, ControlEdge builder, VMware Workstation pro, Modbus Poll, телеметричні дані ГРП.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ І ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ.

2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГРП.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АПРОБАЦІЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМ И.

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

1. Дерево проекту. Схема функціональна.

2. Вікно глобальних змінних при активній імітації ГРП.

3. Робота FBD модуля при активній імітації ГРП.

4. Моніторинг параметрів телемеханіки ГРП

5. Функціональна схема системи телемеханіки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-3	к.т.н. доц. Николайчук М.Я.		

7. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ І ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ.	09.2025	Виконано
2	РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГРП.	10.2025	Виконано
3	ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ.	11.2025	Виконано
4	ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ	12.2025	Виконано

**Здобувач** \_\_\_\_\_  
( підпис )

Боднарук О.А.  
(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_  
( підпис )

Николайчук М.Я.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Звіт про КРМ: 76 арк., 3 розділи, 66 рис., 5 табл., 30 джерел.

Розроблено апаратно-програмний комплекс для імітаційного моделювання систем телемеханіки газорозподільних пунктів. Програмно відтворено технологічний процес редукування газу на базі контролера Honeywell ControlEdge RTU2020.

Програмно відтворено нелінійну динаміку зміни тиску та температури, ефект дроселювання, генерацію вимірювальних шумів та алгоритм пріоритезації аварійних сигналів. Створений комплекс дозволяє проводити налагодження алгоритмів керування та тестування аварійних режимів у безпечному середовищі без використання реального технологічного обладнання.

Практична значущість отриманих результатів підтверджена шляхом апробації 10 сценаріїв експлуатації у віртуальному середовищі. Верифіковано детермінованість реакції логічного модуля на критичні відхилення параметрів та стабільність обробки даних у реальному часі.

Ключові слова: ТЕЛЕМЕХАНІКА, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ГРП, HONEYWELL, RTU2020, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КЕРУВАННЯ.

## **ABSTRACT**

Report on Master's Qualification Work: 76 pages, 3 chapters, 66 figures, 5 tables, 30 references.

A hardware-software complex for simulation modeling of telemechanics systems for gas distribution points has been developed. The technological process of gas pressure reduction was software-replicated based on the **Honeywell ControlEdge RTU2020** controller.

The non-linear dynamics of pressure and temperature changes, the throttling effect, measurement noise generation, and an alarm signal prioritization algorithm were digitally reproduced. The developed complex allows for the tuning of control algorithms and the testing of emergency modes in a safe environment without the need for real process equipment.

The practical significance of the results is confirmed by testing 10 operational scenarios in a virtual environment. The determinism of the logic module's response to critical parameter deviations and the stability of real-time data processing have been verified.

**Keywords:** TELEMECHANICS, SIMULATION MODELING, GAS DISTRIBUTION POINT, HONEYWELL RTU2020, AUTOMATION, CONTROL.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ВИМІРІВ ...	7
ВСТУП .....	8
<b>1 ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ І ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОБ’ЄКТУ КОНТРОЛЮ</b>	<b>10</b>
1.1 Аналіз технологічного процесу та компонентів газорозподільних пунктів .....	10
1.2 Розробка функціональної схеми системи телемеханіки.....	11
1.3 Обґрунтування вибору апаратно-програмних засобів реалізації системи	13
1.4 Формалізація задач проектування програмного забезпечення .....	19
<b>2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГРП.....</b>	<b>23</b>
2.1 Ініціалізація проекту та конфігурування системних ресурсів контролера .....	23
2.2 Програмне конфігурування та параметризація каналів вводу-виводу .....	29
2.3 Розробка алгоритму автоматизації ГРП .....	35
2.4 Розробка та опис імітаційного модуля Simulator .....	45
<b>3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АПРОБАЦІЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ .....</b>	<b>49</b>
3.1 Інструментарій для проведення імітаційного моделювання.....	49
3.2 Процедури підготовки і запуску симуляції проекту .....	50
3.3 Візуалізація процесу симуляції .....	58
3.4 Аналіз результатів моделювання за режимами роботи .....	64
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>72</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА .....</b>	<b>74</b>

<b>КРМ.АКСм – 03.00.00.000 ПЗ</b>								
Зм.	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	Апаратно-програмний комплекс для імітаційного моделювання систем телемеханіки газорозподільних пунктів	Літ	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Боднарук				Н	6	76
Перев.		Николайчук						
Н.контр.		Возний				ІФНТУНГ, АКСм-24-1		
Затв.		Заміховський						

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ВИМІРІВ

ГРП	Газорозподільний пункт
ГТС	Газотранспортна система
ПЗК	Запобіжно-запірний клапан
ПЛК	Програмований логічний контролер
РАС	Programable Automation Controller
RTU	Remote Terminal Unit
ST	Structured Text
FBD	Function Block Diagram
HART	Highway Addressable Remote Transducer

					КРМ.АКС <sub>м</sub> - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний етап розвитку автоматизованих систем у газотранспортній сфері пов'язаний із широким впровадженням розподілених інтелектуальних засобів керування. Такі рішення вимагають особливо високого рівня надійності та стабільності роботи програмного забезпечення контролерів. Газорозподільні пункти належать до об'єктів підвищеної небезпеки, тому використання звичайних методів налагодження алгоритмів безпосередньо в умовах експлуатації є неправильним і потенційно небезпечним через імовірність аварій та значні фінансові наслідки [1]. У зв'язку з цим зростає потреба у створенні спеціальних інструментів які призначеня для проведення випробувань на етапі виробництва в лабораторних умовах. Використання рішень на основі платформи Honeywell RTU2020 надає можливість реалізувати імітаційну модель технологічного процесу, що дозволяє детально перевіряти алгоритми захисту без ризику для реального об'єкта.

**Мета роботи** полягає у проектуванні апаратно-програмного комплексу імітаційного моделювання, який забезпечує верифікацію алгоритмів керування, підсистем аварійного захисту та моніторингу параметрів ГРП без залучення фізичного технологічного обладнання.

### **Завдання дослідження:**

- здійснити аналіз архітектури системи телемеханіки на базі контролера Honeywell RTU2020 задля визначення оптимальних методів програмної емуляції периферійних пристроїв;
- розробити програмний модуль мовою структурованого тексту ST, що реалізує математичну модель генерації вхідних сигналів з урахуванням стохастичних збурень та інерційності перехідних процесів;
- синтезувати та імплементувати в середовищі розробки детерміновані алгоритми керування виконавчими механізмами та логіку блокувань мовою функціональних блоків FBD;

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

- розробити структуру мапінгу Modbus-реєстрів для забезпечення коректної передачі діагностичної інформації та технологічних змінних на верхній рівень керування;
- провести апробацію системи шляхом моделювання аварійних сценаріїв для перевірки реакції алгоритмів на вихід параметрів за допустимі межі та емуляцію апаратних відмов датчиків.

**Об'єкт дослідження** - процеси автоматичного контролю та телемеханічного керування технологічними параметрами газорозподільних пунктів.

**Предмет дослідження** - методи та алгоритми імітаційного моделювання поведінки обладнання ГРП, а також логіка функціонування систем захисту в середовищі програмованих логічних контролерів.

**Практичне значення одержаних результатів** визначається створенням прикладного інструментарію для налагодження ПЗ в лабораторних умовах. Запропоноване рішення уможливорює проведення безпечних експериментів з імітацією критичних аварійних ситуацій, що є неможливим на реальному об'єкті. Комплекс дозволяє виконати налаштування параметрів фільтрації сигналів та перевірити взаємодію контролера зі SCADA-системою через Modbus-інтерфейс.

**Особистий внесок.** Обґрунтовано архітектуру програмного забезпечення, що працює за принципом замкнутого циклу. Розроблено програмний код ядра симуляції мовою ST, реалізовано прикладну логіку технологічних захистів мовою FBD та сконфігуровано систему обміну даними в середовищі Honeywell ControlEdge-Builder.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

# 1 ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ І ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ

## 1.1 Аналіз технологічного процесу та компонентів газорозподільних пунктів

Газорозподільний пункт (ГРП) у структурі магістрального газопроводу розглядається як територіально розподілений об'єкт телемеханізації, що виконує функції автоматичного зниження тиску, очищення газу та комерційного обліку енергоресурсу [2, 3]. З позиції теорії керування ГРП класифікується як складний динамічний об'єкт із вираженою нелінійністю статичних характеристик регулюючих органів та транспортним запізненням, зумовленим інерційністю газового середовища та стохастичним характером споживання [4, 5]. Пріоритетним завданням автоматизації такого об'єкта є забезпечення безперебійної роботи вузла редукції та миттєва реакція на перехід технологічних параметрів за встановлені аварійні межі.

Технологічний процес об'єкту організовано за принципом послідовної обробки потоку газу, де кожен етап потребує постійного контролю:

**1. Очищення та моніторинг фільтрів.** Газ в першу чергу проходить через газові фільтри, що захищають запірну арматуру від ерозії та пошкоджень [6, 7]. Для системи телемеханіки основним параметром моніторингу є перепад тиску на фільтруючому елементі. Алгоритм контролера повинен в реальному часі аналізувати диференціальний тиск для визначення ступеня засмічення касети, що дозволяє попередити критичне зниження пропускної здатності лінії.

**2. Термодинамічні особливості процесу редукування.** Центром технологічного процесу є зниження тиску шляхом зміни гідравлічного опору дросельного органу регулятора. При розробці імітаційної моделі критично важливо враховувати прояв ефекту Джоуля-Томсона - охолодження газу при його розширенні [8]. Для природного газу падіння температури складає приблизно 0,5 °С на кожен бар перепаду тиску. Це явище створює ризики утворення гідратних

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

пробок у вихідному колекторі та обмерзання імпульсних трубок контрольно-вимірювальних приладів. Контроль температури газу на виході є однією з обов'язкових умов для правильного функціонування захисту і алгоритм імітації повинен математично відтворювати цей зв'язок [9].

**3. Реалізація аварійного захисту на базі ПЗК.** Основним компонентом системи безпеки ГРП, що інтегрується в цифрову структуру телемеханіки є запірний клапан. Цей виконавчий механізм забезпечує безумовне відсікання подачі газу на об'єкт у разі виникнення аварійних ситуацій ситуацій:

- перевищення або падіння вхідного тиску за межі технологічного регламенту;
- критичне зростання тиску після вузла редукції, що загрожує цілісності мереж споживача;
- вихід температурних параметрів за встановлені аварійні межі.

В алгоритмах логічного захисту, що реалізуються в ПЛК, ПЗК виступає ключовим об'єктом керування, стан якого визначається результатами порівняння поточних значень датчиків із масивом уставок.

**4. Комерційний облік та моніторинг температури.** Процес супроводжується приведенням виміряного робочого об'єму газу до стандартних умов. Для стабільної роботи електроніки та засобів автоматизації обов'язковим є моніторинг температури в приміщення . Вихід температури приміщення за межі допустимого діапазону (наприклад, замерзання конденсату в імпульсних лініях або перегрів обчислювальних модулів) інтегрується в загальну логіку безпеки як пріоритетний аварійний сигнал.

## **1.2 Розробка функціональної схеми системи телемеханіки**

Проектований апаратно-програмний комплекс базується на сучасній архітектурі побудови систем телемеханіки, де є чітка межа між рівнями збору, обробкою та візуалізацією даних [9]. Нижній рівень представлений віртуальним польовим обладнанням, середній - контролюючим блоком ПЛК Honeywell

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підп.	Дата		11

RTU2020, а верхній - рівнем диспетчерського контролю. Визначальною особливістю системи є реалізація принципу замкнутого контуру - фізичний контролер оперує математичною моделлю технологічного процесу, що розгорнута в його оперативній пам'яті. Це дозволяє проводити комплексну верифікацію алгоритмів захисту без підключення до діючих газопроводів, імітуючи реальну поведінку об'єкта в безпечному лабораторному середовищі [8]. Функціональна схема системи зображена на рис. 1.1.

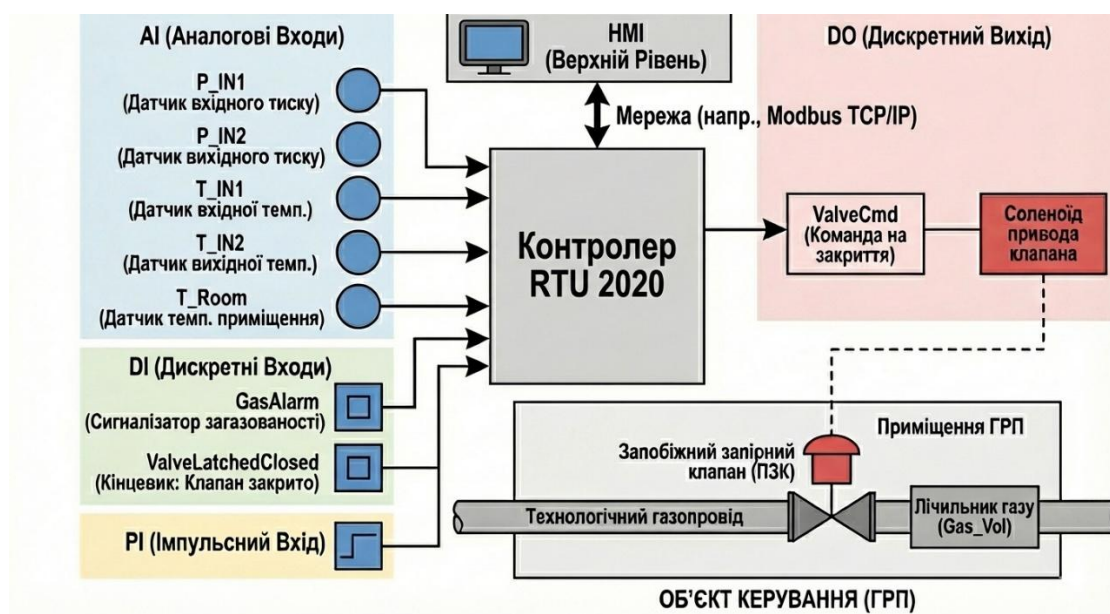


Рисунок 1.1 – Функціональна схема системи

### Підсистема аналогового вводу (AI)

Канали аналогового вводу сконфігуровані для зчитування розрахованих значень, що імітують вихідні сигнали датчиків з уніфікованим виходом:

- **P\_IN1 (0...12 бар):** тиск газу на вході ГРП;
- **P\_IN2 (0...0.6 бар):** тиск газу на виході ГРП, після редукування;
- **T\_IN1 та T\_IN2:** канали контролю температури на вході та виході;
- **T\_Room:** температура всередині приміщення ГРП.

### Підсистема дискретного та лічильного вводу (DI/PI)

Моніторинг цифрових входів та облік газу реалізовано через відповідні цифрові інтерфейси:

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

- **Valve\_Latched\_Closed:** фіксація положення запірною механізмом через кінцеві вимикачі;
- **Gas\_Alarm:** обробка сигналу від імітованого газоаналізатора. Поріг спрацювання встановлено на рівні 1% концентрації метану, що є критичним сигналом для миттєвої активації алгоритму захисту;
- **Gas\_Vol:** фіксує імпульси від віртуального лічильника. Частота генерації імпульсів програмно корелюється з розрахованою миттєвою витратою, що дає змогу вести комерційний облік газу.

### **Підсистема виводу та керування (DO)**

Керуючий вплив реалізується через дискретні вихідні канали контролера. Основним об'єктом впливу є електромагніт приводу запобіжно-запірною клапана. Команда ValveCmd генерується логічним блоком захисту при виявленні виходу будь-якого параметра за аварійні межі або при отриманні сигналу про загазованість.

Програмна архітектура всередині RTU 2020 побудована за модульним принципом із суворим розділенням потоків. Модуль імітації "Simulator" на основі математичних залежностей розраховує динаміку фізичних процесів, формуючи «віртуальні датчики». Отримані дані передаються до Модуля захисту "MainControl", який функціонує як реальна система автоматики - порівнює значення з уставками, веде журнали подій та формує команди на виконавчі механізми. Така організація функціональної схеми дозволяє комплексно дослідити поведінку системи як у стаціонарних, так і в перехідних режимах.

### **1.3 Обґрунтування вибору апаратно-програмних засобів реалізації системи**

Підбір компонентів для створення автоматизованої системи здійснювався із врахуванням умов експлуатації обладнання в газотранспортній галузі України. Основна увага приділяється надійності роботи компонентів, точності вимірювань і придатності обладнання для використання на реальних об'єктах. Важливою

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підп.	Дата		13

вимогамою була стабільна робота за різних температур, можливість автономного функціонування на віддалених пунктах і також підтримка поширених промислових протоколів зв'язку. Перевага надавалася технічним рішенням, які вже використовуються на газорозподільних пунктах газових систем України.

### 1.3.1 Вибір базового контролера

Центральним обчислювальним вузлом системи обрано спеціалізований контролер для нафтогазової галузі - Honeywell ControlEdge RTU2020 (рис. 1.2). Цей пристрій належить до класу РАС-контролерів і спроектований для вирішення задач керування технологічними процесами з жорсткими вимогами до енергоефективності [10].



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд Honeywell RTU2020

Вибір даної платформи обумовлений такими факторами:

- **енергоефективність:** у типовому режимі споживання складає менше 1.8 Вт, що є важливим після постійних обстрілів енергетики агресором [11, 12];

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- **стійкість до середовища:** конструктивне виконання дозволяє експлуатацію контролера в різних температурних умовах [13]. Робочий діапазон температур від -40 °С до +75 °С, що усуває потребу у встановленні систем примусового обігріву чи охолодження в шафі автоматизації;
- **універсальність каналів:** 28 каналів вводу-виводу дозволяє програмно налаштовувати кожен канал під потреби всіх давачів та виконавчих механізмів. Це дає змогу підключити обладнання без додаткових модулів розширення;
- **діагностика:** разом із Modbus та DNP3, підтримка протоколу HART дозволяє контролеру бачити повний стан датчиків Rosemount у реальному часі. Це дає доступ до сервісних даних приладів, а не лише до «сухих» значень тиску чи температури.

### 1.3.2 Засоби вимірювання тиску

Для забезпечення точного контролю гідравлічного режиму на вхідних та вихідних ділянках газопроводу прийнято рішення використовувати перетворювачі тиску серії Rosemount від компанії Emerson.

Для моніторингу вхідного магістрального тиску P\_IN1 з діапазоном до 12 бар, обрано датчик Rosemount 3051TG [14]. Прилад базується на тензорезистивній технології з розділовою мембраною з нержавіючої сталі 316L. Еталонна точність вимірювання на рівні  $\pm 0.04\%$  дозволяє фіксувати найменші коливання тиску, що важливо для імітаційного моделювання. Стабільність характеристик гарантується виробником протягом 10 років, що суттєво знижує витрати на сервісне калібрування (рис. 1.3) , [15].

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15



Рисунок 1.3 – Інтелектуальні датчик тиску Rosemount серії 3051

Для контролю вихідного тиску P\_IN2 з діапазоном до 0.6 бар, обрано модель Rosemount 2088 [16]. Датчик забезпечує похибку вимірювання  $\pm 0.075\%$  та має компактний корпус із класом захисту IP66/IP68 [17]. Використання датчиків різних серій дозволяє оптимізувати бюджет проекту, зберігаючи максимальну точність на вхідній магістралі та достатню роздільну здатність на лінії споживача. Обидва прилади підтримують цифровий протокол HART для моніторингу власної справності.

### 1.3.3 Засоби вимірювання температури

Враховуючи інерційність теплових процесів у газовому потоці, для вимірювання температури газу та навколишнього середовища обрано термоперетворювачі опору (RTD) типу Pt100 (або аналоги TCM-1088) [18]. Принцип їх дії базується на зміні електричного опору металу залежно від температури, що в робочому діапазоні ГРП має лінійний характер. Основною

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

характеристикою є вибухобезпечність. На рис. 1.4 зображено термоперетворювач Aplisens CTR/EXD.



Рисунок 1.4 – Термоперетворювач Aplisens

Для нівелювання похибки, викликані опором з'єднувальних ліній, підключення до контролера RTU2020 здійснюється за трьохпровідною схемою. Це дозволяє обчислювальному модулю автоматично компенсувати опір дротів та отримувати дійсне значення температури чутливого елемента. Корпус датчиків виконаний із нержавіючої сталі, що дозволяє їх прямий монтаж у газове середовище під тиском.

### 1.3.4 Засоби комерційного обліку та безпеки

Функцію обліку енергоресурсу виконує електронний коректор об'єму газу OE-VPT (рис. 1.5) [19]. Пристрій у реальному часі обчислює коефіцієнт стисливості та приводить робочий об'єм до стандартних умов [20]. Інтеграція з контролером реалізований шляхом під'єднання до Pulse input.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17



Рисунок 1.5 – Коректор об'єму газу OE-VPT

Система безпеки включає сигналізатор загазованості ДМ-4 (рис. 1.6), налаштований на виявлення метану [21, 22]. Поріг спрацювання встановлено на рівні 10-20% від нижньої межі вибуховості (НКГЗ). Вихідний сигнал («сухий контакт») заведений на пріоритетний дискретний вхід контролера. При отриманні цього сигналу логіка MainControl ініціює миттєву команду на закриття запобіжно-запірного клапана (ПЗК) для локалізації можливого витoku.



Рисунок 1.6 – Датчик загазованості ДМ-4

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

### 1.3.5 Програмне середовище розробки

Розробка прикладного програмного забезпечення здійснюється в інтегрованому середовищі Honeywell RTU Builder, яке повністю відповідає вимогам міжнародного стандарту IEC 61131-3 [23]. Для реалізації поставлених задач обрано стратегію поєднання різних мов програмування.

Математичне ядро імітаційної моделі реалізується мовою Structured Text (ST). Це мова високого рівня, синтаксис якої подібний до Pascal або C, що робить її оптимальною для написання складних алгоритмів обробки даних, реалізації формул термодинаміки реальних газів, циклічних обчислень та роботи з багатовимірними масивами. Саме засобами ST реалізується генерація псевдовипадкових чисел для імітації шумів вимірювання та розрахунків динаміки зміни тиску.

Логіку технологічного захисту, що відповідає за керування ПЗК та обробку аварій, реалізовано мовою FBD. Графічний формат алгоритму у вигляді функціональних схем забезпечує високу наочність, спрощує налагодження та дозволяє персоналу швидко знаходити причини спрацювання захистів без аналізу текстового коду. Такий підхід гарантує стабільну роботу системи керування та суттєво зменшує ймовірність помилок у найбільш відповідальних підсистемах безпеки ГРП.

### 1.4 Формалізація задач проектування програмного забезпечення

Спираючись на результати аналізу технологічного процесу та специфікації обраної апаратної платформи Honeywell RTU2020, необхідно сформулювати комплекс вимог до прикладного програмного забезпечення. Особливістю розроблюваної системи є її дуалістична природа: вона функціонує в реальному часі, одночасно виконуючи задачі детермінованого керування та стохастичного моделювання технологічних параметрів.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

### 1.4.1 Математична формалізація об'єкта

Газорозподільний пункт розглядається як динамічна система із зосередженими параметрами, поточний стан якої є функцією від вхідних впливів та внутрішніх процесів перетворення енергії газового потоку [24]. Формалізована задача проектування зводиться до програмної реалізації алгоритму  $F$ , який у кожному циклі контролера обчислює вектор вихідних станів  $Y(t)$  на основі вектора керування та вектора збурень:

$$Y(t) = F(U(t), Z(t)), \quad (1.1)$$

де компоненти векторів визначаються наступним чином:

- $Y(t)$  - вектор вихідних змінних, що включає змодельовані значення тисків  $P\_IN1$ ,  $P\_IN2$  та температур  $T\_IN1$ ,  $T\_IN2$ , а також показник накопиченого об'єму газу;
- $U(t)$  - вектор керуючих впливів, що формується оператором або автоматикою;
- $Z(t)$  - вектор випадкових збурень, до якого входить програмно генерований шум вимірювання  $Sim\_Inlet\_Noise$  та імітовані аварійні події.

### 1.4.2. Декомпозиція задач розробки

Для реалізації зазначеної математичної моделі процес проектування програмного забезпечення доцільно розділити на п'ять взаємопов'язаних етапів:

#### 1. Організація адресного простору контролера.

Першочерговим етапом є формування структури бази даних RTU, що передбачає типізацію змінних згідно зі стандартом IEC 61131-3. Необхідно виділити області пам'яті для аналогових змінних типу REAL (збереження фізичних значень з плаваючою комою), змінних уставок типу "Лімітів" (для параметризації меж спрацювання захистів) та булевих змінних BOOL (для обробки дискретних статусів та команд).

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## 2. Реалізація модуля попередньої обробки сигналів.

Оскільки система емулює роботу з реальним польовим обладнанням, програмний код повинен містити блок нормування даних. Задача полягає у трансформації "сирих" значень та накладанні адитивного білого шуму на вхідний сигнал. Це дозволить перевірити стійкість алгоритмів керування в умовах флуктуацій вимірюваного параметра, характерних для реальних датчиків тиску.

## 3. Проектування ядра імітаційної моделі.

Цей програмний блок, реалізований мовою ST, функціонує як двійник реального ГРП. Він забезпечує виконання трьох основних фізичних завдань:

- моделювання інерційності середовища: завдяки використанню аперіодичної ланки дозволяє уникнути неприродних стрибків тиску. Це гарантує фізичну достовірність моделі, імітуючи реальний час заповнення газом об'ємів трубопроводу;
- термодинамічний розрахунок: програмування зв'язку вихідної температури  $T_{IN2}$  від перепаду тиску, що дозволяє коректно відтворити ефект Джоуля-Томсона під час редукування;
- інтегрування витрати: реалізація лічильника, який акумулює об'єм пропущеного газу пропорційно поточній різниці тисків, імітуючи роботу турбінного витратоміра.

## 4. Програмування логіки технологічного захисту (FBD).

На основі даних, отриманих від моделі, розробляється прикладна програма керування. Вона повинна забезпечувати безперервне порівняння поточних значень з аварійними межами MaxLimit, MinLimit та інші, у разі їх порушення, формувати сигнал аварійного зупинки ValveCmd. Використання мови функціональних блоків FBD на цьому етапі є обов'язковим для забезпечення наочності логічних ланцюгів.

## 5. Візуалізація роботи системи через Modbus Poll.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для підтвердження працездатності системи було обрано моніторинг через Modbus Poll замість розробки класичного НМІ. Такий метод дозволяє працювати безпосередньо з регістрами пам'яті контролера та відстежувати зміни параметрів за допомогою графіків, що є набагато ефективнішим для інженерного тестування. В ході апробації всіх передбачених режимів ми переконалися у стабільності передачі значень REAL та зафіксували миттєву реакцію автоматики на аварійні кейси, що передавалися через Modbus-з'єднання.

### **Висновки до першого розділу**

У першому розділі здійснено аналіз газорозподільного пункту як динамічного об'єкта з розподіленими параметрами. Визначено, що для забезпечення роботи імітаційної моделі критично важливим є врахування інерційності газових потоків та термодинамічного ефекту Джоуля-Томсона, який безпосередньо впливає на температурні режими обладнання.

Обґрунтовано вибір апаратної платформи на базі контролера Honeywell ControlEdge RTU2020, що обумовлено його енергоефективністю, кліматичною стійкістю та нативною підтримкою протоколів DNP3 і HART. Комплектація системи датчиками тиску Rosemount та засобами комерційного обліку забезпечує необхідну метрологічну точність і відповідність галузевим стандартам.

Розроблена функціональна схема реалізує концепцію замкнутого контуру, інтегруючи модуль фізичної симуляції безпосередньо в середовище контролера. Формалізовано задачі проектування із застосуванням гібридного підходу: мова Structured Text обрана для реалізації математичного ядра та генерації стохастичних збурень, а Function Block Diagram - для основної логіки технологічних захистів. Отримані результати створюють фундамент для практичної розробки та верифікації програмного забезпечення.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГРП

### 2.1 Ініціалізація проекту та конфігурування системних ресурсів контролера

#### 2.1.1 Створення базового проекту

Початковим етапом розробки системи автоматизації є створення та початкове налаштування проекту в середовищі Honeywell ControlEdge Builder [25]. Цей програмний комплекс є основним інструментом для налаштування апаратних ресурсів контролера, розробки програмної логіки та діагностики роботи системи.

Процедура ініціалізації проекту розпочинається з виклику майстра створення нової конфігурації через меню «Create a New Project». На цьому етапі системі присвоюється унікальний ідентифікатор (ім'я проекту), який надалі використовується для збереження бази даних змінних та файлів конфігурації на жорсткому диску робочої станції. Інструмент створення проекту зображений на рис. 2.1.

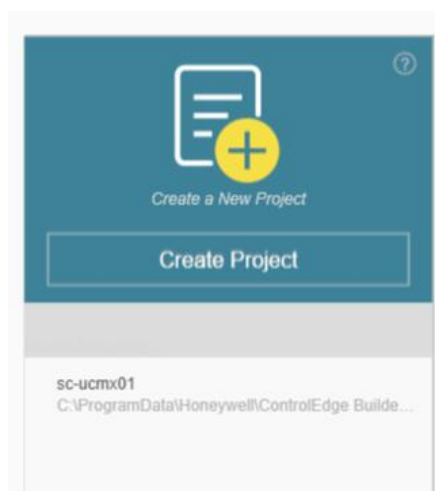


Рисунок 2.1 – Меню створення нового проекту

Важливим кроком є вибір шаблону апаратної платформи, який визначає базову архітектуру системи. Середовище пропонує перелік доступних конфігурацій, що включають різні моделі контролерів (серії 900 або 2020) та типи

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

їх резервування. Для реалізації поставленого завдання було обрано шаблон «sc-ucmx01», як на рис. 2.2. Даний шаблон відповідає конфігурації контролера Honeywell RTU2020 у нерезервованому виконанні (non-redundant controller system). Вибір саме цього варіанту обумовлений технічним завданням, оскільки для локальних систем автоматизації ГРП, як правило, застосовується архітектура з одним процесорним модулем без гарячого резервування, що є економічно доцільним та достатнім з точки зору надійності.

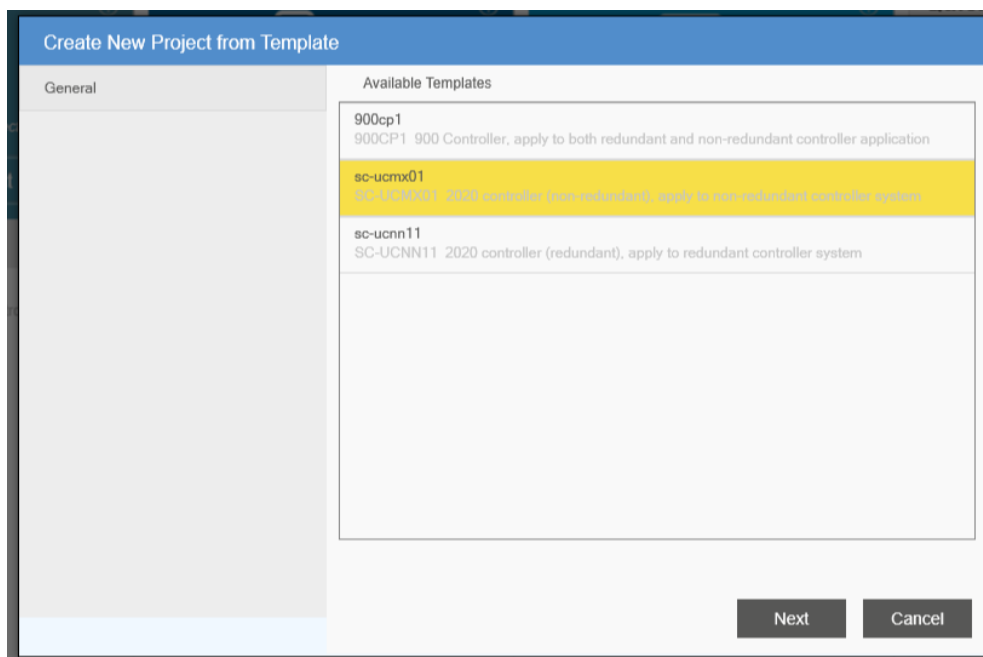


Рисунок 2.2 – Вибір типу контролера

Після підтвердження вибору шаблону середовище автоматично генерує дерево проєкту, завантажуючи відповідні драйвери вводу-виводу та бібліотеки функціональних блоків, специфічні для обраної серії контролера. Це забезпечує коректну адресацію фізичних ресурсів та підготовку системи до подальшого параметрування каналів вимірювання. Вікно проєкту зображено на рис. 2.3.

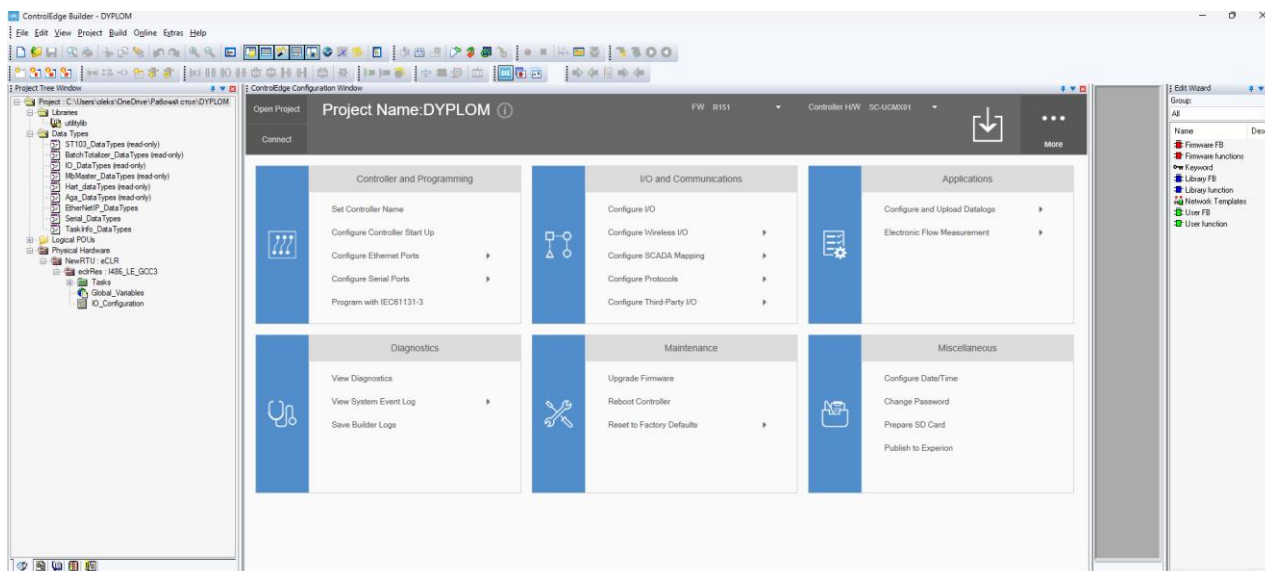


Рисунок 2.3 – Вікно проєкту

## 2.1.2 Оптимізація адресного простору та усунення конфліктів системних змінних

Особливістю використання стандартних шаблонів (зокрема «sc-ustx01») у середовищі Honeywell RTU Builder є автоматична генерація розширеного набору системних діагностичних змінних. Ці змінні, призначені для глибокої діагностики апаратних модулів, за замовчуванням займають значну частину оперативної пам'яті та резервують адреси в області обміну даними.

У ході попереднього тестування було виявлено, що наявність повного переліку передвстановлених системних змінних викликає конфлікт адресації при спробі завантаження користувачької програми, що призводить до помилок компіляції (Build Errors) та блокування переходу контролера в робочий режим (RUN). Крім того, надлишкові змінні створюють додаткове навантаження на процесорний модуль, збільшуючи час циклу опитування. Помилки викликані надлишковими системними змінними зображені на рис. 2.4.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

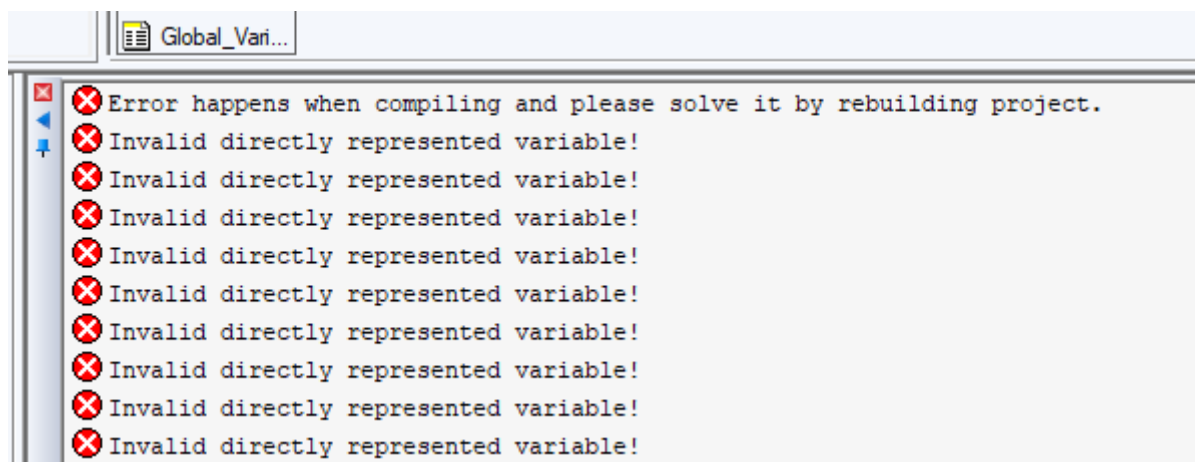


Рисунок 2.4 – Помилки викликані надлишковими системними змінними

Для забезпечення стабільної роботи розроблюваної системи було виконано процедуру оптимізації проекту. Вона полягала у примусовому видаленні (очищенні) списку невикористовуваних системних змінних з таблиці «System Variables». Залишено лише критично необхідні ідентифікатори, що відповідають за загальний статус контролера. Така операція дозволила звільнити адресний простір для користувацьких змінних (описаних у п. 2.2) та усунути програмний конфлікт, забезпечивши коректну компіляцію проекту.

Як було зазначено вище, стандартний шаблон проекту генерує надлишковий набір системних змінних діагностики, які автоматично прив'язуються до певних областей пам'яті контролера. При спробі компіляції проекту це призводить до конфлікту адресного простору (Address Overlap), що блокує завантаження програмного коду. Для усунення цієї колізії та звільнення ресурсів процесора необхідно виконати примусове очищення таблиці глобальних змінних від невикористовуваних системних структур.

Процедура оптимізації виконується за наступним алгоритмом:

1. **Доступ до таблиці змінних.** У дереві навігації проекту (Project Tree) необхідно розгорнути структуру задач та відкрити розділ Global\_Variables. Цей файл містить повний перелік усіх ідентифікаторів, доступних у проекті. Дерево змінних зображено на рис. 2.5.

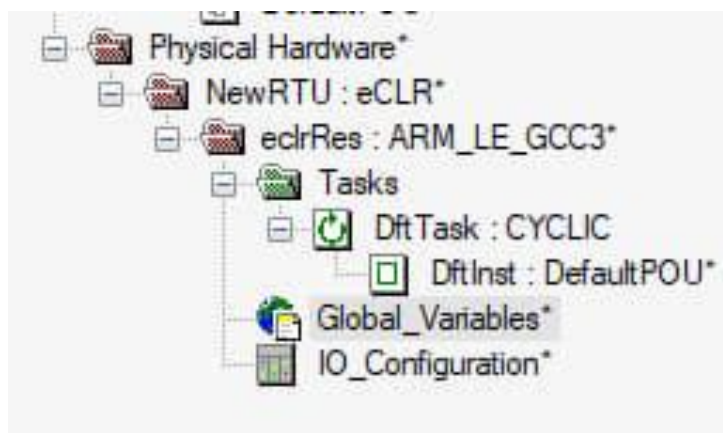


Рисунок 2.5 – Global\_Variables у дереві проекту

2. **Ідентифікація конфліктних областей.** При аналізі списку змінних виявлено групу Task\_Info, яка містить змінні стану системних задач (наприклад, PLC\_TASK\_1...PLC\_TASK\_16). Як видно на фрагменті інтерфейсу, ці змінні підсвічені червоним кольором, що сигналізує про помилку розподілу пам'яті та неможливість їх автоматичної ініціалізації. Вікно зі змінними які потрібно усунути зображено на рис. 2.6.

	Name	Type	Usage	Description	Address	Init	Retain	CDA	EP	TB	HL	Int	Default Hid.
1	System Variables												
17	Common Variables												
18	Input IO Variables												
19	Output IO Variables												
20	Wireless Input Variables												
21	Wireless Output Variables												
22	Controller												
65	DNP3 Slave												
262	Modbus Master												
372	HART-IP SERVER												
410	Modbus Slave												
803	System Errors												
811	WirelessIF Diagnostics												
828	IO Diagnostics												
831	Task_Info												
832	PLC_TASK_1	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 5000								
833	PLC_TASK_2	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 5128								
834	PLC_TASK_3	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 5256								
835	PLC_TASK_4	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 5384								
836	PLC_TASK_5	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 5512								
837	PLC_TASK_6	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 5640								
838	PLC_TASK_7	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 5768								
839	PLC_TASK_8	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 5896								
840	PLC_TASK_9	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 6024								
841	PLC_TASK_10	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 6152								
842	PLC_TASK_11	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 6280								
843	PLC_TASK_12	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 6408								
844	PLC_TASK_13	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 6536								
845	PLC_TASK_14	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 6664								
846	PLC_TASK_15	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 6792								
847	PLC_TASK_16	Task_Info_eCLR	VAR_GLOBAL		%MB1 6920								

Рисунок 2.6 – Вікно змінних

3. **Зміна атрибутів доступу.** За замовчуванням системні групи змінних захищені від редагування. Для виконання модифікації необхідно натиснути праву кнопку миші на групі Task\_Info та у контекстному меню деактивувати опцію Read-only (groups). Це знімає захист від запису та дозволяє вносити зміни в структуру системних даних. Процес вимкнення read-only для системних змінних на рис. 2.7.

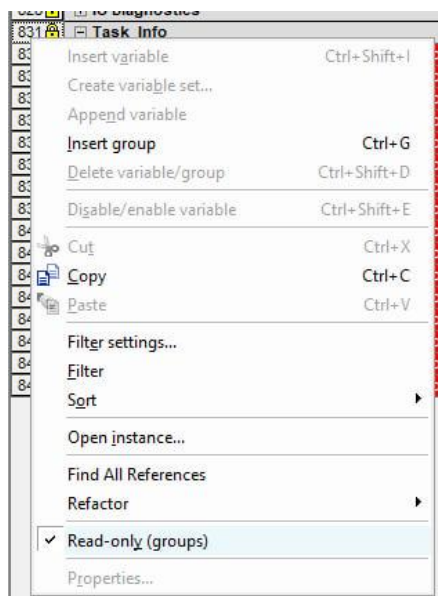


Рисунок 2.7 – Вікно редагування групи змінних

4. **Видалення надлишкових змінних.** Після зняття захисту виконується виділення конфліктних змінних (підсвічених червоним індикатором помилки). Через контекстне меню обирається команда Delete variable/group. Вікно з можливістю видалення та результат видалення змінних зображено на рис. 2.8 – 2.9.

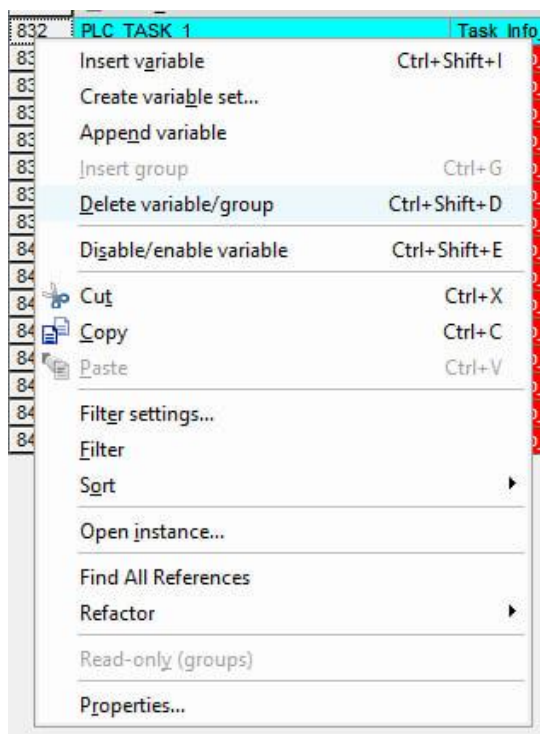


Рисунок 2.8 – Вікно редагування змінної

	Name	Type	Usage	Description	Address	Init	Retain	CDA	EIP	TB	Hi...	Int.	Default Hid...
1	System Variables												
17	Common Variables												
18	Input IO Variables												
19	Output IO Variables												
20	Wireless Input Variables												
21	Wireless Output Variables												
22	Controller												
65	DNP3 Slave												
283	Modbus Master												
375	HART-IP SERVER												
410	Modbus Slave												
803	System Errors												
811	WirelessIF Diagnostics												
828	IO Diagnostics												
831	Task_Info												

Рисунок 2.9 – Результат видалення надлишкових системних змінних

## 2.2 Програмне конфігурування та параметризація каналів вводу-виводу

Після завершення етапу структурного створення проєкту в середовищі Honeywell Builder, наступним кроком є налаштування апаратної периферії контролера, вікно налаштування I/O зображено на рис. 2.10. Процес конфігурування входів та виходів (I/O) є фундаментальним для створення «цифрового двійника» газорозподільного пункту.

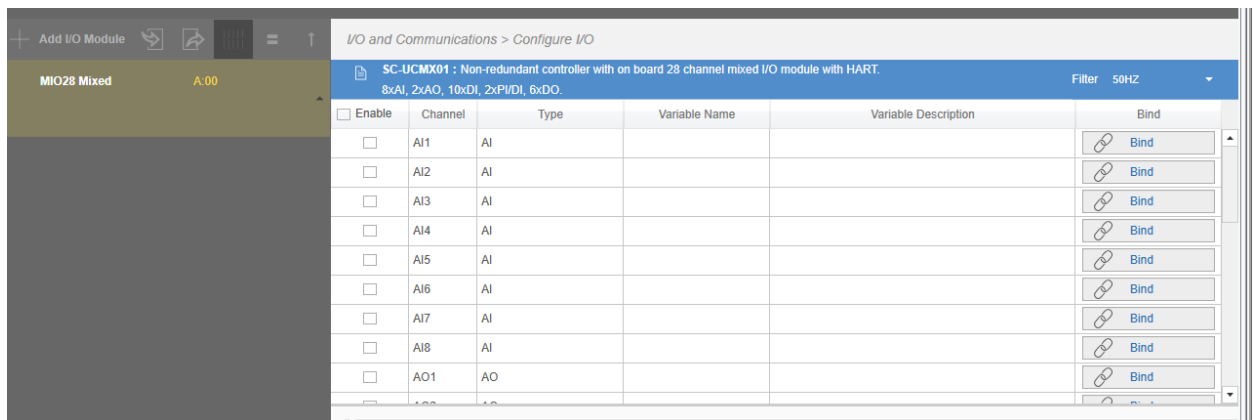


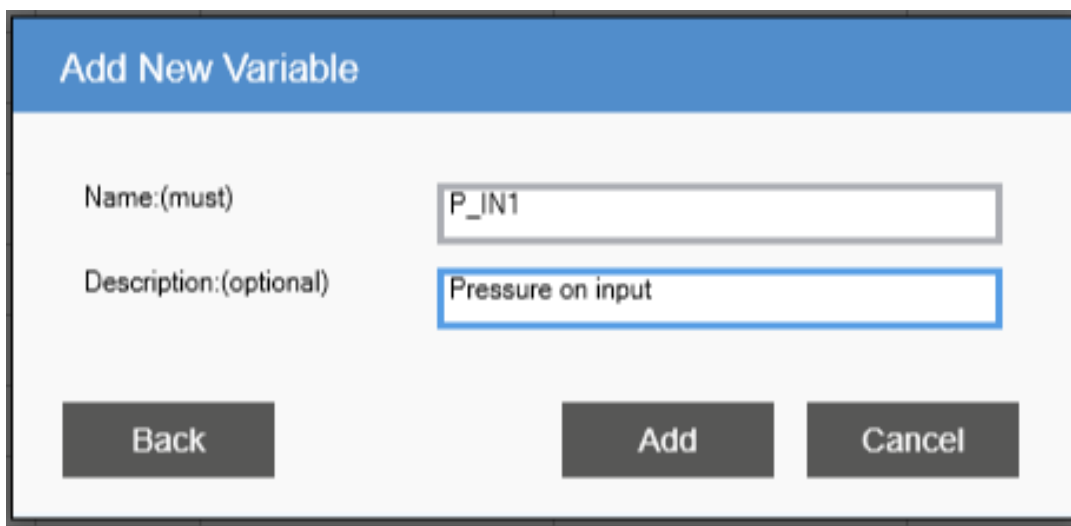
Рисунок 2.10 – Вікно налаштування входів-виходів (I/O)

Незважаючи на те, що в даній роботі реалізовано імітаційне моделювання, параметризація контролера Honeywell RTU 2020 виконується за стандартами реального промислового об'єкта. Це означає, що ми створюємо повноцінну карту адрес та фізичних прив'язок, де джерелом сигналу замість фізичного датчика

виступає програмний генератор даних (імітатор), проте для самого контролера цей процес залишається прозорим.

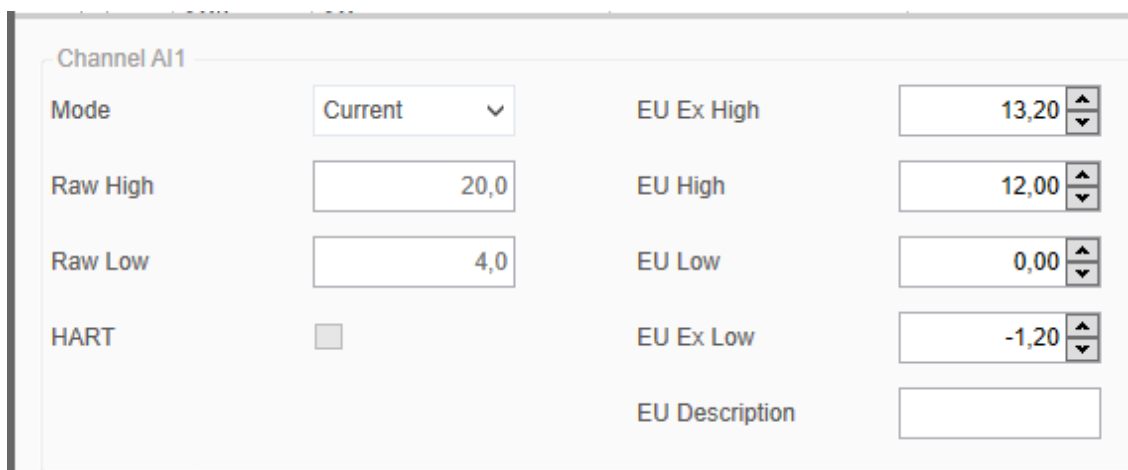
### 2.2.1 Конфігурування аналогових входів (AI) та діагностичних меж

Аналогові входи модуля MIO28 Mixed налаштовуються на роботу з уніфікованим струмовим сигналом 4–20 мА. Для кожного каналу (тиск, температура) проводиться масштабування електричного сигналу у відповідні інженерні одиниці (EU). Налаштування I/O відбувається за принципом: 1. Натиснути “Bind” напроти типу входу-виходу (AI, DI, та інші) -> 2. Створення змінної (рис. 2.11) -> 3. Параметрування вхідного вихідного сигналу (рис. 2.12).



The screenshot shows a dialog box titled "Add New Variable". It has two input fields: "Name:(must)" with the value "P\_IN1" and "Description:(optional)" with the value "Pressure on input". At the bottom, there are three buttons: "Back", "Add", and "Cancel".

Рисунок 2.11 – Створення змінної “P\_IN1” для визначення тиску на вході



The screenshot shows the configuration for "Channel AI1". It includes a "Mode" dropdown set to "Current". Below it are "Raw High" (20,0) and "Raw Low" (4,0) input fields. A "HART" checkbox is unchecked. On the right side, there are four "EU" value fields with up/down arrows: "EU Ex High" (13,20), "EU High" (12,00), "EU Low" (0,00), and "EU Ex Low" (-1,20). At the bottom right, there is an empty "EU Description" field.

Рисунок 2.12 – Параметрування вхідного сигналу AI1

Особливу увагу приділено параметрам EU Ex High та EU Ex Low (Extended Range). У реальних системах ці значення використовуються для діагностики справності обладнання, і в нашій імітаційній моделі вони залишаються активними для перевірки реакції системи на аварійні стани:

- **EU Ex Low:** встановлюється на рівні -5...-10% від нижньої межі. Якщо імітований сигнал впаде нижче 4 мА (наприклад, до 3.8 мА), система ідентифікує це як «обрив лінії»;
- **EU Ex High:** встановлюється на рівні 105–110%. Якщо сигнал перевищить 20 мА, контролер зафіксує несправність сенсора.

Параметризація основних каналів тиску:

- **вхідний тиск (P\_IN1):** діапазон 0–12 бар. Масштабування: 4 мА = 0 бар; 20 мА = 12 бар;
- **вихідний тиск (P\_IN2):** діапазон 0–6 бар. Масштабування: 4 мА = 0 бар; 20 мА = 6 бар;
- для температурних каналів (T\_IN1, T\_IN2) встановлено діапазон - 40...+60 °С, а для датчика температури в приміщенні (T\_Room) - 0...50 °С. На рис 2.13 зображено налаштовані входи АІ.

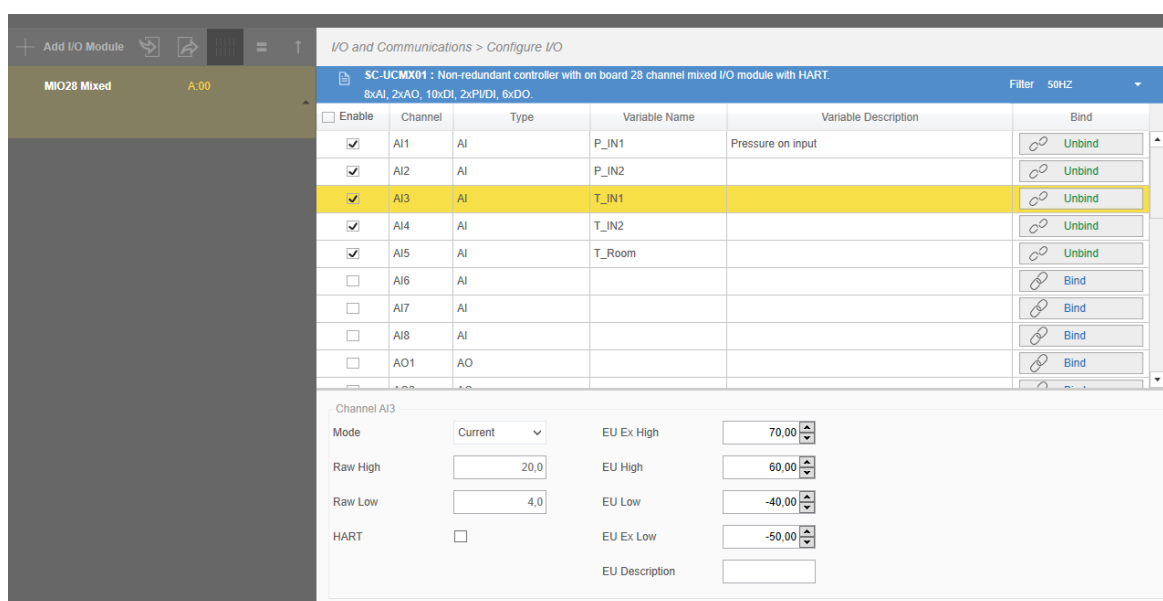


Рисунок 2.13 – Налаштовані аналогові входи

## 2.2.2 Налаштування дискретних сигналів (DI) та логіки безпеки (DO)

Дискретні входи конфігуруються для фіксації критичних подій та станів запірною клапану. Налаштування дискретних входів зображено на рис. 2.14.

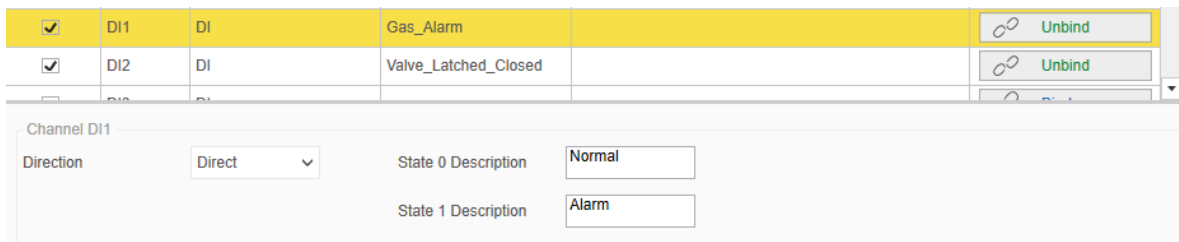


Рисунок 2.14 – Налаштування дискретних входів

Сигналізатор загазованості (DI1 - GasAlarm): для цього каналу в полі State 1 Description вказується «ALARM». У моделі перехід цього входу в стан «1» є пріоритетною подією, що блокує роботу ГРП.

Зворотний зв'язок (DI2 - Valve\_Latched\_Closed): цей сигнал імітує роботу кінцевого вимикача клапана, підтверджуючи виконання команди.

Для дискретного виходу ValveCmd, що керує відсікачем, обов'язково налаштовується параметр Failsafe Output Mode. Встановлюється User Config Output = 0 (стан «Закрито»). Це важливо оскільки навіть в імітаційній моделі ми відтворюємо логіку безпеки, де при втраті зв'язку або збої живлення контролера клапан повинен автоматично перейти в безпечний (закритий) стан (рис. 2.15).

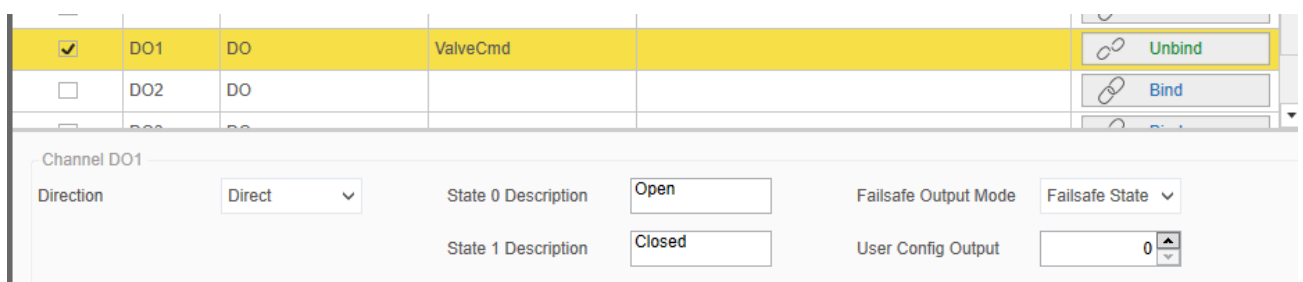


Рисунок 2.15 – Параметри дискретного виходу DO1

## 2.2.3 Конфігурування імпульсного входу (PI) для обліку газу

Облік витрат реалізовано через змінну Gas\_Volume. EU Description: Задається як  $m^3$ .

Контролер налаштовується на підрахунок кількості імпульсів, що надходять від імітатора лічильника. Вага одного імпульсу програмно задається рівною 0.1 або 1 m<sup>3</sup> що дозволяє моделювати динаміку споживання газу в реальному часі як на рис. 2.16.



Рисунок 2.16 – Створення PI1

## 2.2.4 Мапінг змінних та приведення типів даних для імітаційної логіки

Після фізичного налаштування каналів модуля вводу-виводу, наступним етапом є організація структури даних у проєкті. Для того, щоб створені змінні були доступні для алгоритмів імітаційного моделювання та розрахунків, необхідно виконати їх перенесення до загального реєстру та змінити їх тип даних на стандартні типи мов програмування МЕК 61131-3. Вікно новостворених змінних наведено на рис. 2.17.

	Name	Type	Usage	Description	Address	Init	Retain	CDA	EP	TB	Hi	Init	Default
17	System Variables												
18	Common Variables												
19	Input IO Variables												
20	P_IN1	ANALOG_INPUT_TYPE	VAR_GLOBAL	Pressure on input									
21	P_IN2	ANALOG_INPUT_TYPE	VAR_GLOBAL	Pressure on output									
22	T_IN1	ANALOG_INPUT_TYPE	VAR_GLOBAL	Temperature on input									
23	T_IN2	ANALOG_INPUT_TYPE	VAR_GLOBAL	Temperature on output									
24	T_Room	ANALOG_INPUT_TYPE	VAR_GLOBAL	Room temperature									
25	Gas_Alarm	DIGITAL_INPUT_TYPE	VAR_GLOBAL	Gas alarm									
26	Valve_Latched_Closed	DIGITAL_INPUT_TYPE	VAR_GLOBAL	Valve signal									
27	ValveCmd_READBACK	DIGITAL_OUTPUT_READBACK...	VAR_GLOBAL	Valve signal									
28	Gas_Vol	PULSE_INPUT_TYPE	VAR_GLOBAL	Gas counter									
29	Output IO Variables												
30	ValveCmd	DIGITAL_OUTPUT_TYPE	VAR_GLOBAL	Valve control									
31	Wireless Input Variables												

Рисунок 2.17 – Вікно Global Variables після конфігурації входів-виходів

Однією з головних “проблем” програми ControlEdge є створення складних системних типів даних для входів та виходів. Ці типи даних містять не тільки значення, а й статуси та системні дані. Для імітаційного моделювання та роботи алгоритмів ці типи даних є надлишковими та незручними. Тому в групі Common Variables потрібно змінити типи даних на “базові” (табл. 2.1):

- **аналогові сигнали (P\_IN1, T\_IN2 тощо):** тип змінюється з ANALOG\_INPUT\_TYPE на REAL. Це дозволяє використовувати

значення тиску та температури безпосередньо у математичних формулах як числа з плаваючою комою;

- **дискретні сигнали (Gas\_Alarm, ValveCmd):** тип змінюється з DIGITAL\_INPUT\_TYPE або DIGITAL\_OUTPUT\_TYPE на BOOL. Це необхідно для реалізації логічних операцій (AND, OR, NOT) в алгоритмах захисту;
- **імпульсні сигнали (Gas\_Vol):** тип PULSE\_INPUT\_TYPE замінюється на REAL або DINT (залежно від обраної стратегії накопичення), що дозволяє імітувати інкрементальне зростання об'єму газу в часі.

Таблиця 2.1 – Перетворення типів даних у змінних входу-виходу

Назва змінної	Вхідний тип	Вихідний тип	Призначення
P_IN1	ANALOG_INPUT_TYPE	REAL	Вхідний тиск газу
P_IN2	ANALOG_INPUT_TYPE	REAL	Вихідний тиск газу
T_IN1	ANALOG_INPUT_TYPE	REAL	Температура на вході
T_IN2	ANALOG_INPUT_TYPE	REAL	Температура на виході
T_Room	ANALOG_INPUT_TYPE	REAL	Температура всередині ГРП
Gas_Alarm	DIGITAL_INPUT_TYPE	BOOL	Загазованість всередині ГРП
ValveCmd	DIGITAL_OUTPUT_TYPE	BOOL	Контроль клапану
Gas_Vol	PULSE_INPUT_TYPE	REAL	Лічильник газу

На рис. 2.18 зображено результат перенесення всіх змінних у групу “Common variables” та зміну їх типів даних.

Name	Type	Usage	Description	Address	Init	Retain	CDA	EP	TB	HL	Init.	Default
System Variables												
Common Variables												
P_IN1	REAL	VAR_GLOBAL	Pressure on input									
P_IN2	REAL	VAR_GLOBAL	Pressure on output									
T_IN1	REAL	VAR_GLOBAL	Temperature on input									
T_IN2	REAL	VAR_GLOBAL	Temperature on output									
T_Room	REAL	VAR_GLOBAL	Room temperature									
Gas_Alarm	BOOL	VAR_GLOBAL	Gas alarm									
Valve_Latched_Closed	BOOL	VAR_GLOBAL	Valve signal									
Gas_Vol	REAL	VAR_GLOBAL	Gas counter									
ValveCmd	BOOL	VAR_GLOBAL	Valve control									
ValveCmd_READBACK	DIGITAL_OUTPUT_READBA...	VAR_GLOBAL										
Input IO Variables												

Рисунок 2.18 – Вікно “Global Variables”

## 2.3 Розробка алгоритму автоматизації ГРП

### 2.3.1 Структурування програмних одиниць (POU)

Проектна архітектура в середовищі Honeywell Builder організована через розділення функцій на окремі програмні модулі (Logical POU), що завантажуються в ієрархію контролера. Для роботи було створено 2 логічні блоки (рис. 2.18). Simulator (ST), який буде використаний для симуляції роботи ГРП та MainControl (FBD), який буде обробляти основну логіку. На рис. 2.19 зображено процес створення логічного блоку MainControl на мові FBD.

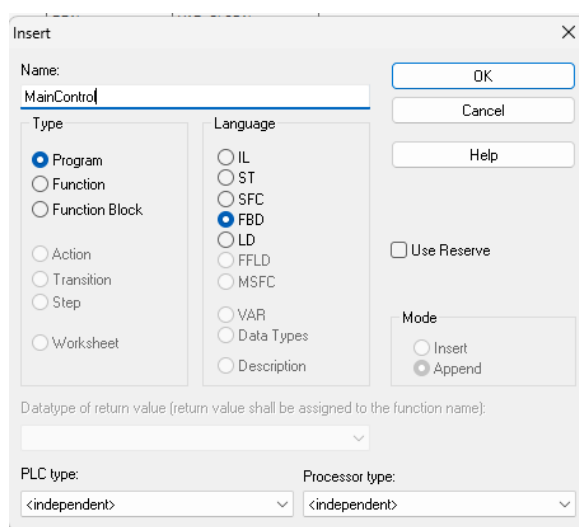


Рисунок 2.19 – Створення логічного блоку

Нижче наведений короткий опис створених логічних блоків:

- **Simulator:** програмний модуль, що виступає джерелом даних. Модуль генерує динамічні зміни тиску та температури, накладаючи на розрахункові значення математичні шуми та випадкові відхилення для максимальної імітації реальних процесів;
- **MainControl:** модуль основної логіки, де зосереджені алгоритми захисту, блокувань та формування телемеханічних сигналів для SCADA-системи.

На рис. 2.20 зображено розміщення програмних модулів в ієрархії проекту.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

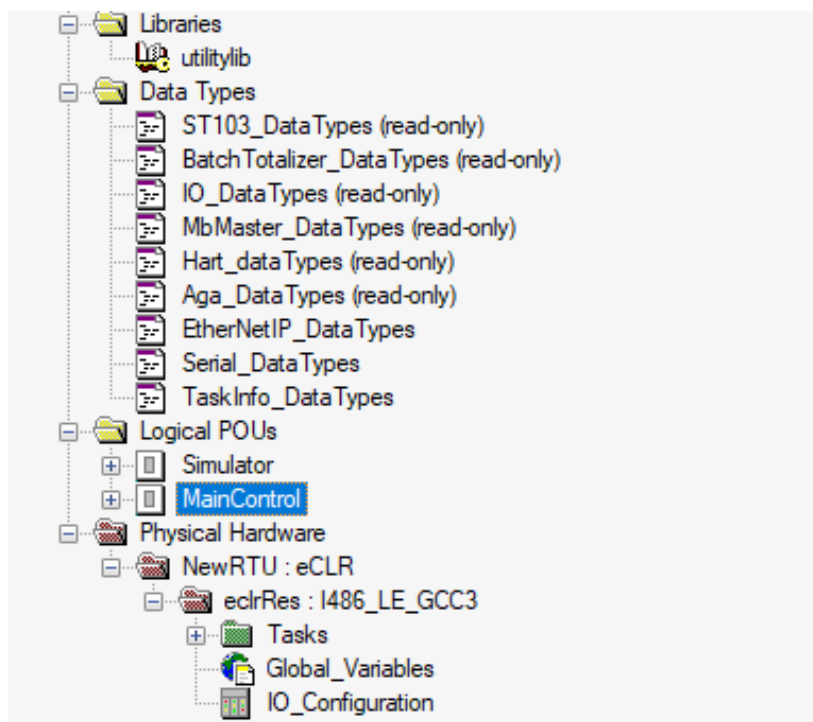


Рисунок 2.20 – Розміщення програмних модулів у ієрархії проекту

### 2.3.2 Основні алгоритми роботи програми MainControl

Логіка модуля MainControl виконується циклічно та відповідає за обробку вхідних даних від імітатора та формування команд для виконавчих механізмів. В основу програми покладено чотири алгоритми контролю.

#### Контроль технологічних меж (тиск та температура)

Для перевірки відповідності параметрів нормі використовуються блоки порівняння - компаратори. Для кожного аналогового параметра P\_IN1, P\_IN2, T\_IN1, T\_IN2, T\_Room у програмі задано «коридор» допустимих значень:

- **принцип роботи:** значення параметра подається на блоки GT – “верхня межа” та LT – “нижня межа”;
- **результат:** якщо тиск або температура виходять за встановлені межі, на виході блоків з'являється логічна одиниця активуюючи відповідний прапорець аварії, до прикладу AlarmP\_IN1 або AlarmT\_IN2.

#### Алгоритм перевірки редукування газу

Цей алгоритм контролює справність регулятора тиску шляхом аналізу різниці між входом та виходом ГРП:

- блок SUB обчислює різницю: P\_IN1 - P\_IN2;

					KPM.AKCM - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

- отриманий результат порівнюється з мінімально допустимим перепадом P\_SUB;
- якщо різниця тисків стає меншою за уставку, активується сигнал ReductuionALARM.

### **Моніторинг загазованості**

Алгоритм обробки сигналу GasAlarm є найбільш простим, оскільки працює з дискретним сигналом. При спрацюванні датчика загазованості в приміщенні ГРП, логічна одиниця одразу надходить у ланцюг аварійного відключення. Цей параметр не потребує математичних розрахунків і має пряму дію на закриття клапана.

### **Логіка керування відсікачем (клапаном)**

Усі виявлені аварійні стани зводяться до єдиного вихідного сигналу - ValveCmd. Для цього використовується багатоканальний логічний елемент OR:

- **зв'язок з аваріями:** на входи блоку OR підключені сигнали від усіх контурів: порушення меж тиску, аварія редукування, критична температура та загазованість;
- **дія:** поява сигналу "1" на будь-якому вході призводить до того, що вихід ValveCmd також стає рівним "1";
- **принцип безпеки:** програма працює за логікою «Fail-Safe». Оскільки запірна арматура на ГРП зазвичай закривається при знятті напруги або отриманні аварійного імпульсу.

### **2.3.3 Специфікація та характеристика використаних функціональних блоків**

Для початку програмування мовою FBD, потрібно підібрати блоки які будуть використані в майбутній програмі. Розробка логічної структури модуля MainControl базується на використанні стандартної бібліотеки функціональних блоків середовища розробки [26]. Кожен блок виконує чітко визначену

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

арифметичну або логічну операцію над вхідними даними, що надходять від модуля імітації або фізичних каналів.

Для реалізації системи захисту та моніторингу ГРП було задіяно такі типи блоків:

- **GT (Greater Than) та LT (Less Than):** дані блоки є основними компонентами вузлів контролю технологічних меж. Вони виконують порівняння поточних значень тиску та температури P\_IN, T\_IN з уставками, що зберігаються у групі Common Variables.;
- **SUB (Subtraction):** арифметичний блок, що використовується для обчислення перепаду тиску на вузлі редукції.
- **OR (Logical OR):** логічний суматор. У схемі використано як двомовні блоки для об'єднання сигналів «High/Low» одного параметра, так і багатоканальний блок для формування загальної команди на закриття клапана;
- **AND та NOT:** використовуються для створення умовних залежностей. Наприклад, для активації аварії редукції лише за умови, що клапан фактично відкритий.

Для оцінки складності розробленого алгоритму та необхідних обчислювальних ресурсів контролера проведено підрахунок використаних елементів (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Підрахунок використаних блоків

Тип блоку	Призначення	Кількість
GT	Перевірка верхньої межі	5
LT	Перевірка нижньої межі	5
OR	Логічне “або”	6
SUB	Блок різниці	1
AND	Логічне “і”	1
NOT	Логічне “не”	1

### 2.3.4 Специфікація внутрішніх змінних та технологічних уставок

Для реалізації алгоритму захисту в модулі MainControl використовується набір змінних, що забезпечують порівняння параметрів та формування аварійних сигналів. Усі ці змінні зосереджені в розділі Common Variables і мають глобальний статус, що дозволяє логіці «бачити» дані від імітатора та передавати команди на вихід.

#### Технологічні уставки

Це опорні значення (типу REAL), які подаються на другі входи компараторів GT та LT. Саме з ними програма порівнює поточний тиск чи температуру (табл 2.3).

Таблиця 2.3 – Лімітні змінні типу REAL

Назва змінної	Фіксоване значення	Роль у схемі FBD
P_IN1_MaxLimit	8.0	Верхня межа тиску на вході
P_IN1_MinLimit	3.0	Нижня межа тиску на вході
P_IN2_MaxLimit	0.45	Верхня межа тиску на виході
P_IN2_MinLimit	0.2	Нижня межа тиску на виході
T_IN1_MaxLimit	40.0	Верхня межа температури на вході
T_IN1_MinLimit	-10.0	Нижня межа температури на вході
T_IN2_MaxLimit	35.0	Верхня межа температури на виході
T_IN2_MinLimit	-15.0	Нижня межа температури на виході
RoomTLimitHigh	40.0	Верхня межа температури в приміщенні ГРП
RoomTLimitLow	5.0	Нижня межа температури в приміщенні ГРП
P_SUB	6.5	Уставка для перевірки редукції

#### Аварійні прапорці та статуси (Alarm Flags)

Ці змінні типу BOOL є результатами роботи блоків. Вони збирають аварії з кожного каналу і записують булеву одиницю в себе, пізніше ці дані можна буде використати в SCADA інтерфейсі для сигналізації аварій ГРП (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Аварійні та вихідні змінні логічної схеми

Назва змінної	Опис
AlarmP_IN1	Проблема з тиском на вході
AlarmP_IN2	Проблема з тиском на виході
AlarmT_IN1	Проблема з температурою на вході
AlarmT_IN2	Проблема з температурою на виході
AlarmRoomTemp	Проблема з температурою в приміщенні ГРП
ReductionALARM	Проблема з редукуванням газу

Нові змінні які були створені для коректної роботи FBD програми MainControl відображені на рис. 2.21.

28	P_IN1_MaxLimit	REAL	VAR_GLOBAL		8.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
29	P_IN1_MinLimit	REAL	VAR_GLOBAL		3.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
30	P_IN2_MaxLimit	REAL	VAR_GLOBAL		0.45	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
31	P_IN2_MinLimit	REAL	VAR_GLOBAL		0.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
32	T_IN1_MaxLimit	REAL	VAR_GLOBAL		40.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
33	T_IN1_MinLimit	REAL	VAR_GLOBAL		-10.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
34	T_IN2_MaxLimit	REAL	VAR_GLOBAL		35.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
35	T_IN2_MinLimit	REAL	VAR_GLOBAL		15.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
36	RoomLimitHigh	REAL	VAR_GLOBAL		40.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
37	RoomLimitLow	REAL	VAR_GLOBAL		5.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
38	P_SUB	REAL	VAR_GLOBAL		6.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
39	AlarmP_IN1	BOOL	VAR_GLOBAL			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
40	AlarmP_IN2	BOOL	VAR_GLOBAL			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
41	AlarmT_IN1	BOOL	VAR_GLOBAL			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
42	AlarmT_IN2	BOOL	VAR_GLOBAL			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
43	AlarmRoomTemp	BOOL	VAR_GLOBAL			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
44	ReductionAlarm	BOOL	VAR_GLOBAL			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
45	Input IO Variables								

Рисунок 2.21 – Змінні створені для роботи FBD

### 2.3.5 Побудова логічної структури програми та взаємозв'язок функціональних вузлів

Розробка FBD-програми в середовищі проектування виконувалася шляхом послідовного з'єднання функціональних блоків у єдину обчислювальну мережу. Логіка модуля MainControl розділена на автономні сегменти, кожен з яких відповідає за окремий вузол безпеки ГРП.

Формування сегментів моніторингу аналогових параметрів

Першим етапом розробки стало створення ланцюгів контролю тиску та температури (рис. 2.22). Побудова виконана за ієрархічним принципом:

- **вхідний каскад:** технологічні змінні типу REAL подаються на входи блоків порівняння GT та LT;

- **параметризація:** другим входом для кожного компаратора виступає відповідна лімітна змінна зі сталим значенням, що дозволяє гнучко змінювати межі спрацювання захисту без втручання в код;
- **проміжна агрегація:** виходи блоків GT та LT об'єднуються через логічний елемент OR. Це дозволяє сформувати єдиний аварійний прапор для кожного параметра, який активується при будь-якому виході за межі “коридору” безпеки.

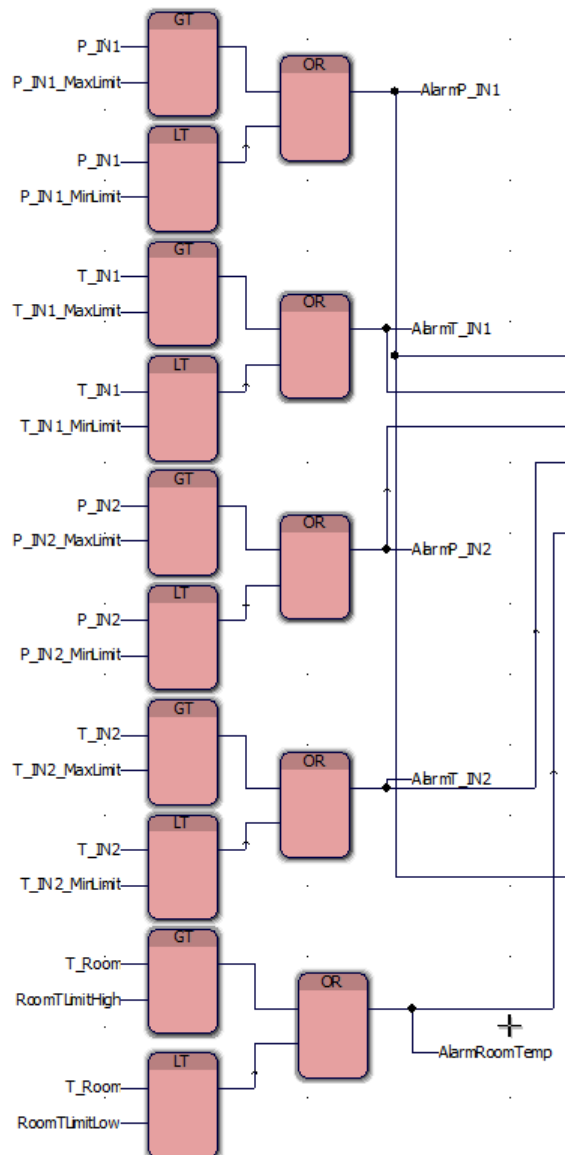


Рисунок 2.22 – FBD блок контролю тиску і температури

## Реалізація вузла діагностики редукції та загазованості

Наступним кроком стало налаштування сегмента, що контролює ефективність зниження тиску та наявність витоків газу (рис. 2.23).

1. **Математична обробка:** блок SUB виконує віднімання вихідного тиску від вхідного, обчислюючи фактичний перепад на регуляторі.
2. **Верифікація:** отримане значення порівнюється з уставкою P\_SUB.
3. **Логічне блокування:** для запобігання помилковим спрацюванням, коли клапан закритий і редукція не відбувається, сигнал проходить через блок AND, де враховується інвертований стан виходу P\_IN1.

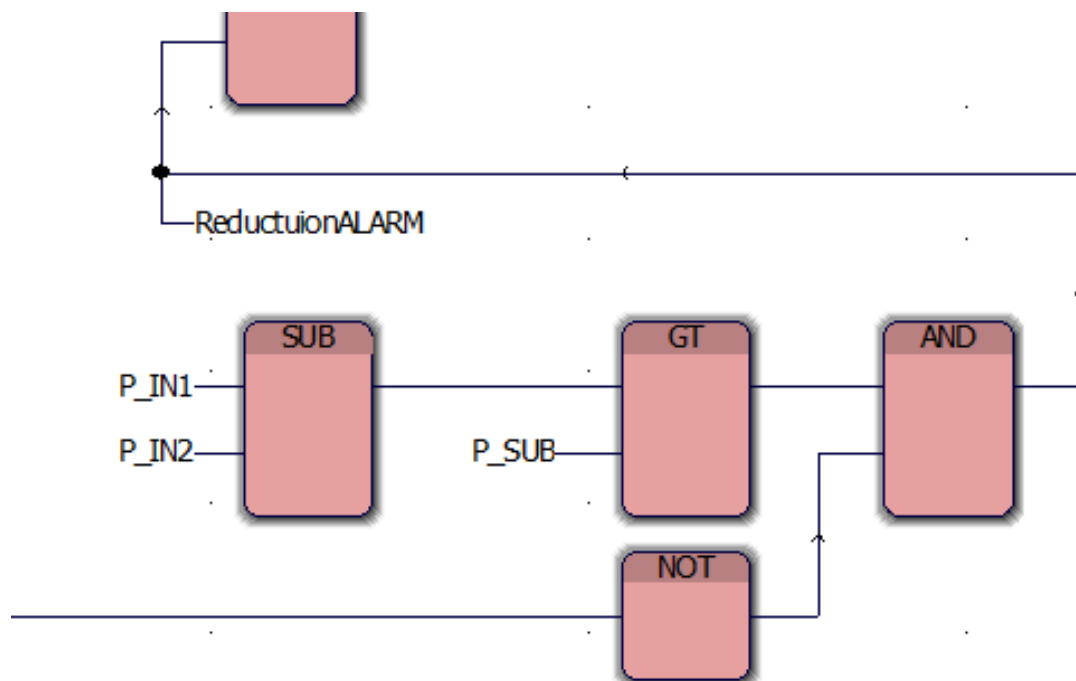


Рисунок 2.23 – FBD блок контролю редукування газу

Сигнал загазованості GasAlarm інтегрований у загальну схему як пріоритетний дискретний вхід, що забезпечує миттєву реакцію системи на аварійну подію (рис.2.24).

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

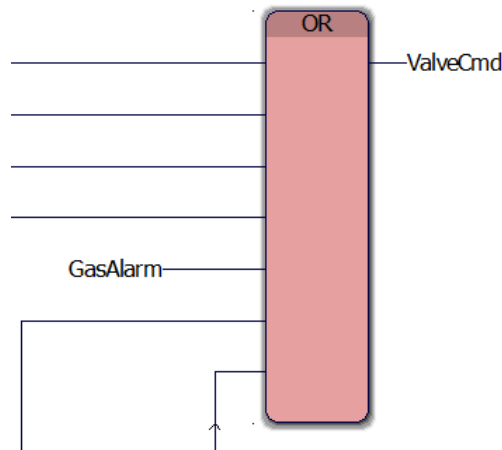


Рисунок 2.24 – FBD блок контролю загазованості

Синтез вихідної команди керування

Завершальним етапом побудови програми стало зведення всіх сформованих аварійних сигналів до фінального каскаду керування (рис 2.25):

- **логічне підсумовування:** використано багатоканальний блок OR, на входи якого підключено всі аварійні прапори;
- **формування виходу:** вихід цього блоку жорстко прив'язаний до змінної ValveCmd.

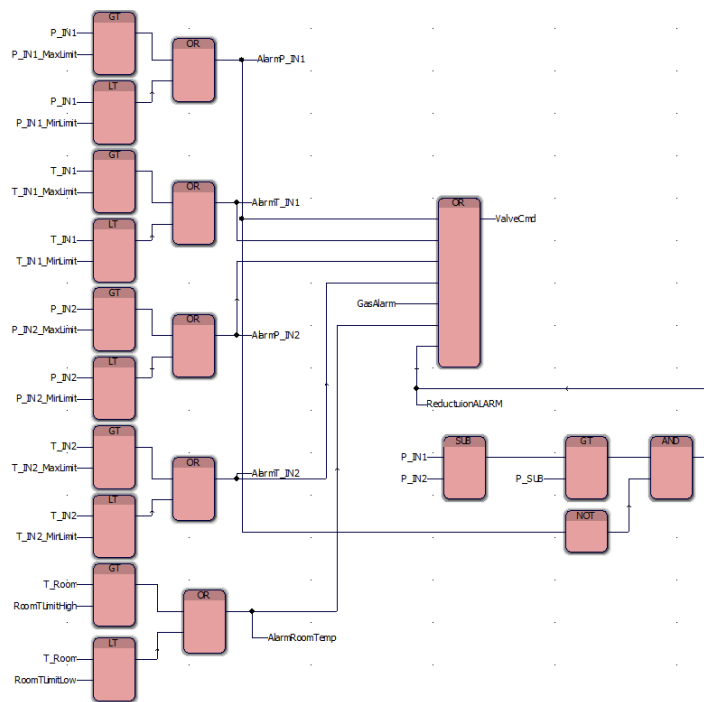


Рисунок 2.25 – Загальний вигляд FBD програми

Така архітектура побудови програми гарантує, що поява будь-якого аварійного сигналу в будь-якому сегменті ланцюга призводить до негайної зміни стану вихідної змінної та “закриття” віртуального клапана.

### 2.3.6 Конфігурування черговості виконання програмних модулів

Для реалізації розроблених алгоритмів у програмному середовищі проведено призначення створених модулів (POU) до виконання апаратним ресурсом контролера. У структурі проекту Physical Hardware для ресурсу NewRTU:eCLR сконфігуровано задачу DftTask із типом виконання CYCLIC (рис. 2.26).

Порядок виклику програмних модулів у межах одного циклу сканування контролера має критичне значення для точності моделювання. Для виключення затримки сигналу на один цикл було встановлено наступну черговість:

- **Sim (Simulator)** - виконує генерацію вхідних масивів даних, імітуючи роботу датчиків тиску та температури;
- **MainCNTR (MainControl)** - здійснює аналіз отриманих значень, їх порівняння з уставками та формування команд керування.

Така послідовність гарантує детермінованість роботи системи - основна програма захисту завжди обробляє актуальні дані, що були сформовані імітатором у поточному циклі контролера. Це дозволяє системі миттєво реагувати на змодельовані зміни параметрів об'єкта.

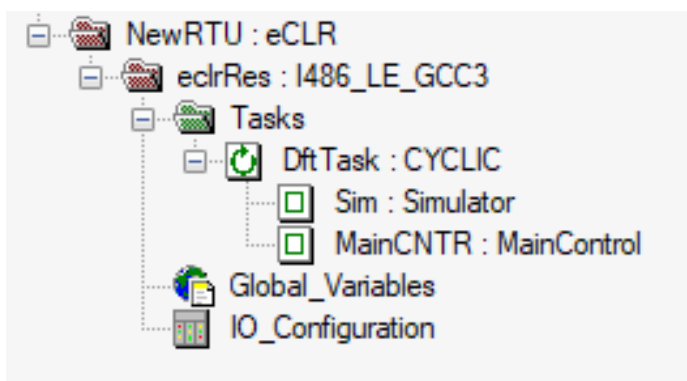


Рисунок 2.26 – Присвоєння програмних блоків до циклічного виконання

## 2.4 Розробка та опис імітаційного модуля Simulator

Для імітації “живої” ГРП було розроблено програмний модуль Simulator. Цей модуль функціонує на мові ST та призначений для генерації значень тиску на вході та виході, температури та об’єму газу, враховуючи інерційність фізичних процесів та роботу запірної арматури.

### 2.4.1 Внутрішні змінні імітаційного блоку

Для коректної роботи алгоритму моделювання в розділ **Common Variables** було додано низку службових змінних. Вони дозволяють керувати станом моделі та створювати динамічні зміни параметрів (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 - Основні змінні імітаційного модуля

Назва змінної	Тип даних	Роль в моделі
Sim_Inlet_Noise	REAL	Імітаційний шум
Sim_Mode	INT	Режим роботи імітаційної моделі
Target_P1	REAL	Цільові значення тиску на вході
Target_P2	REAL	Цільові значення тиску на виході
Sim_T2_Offset	REAL	Зсув температури на виході
Valve_Latched_Closed	BOOL	Перевірка стану клапана

### 2.4.2 Принцип роботи та алгоритмічна структура симулятора

Програма імітатора виконується циклічно і складається з декількох функціональних частин, кожна з яких відповідає за певну фізичну складову процесу.

#### 1. Генерація імітаційного шуму та базових параметрів

На кожному циклі значення Sim\_Inlet\_Noise інкрементується на 0.01 у діапазоні від -0.05 до 0.05. Це дозволяє уникнути статичності «ідеальних» графіків, додаючи до сигналів тиску та температури реалістичні коливання. Також тут задаються базові значення температури приміщення та вхідного газу.

#### 2. Вибір режимів роботи (CASE Sim\_Mode)

Логіка побудована на перемикачі режимів. Залежно від обраного Sim\_Mode, симулятор встановлює різні цільові значення для тиску та температури:

- режим 0: робота в межах норми (6.0 бар на вході, 0.3 бар на виході);
- режими 1–8: моделювання аварійних ситуацій (перевищення/падіння тиску та температури);
- режим 9: повне скидання параметрів до початкових значень.

Детальний аналіз кожного режиму та реакція системи на них будуть розглянуті у Розділі 3.

### 3. Моделювання динаміки тиску та роботи клапана

Це ключова частина симулятора, яка відтворює інерційність системи:

- якщо надходить команда ValveCmd, клапан переходить у стан закриття. При цьому тиск на вході P\_IN1 та виході P\_IN2 починає поступово знижуватися до нуля з кроком 0.05 та 0.005 відповідно;
- якщо клапан відкритий, система плавно підтягує поточні значення до цільових значень Target\_P. Це дозволяє імітувати реальний процес заповнення газопроводів та роботу регулятора.

### 4. Термодинаміка та облік газу

Для моделювання температури на виході T\_IN2 використано спрощену математичну модель ефекту Джоуля-Томсона. Температура падає пропорційно різниці тисків між входом та виходом:  $T\_IN2 := T\_IN1 - ((P\_IN1 - P\_IN2) * 0.5)$ .

Також реалізовано лічильник об'єму газу: якщо тиск на виході перевищує 0.1 бар, значення Gas\_Volume постійно збільшується, імітуючи проходження потоку через лічильник. Приклад програми імітаційної моделі зображено на рис. 2.27 – 2.28.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

```

1 Sim_Inlet_Noise := Sim_Inlet_Noise + 0.01;
2 IF Sim_Inlet_Noise > 0.05 THEN
3   Sim_Inlet_Noise := -0.05;
4 END_IF;
5
6 Target_T1 := 15.0;
7 Sim_T2_Offset := 0.0;
8
9 T_Room := 20.0 + (Sim_Inlet_Noise * 2.0);
10
11 IF Sim_Mode = 8 THEN
12   T_Room := 65.0;
13 END_IF;
14
15 CASE Sim_Mode OF
16 0:
17   Target_P1 := 6.0 + Sim_Inlet_Noise;
18   Target_P2 := 0.3 + (Sim_Inlet_Noise * 0.1);
19 1:
20   Target_P1 := P_IN1_MaxLimit + 1.0;
21   Target_P2 := 0.3;
22 2:
23   Target_P1 := P_IN1_MinLimit - 1.0;
24   Target_P2 := 0.3;
25 3:
26   Target_P1 := 6.0 + Sim_Inlet_Noise;
27   Target_P2 := P_IN2_MaxLimit + 0.2;
28 4:
29   Target_P1 := 6.0 + Sim_Inlet_Noise;
30   Target_P2 := P_IN2_MinLimit - 0.1;
31 5:
32   Target_P1 := 6.0;
33   Target_P2 := 0.3;
34   Target_T1 := T_IN1_MaxLimit + 5.0;
35 6:
36   Target_P1 := 6.0;
37   Target_P2 := 0.3;
38   Target_T1 := T_IN1_MinLimit - 5.0;
39 7:
40   Target_P1 := 6.0;
41   Target_P2 := 0.3;
42   Sim_T2_Offset := (T_IN2_MaxLimit - 15.0) + 10.0;
43 8:
44   Target_P1 := 6.0;
45   Target_P2 := 0.3;
46   Sim_T2_Offset := (T_IN2_MinLimit - 15.0) - 10.0;
47 9:
48   Target_P1 := 6.0;
49   Target_P2 := 0.3;
50 ELSE
51   Target_P1 := 6.0;
52   Target_P2 := 0.3;
53 END_CASE;
54
55 IF Sim_Mode = 9 THEN
56   P_IN1 := 6.0;
57   P_IN2 := 0.3;
58   T_IN1 := 15.0;

```

Рисунок 2.27 – Виконавча програма імітаційної моделі

```

57 P_IN2 := 0.3;
58 T_IN1 := 15.0;
59 T_IN2 := 12.15;
60 Gas_Volume := 0.0;
61 Valve_Latched_Closed := FALSE;
62 ELSE
63 IF ValveCmd = TRUE THEN
64   Valve_Latched_Closed := TRUE;
65 END_IF;
66
67 IF Valve_Latched_Closed = TRUE THEN
68 IF P_IN1 > 0.0 THEN
69   P_IN1 := P_IN1 - 0.05;
70 ELSE
71   P_IN1 := 0.0;
72 END_IF;
73
74 IF P_IN2 > 0.0 THEN
75   P_IN2 := P_IN2 - 0.005;
76 ELSE
77   P_IN2 := 0.0;
78 END_IF;
79 ELSE
80 IF P_IN1 < Target_P1 THEN
81   P_IN1 := P_IN1 + 0.05;
82 ELSIF P_IN1 > Target_P1 THEN
83   P_IN1 := P_IN1 - 0.05;
84 END_IF;
85
86 IF P_IN1 < Target_P2 THEN
87   Target_P2 := P_IN1;
88 END_IF;
89
90 IF P_IN2 < Target_P2 THEN
91   P_IN2 := P_IN2 + 0.005;
92 ELSIF P_IN2 > Target_P2 THEN
93   P_IN2 := P_IN2 - 0.005;
94 END_IF;
95
96 IF P_IN2 > 0.1 THEN
97   Gas_Volume := Gas_Volume + 0.02;
98 END_IF;
99 END_IF;
100
101 T_IN1 := Target_T1 + (Sim_Inlet_Noise * 10.0);
102 T_IN2 := T_IN1 - ((P_IN1 - P_IN2) * 0.5) + Sim_T2_Offset;
103

```

Рисунок 2.28 – Виконавча програма імітаційної моделі

					KPM.AКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		47

Таким чином, розроблений симулятор дозволяє повноцінно відпрацювати алгоритми телемеханіки, перевірити швидкість реакції контролера на аварії та налаштувати Scada-систему без використання реального об'єкта.

### **Висновки до другого розділу**

У другому розділі розроблено апаратно-програмний комплекс для імітаційного моделювання ГРП на базі Honeywell RTU 2020. Проведено конфігурування модулів вводу-виводу, масштабування сигналів та мапінг глобальних змінних у групу Common Variables. Реалізовано алгоритм захисту MainControl (FBD) та імітаційний модуль Simulator (ST), що відтворює динаміку фізичних процесів, інерційність середовища та роботу запірної арматури.

Налаштування черговості виклику програм у циклічній задачі DftTask забезпечило детермінованість обробки даних без часових затримок у межах одного скану контролера. У результаті отримана функціональна модель, яка дозволяє відпрацьовувати аварійні режими експлуатації та виконувати їх візуалізацію у SCADA-системі без використання реального об'єкта.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

## 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АПРОБАЦІЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ

### 3.1 Інструментарій для проведення імітаційного моделювання

Для проведення досліджень розроблених алгоритмів та перевірки логіки захисту ГРП використано комплексне програмне середовище, що дозволяє виконувати відпрацювання управляючих функцій без залучення фізичного обладнання<sup>1</sup>. Основою цього комплексу є поєднання засобів віртуалізації апаратної частини контролера та інструментів моніторингу промислових протоколів.

#### 3.1.1 Віртуалізація контролера у VMware Workstation Pro

Для симуляції роботи контролера Honeywell RTU 2020 використано програмне забезпечення VMware Workstation Pro. У віртуальній машині розгорнуто образ системи, що імітує роботу процесора з двигуном eCLR.

Це дозволяє створити локальний вузол в мережі з власною IP адресою, до якого середовище розробки підключається для завантаження конфігурації та логіки.

Використання віртуального контролера забезпечує повну ідентичність виконання коду порівняно з реальним контролером, що є важливим для достовірності результатів імітаційного моделювання.

#### 3.1.2 Застосування Modbus Poll для моніторингу та візуалізації

Оскільки імітаційна модель передбачає зміну параметрів у реальному часі, для їх візуалізації та верифікації використано утиліту Modbus Poll. У даному проекті вона виконує роль спрощеного інтерфейсу SCADA-системи [27].

Зв'язок між віртуальним контролером та Modbus Poll реалізовано через протокол Modbus TCP/IP.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

Програма дозволяє зчитувати масиви регістрів, де зберігаються наші змінні типу REAL (P\_IN1, P\_IN2) та BOOL (ValveCmd, GasAlarm), і відображати їх у вигляді графіків (трендів).

Використання Modbus Poll як інструментарію діагностики дозволяє наочно зафіксувати динаміку перехідних процесів, що генеруються модулем Simulator, та перевірити швидкість спрацювання логіки MainControl при настанні аварійних подій. Це забезпечує можливість детального аналізу кожного з 9 режимів роботи системи, що розглядаються у наступних підрозділах.

### 3.2 Процедури підготовки і запуску симуляції проєкту

Процес підготовки до імітаційного моделювання включає в себе - запуск віртуального середовища виконання та налаштування зв'язку між середовищем розробки та симулятором контролера. Це важливий етап, який надає можливість завантаження логіки у віртуальний контролер та перевірку роботи моделі.

#### 3.2.1 Використання файлу симуляції та імпортування в VMware

Для створення віртуального контролера використовується спеціалізований файл симуляції контролера, який іде в комплекті з програмою ControlEdge. В папці симулятора 3 файли для симуляції різних версій контролерів. При створенні проєкту було обрано контролер RTU2020 - SC-UCMX01, файл віртуальної машини симуляції контролера в назві має модельний номер контролера “SC-UCMX01” у форматі .ovf (рис. 3.1). Даний файл містить попередньо налаштовану операційну систему з установленим двигуном eCLR, що повністю імітує архітектуру апаратної частини Honeywell RTU 2020.

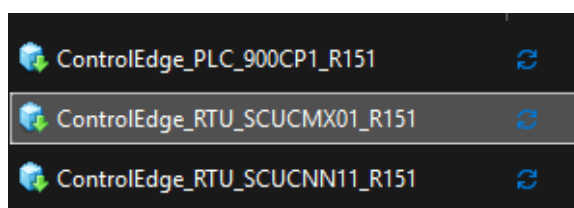


Рисунок 3.1 – Файл віртуальної машини-симулятора

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		50

### Процес імпортування:

- запуск програмного комплексу VMware Workstation Pro;
- вибір пункту меню *File* -> *Open* та вказівка шляху до файлу симуляції;
- у вікні, що з'явилося, вказується ім'я нової віртуальної машини та шлях для її збереження на дисках ПК;
- натискання кнопки *Import* для розпакування образу.

Вікно імпорту зображене на рис. 3.2.

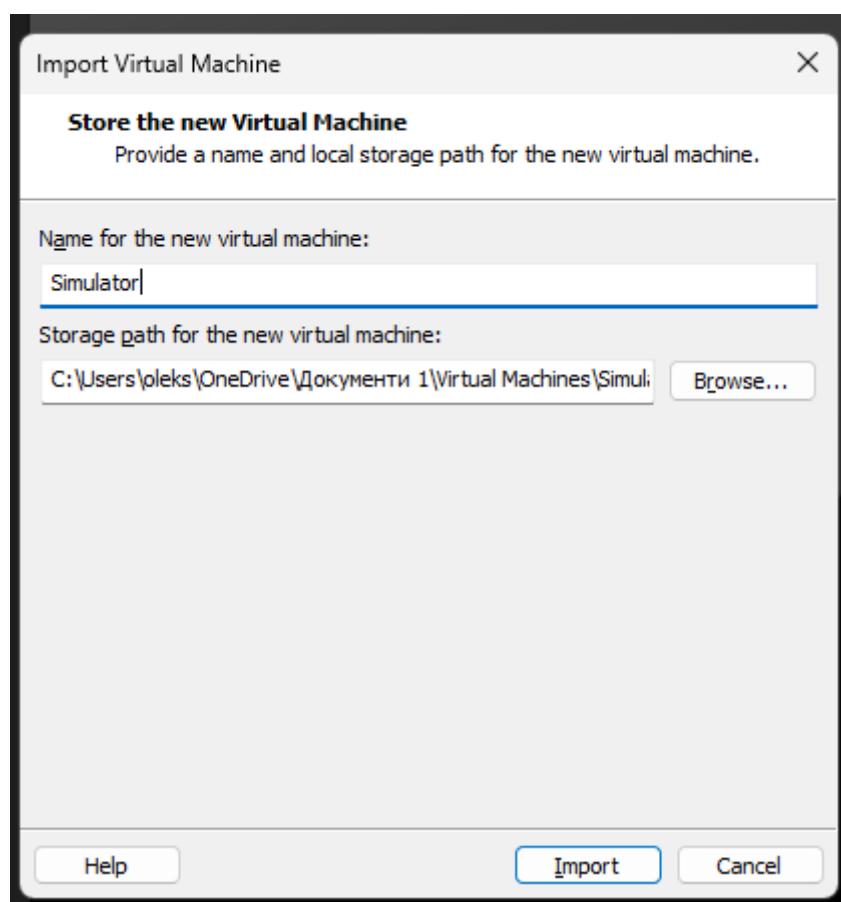


Рисунок 3.2 – Вікно імпорту віртуальної машини

### 3.2.2 Налаштування мережевих параметрів віртуальної машини

Для того, щоб середовище розробки «бачило» віртуальний контролер, необхідно забезпечити їх знаходження в одному мережевому сегменті. Це реалізується через налаштування віртуального мережевого адаптера (рис. 3.3 – 3.4).

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

В налаштуваннях Network Adapter та Network adapter 2 змінено налаштування Network connection. З режиму Bridged на режим NAT. Після цих змін, ControlEdge буде “бачити” віртуальний контролер.

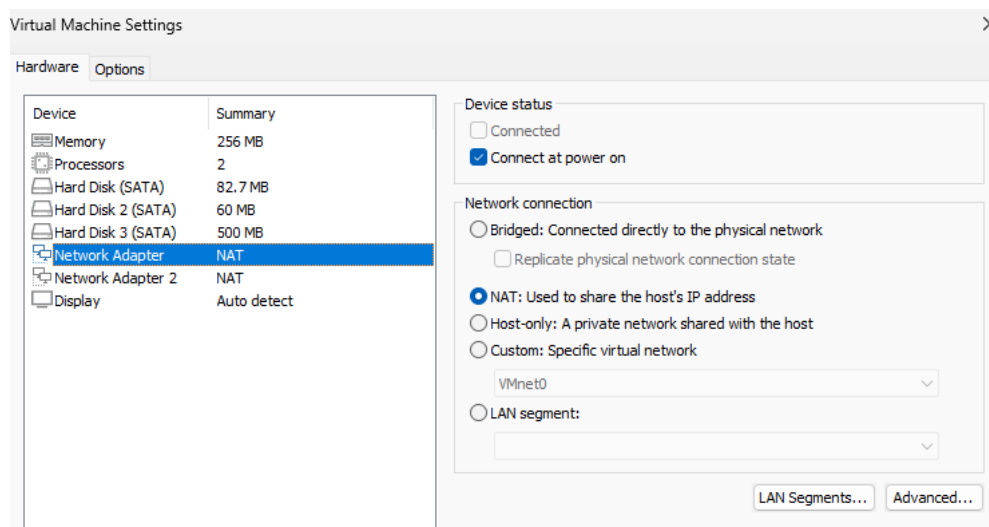


Рисунок 3.3 – Налаштування Network Adapter

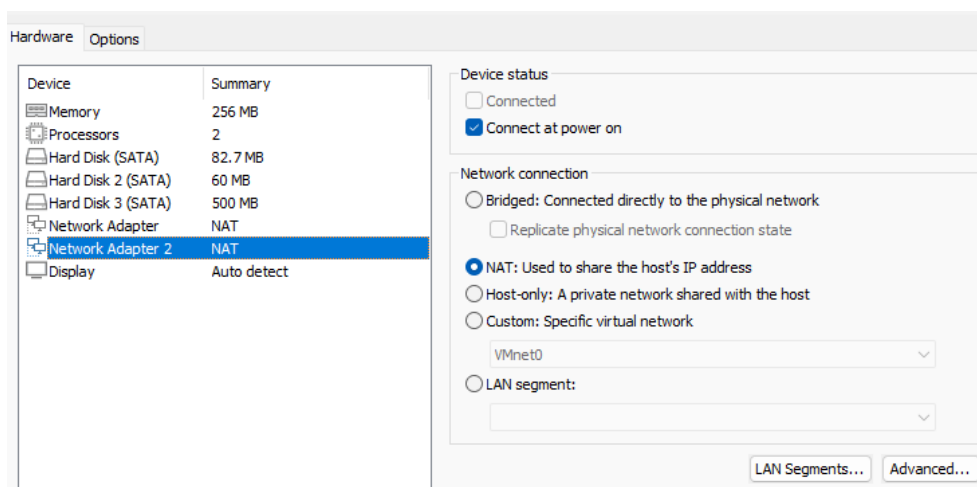


Рисунок 3.3 – Налаштування Network Adapter 2

Після успішного налаштування віртуальної машини, потрібно перевірити чи вона запуститься. Запуск віртуальної машини відбувається за допомогою кнопки “Power on this virtual machine” біля назви (рис. 3.4).

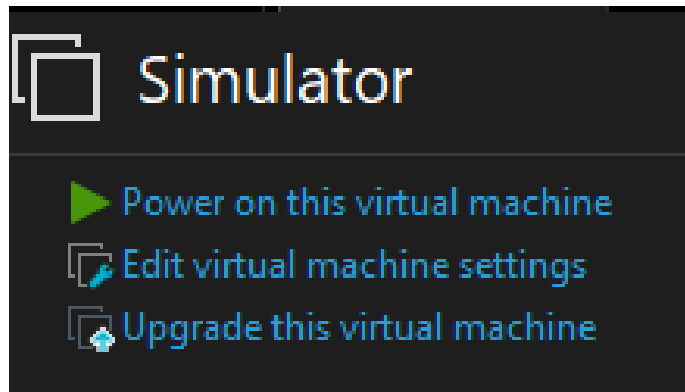


Рисунок 3.4 – Меню запуску віртуальної машини

Після успішного запуску машини, з'являється вікно консоль симулятора контролера у якому видно IP - адресу для з'єднання (рис. 3.5).

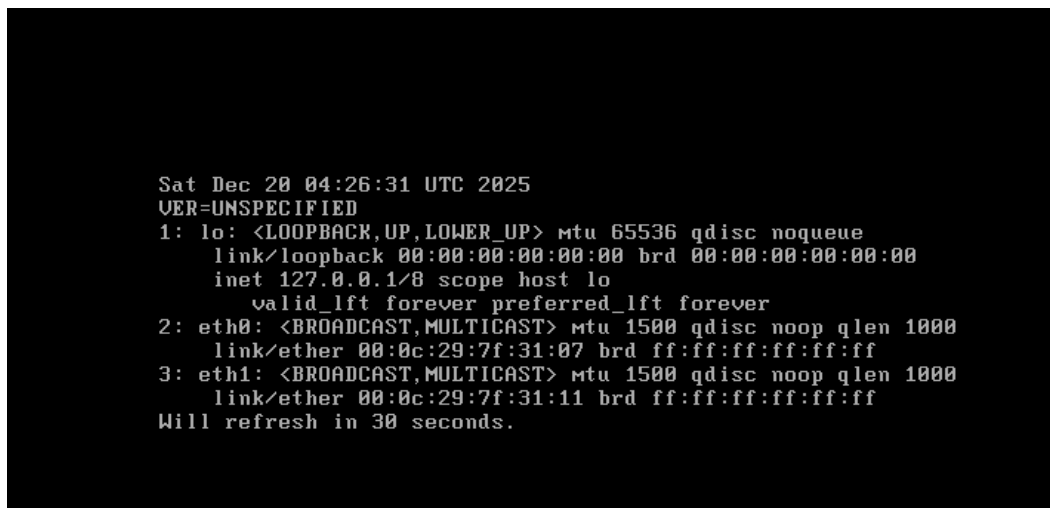


Рисунок 3.5 – Консоль симулятора контролера

### 3.2.3 Конфігурування підключення зі сторони ControlEdge Builder

Для коректного з'єднання програми ControlEdge з симулятором, потрібно налаштувати мережеві з'єднання в програмі. Для цього у вікні налаштувань контролера, потрібно вибрати "Configure Ethernet Ports" (рис. 3.6).

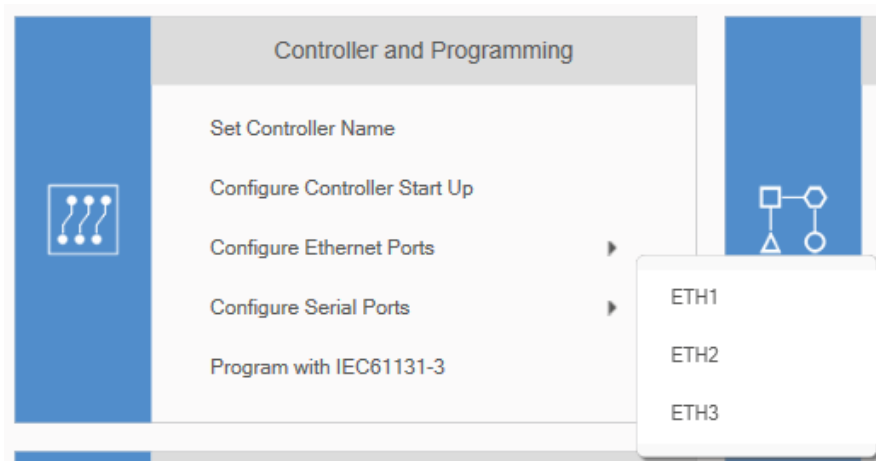


Рисунок 3.6 – Вікно вибору налаштувань Ethernet портів

В мережеских налаштуваннях ETH1 проведено конфігурування з'єднання (рис.3.7). Network setting обрано режим "Use the following IP adress", IP Adress – 192.168.160.129 (як у симуляторі), Subnet mask обрано стандартну – 255.255.255.0. Для ETH2 налаштування проведено відповідно (рис. 3.8). Також "підключено" протокол Modbus Slave для подальшого використання програмою Modbus Poll.

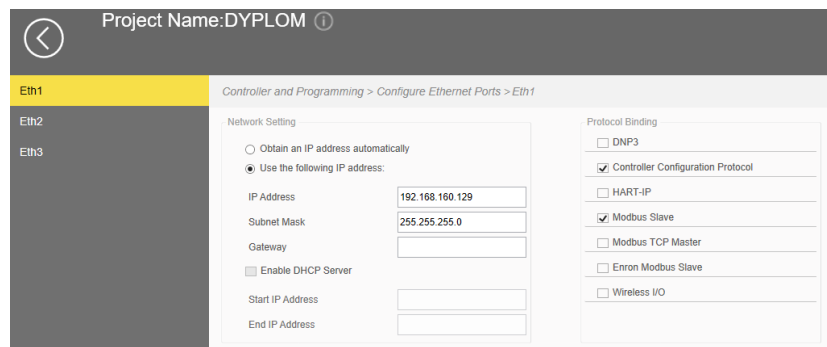


Рисунок 3.7 – Налаштування ETH1

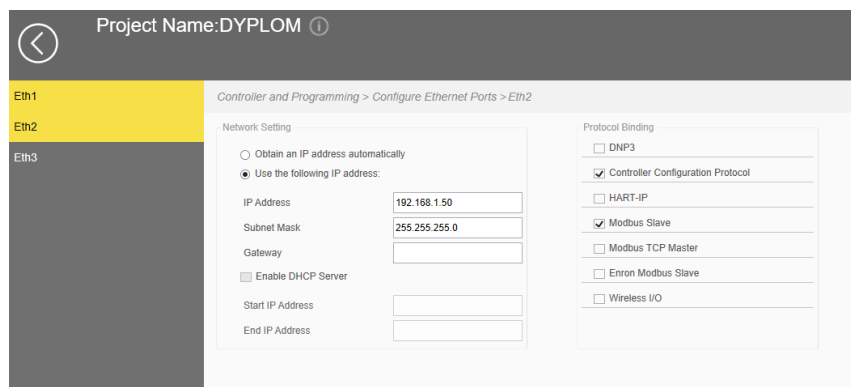


Рисунок 3.8 – Налаштування ETH2

Після завершення конфігурування мережевих інтерфейсів необхідно виконати процедуру безпосереднього підключення середовища розробки до віртуального контролера. Процес авторизації та встановлення сеансу зв'язку проводиться через спеціалізоване вікно «Connect controller» (рис. 3.9).

При ініціалізації команди підключення програма виконує сканування локальної мережі на наявність активних вузлів. У вкладці «Scan and Select» відображається перелік знайдених пристроїв. У нашому випадку система ідентифікує контролер з ім'ям «NewRTU», IP-адресою 192.168.160.129 та унікальним серійним номером симулятора.

Для отримання доступу до керування контролером необхідно пройти процедуру автентифікації. Для віртуального контролера Honeywell RTU 2020 використовуються стандартні параметри доступу:

- User name: Administrator;
- Password: Admin@123.

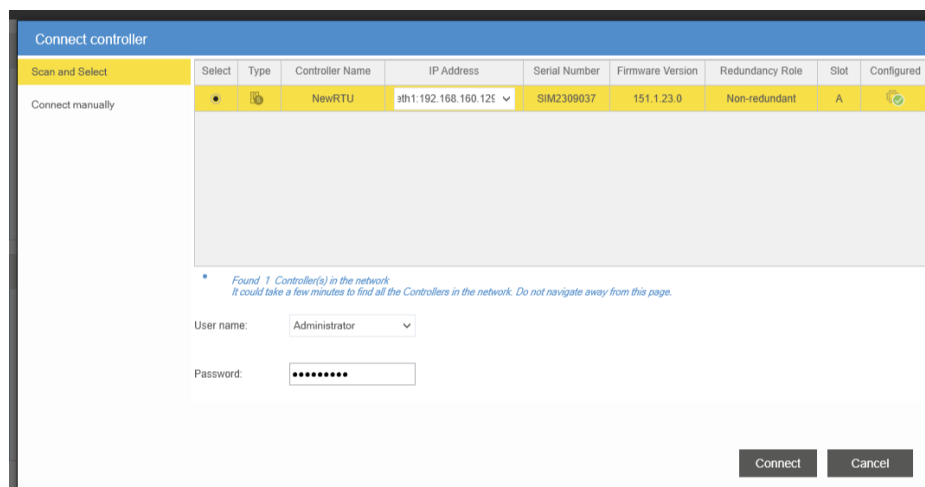


Рисунок 3.9 – Вікно авторизації та вибору контролера в мережі

Після введення облікових даних та натискання кнопки «Connect» середовище розробки встановлює захищене з'єднання. Підтвердженням успішної синхронізації ControlEdge Builder із симулятором VMware є зміна статусу в інформаційному полі проекту (рис. 3.10).

У нижній панелі інтерфейсу з'являється повідомлення «Connected to: NewRTU», де також дублюється поточна IP-адреса та роль контролера (Non-

redundant). Це свідчить про готовність системи до завантаження логічних модулів імітації та проведення подальших досліджень.

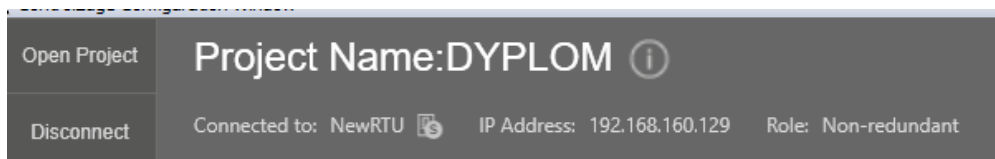


Рисунок 3.10 – Підтвердження успішного з'єднання середовища розробки з симулятором

### 3.2.4 Завантаження проєкту в контролер та початкова перевірка

Після встановлення зв'язку з віртуальним контролером проводиться етап завантаження розробленої логіки та конфігурації в пам'ять пристрою. Дана процедура є завершальною у циклі підготовки до імітаційного моделювання.

#### Процес завантаження та ініціалізації:

- у середовищі розробки ініціюється команда завантаження проєкту. Програма виводить діалогове вікно підтвердження «Download confirmation» (рис. 3.11), яке вимагає від користувача переконатися у безпеці об'єкта перед початком перезапису пам'яті контролера;
- після підтвердження відкривається вікно керування станом двигуна eCLR (рис. 3.12). Для першого запуску або при внесенні суттєвих змін у структуру змінних використовується режим Cold Start (холодний старт). Це забезпечує повне очищення пам'яті та ініціалізацію всіх змінних значеннями за замовчуванням (Init values), що були прописані в таблиці Common Variables.

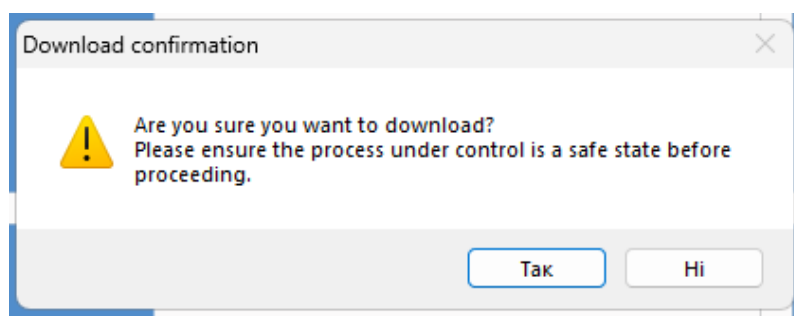


Рисунок 3.11 – Діалогове вікно підтвердження завантаження проєкту

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56

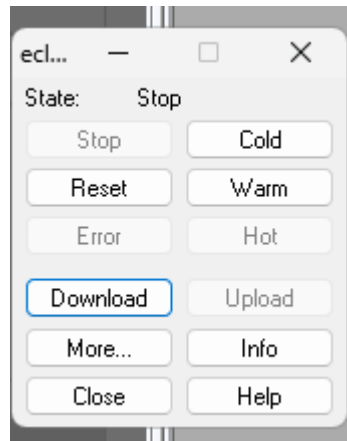


Рисунок 3.12 – Вікно вибору режиму завантаження та старту контролера

Завершення процесу супроводжується повідомленням «Configuration applied successfully» (рис. 3.13). Після натискання кнопки «Cold» стан контролера змінюється зі «Stop» на «Running» (рис. 3.14), що свідчить про початок циклічного виконання програмних модулів Sim та MainCNTR.

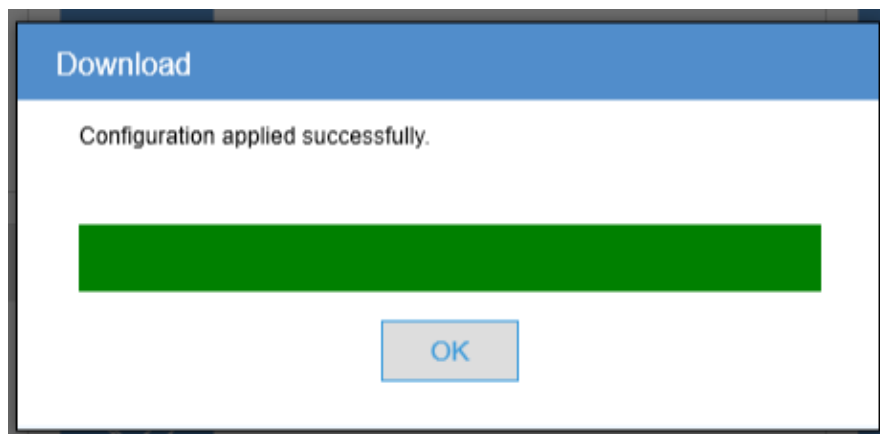


Рисунок 3.13 – Повідомлення про успішне завантаження конфігурації

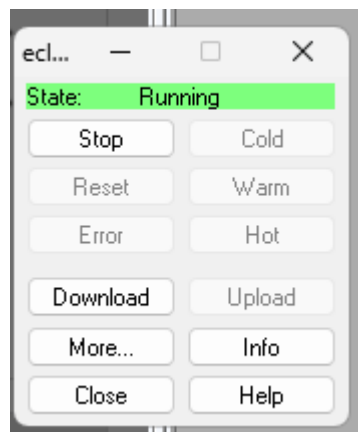


Рисунок 3.14 – Стан контролера «Running» після успішного запуску

Верифікація коректності роботи алгоритмів проводиться через режим відладки (Debug mode). У цьому режимі середовище розробки відображає поточні значення змінних безпосередньо в таблиці Common Variables у колонці «Online value» (рис. 3.15).

На етапі початкової перевірки система автоматично переходить у нормальний режим роботи Sim\_Mode = 0. Про коректне функціонування імітаційної моделі свідчать такі показники:

- вхідний тиск P\_IN1 встановлюється на рівні 6.0 бар;
- вихідний тиск P\_IN2 становить 0.3 бар;
- прапорці аварій мають значення FALSE, що вказує на відсутність порушень технологічного регламенту.

	Name	Online value	Type	Usage	Description	Address	Init	R
1	System Variables							
17	Common Variables							
18	AlarmP_IN1	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL				
19	AlarmT_IN1	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL				
20	AlarmP_IN2	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL				
21	AlarmT_IN2	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL				
22	P_SUB	6.500000E+0	REAL	VAR_GLOBAL			6.5	
23	P_IN1	6.0500002E+0	REAL	VAR_GLOBAL			6.0	
24	T_IN1	1.5500000E+0	REAL	VAR_GLOBAL				
25	P_IN2	3.0500001E-001	REAL	VAR_GLOBAL			0.3	
26	T_IN2	1.2627500E+0	REAL	VAR_GLOBAL				
27	GasAlarm	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL				
28	ValveCmd_READBACK	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL				
29	ValveCmd	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL				
30	Sim_Inlet_Noise	4.9999997E-002	REAL	VAR_GLOBAL			0.0	
31	ReductionALARM	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL				
32	P_IN1_MaxLimit	8.0000000E+0	REAL	VAR_GLOBAL			8.0	
33	P_IN1_MinLimit	3.0000000E+0	REAL	VAR_GLOBAL			3.0	
34	T_IN1_MaxLimit	4.0000000E+0	REAL	VAR_GLOBAL			40.0	
35	T_IN1_MinLimit	-1.0000000E+	REAL	VAR_GLOBAL			-10.0	
36	P_IN2_MaxLimit	4.4999999E-001	REAL	VAR_GLOBAL			0.45	
37	P_IN2_MinLimit	2.0000000E-001	REAL	VAR_GLOBAL			0.2	
38	T_IN2_MaxLimit	3.5000000E+0	REAL	VAR_GLOBAL			35.0	
39	T_IN2_MinLimit	-1.5000000E+	REAL	VAR_GLOBAL			-15.0	
40	Sim_Mode	0	INT	VAR_GLOBAL			0	
41	Target_P1	6.0500002E+0	REAL	VAR_GLOBAL				
42	Target_P2	3.0500001E-001	REAL	VAR_GLOBAL				
43	Target_T1	1.5000000E+0	REAL	VAR_GLOBAL				
44	Sim_T2_Offset	0.0000000E+0	REAL	VAR_GLOBAL				
45	T_Room	2.0100000E+0	REAL	VAR_GLOBAL				
46	RoomTLimitHigh	4.0000000E+0	REAL	VAR_GLOBAL			40.0	
47	RoomTLimitLow	5.0000000E+0	REAL	VAR_GLOBAL			5.0	
48	AlarmRoomTemp	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL				
49	Gas_Volume	6.9199944E+0	REAL	VAR_GLOBAL				
50	Valve_Latched_Closed	FALSE	BOOL	VAR_GLOBAL			0	
51	Input IO Variables							

Рисунок 3.15 – Відображення значень змінних у режимі Debug

Наявність динамічних змін у колонці «Online value» (незначні коливання тиску за рахунок імітаційного шуму) підтверджує, що апаратно-програмний комплекс функціонує згідно із заданим алгоритмом і готовий до випробувань в аварійних режимах.

### 3.3 Візуалізація процесу симуляції

Для забезпечення моніторингу технологічних процесів та перевірки створених алгоритмів захисту реалізовано систему візуалізації даних. Принцип

роботи системи базується на взаємодії між контролером та зовнішнім програмним забезпеченням за протоколом Modbus. У даній схемі контролер RTU 2020 функціонує як Modbus Slave “сервер”, надаючи доступ до внутрішніх змінних, а утиліта Modbus Poll виступає в ролі Modbus Master “клієнта”, що виконує циклічне опитування комірок даних та побудову графіків.

### 3.3.1 Конфігурування SCADA Mapping та розподіл реєстрів

Підготовка даних для передачі на верхній рівень починається з налаштування карти адрес (Mapping) у середовищі ControlEdge Builder.

Процес налаштування включає наступні кроки:

1. У меню «I/O and Communications» обирається розділ «Configure SCADA Mapping», де встановлюється протокол Modbus Slave (рис. 3.16).

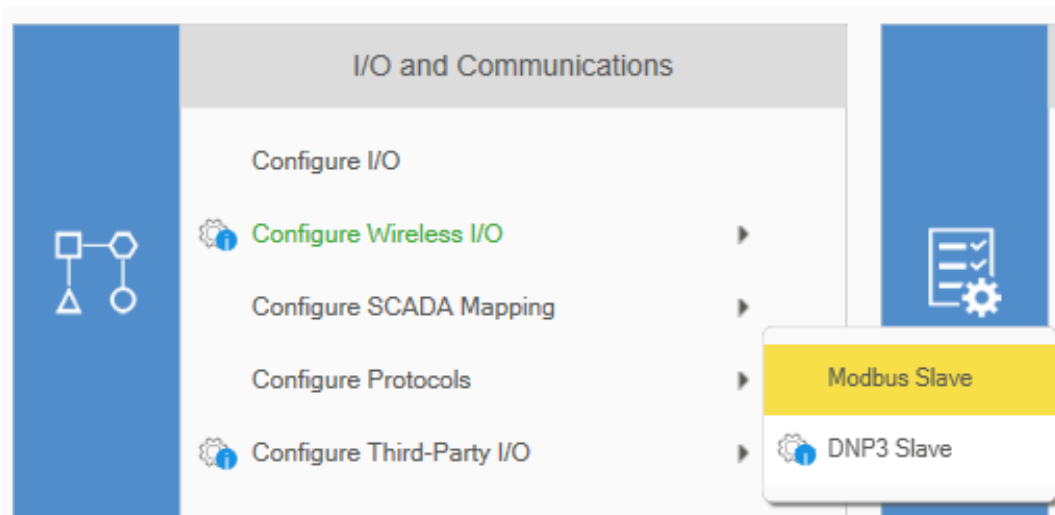


Рисунок 3.16 – Вибір налаштування Modbus Slave

2. Для додавання технологічних параметрів до таблиці обміну використовується команда «Add Mapping». Змінювані параметри та дані імітації закріплюються за типом реєстрів Holding Register, що забезпечує можливість двостороннього обміну даними (рис. 3.17).

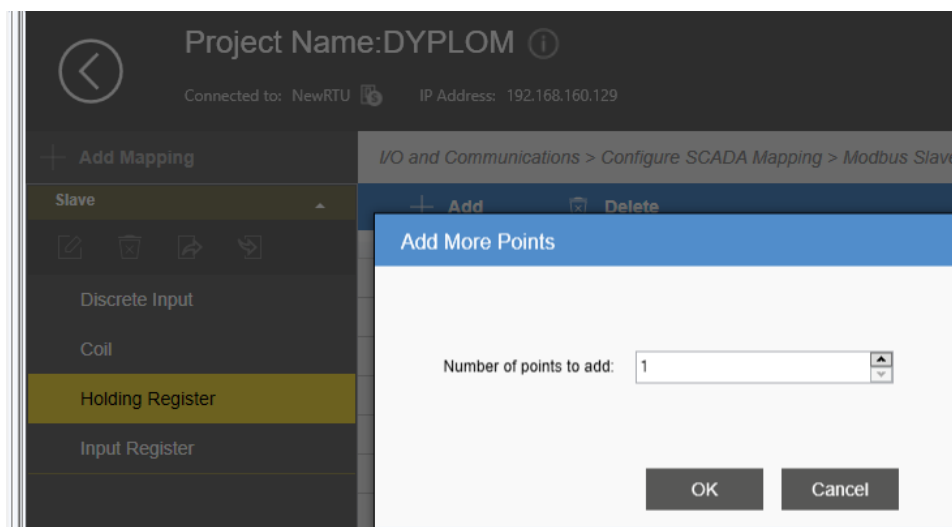


Рисунок 3.17 – Додавання змінних до реєстрів типу Holding Register

3. Особливістю адресації в проекті є використання кроку через одну одиницю (наприклад, 2, 4, 6, 8...). Це зумовлено специфікою типу даних REAL (32-бітне число з плаваючою комою). Оскільки стандартний Modbus-реєстр має розрядність 16 біт (2 байти), одна змінна типу REAL займає два послідовних реєстри [28].

Згідно з сформованою картою адрес:

- змінна @GV.P\_IN1 займає реєстри з адресами 1 та 2;
- змінна @GV.P\_IN2 займає реєстри 3 та 4 і так далі.

Такий розподіл гарантує цілісність зчитування значень та виключає накладання даних при обробці результатів симуляції (рис. 3.18).

I/O and Communications > Configure SCADA Mapping > Modbus Slave			
+ Add		Delete	
<input type="checkbox"/>	Modbus Address	Variable Name	
<input type="checkbox"/>	2	@GV.P_IN1	...
<input type="checkbox"/>	4	@GV.P_IN2	...
<input type="checkbox"/>	6	@GV.T_IN1	...
<input type="checkbox"/>	8	@GV.T_IN2	...
<input type="checkbox"/>	10	@GV.T_Room	...
<input type="checkbox"/>	12	@GV.Gas_Volume	...

Рисунок 3.18 – Таблиця розподілу Modbus-адрес для основних змінних проекту

### 3.3.2 Налаштування Modbus Poll для зчитування даних

Для отримання даних із віртуального контролера та їх подальшого аналізу використано утиліту Modbus Poll. Процес налаштування програмного

забезпечення включає конфігурування параметрів зв'язку, визначення діапазону зчитування та прив'язку змінних до графічного інтерфейсу.

На першому етапі у вікні Connection Setup встановлено параметри зв'язку з симулятором (рис. 3.19). Обрано протокол Modbus TCP/IP, вказано IP-адресу віртуальної машини 192.168.160.129 та стандартний порт 502.

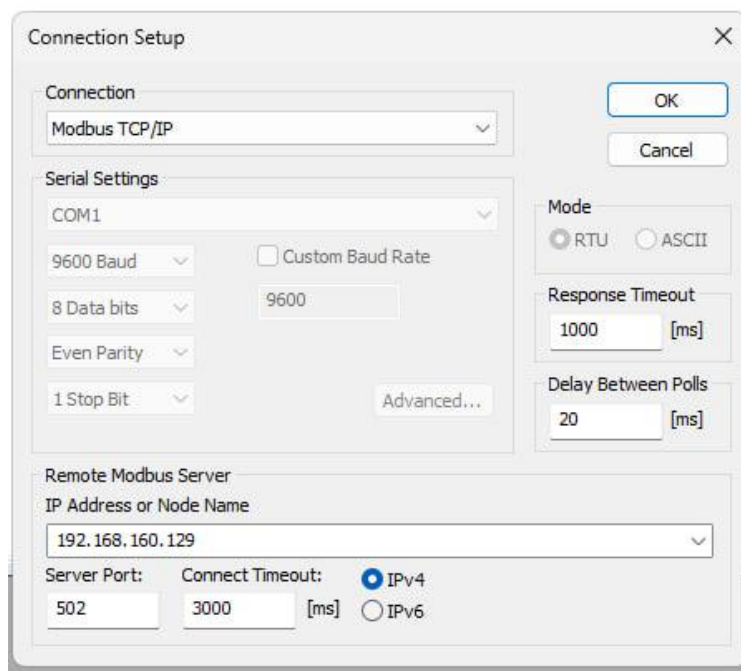


Рисунок 3.19 – Налаштування TCP/IP з'єднання в Modbus Poll

Визначення функцій та форматів даних

У вікні Read/Write Definition (рис. 3.20) задано параметри опитування:

- **Slave ID:** 1;
- **Function:** 03 Read Holding Registers;
- **Quantity:** 12 (обсяг даних, що охоплює всі технологічні змінні).

Для коректного відображення значень типу REAL у контекстному меню обрано формат 32-bit Float із послідовністю байтів Big-endian (рис. 3.21). Це дозволяє перетворити сирі дані з регістрів у зрозумілі фізичні одиниці (бари та градуси).

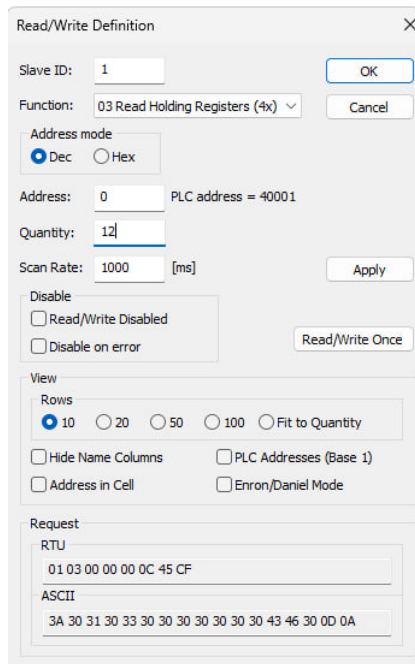


Рисунок 3.20 – Параметри опитування регістрів

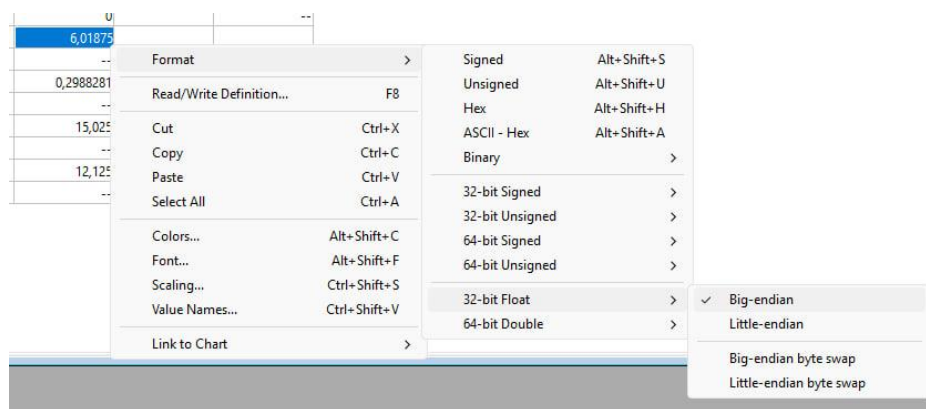


Рисунок 3.21 – Вибір формату даних для змінних типу REAL

Для візуалізації динаміки процесів проведено закріплення адрес регістрів за відповідними трендами у вікні Series Settings (рис. 3.22 – 3.23). Згідно з розробленою картою адрес, встановлено наступну відповідність:

- **Address 2:** P\_IN1 (тиск на вході);
- **Address 4:** P\_IN2 (тиск на виході);
- **Address 6:** T\_IN1 (температура на вході);
- **Address 8:** T\_IN2 (температура на виході);
- **Address 10:** T\_Room (температура в приміщенні);
- **Address 12:** Gas\_Vol (лічильник газу).

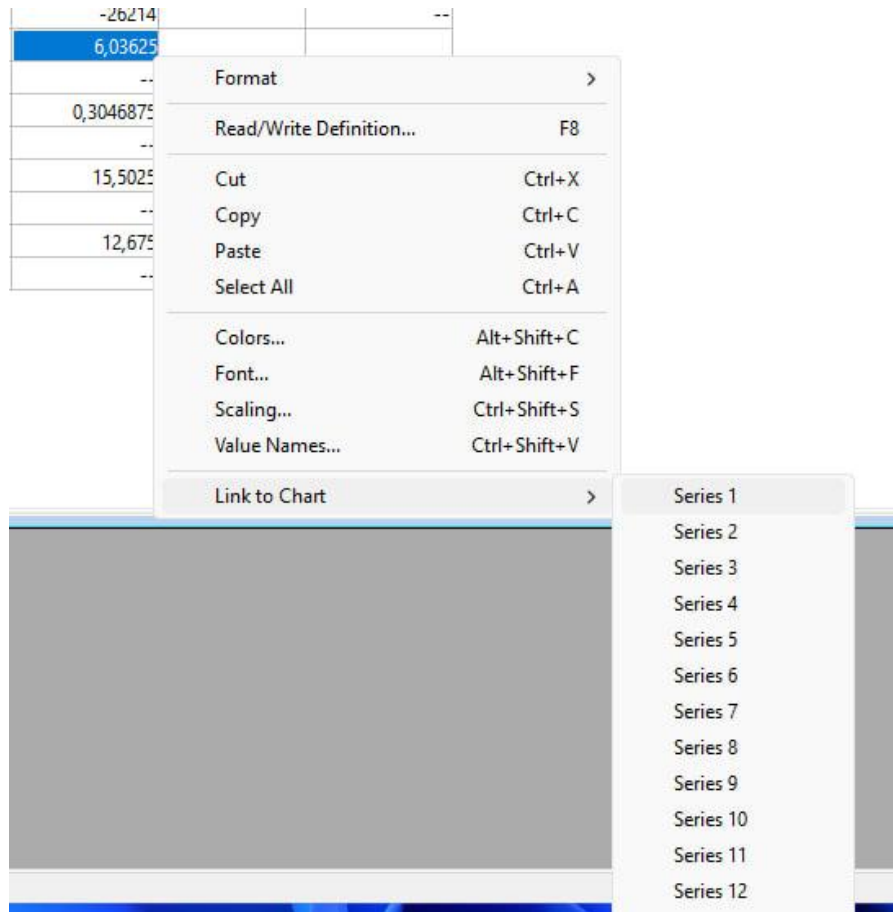


Рисунок 3.22 – Прив’язка Modbus-адрес до графіку

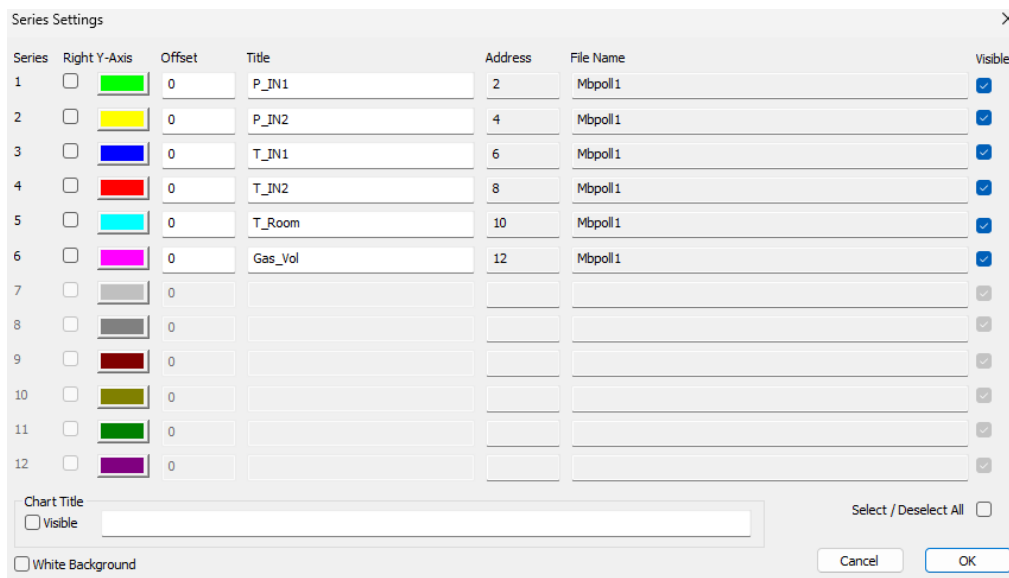


Рисунок 3.23 – Налаштування графіків

Після налаштування мапінгу активовано функцію Link to Chart для кожної змінної. Це дозволяє вивести всі ключові параметри на єдине вікно Real Time Charting (рис. 3.24), що дає можливість спостерігати за реакцією моделі на зміну

режимів роботи у реальному часі. На графіку видно зміну даних при активному режимі роботи – 0 (нормальний).

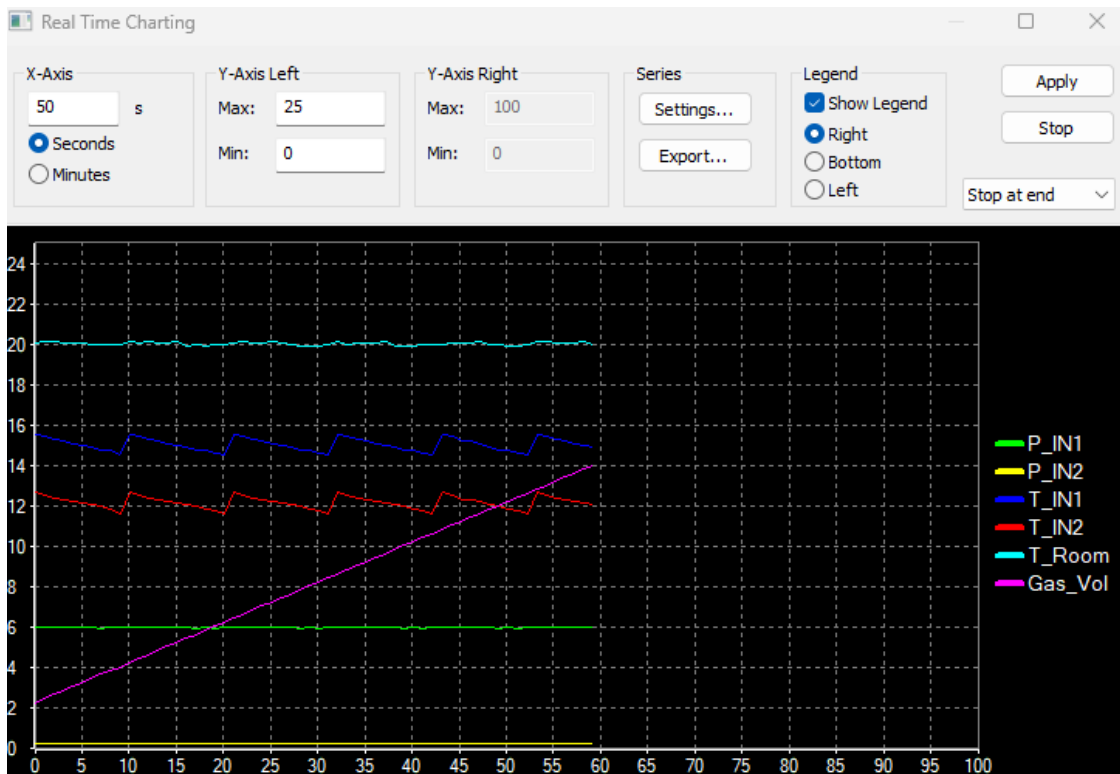


Рисунок 3.24 – Вікно реального часу з графіками технологічних параметрів

### 3.4 Аналіз результатів моделювання за режимами роботи

Експериментальне дослідження розробленого апаратно-програмного комплексу полягає у верифікації алгоритмів захисту ГРП через послідовну зміну станів імітаційної моделі. Процес тестування передбачає аналіз реакції логіки MainControl на технологічні відхилення, що генеруються модулем Simulator за допомогою змінної Sim\_Mode [29, 30].

#### 3.4.1 Специфікація алгоритмів імітаційного модуля

Згідно з розробленим кодом на мові ST, модуль Simulator реалізує детерміновану модель поведінки об'єкта. Алгоритм забезпечує динамічну зміну параметрів тиску та температури з урахуванням інерційності середовища та імітаційного шуму Sim\_Inlet\_Noise у діапазоні  $\pm 0.05$ .

Програмно реалізовано наступні режими функціонування:

- **Mode 0:** номінальний режим із цільовими значеннями  $P_{IN1} = 6.0$  бар та  $P_{IN2} = 0.3$  бар;
- **Mode 1–2:** аварії за вхідним тиском (вихід за межі  $P_{IN1\_MaxLimit}$  та  $MinLimit$ );
- **Mode 3–4:** аварії за вихідним тиском (випереження  $MaxLimit$  на  $0.2$  бар або падіння нижче  $MinLimit$ );
- **Mode 5–6:** порушення температурного регламенту газу на вході;
- **Mode 7–8:** критичні відхилення температури після редукції  $T_{IN2}$  та імітація пожегу в приміщенні ГРП;
- **Mode 9:** примусова ініціалізація та скидання накопичувальних регістрів.

### 3.4.2 Робота системи в номінальному режимі Mode 0

При встановленні  $Sim\_Mode = 0$  алгоритм підтримує цільові значення тиску з урахуванням коливань (рис. 3.25 – 3.26):

- **стан змінних:** значення  $P_{IN1}$  та  $P_{IN2}$  плавно підтягуються до  $6.0$  та  $0.3$  відповідно. У вікні *Common Variables* фіксується динаміка змін тиску та температури  $T_{Room}$ ;
- **логіка захисту:** усі аварійні прапорці  $AlarmP_{IN1}$ ,  $AlarmP_{IN2}$  та інші перебувають у стані **FALSE**, що підтверджує коректність роботи алгоритму без хибних спрацювань;
- **облік газу:** оскільки тиск на виході перевищує  $0.1$  бар, відбувається циклічне накопичення значення  $Gas\_Volume$  із кроком  $0.02$  за цикл.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		65

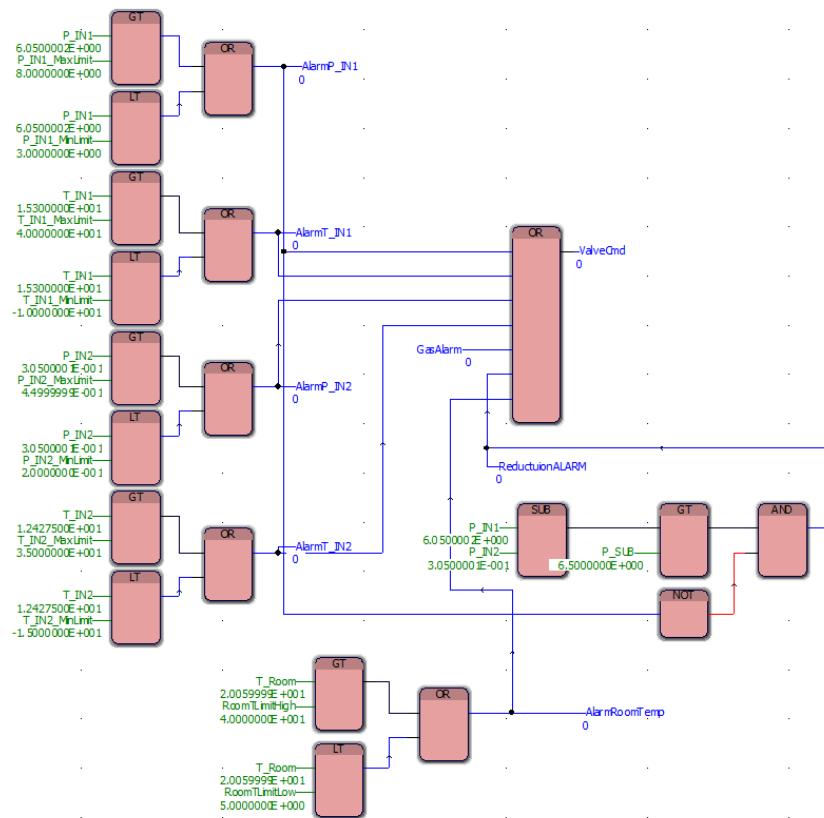


Рисунок 3.25 – Робота FBD програми в режимі 0

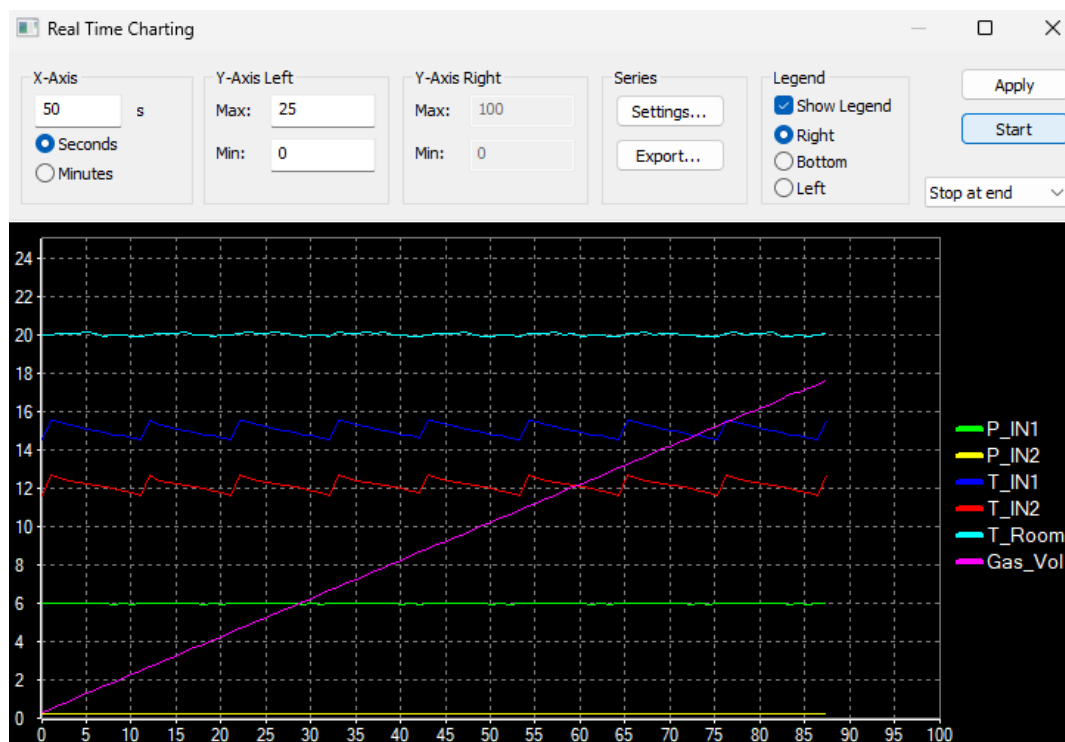


Рисунок 3.26 – Графік зміни значень в реальному часі у Mode 0

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

### 3.4.3 Відпрацювання аварії за вхідним тиском Mode 1

У даному режимі цільове значення Target\_P1 встановлюється як  $P\_IN1\_MaxLimit + 1.0$  (рис. 3.27 – 3.28):

- **динаміка процесу:** програма інкрементує значення P\_IN1 до моменту перетину уставки 8.0 бар;
- **спрацювання MainControl:** при досягненні порогового значення блок GT активує прапор AlarmP\_IN1, що ініціює перехід ValveCmd у стан TRUE;
- **реакція моделі:** після активації команди закриття симулятор встановлює Valve\_Latched\_Closed := TRUE, що запускає процес поступового скидання тиску (P\_IN1 знижується на 0.05, а P\_IN2 на 0.005 за цикл) до повного обнулення.

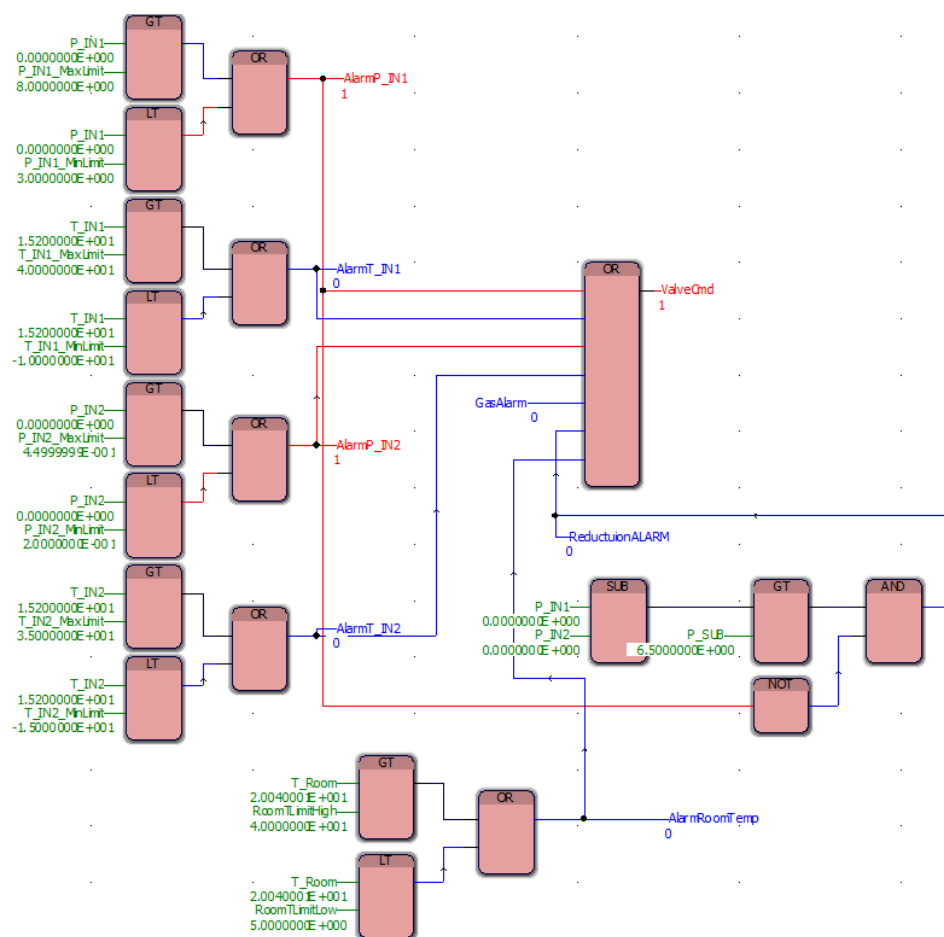


Рисунок 3.27 – Робота FBD програми в режимі 1

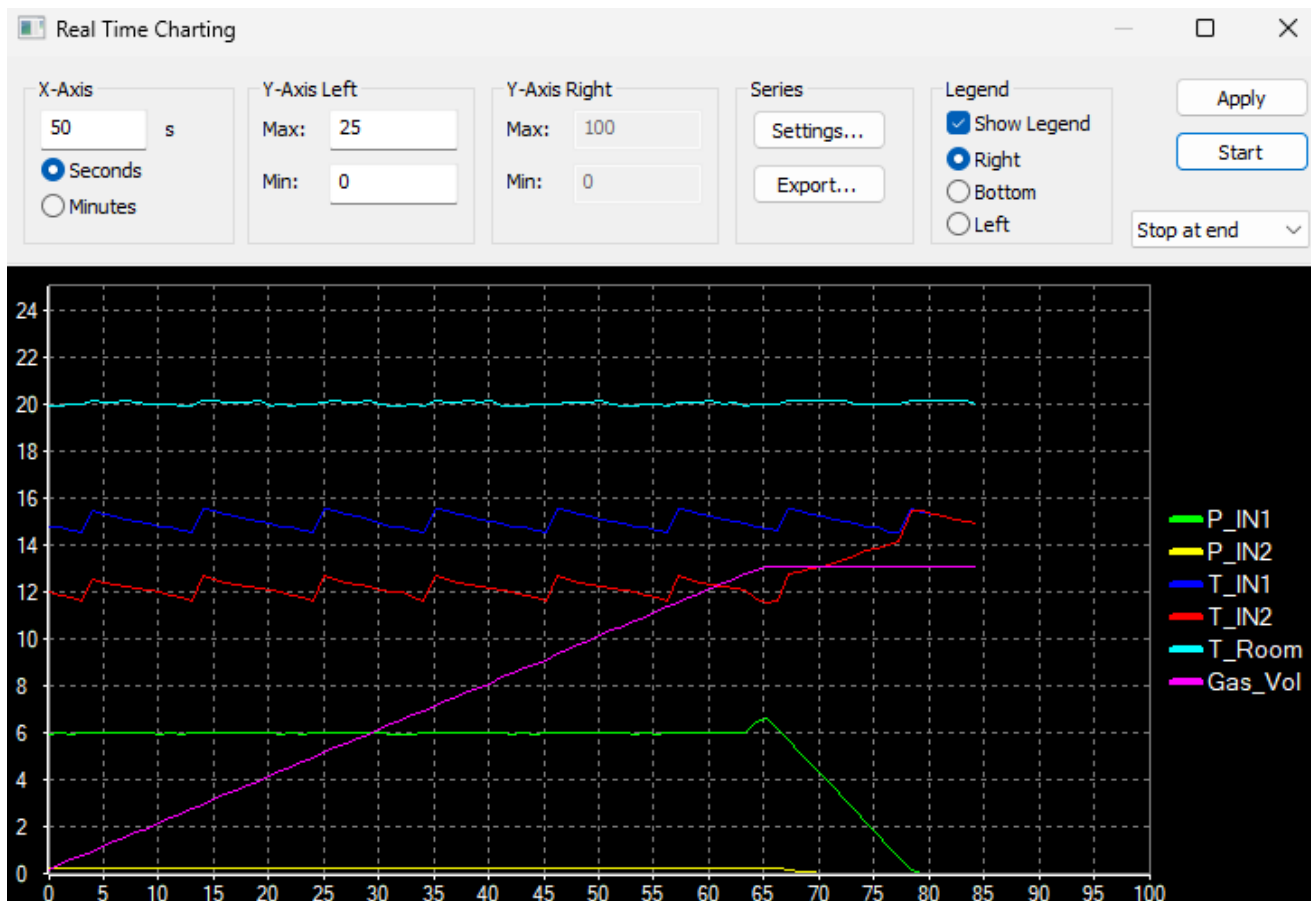


Рисунок 3.28 – Графік зміни значень в реальному часі у Mode 1

### 3.4.4 Моделювання аварії вихідного тиску Mode 3

Режим імітує несправність регулятора, де цільовий тиск Target\_P2 стає вищим за уставку на 0.2 бар (рис. 3.29 – 3.30):

- **зміни в MainControl:** блок порівняння фіксує перевищення P\_IN2\_MaxLimit (0.45 бар). У групі Common Variables активується змінна AlarmP\_IN2;
- **автоматика безпеки:** логічне «АБО» формує команду на закриття відсікача. На графіках Modbus Poll спостерігається припинення росту Gas\_Volume одночасно із падінням тиску після спрацювання захисту.

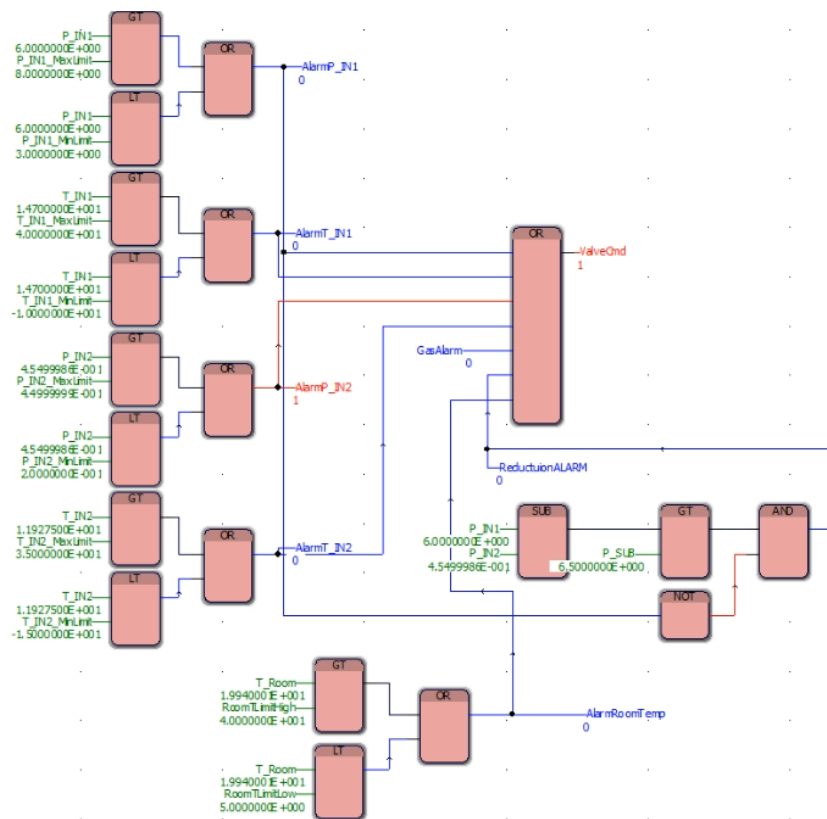


Рисунок 3.29 – Спрацювання захисту при зростанні тиску на виході Mode 3

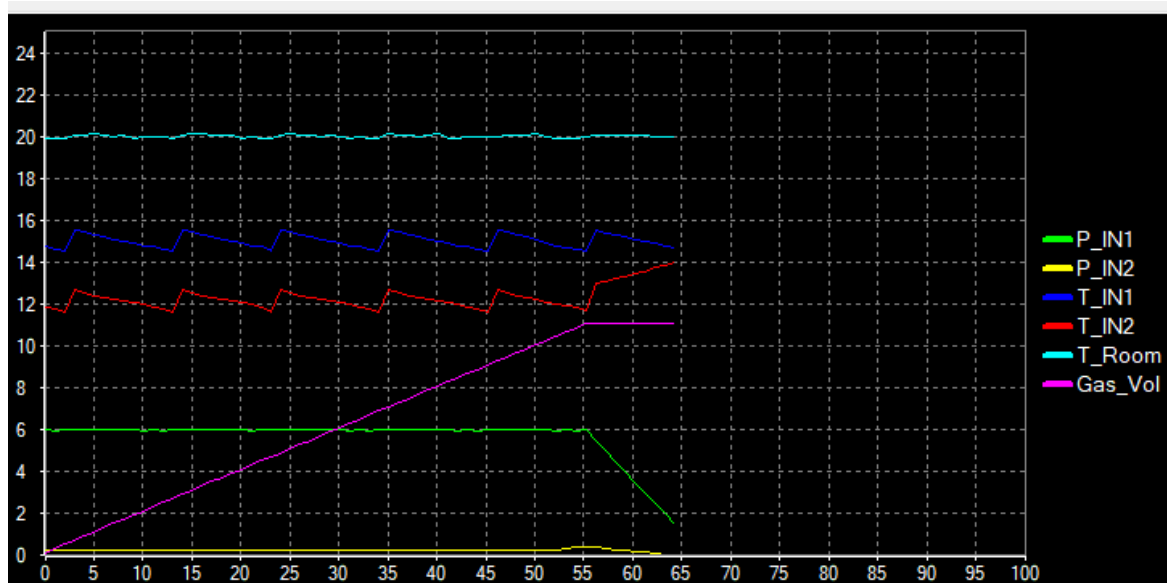


Рисунок 3.30 – Графік зміни значень в реальному часі у Mode 3

### 3.4.5 Аналіз критичного перегріву приміщення Mode 8

У режимі 8 алгоритм імітує вихід з ладу системи клімат-контролю ГРП та аномальне охолодження газу (рис. 3.31 – 3.32):

- **логіка симулятора:** температура приміщення T\_Room жорстко встановлюється на рівні 65.0 °C. Одночасно через Sim\_T2\_Offset моделюється критичне падіння температури T\_IN2 нижче за мінімальну уставку;
- **результат:** блоки контролю температури в MainControl фіксують подвійне порушення. Команда ValveCmd активується, блокуючи подачу газу на об'єкт. На графіку фіксується стрибкоподібна зміна T\_Room та миттєва реакція виконавчого механізму.

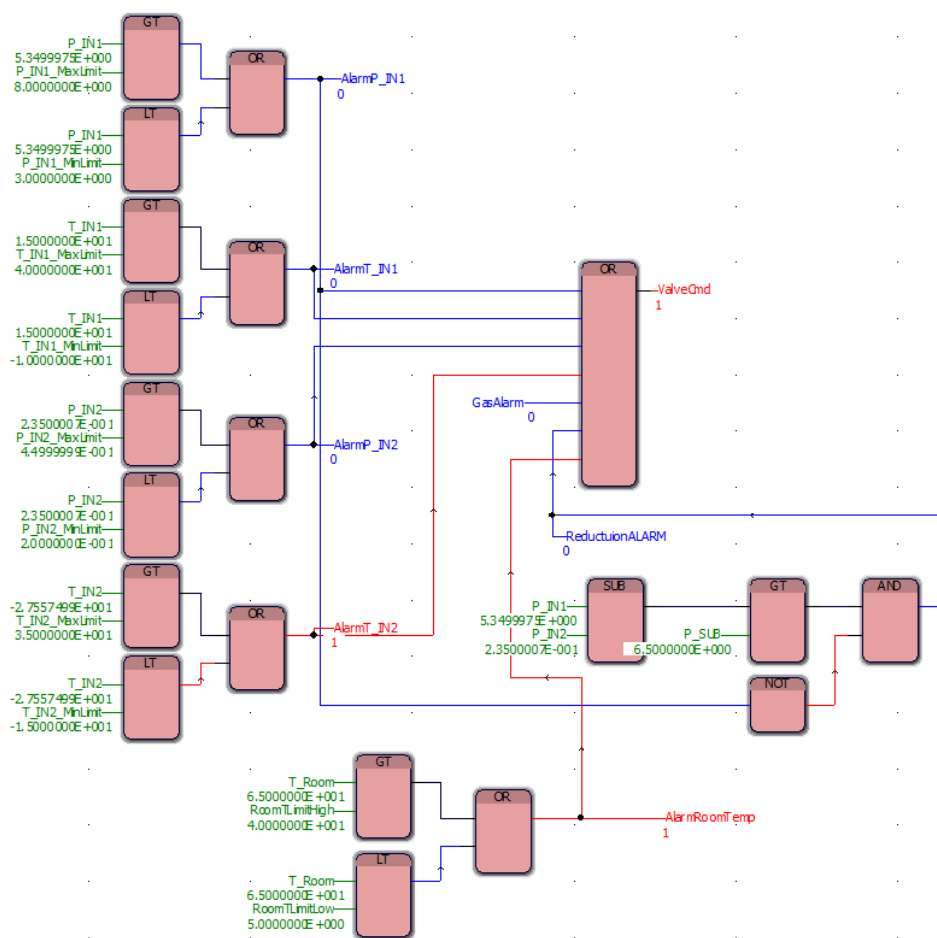


Рисунок 3.31 – Спрацювання захисту при аварії за температурою приміщення та газу у режимі Mode 8



## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було розроблено апаратно-програмний комплекс для імітаційного моделювання на газорозподільних станціях. Основною метою такого рішення було розробити віртуальну безпечну експериментальну платформу для алгоритмів управління та захисту без використання реального обладнання. Оскільки на етапі проектування з'являється можливість виявлення можливих проблем, пов'язаних з логікою управління, це є дуже важливим для об'єктів газотранспортної галузі, де будь-яка аварійна ситуація становить загрозу безпеці.

Моделювання виконується шляхом розгляду газорозподільної станції як складного динамічного об'єкта. Математично враховуючи інерцію потоків та термодинамічні впливи при зниженні тиску газу, ми досягли високої точності відтворення фізичної системи. З технічної точки зору, була обрана платформа Honeywell ControlEdge RTU2020, яка поєднує в собі надійність та детерміновану обробку даних, що забезпечує надійність у реальному часі виконання моделі.

Архітектура системи забезпечує інтеграцію моделі симуляції безпосередньо в середовище контролера, щоб уникнути затримки передачі даних та захопити найбільш повне уявлення про динаміку об'єкта. Програмний елемент комплексу реалізовано на такій гібридній основі: складні обчислення ядра симуляції виконуються за допомогою мови Structured Text, а структура технологічних захистів створюється мовою Function Block Diagram. Такий розподіл дозволив поєднати обчислювальну потужність та легкість і зрозумілість обслуговування системи. Тести, проведені у віртуальному середовищі, показали, що комплекс правильно моделює нормальні та аварійні режими роботи, що веде до надійної роботи систем захисту при критичних змінах тиску або інших аномальних ситуаціях.

Методологія, заснована на промислових контролерах у побудові симуляційних комплексів, закладає основу для розробки повних "цифрових

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

двійників" для фізичної системи енергетичної інфраструктури. Результати роботи мають високу практичну цінність і можуть бути переведені в процес автоматизації інших технологічних об'єктів з подібними фізичними процесами, що сприяє загальному розвитку цифровізації та робить галузь безпечнішою.

					КРМ.АКС <sub>м</sub> - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		73

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. НПАОП 0.00-1.76-15. Правила безпеки систем газопостачання: затв. наказом Міністерства енергетики та теплоенергетики України від 15.05.2015 № 285. *Офіційний вісник України*. 2015. № 46. Ст. 1697.

2. Закон України «Про ринок природного газу»: від 09.04.2015 № 329-VIII. *Відомості Верховної Ради*. 2015. № 27. Ст. 234. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19> (дата звернення: 10.12.2025).

3. Кодекс газотранспортної системи: затверджено постановою НКРЕКП від 30.09.2015 № 2493. *Офіційний вісник України*. 2015. № 92. Ст. 3137.

4. Попович М. Г., Ковальчук О. В. *Теорія автоматичного керування*: підручник. 2-ге вид. Київ: Либідь, 2007. 656 с.

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

6. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Київ: Мінрегіонбуд України, 2019. 120 с.

7. Ellgen P. *Thermodynamics and Chemical Equilibrium*. Oklahoma: School of Science and Mathematics, 2022. (Розділ 10.14: Ефект Джоуля-Томсона).

8. Сторожук В. М. Математичне моделювання динамічних процесів у газопроводах. *Нафтогазова енергетика*. 2018. № 1(29). С. 45-52.

9. Піндус Н. М. Розробка віртуального тренажера для вимірювання втрат газу. *Метрологія та прилади*. 2014. № 1. С. 34–38.

10. Honeywell International Inc. *ControlEdge RTU Specification. SC03-300-174*. 2022. 28 р. [Електронний ресурс]: [Веб-сайт] - Режим доступу: <https://www.honeywellprocess.com>.

11. Закон України «Про критичну інфраструктуру»: від 16.11.2021 № 1882-IX. *Офіційний вісник України*. 2021. № 95.

12. Honeywell International Inc. *ControlEdge 2020 Platform Hardware Planning and Installation Guide*. 2022.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підп.	Дата		74

13. Emerson Process Management. *Rosemount 3051 Pressure Transmitter. Product Data Sheet*. 00813-0100-4001. 2023. [Електронний ресурс]: [Веб-сайт] - Режим доступу: <https://www.emerson.com>.

14. Emerson Process Management. *Rosemount 3051 Reference Manual*. 00809-0100-4001. 2017. 180 p.

15. Emerson Process Management. *Rosemount 2088 Absolute and Gage Pressure Transmitter. Product Data Sheet*. 00813-0100-4690. 2024.

16. Emerson Process Management. *Rosemount 2088 Reference Manual*. 00809-0100-4108. 2014.

17. Aplisens S.A. *Temperature sensors CT-X. Datasheet*. EN.IO.CT.X. 2022. 8 p. [Електронний ресурс]: [Веб-сайт] - Режим доступу: <https://aplisens.com>.

18. ТОВ «СЛОТ». *Коректор об'єму газу OE-VT. Настанова з експлуатації*. НИМД 421412.004-01. Івано-Франківськ, 2021. 45 с.

19. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»: від 05.06.2014 № 1314-VII. *Відомості Верховної Ради*. 2014. № 30. Ст. 1008.

20. Кодекс газорозподільних систем: затверджено постановою НКРЕКП від 30.09.2015 № 2494. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15> (дата звернення: 10.12.2025).

21. ТОВ «ТЕМІО». *Сигналізатор газу «ВАРТА 1-03»*. Настанова з експлуатації. Київ, 2022. 24 с.

22. International Electrotechnical Commission. *IEC 61131-3:2013 Programmable controllers – Part 3: Programming languages*. Geneva: IEC, 2013. 464 p.

23. ДСТУ EN 61131-3:2022. Програмовані контролери. Частина 3. Мови програмування (EN 61131-3:2013, IDT; IEC 61131-3:2013, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023.

24. Трегуб В. Г. *Автоматизація об'єктів періодичної дії: підручник*. Київ: Ліра-К, 2019. 136 с.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		75

25. Ладанюк А. П., Луцька Н. М. *Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами*. Київ: Ліра-К, 2018.
26. Honeywell International Inc. *ControlEdge Builder User's Guide. RTDOC-X283-en-151A*. 2018. 350 p.
27. Honeywell International Inc. *ControlEdge Builder Function and Function Block Reference Guide. RTDOC-X286-en-174A*. 2022. 250 p.
28. Modbus Organization, Inc. *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*. 2012. URL: <http://www.modbus.org> (дата звернення: 11.12.2025).
29. Modbus Organization, Inc. *Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b*. 2006. URL: <http://www.modbus.org>.
30. Велика О. Т., Ляковська С. Є. Імітаційне моделювання технологічних процесів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. № 4. С. 140–143.

					КРМ.АКСм - 03.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		76

## БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема: Апаратно-програмний комплекс для імітаційного моделювання систем телемеханіки газорозподільних пунктів

Обсяг ПЗ – 76 аркушів, 66 рисунків, 5 таблиць, 30 використаних джерел.

Перелік креслень графічної частини:

1. КРМ.АКСм – 03.00.00.001 Е2 – Дерево проєкту. Схема функціональна.
2. КРМ.АКСм – 03.00.00.002 - Вікно глобальних змінних при активному режимі Sim\_Mode 7.
3. КРМ.АКСм – 03.00.00.003 Е2 – Робота FBD модуля при активному режимі Sim\_Mode 7. Схема функціональна.
4. КРМ.АКСм – 03.00.00.004 – Моніторинг параметрів телемеханіки ГРП в імітаційному режимі Sim\_Mode 7.
5. КРМ.АКСм – 03.00.00.005 Е2 – Функціональна схема системи телемеханіки.

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025р

Підпис студента

Боднарука О.А.

## Додаток А – Код програми симуляції ГРП “Simulator”

```
// --- ГЕНЕРАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОГО ШУМУ ---
// Створення пилкоподібного сигналу в діапазоні [-0.05, 0.05] для імітації
реальних коливань датчиків
Sim_Inlet_Noise := Sim_Inlet_Noise + 0.01;
IF Sim_Inlet_Noise > 0.05 THEN
    Sim_Inlet_Noise := -0.05;
END_IF;

// Встановлення базових значень та ініціалізація змінних
Target_T1 := 15.0; // Базова температура на вході
Sim_T2_Offset := 0.0; // Зміщення для імітації аварій по температурі на виході

// Симуляція загазованості або температури приміщення (з урахуванням шуму)
T_Room := 20.0 + (Sim_Inlet_Noise * 2.0);

// Спеціальний режим 8: імітація спрацювання датчика загазованості (Gas Alarm)
IF Sim_Mode = 8 THEN
    T_Room := 65.0;
END_IF;

// --- ВИБІР СЦЕНАРІЮ РОБОТИ (0-9) ---
CASE Sim_Mode OF
    0: // Штатний режим: тиск 6.0 бар на вході, 0.3 бар на виході
        Target_P1 := 6.0 + Sim_Inlet_Noise;
        Target_P2 := 0.3 + (Sim_Inlet_Noise * 0.1);
    1: // Аварія: Перевищення макс. тиску на вході (P_IN1 > Max)
        Target_P1 := P_IN1_MaxLimit + 5.0;
        Target_P2 := 0.3;
    2: // Аварія: Падіння тиску на вході нижче норми (P_IN1 < Min)
        Target_P1 := P_IN1_MinLimit - 1.0;
        Target_P2 := 0.3;
    3: // Аварія: Перевищення тиску на виході (P_IN2 > Max)
        Target_P1 := 6.0 + Sim_Inlet_Noise;
        Target_P2 := P_IN2_MaxLimit + 0.2;
    4: // Аварія: Падіння тиску на виході (P_IN2 < Min)
        Target_P1 := 6.0 + Sim_Inlet_Noise;
        Target_P2 := P_IN2_MinLimit - 0.1;
    5: // Аварія: Перегрів газу на вході
        Target_P1 := 6.0;
        Target_P2 := 0.3;
        Target_T1 := T_IN1_MaxLimit + 5.0;
    6: // Аварія: Критичне охолодження газу на вході
        Target_P1 := 6.0;
        Target_P2 := 0.3;
        Target_T1 := T_IN1_MinLimit - 5.0;
    7: // Аварія: Висока температура на виході (після редукування)
        Target_P1 := 6.0;
        Target_P2 := 0.3;
        Sim_T2_Offset := (T_IN2_MaxLimit - 15.0) + 10.0;
    8: // Аварія: Низька температура на виході (замерзання обладнання)
        Target_P1 := 6.0;
        Target_P2 := 0.3;
        Sim_T2_Offset := (T_IN2_MinLimit - 15.0) - 10.0;
    9: // Режим скидання (Reset): Повернення системи до вихідного стану
        Target_P1 := 6.0;
        Target_P2 := 0.3;
ELSE
        Target_P1 := 6.0;
        Target_P2 := 0.3;
END_CASE;

// --- ЛОГІКА ІМІТАЦІЇ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ---
IF Sim_Mode = 9 THEN
```

```

// Обнулення параметрів при скиданні
P_IN1 := 6.0;
P_IN2 := 0.3;
T_IN1 := 15.0;
T_IN2 := 12.15;
Gas_Volume := 0.0;
Valve_Latched_Closed := FALSE;
ELSE
// Фіксація стану закриття клапана (Latching) при отриманні команди ValveCmd
IF ValveCmd = TRUE THEN
    Valve_Latched_Closed := TRUE;
END_IF;

IF Valve_Latched_Closed = TRUE THEN
    // Логіка падіння тиску після закриття ПЗК (імітація витоку/зупинки
поток)
    IF P_IN1 > 0.0 THEN P_IN1 := P_IN1 - 0.05; ELSE P_IN1 := 0.0; END_IF;
    IF P_IN2 > 0.0 THEN P_IN2 := P_IN2 - 0.005; ELSE P_IN2 := 0.0; END_IF;
ELSE
    // Імітація інерційності: плавне наближення поточного тиску до цільового
    IF P_IN1 < Target_P1 THEN
        P_IN1 := P_IN1 + 0.05;
    ELSIF P_IN1 > Target_P1 THEN
        P_IN1 := P_IN1 - 0.05;
    END_IF;

    // Обмеження: тиск на виході не може бути більшим за вхідний
    IF P_IN1 < Target_P2 THEN
        Target_P2 := P_IN1;
    END_IF;

    // Плавна зміна тиску на виході (P_IN2)
    IF P_IN2 < Target_P2 THEN
        P_IN2 := P_IN2 + 0.005;
    ELSIF P_IN2 > Target_P2 THEN
        P_IN2 := P_IN2 - 0.005;
    END_IF;

    // Накопичення об'єму газу (імітація роботи лічильника при наявності
тиску)
    IF P_IN2 > 0.1 THEN
        Gas_Volume := Gas_Volume + 0.02;
    END_IF;
END_IF;

// Розрахунок температур із застосуванням шуму
T_IN1 := Target_T1 + (Sim_Inlet_Noise * 10.0);

// Імітація ефекту Джоуля-Томсона: охолодження газу при зниженні тиску
(коефіцієнт 0.5)
T_IN2 := T_IN1 - ((P_IN1 - P_IN2) * 0.5) + Sim_T2_Offset;

// Фізичне обмеження: температура на виході не може бути вищою за вхідну без
стороннього нагріву
IF (Sim_T2_Offset <= 0.0) AND (T_IN2 > T_IN1) THEN
    T_IN2 := T_IN1;
END_IF;
END_IF;

```