

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ДУДИЧ Тарас Ярославович

**АВТОМАТИЗАЦІЯ СТАНЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В
РЕЗЕРВУАРІ/ AUTOMATION OF A PRESSURE REGULATION
STATION IN A RESERVOIR**

спеціальність: Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ-41
Т.Я.Дудич

Науковий керівник:
д.т.н., проф Н.Я. Возна

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
"___" _____ 20__ р.

Завідувач кафедри
_____ А.І.Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "бакалавр"
Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ДУДИЧ Тарас Ярославович

_____ (прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

_____ Автоматизація станції регулювання тиску в резервуарі/ Automation of a pressure regulation station in a reservoir _____

_____ керівник роботи _____ д.т.н., проф. Возна Н.Я. _____

затверджені наказом по університету від "28" листопада 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи:

06 травня 2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

_____ 1. Технічні характеристики контролера Siemens S7-1200 _____

_____ 2. Технічні характеристики контролера TURCK BL20 _____

_____ 3. Характеристики мережі Profinet у рамках стандарту RT _____

4. Основні питання, які потрібно розробити:

_____ 1. Аналіз базових компонентів та принципів побудови систем автоматизованого регулювання _____

_____ 2. Розроблення станції регулювання тиску _____

_____ 3. Функціонування установки для керування тиском _____

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

_____ 1. Блок-схема контролера TURCK BL 20 _____

_____ 2. Блок-схема ПІД-регулятора _____

_____ 3. Схема підключення перетворювача до модуля BL20-1AI _____

_____ 4. Схема підключення приводу до модуля BL20-2AO _____

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1			
2			
3			

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз базових компонентів та принципів побудови систем автоматизованого регулювання	12.2024р. – 01.2025р.	
2	Розроблення станції регулювання тиску	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Функціонування установки для керування тиском	04.2025р. – 05.2025р.	

АНОТАЦІЯ

Дудич Т.Я. Автоматизація станції регулювання тиску в резервуарі. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

У дипломній роботі представлені всі кроки, а також висновки та коментарі, пов'язані з проєктуванням та програмуванням станції регулювання тиску. Описані всі компоненти системи регулювання. Станція дозволяє перевірити ПІД-регулятор в управлінні реальним процесом, яким в даному випадку є стабілізація тиску в баку. Описана робота програмованих логічних контролерів, а саме продуктів двох різних виробників TURCK і SIEMENS, а також властивості мережі Profinet, яка зараз найчастіше реалізується в промислових умовах. У своїй роботі автор спирався на теоретичні основи та сучасні тенденції, що властиві сьогодні галузі автоматизації.

ABSTRACT

Dudych T.Ya. Automation of a pressure regulation station in a reservoir. - Manuscript.

Research on obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies", educational and professional program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

In this thesis was present every single steps, with all conclusions, about building, programming and commissioning of Pressure Control System Test Stand. Step by step the author shows all parts of the regulation system. It must allow to test a PID regulation algorithms on real process, in this example, air pressure stabilization in a tank. It also has an opportunity to know how the Programmable Logic Controller works, know the solutions of the two different producers like TURCK and SIEMENS, and allow to discover and understanding, the most implements today, Profinet network. The author based his works not only on theoretical knowledge, but also on the experiences and actual trends in industry.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ БАЗОВИХ КОМПОНЕНТІВ ТА ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	10
1.1 Програмовані логічні контролери: історія розвитку, функціонування та програмування.....	10
1.2 Опис використаного контролера.....	14
1.3 Промислові мережі. Profinet.....	18
1.4 Алгоритм ПД-регулювання: позиційна та швидкісна форми.....	19
2 РОЗРОБЛЕННЯ СТАНЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ.....	27
2.1 Розроблення застосунку для контролера TURCK BL20PGENV3..	27
2.2 Створення застосунку для ПЛК Siemens S7- 1214.....	38
2.3 Запуск мережі Profinet.....	47
3 ФУНКЦІОНУВАННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТИСКОМ...	51
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58
ДОДАТКИ.....	61

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЛК - програмований логічний контролер;

IEC 61131-3 – стандарт, який детально визначає мови програмування, які застосовуються при проектуванні систем керування на основі ПЛК;

LAD (Ladder Diagram) - графічна мова програмування;

FBD (Function Block Diagram) - мова, що базується на блокових схемах;

STL (Statement List) - текстова мова зі синтаксисом, подібним до асемблера;

SCL (Structured Control Language) — мова високого рівня;

IRT - режим ізохронного реального часу;

ПД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

RT - Real Time.

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах сучасного промислового виробництва однією з важливих задач є забезпечення стабільної та безпечної роботи технологічних процесів. Одним із критично важливих параметрів у багатьох галузях промисловості є тиск, стабільність якого безпосередньо впливає як на якість кінцевої продукції, так і на безпеку персоналу та обладнання. Нестабільність або різкі зміни тиску можуть призвести до аварійних ситуацій, зупинки виробництва чи значних фінансових втрат. Саме тому розробка та впровадження систем автоматичного регулювання тиску актуальною задачею при впровадженні цифрових технологій, мережевих систем та інтелектуального управління в промисловість.

Метою запуску системи контролю тиску в резервуарах є можливість перевірити алгоритми керування на об'єкті. Процес полягає у підтриманні постійного заданого тиску в баку. Об'єкт являє собою резервуар об'ємом 20 л. Сама система управління відноситься до типу SISO (Single Input, Single Output). Регульована змінна – це тиск повітря в резервуарі, змінна, що контролює ступінь регулювання пропорційного клапана Festo. Керування зворотним зв'язком передбачалося за допомогою ПД-регулятора. Система призначена для розробки на основі контролера TURCK PLC. Система також надасть можливість перевести клапан в ручний режим і вручну встановити положення відкрито/закрито.

Виконавчим елементом є пропорційний клапан FESTO, керований напругою в діапазоні 0-10В постійного струму. Сама система також призначена для реагування на тривожні змінні.

Контрольована змінна зчитується за допомогою датчика тиску Turck, що дає показання за шкалою 0-6 бар. Вихідним сигналом є струм в діапазоні 4-20мА.

Об'єкт дослідження: процес регулювання тиску повітря в герметичному резервуарі об'ємом 20 літрів.

Предмет дослідження: методи та технічні засоби автоматичного регулювання тиску з використанням програмованих логічних контролерів (ПЛК), мережі Profinet і засобів візуалізації SCADA/HMI.

Мета роботи: розробити автоматизовану систему регулювання тиску, що базується на контролерах двох виробників (Siemens та TURCK), з можливістю аналізу ефективності алгоритму ПІД-регулювання.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- дослідити принципи функціонування ПЛК та мережі Profinet;
- обґрунтувати вибір контролерів Siemens S7-1200 та TURCK BL20 та реалізувати двосторонній обмін даними за допомогою мережі Profinet;
- розробити програмне забезпечення для контролерів із реалізацією алгоритму ПІД-регулювання;
- здійснити візуалізацію процесу;
- провести тестування системи, включаючи реакцію на зовнішні збурення, аварійні стани та втрату живлення.

Практичне значення даної роботи полягає у створенні повнофункціонального стенда для автоматизації процесу регулювання тиску в резервуарі, який може бути використаний як в освітніх цілях, так і як прототип для промислових застосувань. Розроблена система дозволяє:

- вивчати принципи роботи програмованих логічних контролерів (PLC) різних виробників (TURCK і Siemens);
- аналізувати та налаштовувати алгоритми ПІД-регулювання на реальному об'єкті;
- досліджувати особливості побудови та діагностики мережі Profinet; здійснювати архівування та візуалізацію процесів;
- моделювати реальні ситуації, включаючи аварійні умови (зникнення живлення, збої зв'язку, пошкодження датчика), для підвищення надійності промислових систем.

Завдяки відкритості програмного забезпечення та модульній структурі стенд можна легко модернізувати як для дослідження складніших алгоритмів керування, так і для інтеграції з іншими системами автоматизації.

Апробація. Тарас Дудич Автоматизація станції регулювання тиску в резервуарі на базі PLC і промислової мережі Profinet / Т.Дудич, Н.Возна // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2025), Тернопіль, 2025. -С.43-46.

1. АНАЛІЗ БАЗОВИХ КОМПОНЕНТІВ ТА ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

1.1 Програмовані логічні контролери: історія розвитку, функціонування та програмування

У промисловості, ще задовго до появи програмованих логічних контролерів (ПЛК), керування процесами реалізовувалося здебільшого за допомогою механічних систем. І сьогодні на деяких підприємствах, особливо на застарілих і не модернізованих виробничих лініях, все ще можна знайти автоматику, що базується на кулачках, пружинах та інших механічних елементах.

Наступним етапом розвитку автоматизації стало впровадження релейно-контакторних схем, де електромагнітні пристрої одночасно виконували логічні функції (реле) і безпосередньо керували об'єктом (контактори). Проте такі рішення мали суттєві недоліки. Навіть для реалізації найпростіших логічних операцій доводилось використовувати велику кількість компонентів. Будь-яка, навіть незначна, зміна в алгоритмі роботи вимагала роз'єднання та переобладнання всієї схеми, що було складним, трудомістким і дорогим при значних масштабах системи [1].

Діагностика несправностей у таких схемах також була проблемною, особливо в умовах зношеного обладнання. До цього слід додати високий рівень енергоспоживання та неможливість багаторазового використання тих самих логічних функцій без фізичного дублювання елементів. У сучасних умовах, з огляду на вимоги до ефективності, економічного обґрунтування та гнучкості виробництва, подібні системи втрачають актуальність і практично не використовуються. Сьогодні вони збереглися лише в найпростіших автоматизованих процесах, де основну роль відіграє низька вартість компонентів і відсутність вимог до високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Відповіддю на всі зазначені недоліки стала поява ПЛК — пристрою, що дозволив реалізовувати складні логічні функції програмним шляхом, об'єднаних в одному компактному модулі. Першими до цієї ідеї звернулися американські інженери. У 1968 році компанія General Motors висунула концепцію створення повністю електронного пристрою для управління дискретними процесами. Вже в 1969 році з'явився перший повністю програмований логічний контролер — Modicon 084, розроблений Р. Молі (R. Molé) [2, 3].

Це нововведення суттєво розширило можливості автоматизованого керування, одночасно усунувши необхідність у фізичній зміні схем, додаванні реле чи контакторів для кожної нової логічної функції. Контролер підтримував до 128 входів і виходів і мав обсяг пам'яті 1 кілобайт.

У 1983 році компанія Siemens випустила свій перший програмований логічний контролер S5 [4, 5]. Окрім Siemens, на ринку вже були представлені такі виробники, як Modicon, Allen-Bradley, Mitsubishi, OMRON та General Electric. У цей період також починають з'являтися перші промислові мережі, серед яких особливе місце займає Profibus, що й досі широко використовується. Ці мережі дали змогу створювати розподілені системи керування та організовувати обмін даними між контролерами й виконавчими пристроями.

Лише у 1992 році було запроваджено уніфіковані стандарти для програмованих логічних контролерів. Зокрема, стандарт ІЕС 1131 упорядкував ключові аспекти, такі як мови програмування, протоколи зв'язку тощо [6-9].

Порівнюючи сучасні ПЛК з їхніми попередниками, помітний значний технологічний прогрес. З'явилися нові протоколи обміну даними, такі як Profinet, Ethernet TCP, AS-i Interface, на ринку з'явилися нові виробники, а сфери застосування ПЛК постійно розширюються, охоплюючи всі галузі промисловості.

Прикладом сучасного високопродуктивного ПЛК є Siemens 1518-F ZPN/DP [10] , який має 6 МБ пам'яті для програм, 20 МБ користувацької пам'яті, а час виконання бітової інструкції — лише 1 наносекунда. Також реалізована підтримка систем безпеки, зокрема двоканальне виконання програмного коду, як у серії Failsafe від Siemens.

Підсумовуючи, варто зазначити, що ПЛК не лише успішно замінили релейно-контакторні системи, а й дали змогу реалізовувати складні алгоритми керування та регулювання, забезпечили гнучку комунікацію між пристроями і відкрили нові можливості для автоматизації. Змінилося й сприйняття систем керування загалом: сьогодні будь-яку ідею або новий алгоритм можна з легкістю перевести з теорії в практичну реалізацію.

Кожен програмований логічний контролер працює за чітко визначеним алгоритмом, що показано на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 - Цикл роботи ПЛК.

Ініціалізація. На цьому етапі здійснюється підготовка до роботи: обробка таймерів, перевірка шин передачі даних, тестування вхідних і вихідних модулів, а також встановлення контролю тривалості циклу виконання програми.

Зчитування станів входів. Контролер зчитує поточні логічні стани з усіх фізичних входів і заносить їх у внутрішню пам'ять, яка називається образ входів (Process Image).

Виконання програми. Програма користувача виконується поетапно, інструкція за інструкцією, на основі даних, збережених у пам'яті.

Оновлення виходів. Після завершення виконання програми, зображення виходів (тобто логічні стани, які мають бути подані на фізичні виходи) передаються до вихідних модулів ПЛК.

Обслуговування зовнішніх пристроїв. У цьому етапі відбувається обмін даними з усіма пристроями, підключеними до ПЛК через мережу (сенсори, панелі оператора, інші контролери тощо).

Діагностика. ПЛК виконує автоматичну самодіагностику, що дає змогу виявити внутрішні помилки чи збої в роботі системи.

Ось переклад українською з адаптованим перефразуванням для технічного контексту:

Стандарт ІЕС 61131-3 детально визначає мови програмування, які застосовуються при проєктуванні систем керування на основі ПЛК [6-9]. Сам процес уніфікації розпочався ще з публікації стандарту ІЕС 1131-3 у 1993 році. До цього кожен виробник розробляв власну мову програмування для своїх контролерів.

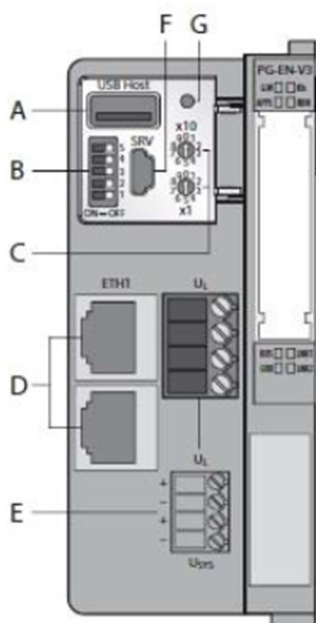
Стандарт визначає такі варіанти мов:

- LAD (Ladder Diagram) — графічна мова програмування, що є найпростішою для ПЛК. Її синтаксис максимально наближений до електричних схем. Вона не потребує глибоких знань від програміста чи користувача системи;

- FBD (Function Block Diagram) — мова, що базується на блокових схемах. Зручна для розробки логічних структур керування;
- STL (Statement List) — текстова мова зі синтаксисом, подібним до асемблера;
- SCL (Structured Control Language) — мова високого рівня. У середовищі Codesys вона позначається скороченням ST (Structured Text) [11].

1.2 Опис використаного контролера

У якості центрального елемента керування в лабораторному стенді використано програмований логічний контролер Turck BL20-PG-EN-V3 [12] (рисунок 1.2), що належить до нового покоління пристроїв типу Gateway. Контролер може функціонувати як автономно, так і в складі розподілених систем автоматизації, взаємодіючи з іншими ПЛК та виконавчими модулями через промислові мережі.



- A – порт USB;
- B – DIP-перемикач для налаштування режиму адресації;
- C – поворотний перемикач для встановлення IP-адреси;
- D – порти Ethernet;
- E – напруга живлення;
- F – сервісний роз'єм;
- G – кнопка SET.

Рисунок 1.2 - Вигляд контролера TURCK BL 20

Turck BL20 підтримує найпоширеніші протоколи обміну даними, зокрема: Profinet, EtherNet/IP та Modbus TCP. Завдяки цьому пристрій може

виступати у ролі віддаленого пристрою (Slave) у системах із головними керуючими вузлами або промисловими ПК.

Програмування контролера здійснюється через інтерфейс Ethernet або mini USB за допомогою середовища Codesys V3, починаючи з версії 3.5.6 [13]. Це середовище забезпечує повну відповідність стандарту IEC 61131-3, що дозволяє використовувати широкий спектр мов програмування ПЛК, таких як:

- IL (Instruction List) – інструкційний список,
- FBD (Function Block Diagram) – мова функціональних блоків,
- ST (Structured Text) – структурований текст,
- SFC (Sequential Function Chart) – послідовна функціональна схема,
- LAD (Ladder Diagram) – релейно-контактна схема.

Контролер оснащений двома Ethernet-портами, які виконують функцію мережевого комутатора, що дозволяє створювати лінійну топологію мережі без необхідності додаткових зовнішніх пристроїв.

Налаштування IP-адреси здійснюється за допомогою обертового перемикача, вбудованого в корпус контролера. Можливі режими конфігурації включають:

- Static IP – ручне задання IP-адреси,
- PGM – зчитування налаштувань із EEPROM,
- DHCP – автоматичне отримання IP-адреси з мережі.

Стан роботи контролера можна легко зчитати за допомогою восьми світлодіодів, розташованих на передній панелі контролера. За допомогою діода з написом GW можна зчитати стан мікропрограми (firmware), діод IOs – стан і можливі помилки входів/виходів, APPL – стан роботи PLC-додатку, який може бути довільно запрограмований користувачем системи, RUN – статус виконуваної програми, BUS – стан мережі, ERR – помилка, потрібна діагностика модуля, а також Link 1 і Link 2 – статуси з'єднання на портах Ethernet.

Рисунок 1.3 відображає блок-схему контролера. Основою контролера є 32-бітний процесор ARM, який дозволяє виконати 1000 команд AWL за час

менше ніж 1 мс. Крім того, він має повнофункціональний годинник реального часу, доступний з програмного рівня, який завдяки вбудованому суперконденсатору здатен зберігати свій стан до 168 годин. Контролер має 1024 кБайт програмної пам'яті. Дуже корисною функцією, що відповідає духу четвертої промислової революції, є веб-сервер, за допомогою якого після активації можна користуватися сервісними функціями контролера, переглядати змінні, а також, наприклад, керувати мережею Profinet, задаючи ім'я контролеру.

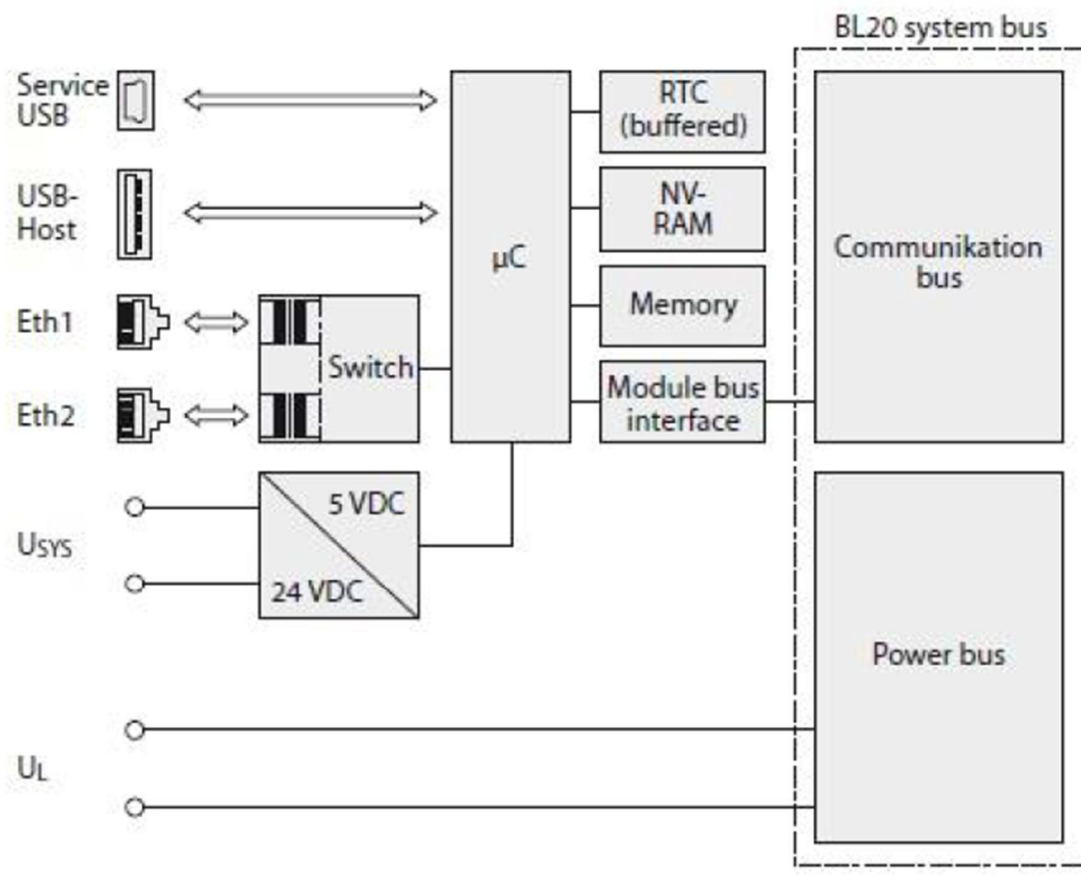


Рисунок 1.3 - Блок-схема контролера TURCK BL 20

Контролер може обмінюватися 1024 байтами вхідних і вихідних даних за допомогою мережі Profinet. Сама мережа Profinet відповідає стандарту RT (Real Time).

SIEMENS S7-1214C DC/DC/DC

Серія контролерів S7-1200 (рисунок 1.4) була створена як наступник популярної серії S7-200 [14]. ПЛК цієї серії має модульну будову, де окремі комунікаційні модулі або модулі розширення монтуються на звичайну DIN-рейку, без потреби у використанні стояків (як у серіях S5, S7-400) або спеціальних з'єднувачів, характерних для серії S7-300. Серія S7-1200 ідеально підходить для застосувань у не надто складних проектах, які не вимагають значних обчислювальних ресурсів. Модульність контролера дозволяє адаптувати його до вимог конкретної задачі. Можлива розширюваність до 3 комунікаційних модулів і 8 модулів введення/виведення, а також можливість встановлення сигнальної плати або батареї для подовження роботи годинника реального часу (RTC).

Контролер S7-1214C має 75 кБ оперативної пам'яті, а обсяг завантажуваної пам'яті становить 4 МБ. Підтримка реального часу забезпечується RTC-годинником, який живиться від суперконденсатора — при вимкненні живлення контролер зберігає час до 10 діб, а при використанні батареї — до 1 року.

Контролер оснащено 14 вхідними цифровими каналами, 2 аналоговими входами та 10 транзисторними цифровими виходами. Також є 3 квадратурні та 3 одноканальні швидкі лічильники, а також 4 імпульсні виходи.

Контролер має Ethernet-порт, який повністю підтримує Profinet у версії RT. Час виконання 1000 інструкцій, за даними виробника, становить 0,04 мс. Контролер може працювати в мережі Profinet як у режимі Master, так і Slave.

Для базової діагностики передбачено 3 вбудовані світлодіоди:

- RUN/STOP — інформує про режим роботи контролера (жовтий – STOP, зелений – RUN),
- ERROR — повідомляє про помилки (наприклад, перевищення вхідного сигналу),
- MAINT — сигналізує про потребу втручання користувача або програміста.

Для детальної діагностики слід використовувати Діагностичний буфер, вбудований у середовище TIA Portal.



Рисунок 1.4 - Контролер S7 1214 dc/dc/dc

1.3 Промислові мережі. Profinet

Profinet IO, як промислова мережа, виникла на основі мереж Profibus та Industrial Ethernet, ставши їх подальшим розвитком. Вона призначена для з'єднання розподілених автоматизованих систем. Мережа Profinet дозволяє не лише здійснювати обмін даними між пристроями, а й об'єднувати промислові мережі з офісними, використовуючи всі переваги інфраструктури, побудованої на базі Ethernet [15].

Завдяки технології комутації та передачі даних всі станції мають можливість доступу до мережі в будь-який момент, обмінюючись інформацією в режимі full-duplex зі швидкістю 100 Мбіт/с.

Основна передача даних у мережі відбувається на основі протоколу TCP/IP. Пакети формуються як за стандартом з'єднувального протоколу з підтвердженням TCP, так і безз'єднувального UDP. Проте така передача є недостатньою в реальному часі, особливо в системах, де часова визначеність має вирішальне значення.

Тому вся критично важлива комунікація між пристроями систем управління здійснюється за допомогою пакетів режиму SRT (синхронний реальний час). Це дозволяє забезпечити затримку не більше ніж 10 мс, а пакети позначаються пріоритетним тегом рівня 6, минаючи додаткове інкапсулювання [16].

Найточнішим і водночас найвимогливішим до реального часу та надійності є режим ізохронного реального часу (IRT). У цьому режимі передача даних завжди починається із синхронізації, а сама передача здійснюється на апаратному рівні, з максимальним пріоритетом.

З'єднання між пристроями може здійснюватися:

- за допомогою екранованої виті пари не нижче категорії 5 (до 100 м),
- оптоволоконного кабелю,
- бездротовими засобами.

Мережа Profinet безсумнівно перевершує Profibus не лише за швидкістю передачі даних, а й за надійністю та можливістю побудови складних топологій. Крім того, вона значно стійкіша до електромагнітних завад, що має особливе значення в умовах промислового виробництва.

1.4 Алгоритм ПІД-регулювання: позиційна та швидкісна форми

Історія створення систем автоматичного регулювання бере свій початок ще у 1788 році, коли Джеймс Ватт вперше застосував пропорційний регулятор із зворотним зв'язком для керування потоком пари в паровій машині (рисунки 1.5). Це був механічний відцентровий регулятор, який дозволяв стабілізувати швидкість обертання парової машини залежно від навантаження [17]. Відцентровий регулятор Ватта працював за принципом зворотного зв'язку: при збільшенні швидкості обертання вала регулятор підіймав вантажі, що зменшувало потік пари через дросельний клапан, і навпаки. Механізм став прообразом сучасної системи автоматичного регулювання, який використовується в різних галузях техніки.

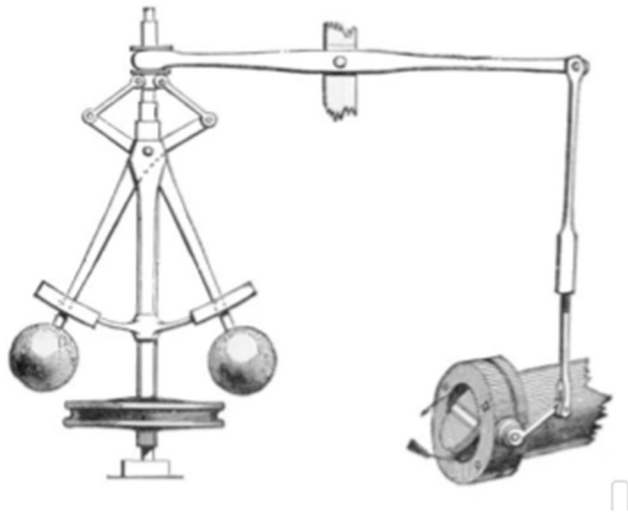


Рисунок 1.5 - Принципова схема регулятора J.Watt

До сьогодні принцип дії системи регулювання залишається незмінним: здійснюється вимірювання фактичного значення параметра, воно порівнюється з бажаним значенням, в результаті чого визначається так зване відхилення регулювання (похибка), після чого виконується такий керуючий вплив, який зменшує цю похибку, і цикл повторюється доти, доки не буде досягнуто очікуваного значення.

У автоматичному регулюванні традиційно використовували пропорційні регулятори. Перший регулятор, який поєднував пропорційну, інтегральну та диференціальну складові, з'явився у 1922 році завдяки спостереженням Ніколаса Мінорського [18, 19]. Під час морської подорожі він спостерігав за штурманом, який керував кораблем. Це керування не базувалося лише на мінімізації поточного відхилення, а також враховувало попередні відхилення та швидкість зміни значень.

Цей регулятор був реалізований на борту корабля "New Mexico". Попри те, що система забезпечувала надзвичайно точне утримання курсу, армія не наважилася впровадити її для постійного використання.

Бурхливий розвиток регулювання типу ПД відбувся під час Другої світової війни. Зокрема, важливими були дослідження Ціглера та Ніколса, які займались налаштуванням ПД-регуляторів для американських підводних

човнів та ввели поняття передавальної функції [20, 21]. Пневматичні ПД-регулятори почали застосовуватись у військових технологіях все ширше.

Втім, подальший розвиток та впровадження таких систем у цивільному секторі довгий час стримувались через військову таємницю. Лише після завершення війни почалася активна розробка і масове впровадження ПД-регуляторів у промисловості.

У 1957 році був створений перший повністю електронний ПД-регулятор, побудований на основі транзисторної технології, спеціально для промислових застосувань. З того часу з'явилася велика кількість наукових праць, присвячених теорії автоматичного управління.

У 1962 році відбулося перше застосування цифрового керування безпосередньо на основі комп'ютера, а винахід мікропроцесора у 1969 році започаткував стрімкий розвиток регуляторів, заснованих на промислових комп'ютерах та спеціалізованих інтегральних мікросхемах.

1990-ті роки ХХ століття стали переломними в розвитку систем автоматичного управління завдяки впровадженню інформаційних технологій в автоматизацію промислових процесів.

Сьогодні, завдяки розвитку цифрових технологій, ми можемо використовувати регулятори, вже вбудовані в ПЛК або РАС-контролери, вільно адаптувати їх до вимог конкретного застосування, використовувати вбудовані алгоритми автоналаштування або розробляти власні функції регулювання. Крім того, передача даних про регулювання через мережу стала простою та зручною, що дозволяє легко інтегрувати регулятори в сучасні автоматизовані системи керування.

На сьогоднішній день ПД-регулятори залишаються основним інструментом керування в широкому спектрі галузей.

Широка популярність ПД-регуляторів зумовлена простотою реалізації, наочністю принципу дії, стійкістю до збурень та можливістю налаштування під різні технологічні задачі. Незважаючи на появу складніших методів керування, ПД-регуляція залишається ключовим інструментом у сучасних

автоматизованих системах завдяки своїй ефективності та універсальності [22, 23].

На рисунку 1.6 показана схема роботи паралельного пропорційного, інтегрального та похідного регулятора.

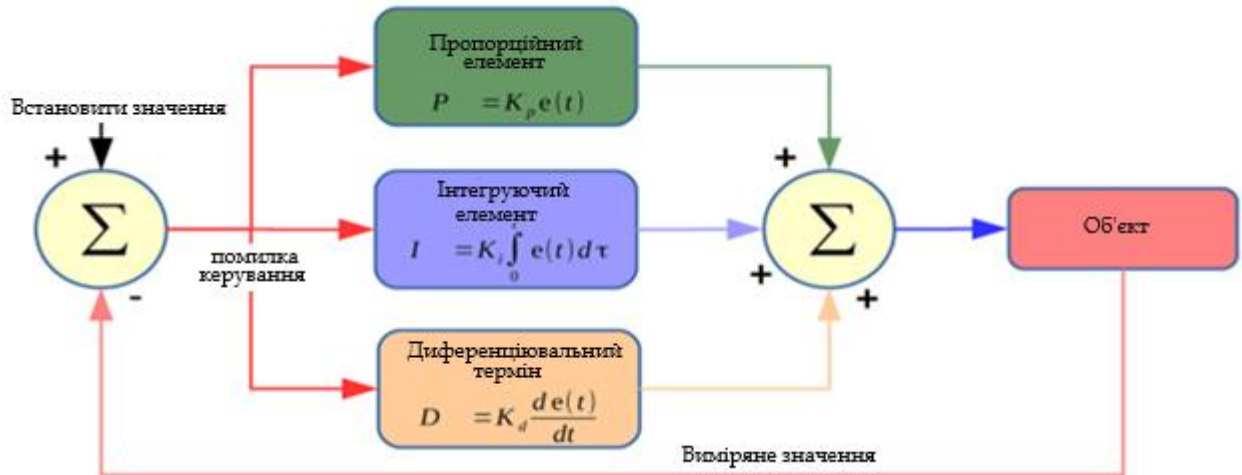


Рисунок 1.6 - Блок-схема ПІД-регулятора.

Загальний вигляд безперервного ПІД-регулятора можна записати наступним чином:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt},$$

де:

$u(t)$ – керуючий сигнал на виході регулятора;

$e(t) = y_{зад}(t) - y(t)$ – похибка регулювання;

K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

K_i – коефіцієнт інтегрувальної складової;

K_d – коефіцієнт диференціальної складової;

$\int_0^t e \, d\tau$ – накопичена похибка (інтеграл);

$\frac{de(t)}{dt}$ – швидкість зміни похибки (похідна).

Це рівняння описує сукупний вплив трьох дій: пропорційної (реакція на поточну похибку), інтегрувальної (реакція на сумарну похибку з часом) і диференціальної (реакція на швидкість зміни похибки), що й забезпечує гнучке та точне керування динамічними процесами.

Першим кроком у роботі ПД-регулятора є визначення похибки регулювання, тобто різниці між заданим та фактичним значенням. Використання в системі автоматичного регулювання лише пропорційної (Р) складової призводить до того, що коли похибка наближається до нуля, регулятор фактично припиняє впливати на процес. Це означає, що система не досягає точної відповідності бажаному значенню.

Додавання до регулятора інтегральної (І) складової забезпечує постійне коригування вихідного сигналу до ти пір, доки фактичне значення не зрівняється із заданим. Швидкість, з якою відбувається це коригування, визначається параметром T_i - це час інтегрування, що показує, за який період вплив інтегральної складової подвоюється.

Диференційна (D) складова реагує на швидкість зміни похибки. Вона сприяє зменшенню перехідного процесу та прискорює реакцію системи, особливо під час різких збурень. Це дозволяє уникнути перерегулювання та підвищити стабільність.

Після дискретизації безперервної моделі (використовуючи методи апроксимації) можна отримати дискретну форму ПД-регулятора. Його передавальна функція в загальному вигляді має вигляд:

$$G(z) = K_p + K_i \cdot \frac{T_s}{z - 1} + K_d \cdot \frac{z - 1}{T_s z},$$

де: K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

$K_i = \frac{K_p}{T_i}$ – коефіцієнт інтегрувальної складової;

$K_d = K_p \cdot T_d$ – коефіцієнт диференціальної складової;

T_s – період дискретизації;

Z – оператор z -перетворення.

Позиційний алгоритм ПД-регулятора.

Позиційний алгоритм регулятора є однією з форм реалізації дискретного ПД-регулятора, в якій керуючий сигнал обчислюється як сума всіх складових

(пропорційної, інтегрувальної та диференціальної) в кожному кроці часу. Його загальна формула має вигляд:

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \sum_{i=0}^k e(i) + K_d \cdot (e(k) - e(k-1))$$

де:

$u(k)$ – керуючий сигнал у момент дискретного часу k ;

$e(k)$ – похибка на k -му кроці;

K_p, K_i, K_d – коефіцієнти П, І та Д складових відповідно.

Одним із головних недоліків позиційного алгоритму є необхідність застосування anti-windup фільтра, який захищає від "перенасичення інтегратора" (wind-up). Це явище виникає тоді, коли керуючий сигнал перевищує фізичні межі виконавчого механізму (наприклад, клапан не може відкритися більше, ніж на 100 %). Незважаючи на це, інтегральна складова продовжує зростати, що призводить до великого накопиченого значення, яке потім може викликати коливання або тривалий час повернення системи до сталого режиму.

Також, для обчислення поточного значення керування, необхідно знати значення похибки в усіх попередніх кроках, що збільшує вимоги до пам'яті та обчислювальних ресурсів.

Алгоритм швидкісного ПД-регулятора.

Швидкісна (інкрементна) форма ПД-регулятора дозволяє уникнути проблеми перенасичення інтегратора (wind-up), тому застосування фільтра anti-windup не є обов'язковим. Крім того, такий підхід значно спрощує реалізацію алгоритму, особливо в мікроконтролерах, оскільки він не потребує збереження великої кількості значень інтегралу, а тільки кількох попередніх похибок.

У цьому випадку не обчислюється абсолютне значення керуючого сигналу, а лише його різниця між поточним і попереднім тактом:

$$\Delta u(k) = K_p \cdot (e(k) - e(k - 1)) + K_i \cdot e(k) + K_d \cdot (e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2))$$

де: $\Delta u(k)$ – приріст (зміна) керуючого сигналу у момент часу k ;

$e(k)$, $e(k-1)$, $e(k-2)$ – похибка на поточному і попередніх двох тактах;

K_p , K_i , K_d – коефіцієнти П, І та Д складових відповідно.

Потім оновлюється керуючий сигнал:

$$u(k) = u(k - 1) + \Delta u(k)$$

До переваг швидкісного алгоритму відносяться простіша реалізація на ПЛК, зниження ризику "wind-up" ефекту, природне обмеження виходу через приріст керування, потребує менше пам'яті (зберігаються лише кілька останніх значень похибки).

На рисунку 1.7 представлено графічне порівняння позиційного та швидкісного алгоритмів ПД-регулятора.

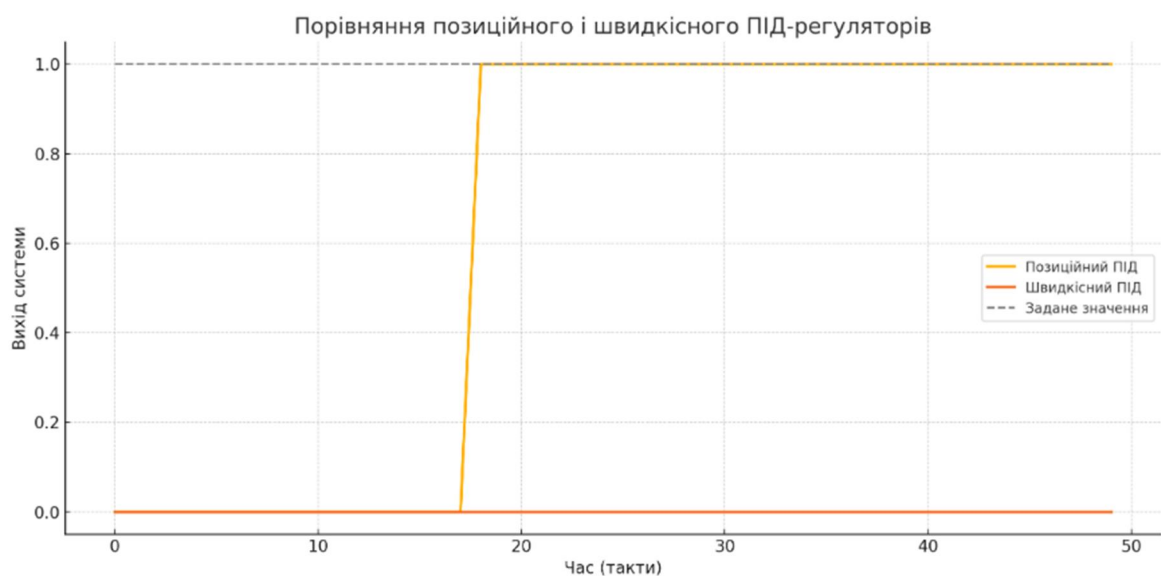


Рисунок 1.7 – Порівняльна оцінка позиційного та швидкісного алгоритмів ПД-регулятора.

У даному випадку графік демонструє реакцію вихідного сигналу системи при подачі одиничного імпульсу або стрибка. Це допомагає побачити, наскільки швидко і точно система досягає бажаного значення, і як вона реагує на помилки.

З рисунка 1.7 видно, що обидва алгоритми забезпечують наближення до заданого значення, але швидкісний алгоритм показує кращу стабільність і уникнення перенасичення.

2. РОЗРОБЛЕННЯ СТАНЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ

2.1 Розроблення застосунку для контролера TURCK BL 20 PG EN V3

Система регулювання, відповідальна за безпосереднє управління процесом, складається з ПЛК-контролера TURCK BL 20 PG EN V3, модуля аналогових входів BL20-1AI, що працює в діапазоні 0/4–20 мА з одним струмовим входом та роздільною здатністю 16 біт, а також модуля аналогових виходів BL20-2AO, який працює в діапазоні -10/0 В – 10 В DC та має два аналогові виходи з роздільною здатністю 16 біт.

Система керування тиском побудована за класичною схемою з використанням ПЛК, модулів вводу/виводу та виконавчих пристроїв.

ПЛК TURCK BL 20 PG EN V3 – центральний елемент управління, що виконує логіку керування, реалізує алгоритм регулювання та здійснює обмін даними з системою SCADA.

Модуль аналогових входів BL20-1AI призначений для зчитування аналогових сигналів з датчиків. У даному випадку він приймає сигнал 4–20 мА від перетворювача тиску TURCK, що вимірює фактичне значення тиску у системі. Сигнал масштабується у ПЛК до фізичного значення (наприклад, в барах).

Модуль аналогових виходів BL20-2AO передає керуючий аналоговий сигнал від -10 В до +10 В на регулюючий клапан FESTO. Цей клапан змінює положення у відповідь на отриманий сигнал, тим самим змінюючи витрату повітря або рідини, що впливає на тиск у системі.

Пропонована система регулювання тиску працює за наступним алгоритмом:

1. Зчитування значень тиску. Перетворювач тиску постійно вимірює тиск у технологічному процесі й передає аналоговий струмовий сигнал (4–20 мА) на модуль BL20-1AI.

2. Опрацювання сигналу. Модуль перетворює аналоговий сигнал у цифрове значення з роздільною здатністю 16 біт і передає його до ПЛК.

3. Розрахунок відхилення (помилки). ПЛК порівнює виміряне значення з заданим тиском. Різниця між ними є помилкою (uchybem).

4. Формування керуючого сигналу. На основі алгоритму керування ПЛК обчислює необхідну величину керуючого сигналу.

5. Передача керуючого сигналу. Розраховане значення подається у вигляді аналогової напруги через модуль BL20-2AO до регулюючого клапана FESTO.

6. Регулювання тиску. Клапан змінює витрату, що призводить до зміни тиску. Система автоматично входить у режим стабілізації, підтримуючи заданий тиск.

До переваг такої конфігурації слід віднести наступне:

- висока точність завдяки 16-бітій роздільній здатності;
- модульна архітектура забезпечує гнучкість розширення;
- сумісність з промисловими протоколами;
- можливість інтеграції з SCADA-системою для візуалізації, архівації даних та дистанційного керування.

Рисунок 2.1 показує спосіб підключення перетворювача тиску TURCK до аналогового входу, а рисунок 2.2 - схему підключення регулюючого клапана FESTO до аналогового виходу.

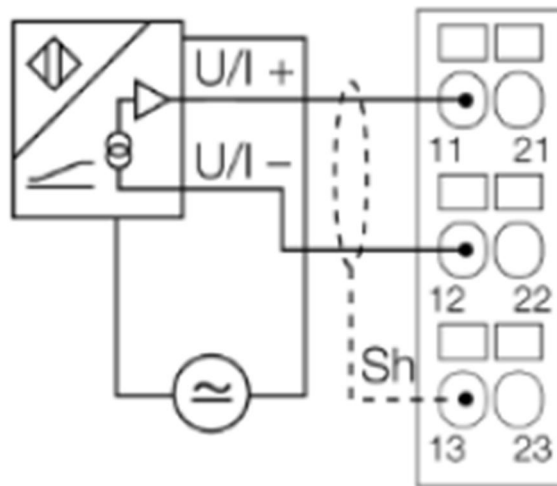


Рисунок 2.1 - Схема підключення перетворювача до модуля BL20-1AI

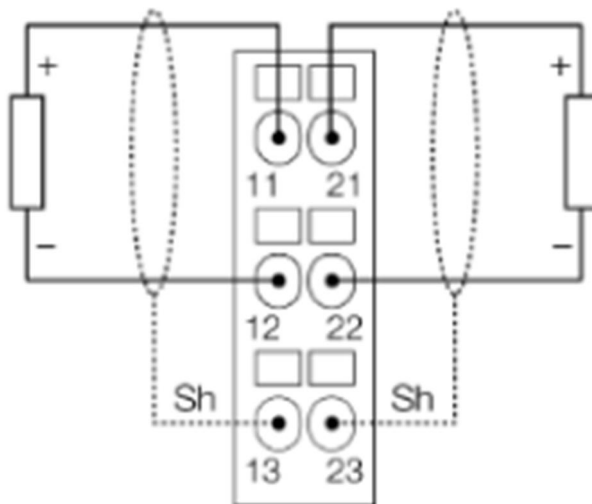


Рисунок 2.2 - Схема підключення приводу до модуля BL20-2AO

Сам контролер, а також регулюючий клапан живляться від джерела живлення на 24 В DC типу MDR-60-24 з вихідним струмом 2,5 А, захищеного автоматичним вимикачем типу В6. Зчитування фактичного значення тиску здійснюється за допомогою п'єзорезистивного давача тиску TURCK PT006R-11-LI3-N1131, який забезпечує вимірювання в діапазоні 0–6 бар та формує вихідний струм у межах 4–20 мА. На рисунку 2.3 наведено реальний вигляд датчика, встановленого на резервуарі.



Рисунок 2.3 - Датчик тиску TURCK, встановлений на об'єкті.

Елементом, що керує потоком стисненого повітря, є пропорційний клапан FESTO типу 5/3 NC, модель MPYE-5-1/8-LF-010-B. Схему роботи клапана зображено на рисунку 2.4, де: 1 – підключення джерела стисненого повітря, 2 – вихід до керованого елемента, 3 та 5 – глушники, 4 – шланг, підключений до пневматичного резервуара.

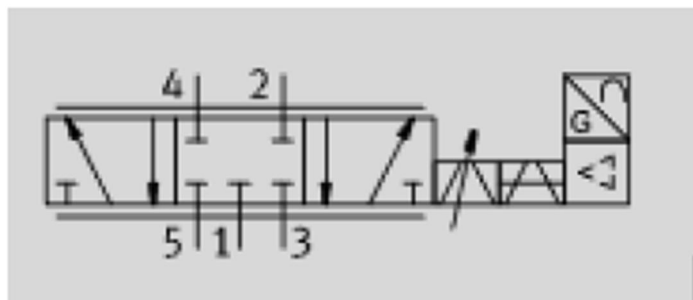


Рисунок 2.4 - Принципова схема пропорційного клапана

Керування клапаном здійснюється за допомогою сигналу напруги в діапазоні 0–10 В постійного струму. На рисунку 2.5 представлено залежність відсотка потоку стисненого повітря від значення аналогового сигналу напруги, що подається.

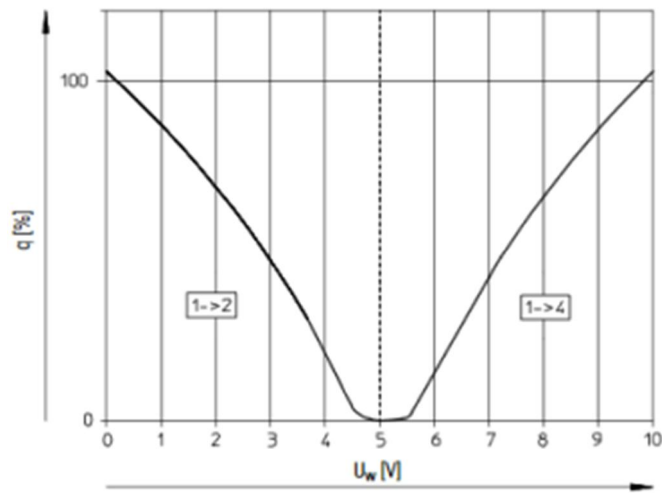


Рисунок 2.5 - Характеристика клапана, залежність витрати від керуючої напруги

З характеристики можна визначити, що клапан повністю закритий при напрузі близько 5 В. У діапазоні від 0 до 5 В клапан працює в режимі «скидання» стисненого повітря. У діапазоні від 5 до 10 В клапан подає тиск у резервуар зі стисненим повітрям.

На рисунку 2.6 зображено загальний вигляд шафи керування стандом регулювання тиску з видимим ПЛК-контролером, модулями аналогових входів/виходів та блоком живлення.



Рисунок 2.6 - Шафа керування станції регулювання тиску

Програми для ПЛК-контролера складена у програмному середовищі Codesys V3.5 з пакетом оновлення Service Pack 9, розробленого компанією Smart Software Solutions. Додатково встановлено файли, які дозволяють використовувати контролер BL20 виробництва TURCK.

Адресу контролера встановлено за допомогою перемикачів типу dip-switch та поворотного перемикача, налаштувавши режим Static-IP. Щоб встановити з'єднання, також потрібно вручну призначити IP-адресу мережевій карті комп'ютера у вкладці IPv4.

Після правильного налаштування адрес, у вікні Device за допомогою функції Scan network виконується пошук встановленого контролера. Програма автоматично виявила підключені до контролера модулі, у даному випадку - аналогові модулі, і виконала їх автоматичне адресування (рисунок 2.7).

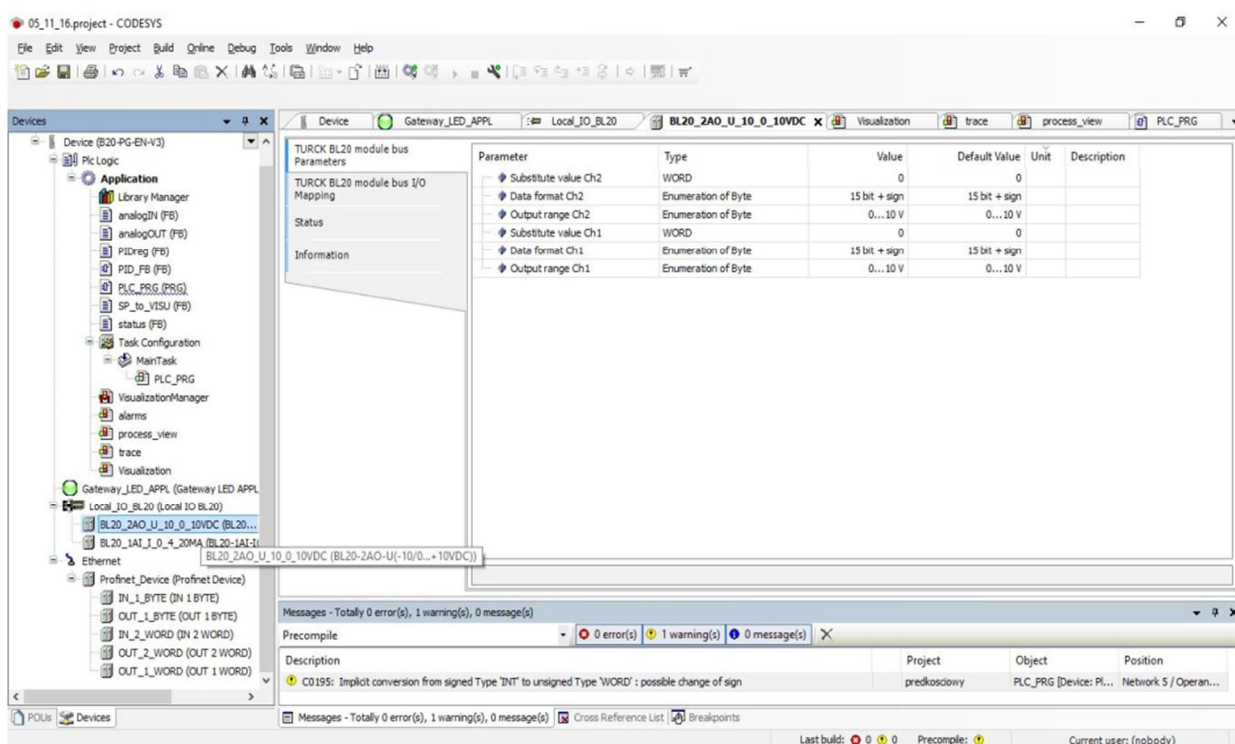


Рисунок 2.7 - Вікно програми з видимими аналоговими модулями (вихідний модуль напруги)

Наступним етапом стало налаштування параметрів аналогових модулів. Зокрема, встановлено формат даних 15 біт + знак, а також задано діапазон напруги, в якому здійснюється керування.

Налаштування модуля струмових входів проводиться аналогічно, з тією різницею, що діапазон вимірювання було змінено з типового 0–20 мА на 4–20 мА. Доступ до сигналу вимірювання з рівня програми здійснюється через вхід за адресою %IW0.

Концепція програми базується на поділі ключових елементів на окремі функціональні блоки, кожен із яких виконує конкретне завдання і викликається у головному циклі програми. Такий підхід підвищує структурованість та зручність обслуговування системи керування.

Рисунок 2.8 ілюструє схему програмних блоків, що показує взаємозв'язки між основними компонентами програми, а саме: блок зчитування сигналу з датчика тиску, блок реалізації ПД-регулятора, блок обробки та нормалізації сигналів, блок керування аналоговим виходом для клапана, блок захистів і діагностики.

Ця модульна структура дозволяє легко змінювати, тестувати й масштабувати окремі частини системи без впливу на всю програму.

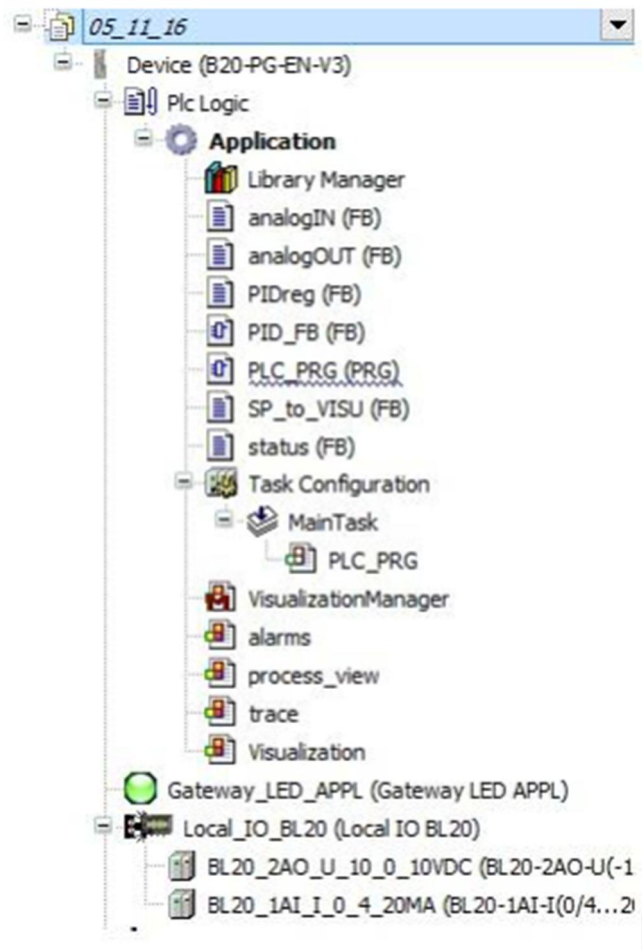


Рисунок 2.8 - Блок-схема програми

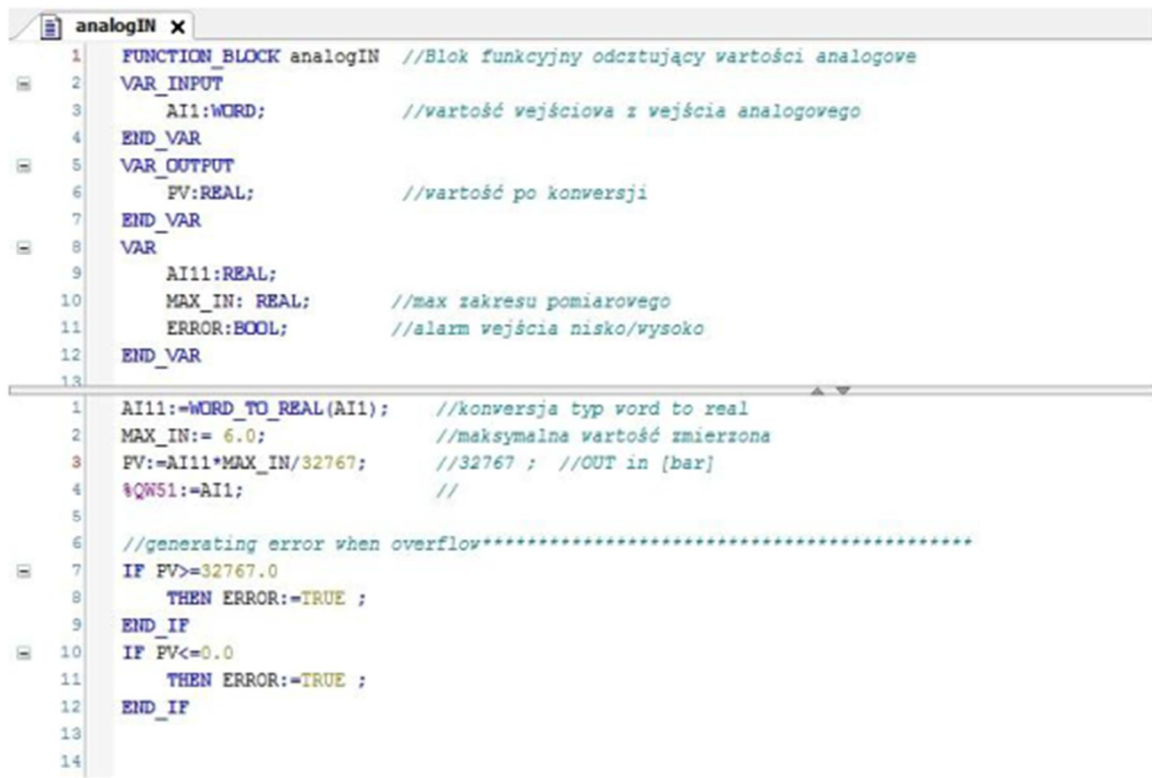
Зчитування значення з аналогового входу реалізовано у функціональному блоці з назвою „analogIN”. Алгоритм роботи полягає в перетворенні цифрового значення, отриманого з входу АЦП, у фізичну величину.

Алгоритм зчитування значення з аналогового входу складається з наступних етапів:

1. Значення, зчитане з аналогового входу (в даному випадку адреса %IW0), — це число від 0 до 32767 (роздільна здатність 15 біт + знак).
2. Це число множиться на максимальне значення діапазону вимірювання датчика, тобто 6 бар.
3. Результат ділиться на 32767, щоб отримати реальне значення тиску в барах.

Рисунок 2.9 демонструє фрагмент програмного коду, де реалізовано цю операцію у вигляді функціонального блоку.

Такий підхід забезпечує просте масштабування значення сигналу з аналогового входу в бари.



```
1 FUNCTION_BLOCK analogIN //Blok funkcyjny odczytujący wartości analogowe
2 VAR_INPUT
3     AI1:WORD;           //wartość wejściowa z wejścia analogowego
4 END_VAR
5 VAR_OUTPUT
6     FV:REAL;           //wartość po konwersji
7 END_VAR
8 VAR
9     AI11:REAL;
10    MAX_IN: REAL;       //max zakresu pomiarowego
11    ERROR:BOOL;        //alarm wejścia nisko/wysoko
12 END_VAR
13
14 AI11:=WORD_TO_REAL(AI1); //konwersja typ word to real
15 MAX_IN:= 6.0;           //maksymalna wartość zmierzona
16 FV:=AI11*MAX_IN/32767; //32767 ; //OUT in [bar]
17 %QW51:=AI1;           //
18
19 //generating error when overflow*****
20 IF FV>=32767.0
21     THEN ERROR:=TRUE ;
22 END_IF
23 IF FV<=0.0
24     THEN ERROR:=TRUE ;
25 END_IF
```

Рисунок 2.9 - Функціональний блок analogIN

Керування аналоговим виходом реалізується за допомогою функціонального блоку „analogOUT”. Цей блок відповідає за перетворення бажаного фізичного значення (наприклад, тиску в барах або у відсотках) у відповідне цифрове значення, яке можна подати на аналоговий вихід, що працює в діапазоні 0–10 В.

Алгоритм керування аналоговим виходом складається з наступних етапів:

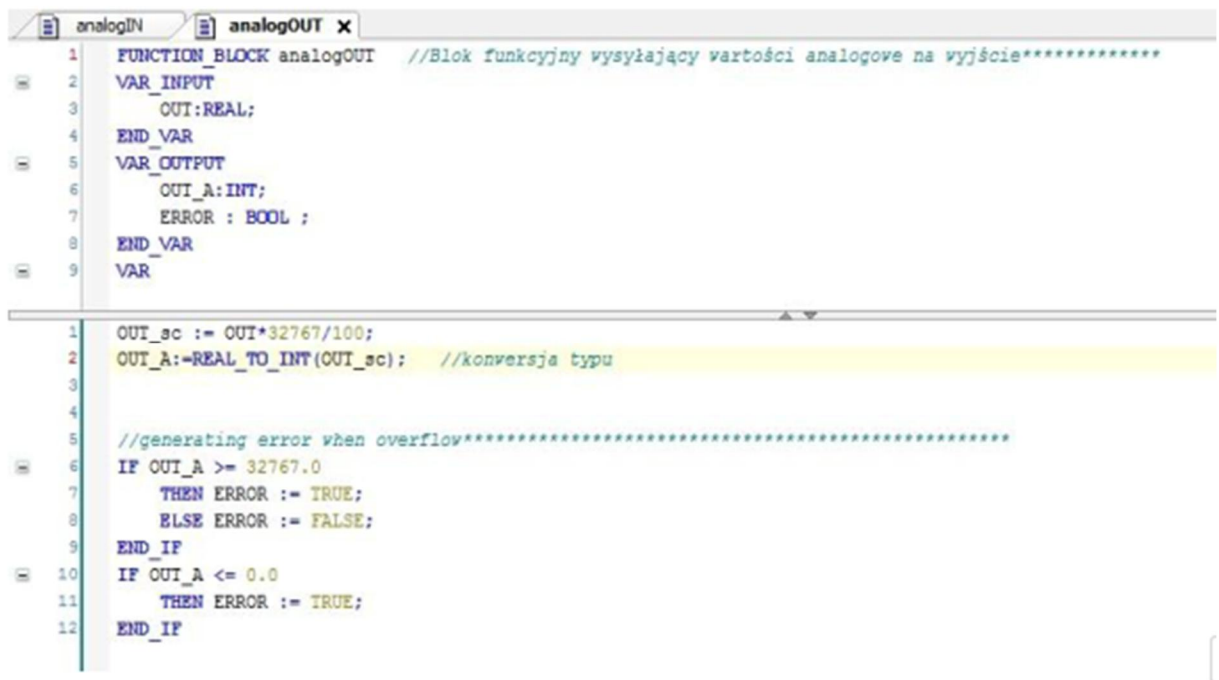
1. Вхідне значення (наприклад, у барах або відсотках відкриття клапана) нормалізується до діапазону 0–10 В.

2. Отримане значення потім масштабується до цифрового діапазону виходу, від 0 до **32767** (роздільна здатність 15 біт + знак).

3. Отримане значення передається на відповідний вихід — %QW1.

Наприклад, якщо потрібно задати 10 В на виході (максимум), то в програму передається значення **32767**. Цей підхід дозволяє точно керувати пристроями, що реагують на аналоговий сигнал, зокрема пропорційним пневматичним клапаном, забезпечуючи плавну та точну зміну керованого параметра (тиску у резервуарі).

Рисунок 2.10 демонструє код реалізації цього функціонального блоку.



```
1 FUNCTION_BLOCK analogOUT //Blok funkcyjny wysyłający wartości analogowe na wyjście*****
2 VAR_INPUT
3     OUT:REAL;
4 END_VAR
5 VAR_OUTPUT
6     OUT_A:INT;
7     ERROR : BOOL ;
8 END_VAR
9 VAR

10 OUT_sc := OUT*32767/100;
11 OUT_A:=REAL_TO_INT(OUT_sc); //konwersja typu

12 //generating error when overflow*****
13 IF OUT_A >= 32767.0
14     THEN ERROR := TRUE;
15     ELSE ERROR := FALSE;
16 END_IF
17 IF OUT_A <= 0.0
18     THEN ERROR := TRUE;
19 END_IF
```

Рисунок 2.10 - Функціональний блок AnalogOUT

Реалізація швидкісного ПІД-регулятора.

Швидкісна версія ПІД-регулятора базується на обчисленні приросту сигналу керування (Δu), а не його абсолютного значення, на відміну від позиційної версії. Завдяки цьому типу реалізації вдається уникнути ефекту wind-up, а також зменшити кількість обчислень і використання пам'яті. Це особливо важливо в системах з обмеженими ресурсами.

Кроки реалізації в програмі CODESYS:

```
VAR
    e      : REAL;    // поточна похибка
    e_1    : REAL;    // похибка з попереднього кроку
    e_2    : REAL;    // похибка з двох кроків назад
```

```

du      : REAL;    // приріст керування
u       : REAL;    // значення керуючого сигналу
Kp      : REAL;    // коефіцієнт пропорційної дії
Ki      : REAL;    // коефіцієнт інтегральної дії
Kd      : REAL;    // коефіцієнт диференціальної дії
END_VAR

// обчислення похибки (задане значення - виміряне)
e := Setpoint - Measured;

// обчислення приросту керуючого сигналу
du := Kp * (e - e_1) + Ki * e + Kd * (e - 2 * e_1 + e_2);

// оновлення значення керування
u := u + du;

// збереження попередніх значень похибки для наступного циклу
e_2 := e_1;
e_1 := e;

```

SCADA.

При створенні системи візуалізації процесу основною метою є забезпечення доступу до процесних даних, налаштувань регулятора з рівня інтерфейсу, можливість перемикання регулятора в ручний режим, а також спостереження за змінними процесу. Візуалізація процесу створена у програмі *Codesys*, з використанням готових блоків. Зовнішній вигляд головного вікна показано на рисунку 2.11.

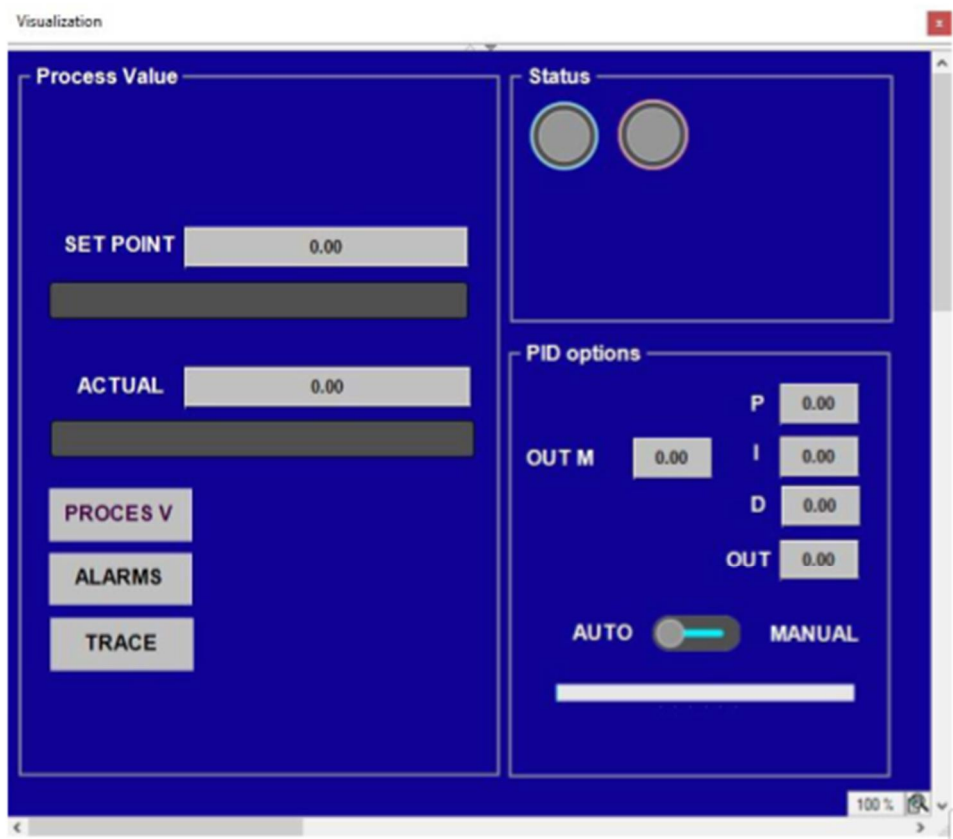


Рисунок 2.11 - Головне вікно системи SCADA

Вікно «Visualization» є головним вікном створеної системи SCADA, яке було поділено на три групи: Process Value, Status, PID options.

Process Value дозволяє змінювати задане значення тиску в резервуарі (у барах) шляхом натискання на вікно SET POINT, а також переглядати актуальне значення тиску у вікні ACTUAL. Обидва значення додатково візуалізуються за допомогою стовпчикового графіка (bargraf).

У вікні Status дві контрольні лампи показують стан регулювання: синя вказує на активну регуляцію без помилок, червона — на наявність помилки або аварії.

Вікно PID options забезпечує доступ до налаштувань ПІД-регулятора, а також дозволяє перемикати його в ручний режим (MANUAL) за допомогою перемикача. Після перемикання в ручний режим зникають налаштування членів ПІД-регулятора, а активується поле OUT M, де можна ввести бажане значення вручну.

У вікні Process Value також знаходиться навігаційна кнопка, яка переводить користувача до вікна з детальним видом процесу (рисунок 2.12). Тут відображається схема системи регулювання, індикатори стану, а також реальний тиск у резервуарі, представлений у вигляді bargraf та числовим значенням у барах. Крім того, можна побачити ступінь відкриття регулюючого клапана, виражений у відсотках.

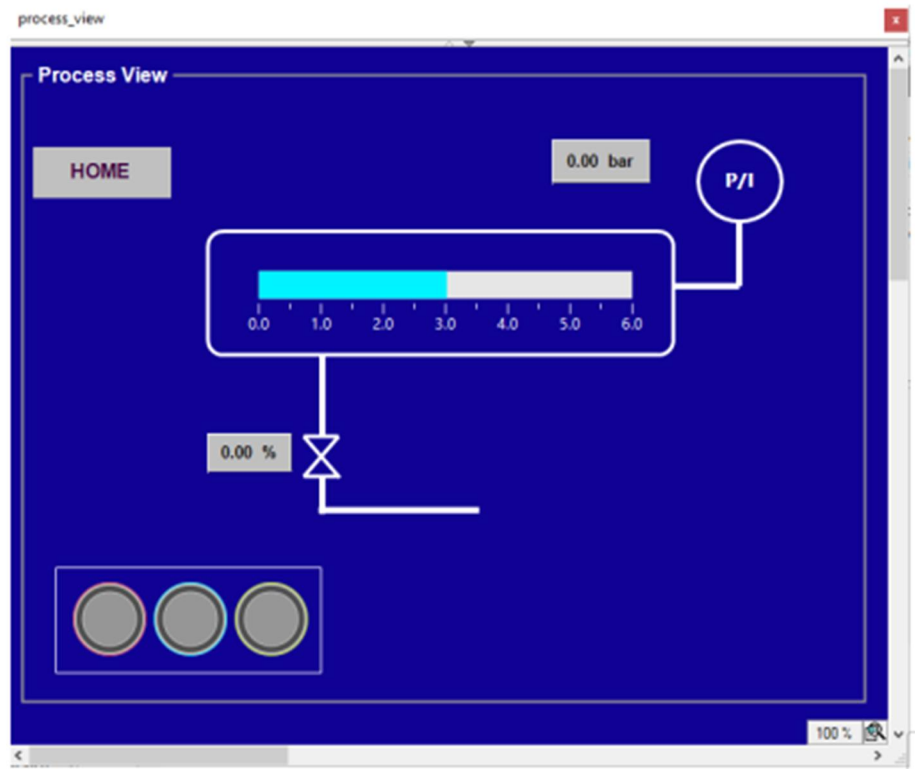


Рисунок 2.12 - Вікно перегляду процесу

2.2 Створення застосунку для ПЛК Siemens S7-1214 DC/DC/DC

Функцію контролера, що збирає дані з процесу у побудованій системі регулювання, виконує програмований логічний контролер (ПЛК) Siemens моделі S7-1214 DC/DC/DC (рисунок 2.13). Вибір цього контролера зумовлений його характеристиками: достатньо великою обчислювальною потужністю, а також зручністю реалізації програми керування в середовищі TIA Portal, що відповідає стандарту IEC 61131-3.

Крім того, контролер має вбудований порт Profinet, що дає змогу будувати мережу та організовувати зв'язок із головним контролером процесу Turck BL20 у режимі MASTER/SLAVE.

Обраний ПЛК було додано до проєкту через пункт меню "Add new device" в головному вікні середовища TIA Portal. Усі дії з конфігурації контролера — присвоєння IP-адреси, активація системних і таймерних бітів — виконувалися у вікні "Device View" (рисунк 2.14).



Рисунок 2.13 - Контролер S7 1214 з модулем CSM 1277

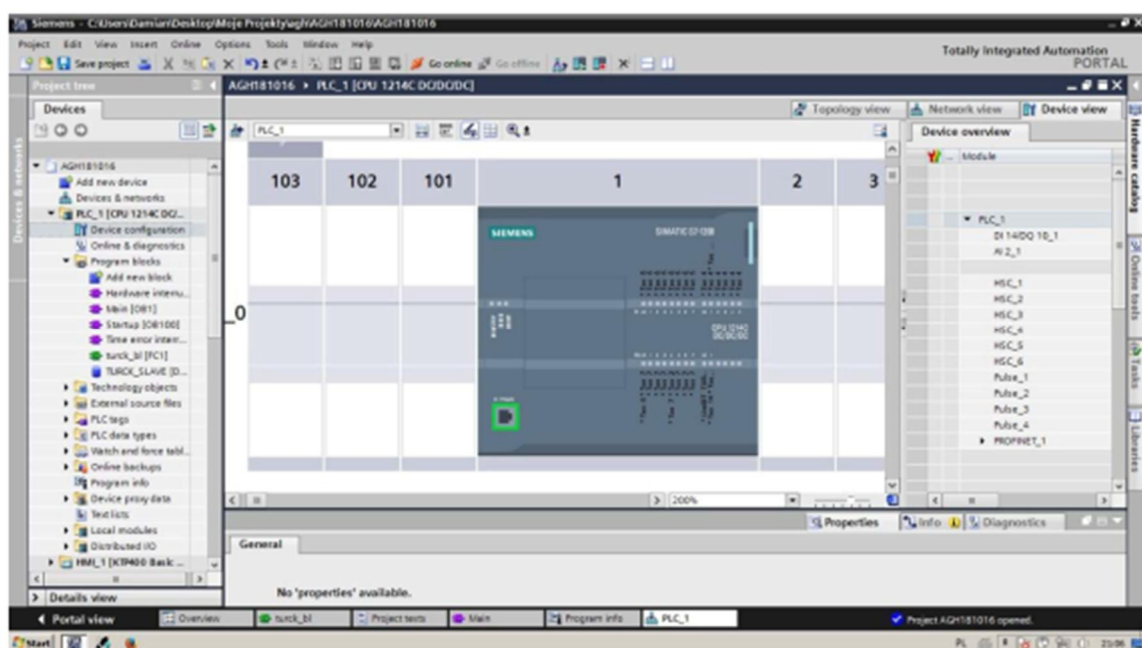


Рисунок 2.14 - Перегляд контролера в меню Перегляд пристрою.

Програму керування було розроблено в середовищі TIA Portal v13 BASIC — зручному для користувача інструменті для проєктування логіки роботи ПЛК. Відповідно до концепції "Totally Integrated Automation (TIA)", у межах одного програмного забезпечення реалізовано як логіку контролера, так і людино-машинний інтерфейс (HMI).

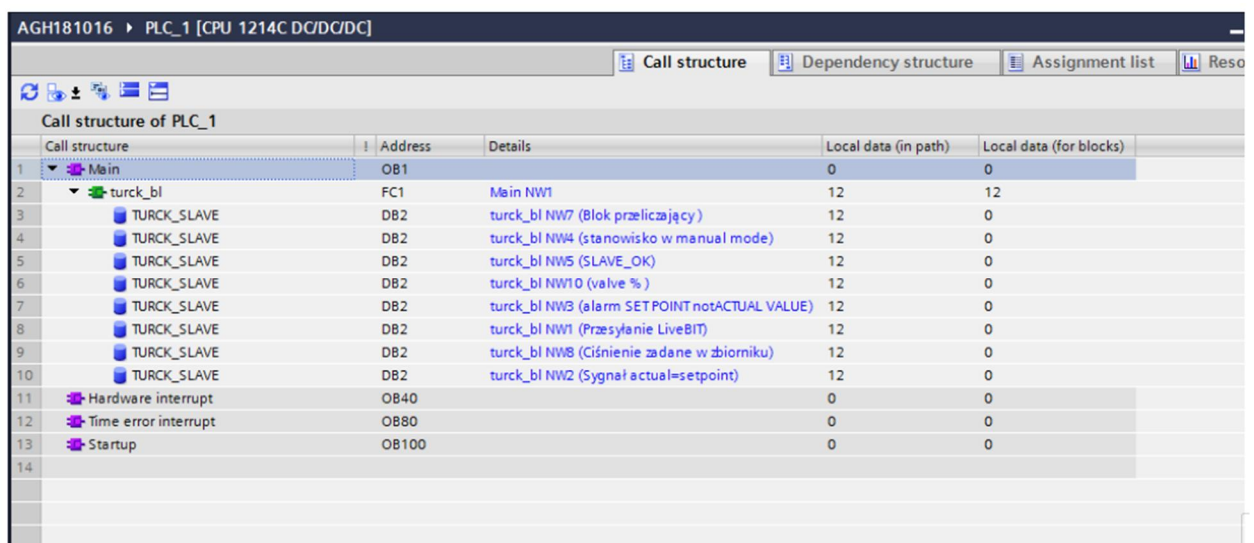
Концепція створення програми полягає у розробці функціонального блоку, відповідального за комунікацію з контролером TURCK. Цей блок викликається в OB1 — основному циклі програми.

Для доступу до процесних змінних використовується оптимізований блок даних (Optimized Data Block). У таких блоках розміщення змінних у пам'яті автоматично визначається контролером, а доступ до них здійснюється через символічні імена.

Такий підхід особливо зручний у складних і великих проєктах, оскільки скорочує час виконання програми та зменшує кількість помилок під час доступу до змінних.

Структура викликів окремих функціональних блоків зображена на рисунку 2.15.

У циклічному блоці OB1 безумовно викликається функція FC1, яка має назву „turck_bl”. Програмний код цієї функції представлений на наступних рисунках. Програма написана мовою функціональних блоків (FBD).



Call structure	Address	Details	Local data (in path)	Local data (for blocks)
1	OB1		0	0
2	FC1	Mein NW1	12	12
3	TURCK_SLAVE	turck_bl NW7 (Blok przeliczajacy)	12	0
4	TURCK_SLAVE	turck_bl NW4 (stanowisko w manual mode)	12	0
5	TURCK_SLAVE	turck_bl NW5 (SLAVE_OK)	12	0
6	TURCK_SLAVE	turck_bl NW10 (valve %)	12	0
7	TURCK_SLAVE	turck_bl NW3 (alarm SET POINT notACTUAL VALUE)	12	0
8	TURCK_SLAVE	turck_bl NW1 (Przesyłanie LiveBIT)	12	0
9	TURCK_SLAVE	turck_bl NW8 (Ciśnienie zadane w zbiorniku)	12	0
10	TURCK_SLAVE	turck_bl NW2 (Sygnał actual=setpoint)	12	0
11	Hardware interrupt		0	0
12	Time error interrupt		0	0
13	Startup		0	0
14				

Рисунок 2.15 - Структура програми

Мережа Network 1 (рисунок 2.16) – передача біта, названого програмістом LiveBIT, від контролера TURCK до Siemens. Цей біт активує цифровий вихід і сигналізує про: коректну роботу контролера TURCK, встановлений зв'язок між контролерами, виконання програми на контролері TURCK.

Network 2 передає інформацію з TURCK про досягнення заданого значення тиску в контурі регулювання.

Network 3 (рисунок 2.17) інформує про недосягнення заданого тиску, що також може свідчити про аварійну ситуацію.

Network 4 зчитує біт, який повідомляє про перехід системи в ручний режим (MANUAL). Цей сигнал також надходить із контролера TURCK.

Ці мережі забезпечують двосторонній обмін даними між контролерами Siemens і TURCK та реалізують логіку моніторингу стану системи.

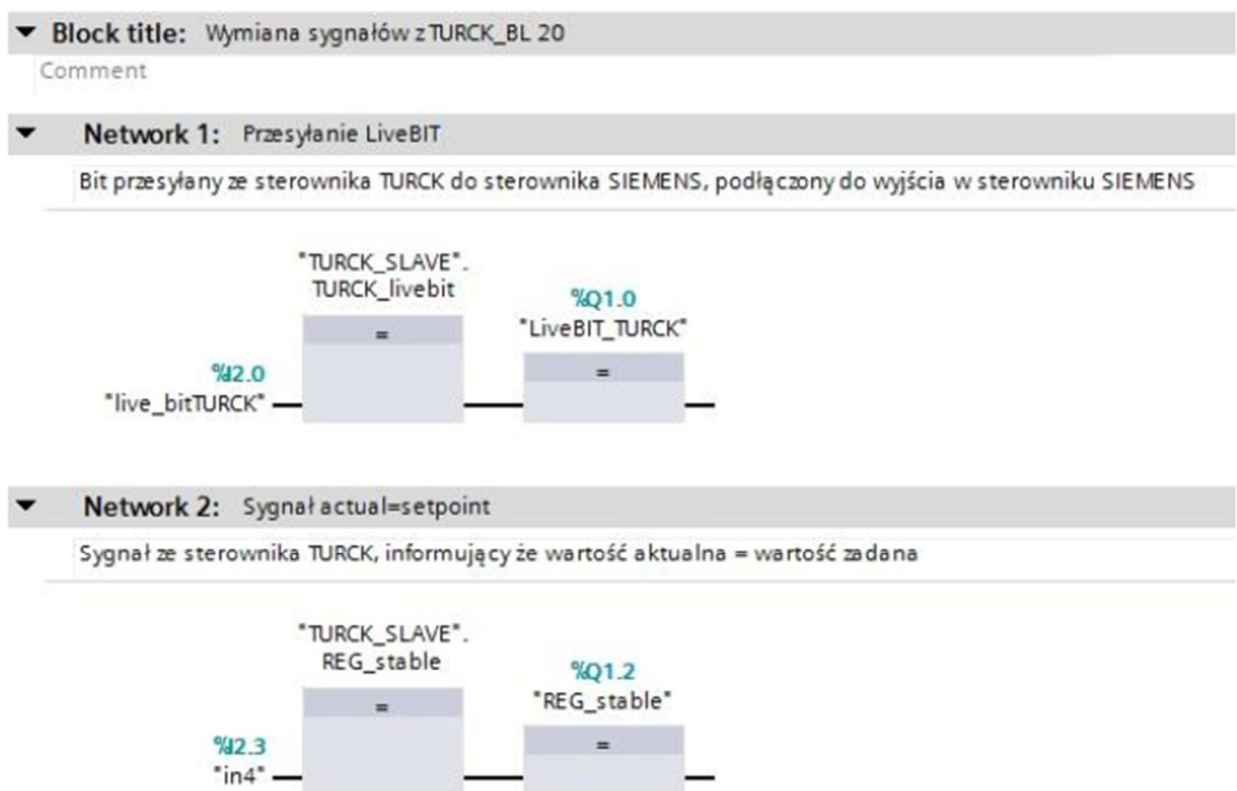


Рисунок 2.16 - Програмний код S7 1200

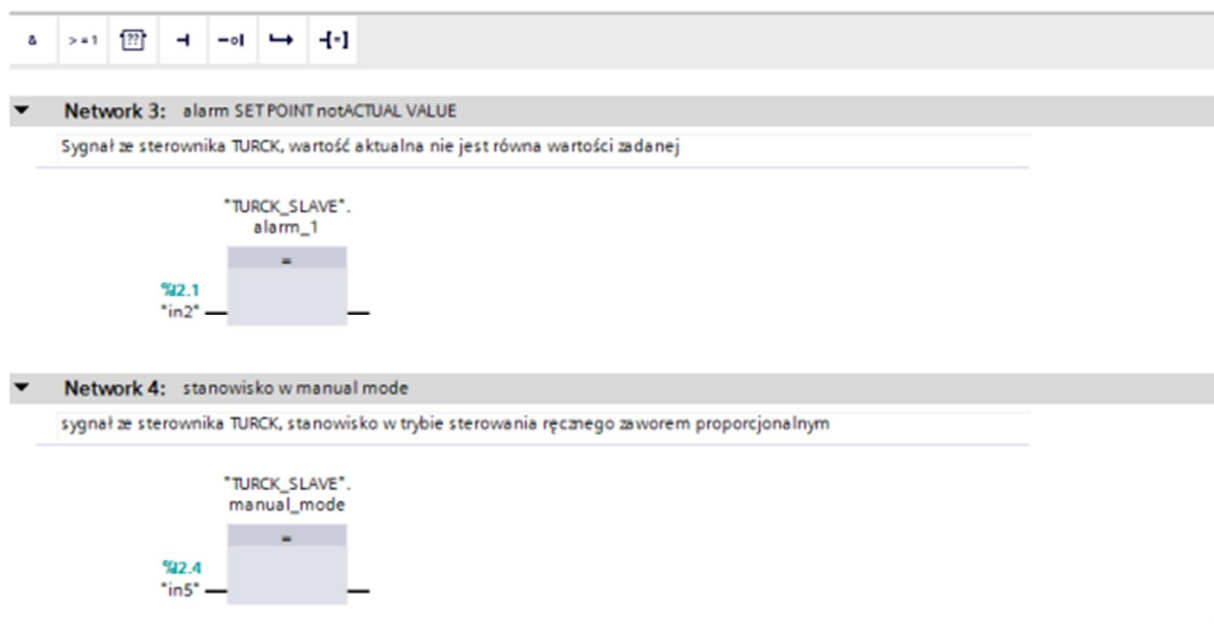


Рисунок 2.17 - Програмний код S7 1200

Рядок 6, рисунок 2.18 містить зчитування поточного фактичного тиску в резервуарі за допомогою блоків, що перетворюють ціле число в дійсне, і блоку «Обчислити», який масштабується до значення в барах. Мережа 7, рисунок 2.19, містить зчитування цільового тиску, встановленого оператором системи керування.

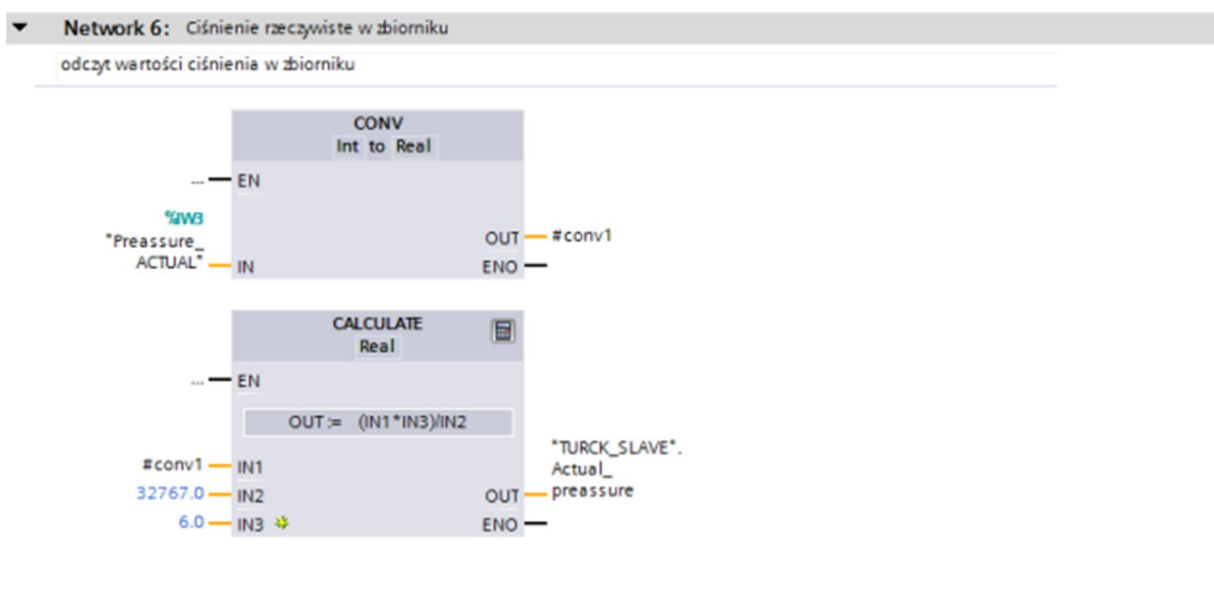


Рисунок 2.18 - Мережа 6, програмний код s7 1200.

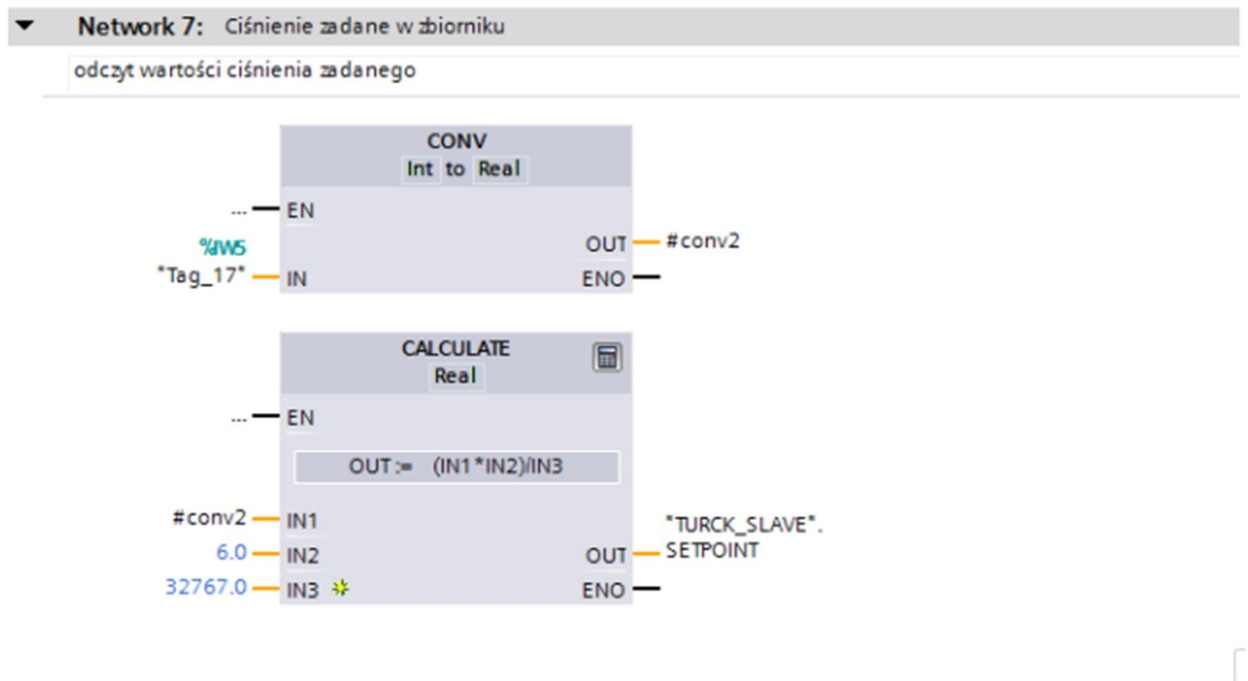


Рисунок 2.19 - Програмний код S7 1200.

Мережа 8 (Network 8, рисунок 2.20) відповідає за передачу біта від контролера Siemens S7-1200 до контролера TURCK BL20. Цей біт може слугувати для керування або синхронізації між системами.

Рядок 9 (Network 9) відповідає за зчитування ступеня відкриття пропорційного клапана, яке подається у відсотках (%). Це значення дозволяє оператору або системі бачити фактичне значення регулювального сигналу, що керує потоком стисненого повітря в системі.

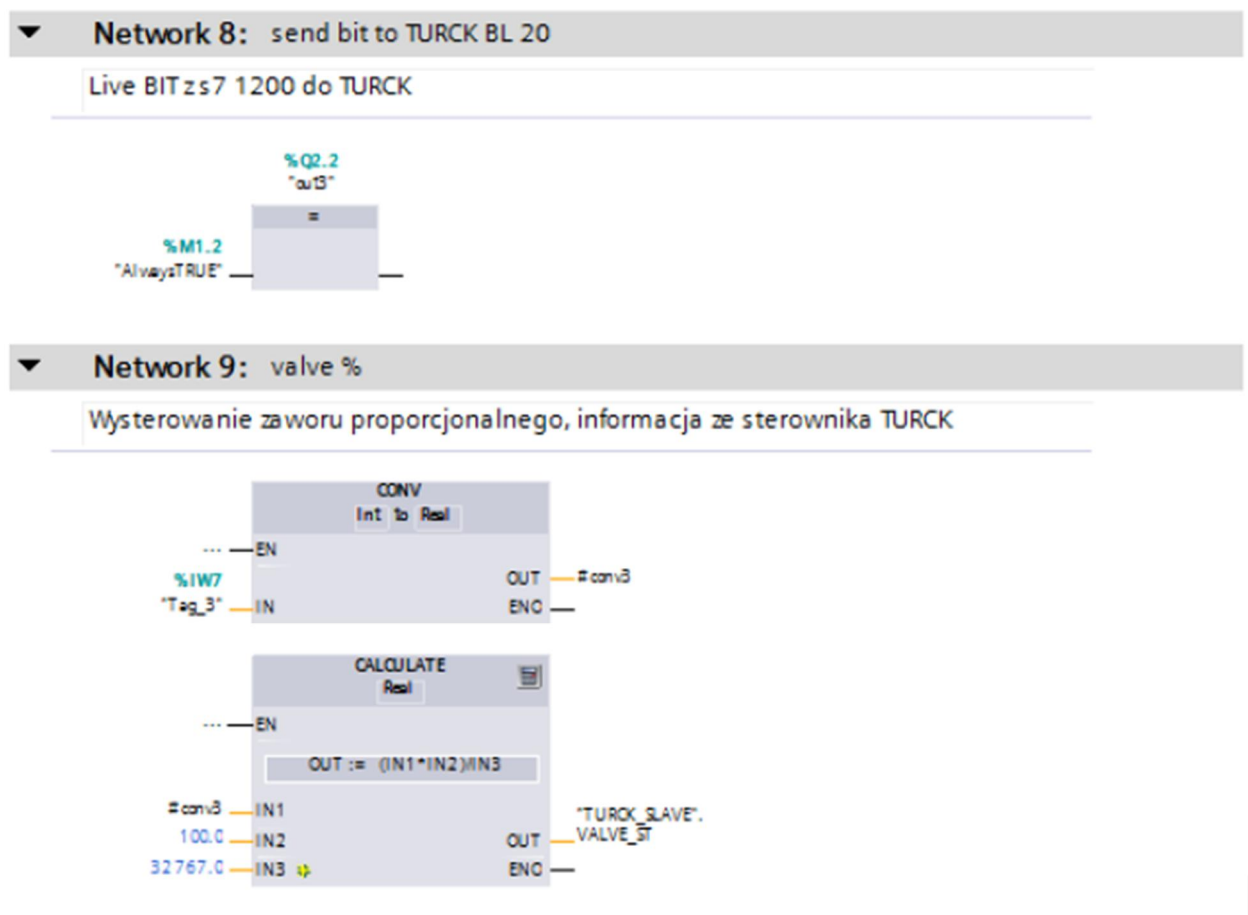


Рисунок 2.20 - Програмний код s7 1200

SCADA

Для побудови HMI-системи керування було використано операторську панель KTP 400 Basic фірми Siemens. Зв'язок між панеллю та контролером здійснюється за допомогою стандарту Profinet. Уся система спроектована в середовищі TIA Portal, яке завдяки своїй гнучкості та функціональності значно полегшує завдання інженера-програміста при створенні операторського інтерфейсу.

Рисунок 2.21 демонструє проєкт панелі у середовищі TIA Portal. Практично повне відтворення реального об'єкта у візуалізації дає змогу без труднощів і досить легко спроектувати інтерфейс для моніторингу та керування процесом.

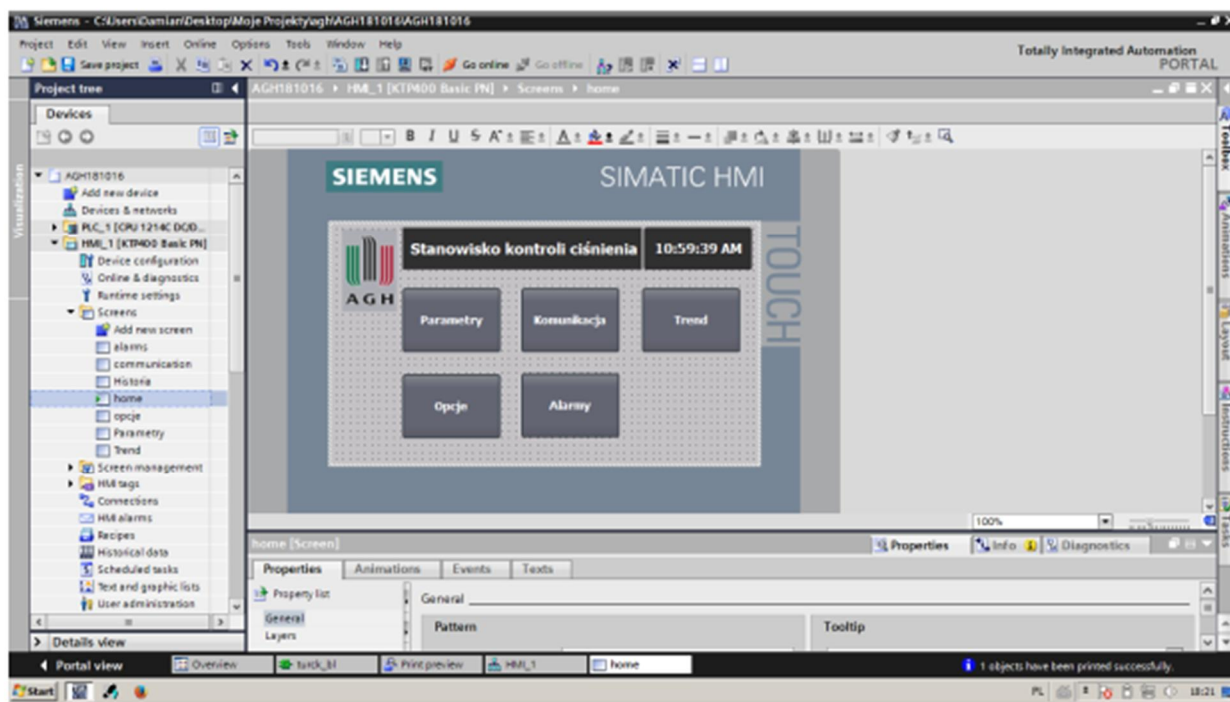


Рисунок 2.21 - Вигляд панелі на порталі ТІА

Інтерфейс візуалізації процесу було поділено на чотири окремі сегменти, доступ до яких здійснюється з головного екрана. Три з них безпосередньо пов'язані з моніторингом процесу або комунікацією. Додатково реалізовано систему сигналізації з можливістю архівації аварій або попереджень. Вікно «Опції» надає доступ до системних параметрів, зокрема можливість вийти з режиму runtime або перейти до панелі керування.

Першим і найважливішим є вікно «Параметри» – рисунок 2.22. Воно забезпечує доступ до перегляду змінних процесу, таких як: фактичний тиск, заданий тиск, ступінь відкриття пропорційного клапана.

У випадку, якщо оператор переводить систему в ручний режим регулювання, це вікно підсвічується, сигналізуючи про зміну режиму роботи.

Сегмент «Комунікація» призначений для візуалізації стану зв'язку між ПЛК TURCK та SIEMENS. Статусні сигнали процесу (аварія, активне регулювання, стабільна робота системи) виводяться на віртуальний світловий індикатор.

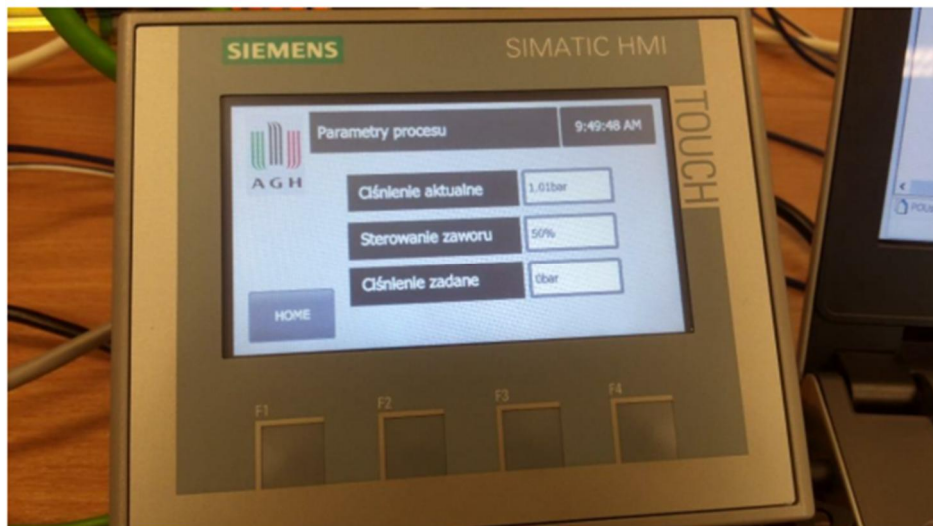


Рисунок 2.22 - Фактичний вигляд, вікно параметрів процесу

Також у цьому вікні відображається сигнал «Live BIT», який передається зі сторони контролера TURCK, що підтверджує активність з'єднання та виконання програми (рисунок 2.23).

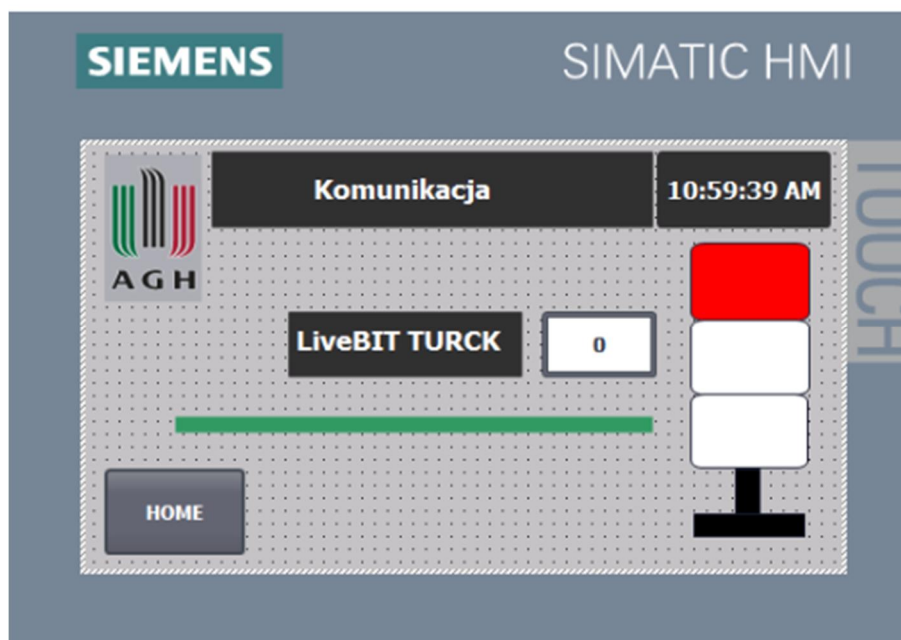


Рисунок 2.23 - Комунікаційне вікно

Вікно «Trend» дозволяє не лише спостерігати за значеннями процесних змінних у вигляді графіків у реальному часі, але й забезпечує архівування цих змінних. Це надає можливість детального аналізу параметрів процесу, як у реальному часі, так і в ключові моменти минулого.

На рисунку 2.24 показано приклад реакції керованого об'єкта, відображений у вікні тренду.

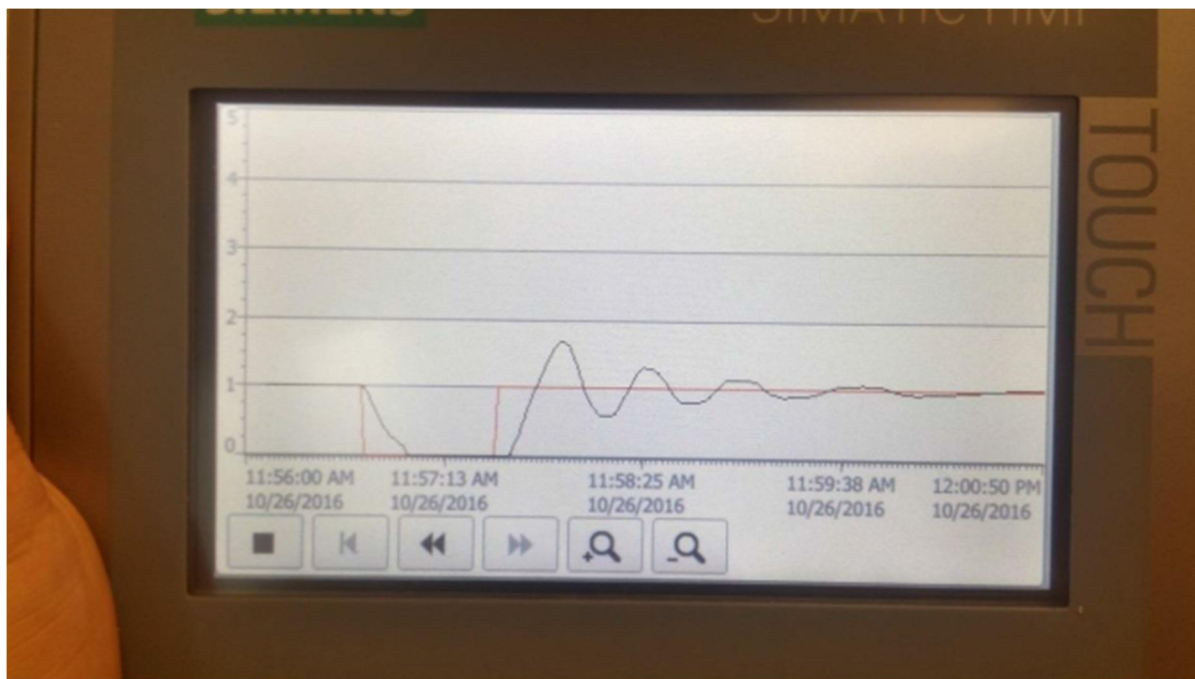


Рисунок 2.24 - Вікно трендів, фактичний вигляд.

Додатковою функціональною можливістю є архівування процесних змінних у вигляді текстового файлу (.txt) на зовнішньому носії. Збережені в такому форматі дані легко конвертуються у файл CSV, що дозволяє їх подальший аналіз або обробку в електронних таблицях.

2.3 Запуск мережі Profinet

Першим кроком при створенні мережі Profinet є вибір відповідних, унікальних IP-адрес для кожного пристрою та визначення спільної маски підмережі.

Як уже згадувалося, комунікація здійснюється на основі протоколу TCP/IP. Однак у протоколі Profinet ключовим є унікальне ім'я пристрою в мережі, яке присвоюється у вікні «Assign device name» в середовищі TIA Portal.

На рисунку 2.25 зображено огляд мережі Profinet (Network View), яку позначено зеленим кольором та ідентифіковано як PN/IE_1, з видимими IP-адресами та призначеними назвами пристроїв.

Для фізичних з'єднань використано Profinet-кабель типу FC TP standard Cable GP 2x2 Cat.5 із роз'ємами RJ45 виробництва Siemens.

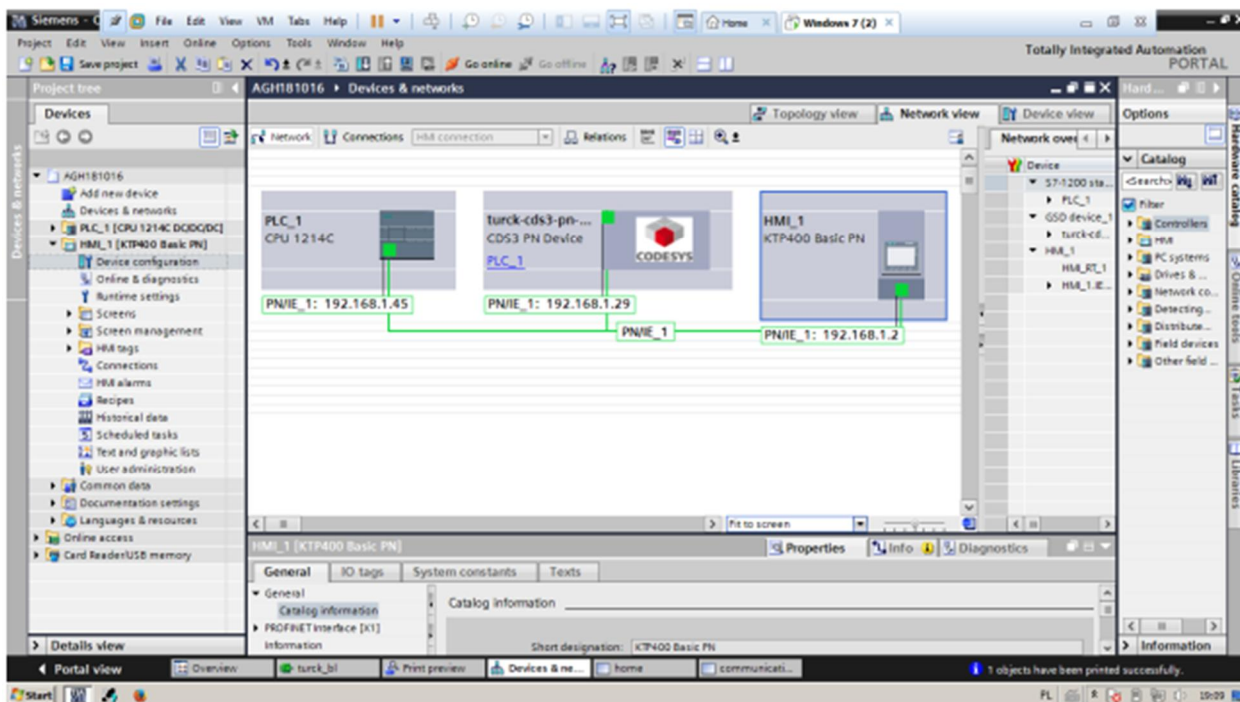


Рисунок 2.25 - Вид мережі Profinet у середовищі TIA Portal

У якості комутатора було використано некерований модуль Siemens, модель CSM 1277 (рис. 2.26). Цей модуль дозволяє підключити до чотирьох мережевих кабелів Profinet.

Варто зауважити, що він не забезпечує повну функціональність Profinet-комутаторів, на відміну від, наприклад, модуля Scalance X200. Це важливо враховувати під час проектування складних додатків, де необхідне призначення пріоритетів пристроям або поділ на VLAN. Проте, для потреб розглянутої системи керування можливостей модуля CSM 1277 цілком достатньо.



Рисунок 2.26 - Модуль CSM 1277

Мережа Profinet дозволяє передавати максимум 1024 байти даних — 512 байт вхідних і 512 байт вихідних.

У рамках даного проєкту було визначено обмін даними у форматі:

- 2 байти (2 BYTE) — для сигналів стану, включаючи LiveBIT, які передаються від контролера S7-1200 до TURCK BL20 і навпаки;
- 3 слова (3 WORD) — для встановленого значення тиску, фактичного значення, а також ступеня відкриття пропорційного клапана.

Конфігурація обміну даними повинна бути зворотною, тобто вхідні дані в середовищі Codesys розглядаються як вихідні в TIA Portal, і навпаки.

На рисунках 2.27 та 2.28 зображено вже сконфігуровані пакети обміну даними у мережі Profinet для обох контролерів.

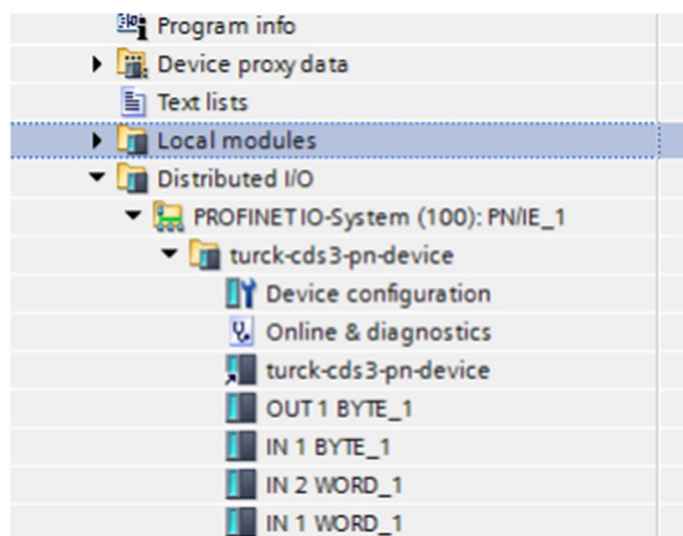


Рисунок 2.27 - Визначені вхідні та вихідні дані на порталі TIA

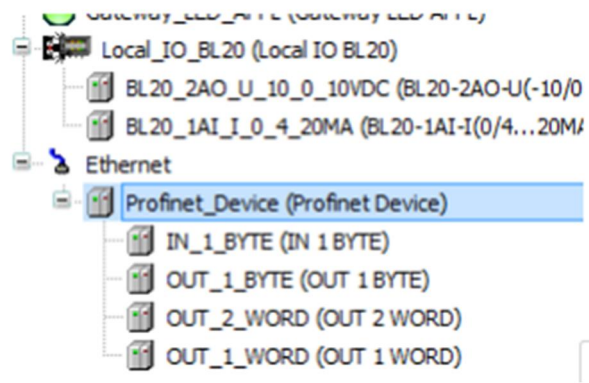


Рисунок 2.28 - Конфігурація модулів введення та виведення в Codesys

3. ФУНКЦІОНУВАННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТИСКОМ

Робота автоматизованої системи регулювання тиску (рисунок 3.1) була поділена на кілька етапів.

Першим етапом стало тестування роботи програми на контролері TURCK BL20. Перевірено коректність зчитування даних на візуалізації, а також можливість ручного керування пропорційним клапаном.

Наступним етапом було тестування роботи програми на контролері Siemens, а також візуалізації процесу на операторській панелі КТР400, з акцентом на відображення трендів і архівування даних.

Перевірено роботу мережі Profinet та правильність обміну даними між контролерами за допомогою онлайн-моніторингу процесних змінних, як у SCADA-додатку, так і у візуалізації на панелі. Також протестовано сигналізацію аварійних станів.

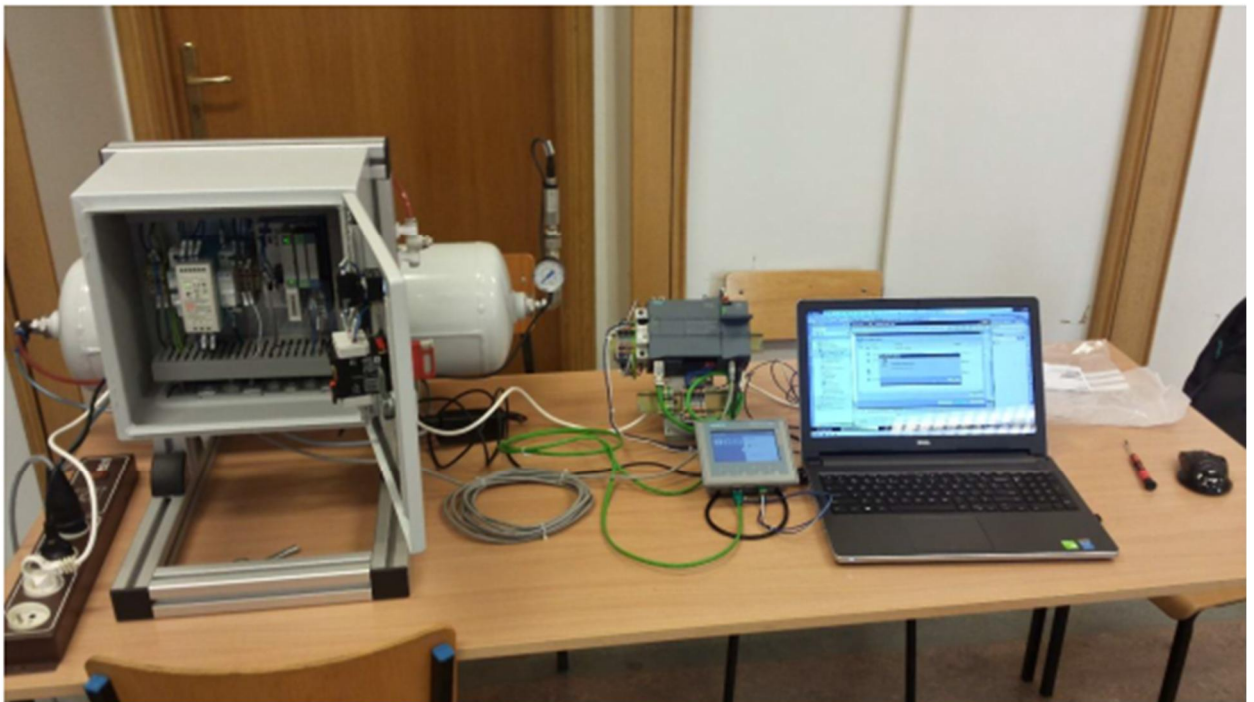


Рисунок 3.1 - Вигляд станції контролю тиску

Заключним етапом стало тестування реакції системи регулювання на одиничний стрибок (unit step), зокрема стабілізацію тиску на рівні 1 бар при типовому налаштуванні ПІД-регулятора, а також реакцію на збурення,

створене через спускний клапан. У кожному випадку здійснювалося архівування процесних даних на USB-накопичувач.

Також проведено тести, пов'язані з безпекою користувача, зокрема: поведінку системи після вимкнення живлення, втрати зв'язку між пристроями, пошкодження датчика тиску.

Як тестування програми ПЛК-контролера від Turck, так і від Siemens не виявило жодних аномалій у роботі. Створені додатки поводяться передбачувано та відповідно до задуму розробника, навіть у аварійних ситуаціях.

Мережа Profinet функціонує без збоїв. Обидва контролери не повідомляють про проблеми з підключенням або зчитуванням сигналів з мережі.

У випадку вимкнення живлення пропорційний клапан відкривається максимально, що призводить до спорожнення резервуара зі стисненим повітрям.

Зчитування та архівування процесних даних на операторській панелі КТР 400 також працює належним чином.

На наведеному нижче рисунку 3.2 показано вікно тренду для заданої та поточної величини тиску, а також реакцію системи на одиничний стрибок і стабілізацію тиску на рівні 1 бар.

Із отриманого графіка можна зробити висновок, що об'єкт регулювання має інерційний та коливальний характер. Завдяки використанню таблиці змінних (Tag Table), легко зчитувати необхідні процесні змінні, визначати час досягнення стабілізації, а також час запізнення.

Ці дані дозволяють обчислити оптимальні налаштування ПІД-регулятора та спостерігати зміну поведінки системи після застосування розрахованих параметрів.

Наведені нижче графіки (рисунки 3.4, 3.5 і 3.6) були створені в програмі Excel на основі архівованих даних, збережених на USB-носії. Приклад даних у форматі .txt зображено на рисунку 3.3.

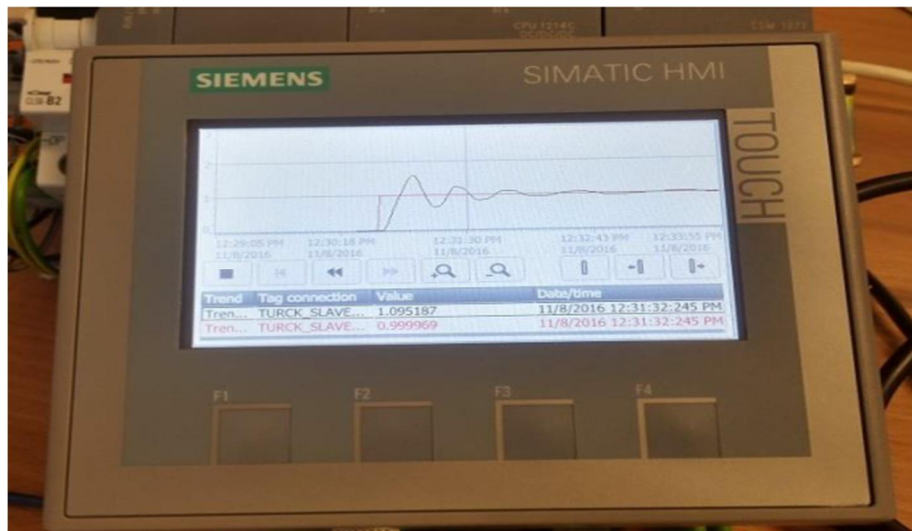


Рисунок 3.2 - Реакція системи керування

Як видно після обробки, дані чітко відображають характер зміни параметрів у часовій області, що демонструє, наскільки легко можна створити систему, здатну до архівації та точної візуалізації процесу, використовуючи навіть базову операторську панель Siemens.

Показані графіки відповідають роботі системи з такими параметрами ПД-регулятора:

- пропорційна складова (P) - 21;
- інтегральна складова (I) - 1,1;
- диференціальна складова (D) - 0,1.

21_110_010.txt — Notabnik

Pluk Edycja Format Widok Pomoc

"VarName"	"TimeString"	"VarValue"	"Validity"	"Time_ms"		
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:07"	0.000000	1	0.000000	1	42716564672.083328
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:07"	0.000000	1	0.000000	1	42716564672.118050
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:07"	0.000000	1	0.000000	1	42716564672.430557
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:07"	0.000000	1	0.000000	1	42716564672.442131
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:07"	0.000000	1	0.000000	1	42716564672.488426
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:07"	0.000000	1	0.000000	1	42716564672.488426
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:08"	0.000000	1	0.000000	1	42716564680.497688
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:08"	0.000000	1	0.000000	1	42716564680.497688
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:09"	0.000000	1	0.000000	1	42716564692.071762
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:09"	0.000000	1	0.000000	1	42716564692.083328
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:10"	0.000000	1	0.000000	1	42716564703.657410
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:10"	0.000000	1	0.000000	1	42716564703.657410
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:11"	0.000000	1	0.000000	1	42716564715.231483
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:11"	0.000000	1	0.000000	1	42716564715.231483
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:12"	0.000000	1	0.000000	1	42716564726.817131
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:12"	0.000000	1	0.000000	1	42716564726.817131
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:13"	0.000000	1	0.000000	1	42716564738.275459
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:13"	0.000000	1	0.000000	1	42716564738.275459
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:14"	0.000000	1	0.000000	1	42716564749.849541
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:14"	0.000000	1	0.000000	1	42716564749.849541
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:15"	0.000000	1	0.000000	1	42716564761.423607
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:15"	0.000000	1	0.000000	1	42716564761.435181
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:16"	0.000000	1	0.000000	1	42716564772.997688
"TURCK_SLAVE_Actual_preassure"	"2016-12-12 13:33:16"	0.000000	1	0.000000	1	42716564773.009262
"TURCK_SLAVE_Setpoint_Pressure"	"2016-12-12 13:33:17"	0.000000	1	0.000000	1	42716564784.583328

Рисунок 3.3: Дані, збережені на флеш-накопичувачі

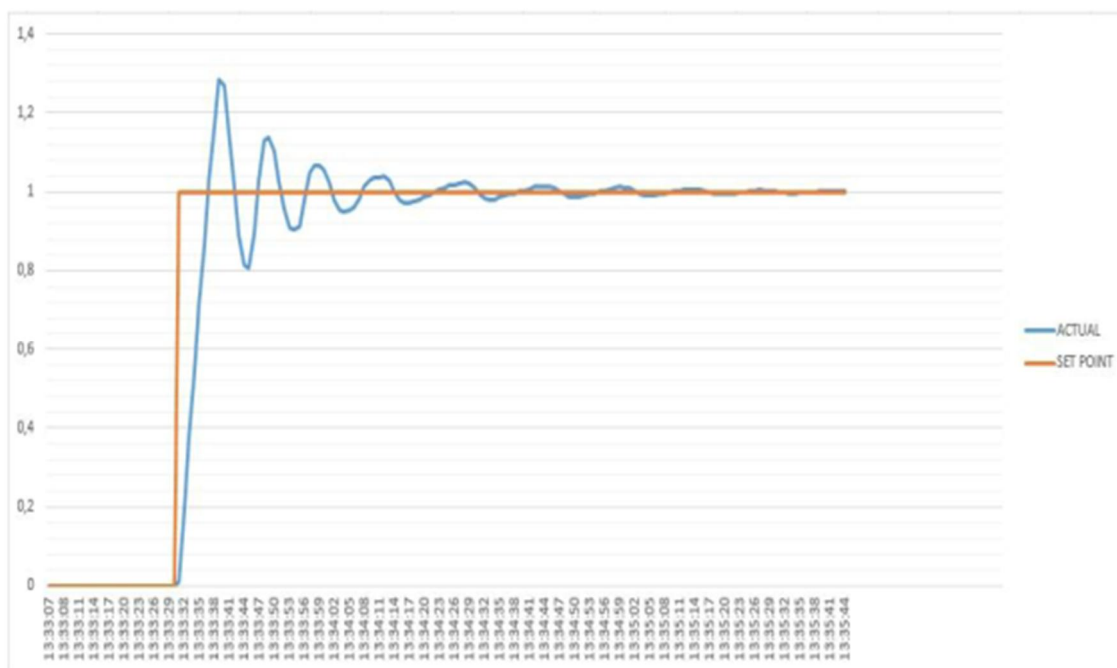


Рисунок 3.4: Діаграма Excel, стабілізація на рівні 1 бар

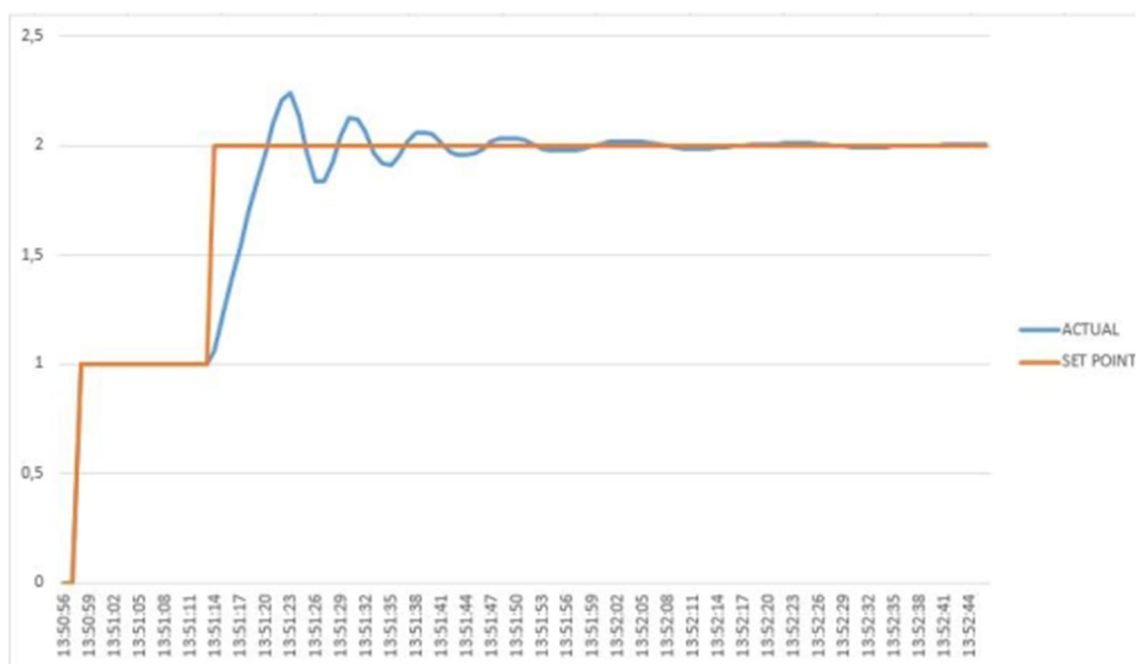


Рисунок 3.5: Стабілізація тиску при 2 барах

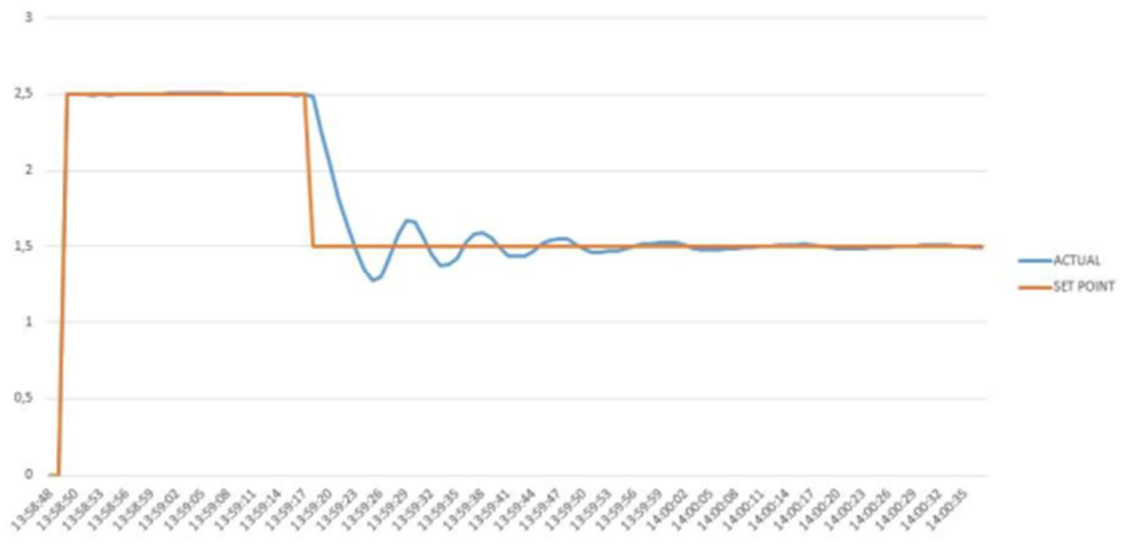


Рисунок 3.6: Стабілізація тиску від 2,5 бар до 1,5 бар

Отримані в такий спосіб графіки можуть бути використані для визначення оптимальних параметрів налаштування регулятора та контролю актуальних значень.

При використанні типових значень параметрів ПД-регулятора, система працює коректно. Стабілізація тиску відбувається орієнтовно через 2 хвилини після подання сигналу.

ВИСНОВКИ

Метою даної роботи було проєктування системи регулювання тиску, призначеної для досліджень у галузі автоматичного керування. Представлена робота охоплює ряд питань, пов'язаних із побудовою такої системи.

Окремі розділи містять теоретичний вступ, огляд загальних проблем систем регулювання, а також самих ПЛК. Другий і третій розділи присвячені практичному розгляду питань, впровадженню прикладних програм для контролерів та аналізом реакції системи регулювання. При написанні роботи автор спирався на власні знання та рішення, що застосовуються в промисловості. Особливу увагу при проєктуванні системи приділено практичним і функціональним аспектам з точки зору оператора.

В ході роботи також було вирішено запустити мережу Profinet в контролері BL 20 і підключити його до контролера Siemens серії S7 1200 в режимі Master-Slave, збираючи дані з процесу управління. Також була додана панель оператора, підключена до мережі Profinet, що забезпечує доступ до перегляду змінних процесу, їх архівації на пристрої Pendrive, поточних налаштувань клапана та діагностики підключення. Стенд дозволяє не тільки протестувати алгоритми управління, але й познайомитися з можливостями мережі Profinet і контролерів двох різних виробників, які використовуються в проєкті, обмінюватися даними процесу один з одним за допомогою всього одного кабелю.

Результатом роботи став стенд, який дає змогу не лише вивчити принципи роботи ПД-регулювання на реальному об'єкті, а й навчитися програмувати ПЛК. Додатковою перевагою є можливість ознайомлення з промисловою мережею Profinet, яка наразі є однією з найпоширеніших у промисловості.

Найскладнішим аспектом роботи було використання двох різних середовищ програмування ПЛК від двох різних виробників. Незважаючи на стандартизовані мови програмування, важко знайти будь-яку схожість між

TIA Portal від Siemens і CODESYS, який використовується для програмування контролера TURCK. Кожен із цих програмних продуктів має свої сильні та слабкі сторони, однак складається враження, що для осіб із досвідом програмування ПЛК простішим і більш інтуїтивним є продукт Siemens. Натомість у CODESYS легше орієнтуватися людям, які мають більше досвіду в програмуванні мікроконтролерів або вбудованих систем.

Показаний у роботі приклад налаштування ПД-регулятора є ілюстративним. Значення параметрів можуть вільно обиратися оператором системи регулювання на основі проведених експериментів. Існує можливість обчислення показників якості регулювання, витрат тощо. Доступ до вихідного коду програми також дозволяє розвивати алгоритм регулювання або застосовувати зовсім інший, ефективніший.

Таким чином, розроблене рішення не лише підтверджує доцільність автоматизації процесу регулювання тиску, а й демонструє практичну реалізацію сучасних принципів автоматизованого керування у виробничих умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. Навчальний посібник. — К.: Ліра-К, 2011. — 500с.
2. Kalil, M. How the Modicon 084 PLC Literally Changed the World [Електронний ресурс] // MikeKalil.com. – Режим доступу: <https://mikekalil.com/blog/modicon-084-plc/>.
3. Modicon: The History, Development, and Evolution of the Programmable Logic Controller [Електронний ресурс] // The European Financial Review. – Режим доступу: <https://www.europeanfinancialreview.com/modicon-the-history-development-and-evolution-of-the-programmable-logic-controller/> – Дата звернення: 10.05.2025.
4. 65 years SIMATIC – History of Innovation [Електронний ресурс] // Siemens Global. – Режим доступу: <https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/specials/60-years-of-simatic.html>.
5. Siemens SIMATIC PLCs – Hardware History [Електронний ресурс] // Control.com. – Режим доступу: <https://control.com/technical-articles/siemens-simatic-plcs-hardware-history/> – Дата звернення: 10.05.2025.
6. Basar, K. IEC 1131-3 PLC Programming Standard [Електронний ресурс] // LinkedIn. – Режим доступу: <https://www.linkedin.com/pulse/iec-1131-3-plc-programming-standard-khairul-basar> – Дата звернення: 10.05.2025.
7. Implementation Aspects of the PLC Standard IEC 1131-3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701743607X>
8. Офіційна сторінка стандарту IEC 61131-3:2013 на сайті Міжнародної електротехнічної комісії (IEC) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/en/publication/4552>

9. IEC 61131-3 — це третя частина міжнародного стандарту IEC 61131
[Електронний ресурс] – Режим доступу:
https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61131-3

10. Siemens. (2023). "Profinet System Description." siemens.com
[Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://control.com/technical-articles/siemens-simatic-plcs-hardware-history/>

11. Tom Mejer Antonsen PLC Controls with Structured Text (ST). - BoD – Books on Demand, 2019. – 128 p. ISBN 8743002420, 9788743002420 Елементи управління ПЛК зі структурованим текстом

12. Модуль зв'язку польової шини BL20-PG-EN-V3 – Turck
[Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://www.eibabo.com/en/turck/programmable-gateway-fieldbus-communication-module-bl20-pg-en-v3-eb16339722?fs=4117533010&c=84323>

13. Галкін П. В., Ключник І. І. Програмування ПЛК в CODESYS: навчальний посібник. — Харків: ФОП Панов А. М., 2019. - 92 с. — ISBN 978-617-7722-62-4

14. Програмовані контролери S7-1200 [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:2961db0147fb92fd02cb65dea800734f8a911ac5/st70-simatic-s7-1200.pdf>

15. Навіщо використовувати PROFINET? [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ua.pcm-cable.com/info/why-use-profinet-99041062.html>

16. PROFINET - провідний стандарт промислової мережі Ethernet для автоматизації виробництва [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/promyslova-komunikatsiya/profinet.html>

17. Pérez-Arancibia, N. O., et al. (2020). "Predictions in the Eye of the Beholder: An Active Inference Account of Watt Governors."

18. Bennett, S. (2016). "The Development of the PID Controller." IFAC-Papers On Line, Vol. 49, Issue 6, pp. 1–6.

19. Voda, A., & Besançon, G. (2018). "From PID to Active Disturbance Rejection Control: A Historical and Ongoing Journey." *Annual Reviews in Control*, Vol. 46, pp. 135–149.

20. Mewada, Y., Prajapati, S., & Hakani, R. (2022). "System for PID Control and Autotuning PID using Ziegler-Nichols Method." *INFLUENCE: International Journal of Science Review*, Vol. 4, No. 1, pp. 249–253.

21. Hruška, M., & Vraný, J. (2021). "Making the PI and PID Controller Tuning Inspired by Ziegler and Nichols Precise and Reliable." *Sensors*, Vol. 21, No. 18, 6157.

22. Клепач М.І. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник. / М.І. Клепач. - Рівне: НУВГП, 2007. – 206 с.

23. Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування. Київ : Аграрна освіта, 2010. - 557 с.