Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Кафедра автоматизації, комп’ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності 174 – Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка

тема роботи:

«Автоматизація виробничої лінії зважування, термообробки та маркування деталей з розробкою системи візуалізації»

Виконав студент гр. АКІТР-24-1м _____ Фруль К. О.

Керівник _____ Рубан С. А.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

Кривий Ріг 2025

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С. А.

_____

«15» липня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-1м Фруль Карини Олегівни

1. **Тема роботи:** «Автоматизація виробничої лінії зважування, термообробки та маркування деталей з розробкою системи візуалізації»

Затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025р.

2. **Термін здачі кваліфікаційної роботи:** 01.12.2025р.

3. **Склад кваліфікаційної роботи:** Пояснювальна записка обсягом 100с., додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (15-20? слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. **Консультанти кваліфікаційної роботи:**

_____Розділ 1-3_____доц. Рубан С.А._____

_____

_____Нормоконтроль_____доц. Маринич І.А._____

5. **Календарний план:**

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Вступ	10.02.2025
2	Розділ 1	15.04.2025
3	Розділ 2	18.07.2025
4	Розділ 3	19.11.2025
5	Висновки	20.11.2025
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	25.11.2025
7	Підготовка презентації та графічного матеріалу	28.11.2025
8	Підготовка доповіді до захисту	01.12.2025

6. **Дата видачі завдання:** 24.12.2024р.

Керівник _____/Рубан С.А./

7. **Запевнення:** *Я, Фруль Карина Олегівна, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконанна самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.*

Із чинним Положеннням про академічну доброчесність *Криворізького національного університету ознайомлена.*

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____/Фруль К.О./

АНОТАЦІЯ

Фруль К.О. «Автоматизація виробничої лінії зважування, термообробки та маркування деталей з розробкою системи візуалізації».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти магістр за освітньо-професійною програмою «Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті» зі спеціальності 174 – Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2025.

Об'єктом дослідження є автоматизована система керування конвеєрною лінією, що виконує три основні технологічні операції: зважування, термообробку та маркування деталей. Дана система є складовою сучасного виробничого процесу, який потребує високого рівня автоматизації, точності контролю та ефективного керування в режимі реального часу.

У першому розділі розглянуто технологічний процес роботи виробничої лінії, виконано аналіз літературних джерел і патентних рішень у сфері автоматизації, визначено недоліки існуючих систем та обґрунтовано методи їх усунення.

У другому розділі представлено математичне та алгоритмічне моделювання процесів зважування, термообробки та маркування. Розроблено структуру системи керування та логіку її роботи з урахуванням вимог продуктивності та енергоефективності.

У третьому розділі описано апаратну та програмну реалізацію системи: використання ПЛК, інтеграцію з KEPServer, застосування SCADA для створення системи візуалізації та моніторингу. Наведено результати випробувань і перевірки працездатності розробленої системи.

Ключові слова:

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЗВАЖУВАННЯ, ТЕРМООБРОБКА, МАРКУВАННЯ, ПЛК, SCADA, OPC UA, HMI, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ, КІБЕР-ФІЗИЧНА СИСТЕМА.

ANNOTATION

Frul K.O. “Automation of the Production Line for Weighing, Heat Treatment, and Labeling of Parts with the Development of a Visualization System.” Master’s qualification work for obtaining the higher education degree of Master in the educational and professional program “Cyber-Physical Systems in Industry, Business, and Transport” in specialty 174 – Automation, Computer-Integrated Technologies, and Robotics – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2025.

The object of the research is an automated control system for a conveyor line performing three main technological operations: weighing, heat treatment, and labeling of parts. This system is an integral component of a modern production process that requires a high level of automation, precise control, and efficient real-time operation.

The first chapter examines the technological process of the production line, provides an analysis of literature sources and patent solutions in the field of automation, identifies the shortcomings of existing systems, and justifies methods for their elimination.

The second chapter presents mathematical and algorithmic modeling of weighing, heat treatment, and labeling processes. The structure of the control system and its operational logic have been developed, taking into account performance and energy efficiency requirements.

The third chapter describes the hardware and software implementation of the system: the use of PLCs, integration with an OPC UA server, and the application of SCADA/Node-RED for building a visualization and monitoring system. The results of testing and verification of the developed system’s functionality are provided.

Keywords:
AUTOMATION, WEIGHING, HEAT TREATMENT, LABELING, PLC, SCADA, OPC UA, HMI, VISUALIZATION, CYBER-PHYSICAL SYSTEM.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1 10
АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ... 10
1.1 Опис об'єкта дослідження 10
1.2 Опис технологічного процесу 14
1.3 Аналіз літературних джерел за напрямком досліджень 17
1.4 Патентний пошук за напрямком досліджень 31
1.5 Недоліки і переваги існуючих рішень 34
1.6 Обґрунтування вибору методів для усунення існуючих рішень 35
Висновок до розділу 1 38
РОЗДІЛ 2 39
ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ 39
2.1. Вступ до математичного моделювання 39
2.2. Загальні підходи до моделювання підсистем виробничої лінії 41
2.3. Математична модель підсистеми зважування 46
2.4. Математична модель підсистеми термообробки 48
2.5. Математична модель підсистеми маркування (RFID-система) 51
2.6. Інтегрована модель виробничої лінії 53
2.7. Аналіз перехідних процесів і характеристик системи 55
2.8. Практична реалізація в MATLAB/Simulink 57
2.9. Числові значення параметрів, використані в імітаційному моделюванні 61
Висновок до розділу 2 63
РОЗДІЛ 3 65
ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ 65
3.1 Загальна архітектура програмно-технічного комплексу 65
3.2 Функціональний огляд середовища автоматизації TIA Portal 72
3.3 Організація промислового обміну даними через KEPServerEX 82
3.4 Налаштування та розробка системи візуалізації в PlantSCADA 89

3.4.1 Реалізація скриптів керування в PlantSCADA 93
3.4.2 Режим симуляції 95
Висновок до розділу 3 101
ВИСНОВОК 103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 105

ВСТУП

Сучасна промисловість перебуває на етапі активного впровадження автоматизації виробничих процесів, що дозволяє підвищити продуктивність, покращити якість продукції та знизити витрати на виробництво. Особливо це стосується таких складних технологічних ліній, які включають послідовне виконання різних операцій, наприклад зважування, термообробки та маркування деталей. Кожен із цих етапів є критично важливим для забезпечення точності, надійності та відтворюваності виробничого процесу.

Автоматизація виробничих ліній, що поєднують кілька технологічних операцій, вимагає створення комплексних систем керування, здатних забезпечувати не лише контроль параметрів, а й їх синхронізацію, обробку великого обсягу даних і візуалізацію стану процесу в режимі реального часу. Для цього застосовуються програмовані логічні контролери (PLC), SCADA-системи, а також промислові комунікаційні протоколи, такі як OPC UA, що забезпечують ефективний обмін інформацією між елементами системи.

Метою магістерської роботи є розробка автоматизованої системи керування виробничою лінією, що інтегрує процеси зважування, термообробки та маркування деталей, з використанням сучасних технологій візуалізації та зв’язку між обладнанням.

Основні напрямки досліджень включають:

- Аналіз сучасних методів та підходів до автоматизації виробничих процесів, зокрема зважування, термообробки і маркування деталей;
- Опис і детальний аналіз об’єкта дослідження — виробничої лінії, технологічних процесів, які в ній реалізуються;
- Вивчення існуючих систем автоматизації в галузі, огляд літературних джерел і патентної документації для визначення кращих практик та інноваційних рішень;
- Виявлення основних проблем та недоліків існуючих систем автоматизації, що знижують ефективність виробництва та якість контролю;

– Обґрунтування вибору методів та технічних рішень для підвищення ефективності керування виробничою лінією.

У процесі дослідження постають такі ключові задачі:

– Розробка архітектури автоматизованої системи з урахуванням особливостей технологічного процесу;
– Програмування PLC-контролерів для керування обладнанням на лінії;
– Створення SCADA-системи для моніторингу та візуалізації стану виробництва;
– Забезпечення інтеграції компонентів системи через протоколи промислової комунікації;
– Проведення тестування розробленої системи і оцінка її ефективності у реальних або апроксимаційних умовах.

Проблематика дослідження пов’язана із необхідністю забезпечення надійності та гнучкості автоматизованих систем, адже сучасні виробничі лінії повинні швидко адаптуватися до змін технологічних процесів, мінімізувати людський фактор, а також забезпечувати високу якість і точність операцій зважування, термообробки і маркування. Вирішення цих проблем сприятиме підвищенню продуктивності підприємств та зниженню виробничих втрат.

Таким чином, результати магістерської роботи можуть мати значну практичну цінність для промислових підприємств, що прагнуть модернізувати свої виробничі процеси та підвищити конкурентоспроможність за рахунок впровадження сучасних автоматизованих систем.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ

1.1 Опис об’єкта дослідження

Об’єктом дослідження є автоматизована система керування конвеєрною лінією, що виконує три основні технологічні операції: зважування, термообробку та маркування деталей. Дана система є складовою сучасного виробничого процесу, який потребує високого рівня автоматизації, точності контролю та ефективного керування в режимі реального часу.

Автоматизована конвеєрна лінія включає такі основні компоненти:

– Конвеєрна стрічка – забезпечує транспортування деталей між технологічними етапами на рисунку 1.1, оснащена двома оптичними датчиками Siemens OGP100, які фіксують граничні орієнтири переміщення деталей та запобігають аварійним ситуаціям. Для забезпечення зворотного зв’язку використовується енкодер, встановлений на вихідному валі конвеєра, який визначає точне положення стрічки.

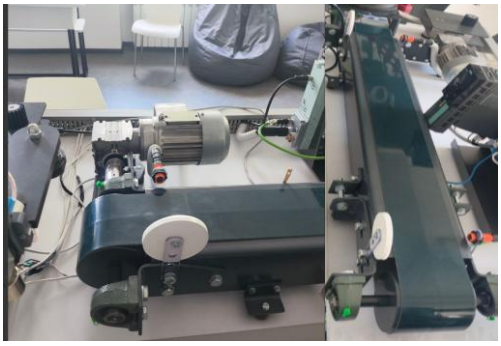


Рисунок 1.1 – Вид конвеєрної стрічки

– Система зважування здійснює вимірювання маси деталей перед подальшою обробкою на рисунку 1.2. Контроль ваги реалізується за допомогою електронного датчика SIWAREX на рисунку 1.3, інтегрованого у вузол зважування. Отримані сигнали з датчика передаються на ваговий модуль SIWAREX WP231 ETHERNET, який виконує налаштування, зчитування показників та їх подальшу передачу

в систему керування SIMATIC S7-1200 на рисунку 1.4. Завдяки інтеграції в середовище TIA Portal цей модуль не лише обробляє дані вимірювань, а й забезпечує розширені діагностичні функції – реєстрацію ваги та контроль граничних значень, що підвищує точність і надійність роботи системи.

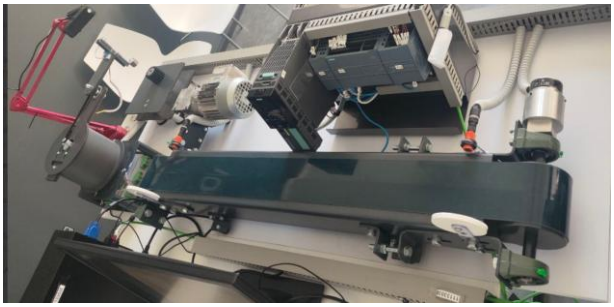


Рисунок 1.2- Система зважування

Рисунок 1.3 – SCARA-robot в зоні зважування з інтегрованим датчиком SIWAREX

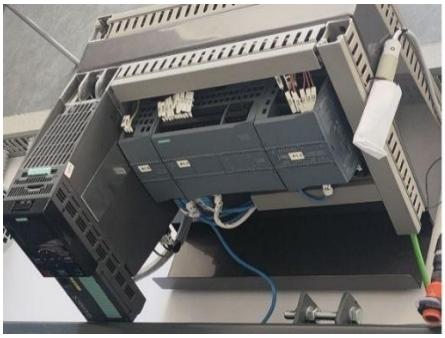


Рисунок 1.4 – Вид Комунікаційного модуля, ПЛК, вагового модуля SIWAREX WP231 ETHERNET

– Система термообробки – нагрівальна установка, що підтримує необхідний температурний режим для обробки деталей на рисунку 1.5. Вона складається з ламп розжарювання, вентилятора та термопари, що забезпечують контроль температури під час руху деталі конвеєром.

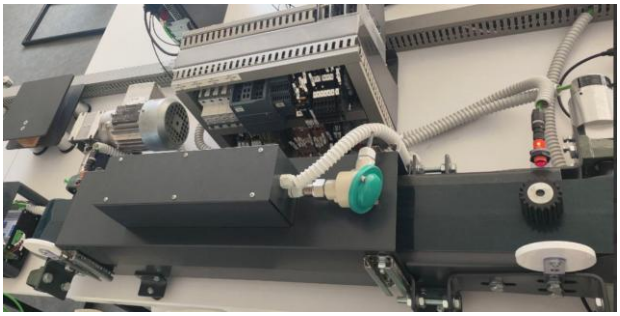


Рисунок 1.5 – Система термообробки

Рисунок 1.6 – Система термообробки

– Система маркування – обладнана RFID-технологією для ідентифікації деталей на рисунку 1.7. Для цього використовується додатковий модуль SIMATIC IOT2000 на рисунку 1.8, який інтегрує зчитувач RF180C на рисунку 1.9. Цей комунікаційний модуль забезпечує підключення високочастотних RFID-систем Siemens до PROFINET IO та дозволяє зчитувати інформацію з міток перед захопленням і переміщенням заготовок. Завдяки уніфікованій системі штекерного ввімкнення RF180C забезпечує швидкий монтаж і введення пристрою в експлуатацію.

Рисунок 1.7 – Система маркування

Рисунок 1.8 – Модуль SIMATIC IOT2000

Рисунок 1.9 – Модуль зчитування RF180C

Робот-маніпулятор – виконує транспортування деталей між технологічними зонами (рис. 1.10). Його конструкція складається з драйвера TB6560 V2 та крокового двигуна BYJ (28BJ48-12-300-01), а також трьох додаткових крокових двигунів, які реалізують комплекс рухів:

- обертання маніпулятора навколо власної осі;
- згинання стріли для зміни радіуса дії та перенесення заготовок;
- вертикальне переміщення підйомника з електромагнітом, що здійснює безпосереднє захоплення деталей.

Рисунок 1.10 - SCARA-robot

Керування маніпулятором здійснюється контролером, який задає сигнали для виконання чітко визначеної послідовності рухів, синхронізованих із роботою конвеєра та допоміжних вузлів системи.

– Програмовані логічні контролери (PLC) – керують виконавчими механізмами та забезпечують обмін даними між компонентами системи на рисунку 1.11.

Рисунок 1.11 – Програмований логічний контролер

– SCADA-система PlantSCADA – відповідає за візуалізацію, моніторинг і дистанційне керування процесом.
– Протокол OPC UA – забезпечує надійний та стандартизований обмін інформацією між обладнанням і програмними компонентами.

Система призначена для комплексної автоматизації виробничого процесу з метою зниження впливу людського фактора, підвищення швидкості роботи лінії та забезпечення стабільного контролю параметрів деталей.

1.2 Опис технологічного процесу

Автоматизований технологічний процес виконує три основні операції: зважування, термообробка та маркування деталей. Усі етапи інтегровані між собою через систему керування на базі ПЛК Siemens S7-1200, SCADA-системи PlantSCADA та протоколу OPC UA, що забезпечує обмін даними в реальному часі.

– Зважування деталей. На початковій стадії заготовка надходить у зону зважування, де ваговий датчик SIWAREX у поєднанні з модулем SIWAREX WP231 визначає масу деталі. Результати передаються в

SCADA-систему PlantSCADA для подальшої обробки та прийняття рішення щодо маршруту руху заготовки. Після завершення зважування робот-маніпулятор переносить деталь на конвеєр для наступного етапу на рисунку 1.12

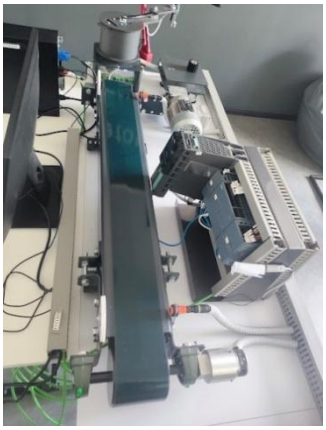


Рисунок 1.12 – Технологічний процес зважування

– Термообробка - деталь переміщується конвеєром до температурної зони, обладнаної термопарою для контролю температури та нагрівальним елементом(лампи розжарювання) із вентилятором для стабілізації теплового режиму на рисунку 1.13. Час нагріву визначається автоматично залежно від заданих у контролері параметрів. По завершенні термообробки деталь захоплюється маніпулятором і переміщується далі.

Рисунок 1.13 – Технологічний процес термообробки

– Маркування RFID-мітками. На фінальній стадії здійснюється маркування за допомогою RFID-системи на рисунку 1.14. Пристрій RF180C у поєднанні з модулем SIMATIC IOT2000 зчитує та записує ідентифікаційні дані кожної деталі, включаючи масу, параметри нагріву та час обробки. Зібрана інформація

зберігається у базі даних для подальшого аналізу, контролю якості та відстеження виробничої історії.

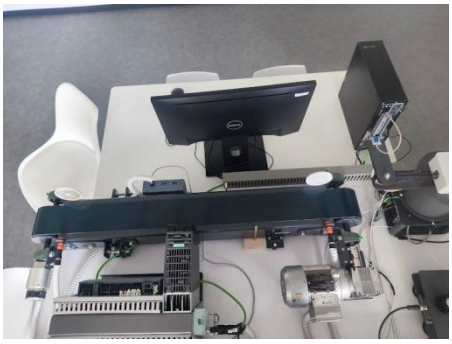


Рисунок 1.14 – Технологічний процес RFID-зчитувача

Технічне забезпечення процесу:

Функціонування автоматизованої виробничої лінії забезпечується комплексом апаратних і програмних засобів:

- Система керування та візуалізації:
- – SCADA-система PlantSCADA для моніторингу, архівування та управління;

  – протокол OPC UA для захищеного обміну даними;

  – три ПЛК Siemens S7-1200 CPU 1215C (6ES7215-1AG40-0XB0) із модулями розширення.
- Комунікаційні та модульні засоби:
- – три модулі CSM 1277 (6GK7277-1AA10-0AA0);
- – ваговий модуль SIWAREX WP231 (7MH4960-2AA01);
- – модуль аналогового введення/виведення SM 1234 (6ES7234-4HE32-0XB0);
- – модулі введення/виведення для інтеграції з датчиками та виконавчими пристроями SIMATIC IOT2000.
- Датчики та виконавчі механізми:
- – електронний ваговий датчик SIWAREX;
- – оптичні датчики контролю положення деталей Siemens OGP100;
- – термопара для вимірювання температури;
- – вентилятор для підтримки температурного режиму;
- – RFID-пристрої RF180C (6GT2002-0JD00) та RF310R (6GT2801-1AA10).

- Електроживлення та приводи:
- – три блоки живлення PM1207 (6EP1332-1SH71);
- – три блоки живлення LOGO!POWER (6EP3310-6SB00-0AY0);
- – три блоки управління (6SL3244-0BB12-1FA0);
- – три перетворювачі частоти(силові модулі) SINAMICS G120 PM240-2 (6SL3210-1PB13-0UL0);
- – 3 інтелектуальні панелі оператора IOP-2 (6SL3255-0AA00-4JA2).
- Робототехнічна частина:
- – три робот-маніпулятори з драйверами крокових двигунів TB6560 V2;
- – крокові двигуни BYJ (28BJ48-12-300-01);
- – електромагніт для захоплення деталей.
- Захисні пристрої:
- дев’ять автоматичних вимикачів iC60N C 6A 1P (A9F79106).

Запропонована автоматизована система керування дозволяє підвищити продуктивність виробничої лінії, зменшити вплив людського фактору та забезпечити точний контроль кожного етапу обробки деталей.

1.3 Аналіз літературних джерел за напрямком досліджень

У сучасному виробництві автоматизовані системи керування конвеєрними лініями, що виконують операції зважування, термообробки та маркування деталей, є ключовими для забезпечення високої продуктивності та якості продукції. У цьому розділі проведено аналіз літературних джерел за напрямком досліджень, з акцентом на методи, пристрої та технології, що використовуються в таких системах.

Автоматизовані системи зважування забезпечують точність і швидкість вимірювань, важливих для багатьох галузей промисловості. Вагові термінали з промисловими вагами дозволяють вводити найменування товарів, зважувати, фіксувати результати і здійснювати маркування продукції (через етикетки, штрих-коди або RFID). Це дозволяє зменшити людський фактор і підвищити точність обліку.

Переваги: Висока точність вимірювань; Швидкість обробки даних; Мінімізація людського фактора.

Недоліки: Висока вартість впровадження; Необхідність регулярного обслуговування і калібрування обладнання.

Термообробка важлива для виробництва матеріалів, зокрема металів і полімерів. Автоматизація цього процесу забезпечує точний контроль температури та часу, що покращує якість продукту та знижує ймовірність дефектів.

Переваги:

- Точний контроль процесу.
- Підвищення якості продукції.
- Зниження енергоспоживання.

Недоліки:

- Складність налаштування та обслуговування.
- Високі вимоги до кваліфікації персоналу.

Маркування продукції забезпечує її відстежуваність та відповідність стандартам. Автоматизовані системи використовують технології, такі як лазерне гравірування, термотрансферний друк та RFID-мітки, що спрощують процес ідентифікації та відстеження.

Переваги:

- Швидкість і точність маркування.
- Зберігання великого обсягу інформації на мітках.
- Покращення ефективності логістики.

Недоліки:

- Висока вартість RFID-систем.
- Можливі проблеми з сумісністю обладнання.

Автоматизовані системи зважування

В одній зі статей [1] Досліджується впровадження системи автоматизації процесу зважування (на рисунку 1.15) для зменшення втрат через помилки у технологічному процесі, неналежний контроль витрат матеріалів та людський фактор. Запропоноване рішення включає використання вагового терміналу з

промисловими вагами для введення найменувань товарів, зважування, фіксації результатів у програмі обліку та маркування продукції. Ідентифікація товарів здійснюється через штрих-коди або RFID-картки. Результати зважування зберігаються в архівах терміналу та інтегруються з обліковими системами, такими як "1С".

Рисунок 1.15 – Система зважування

Автоматизація маркування продукції

На підставі викладеної статті [2]. Точність обробки вантажів критично важлива для складських комплексів і транспортування. Відсутність точних даних спричиняє нестачу запасів, затримки, втрату продажів і зниження задоволеності клієнтів. RFID забезпечує автоматизований облік, покращує контроль запасів і відстеження замовлень, мінімізуючи ручні процеси.

Отримання даних у реальному часі (на рисунку 1.16) дозволяє знижувати витрати та покращувати своєчасність поставок. Серед труднощів – безпека даних, високі витрати, відсутність єдиних стандартів, екологічні фактори, нестача фахівців і складність управління даними. RFID інтегрується у повністю автоматизовані системи та залишатиметься провідною технологією в логістиці щонайменше 15 років, оскільки альтернативи, як-от машинний зір, поки що надто дорогі.

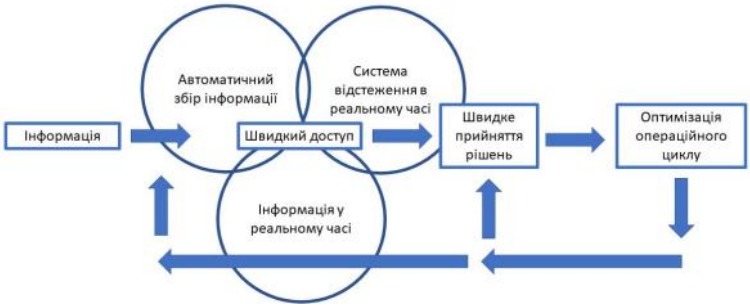


Рисунок 1.16 - Діаграма, яка показує здатність RFID-системи надавати актуальну інформацію у реальному часі

У даній статті [3] представлено, що RFID (на рисунку 1.17) знаходить застосування в різних галузях і залежить від стандартів та ефективності реалізації. Завдяки великому радіусу зчитування, RFID-мітки використовуються для моніторингу транспорту, аналізу потоку та інформування водіїв. Мітки, стійкі до впливу навколишнього середовища, автоматизують облік та контроль за переміщенням виробів. Мінімізує ризики помилкової ідентифікації та дозволяє зчитування без контакту. Швидкість обробки інформації дозволяє зчитувати дані з багатьох об'єктів, зокрема при русі на високій швидкості. RFID покращує ефективність у логістиці, виробництві та транспорті завдяки високій швидкості обробки даних та зручності використання.

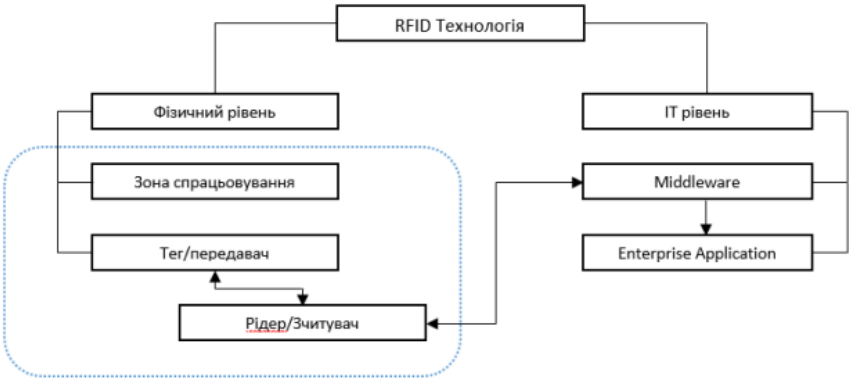


Рисунок 1.17 – Структура рівнів RFID-системи

Автоматизація процесів термообробки

У даній статті [4], Розглянуто адаптивне прогнозуюче керування для термічної обробки обкотишів з використанням рекурсивного алгоритму найменших квадратів для оцінювання параметрів процесу(на рисунках 1.18-

1.19). Цей підхід забезпечує стабільність температурного режиму, незважаючи на варіативність гранулометрії, пористості та зміни параметрів обладнання. Модель, реалізована в Simulink, підтвердила ефективність алгоритму RLS. Висновки підкреслюють перспективи вдосконалення методики через врахування обмежень на керуючі дії на етапах регулювання, що свідчить про постійний розвиток методології.

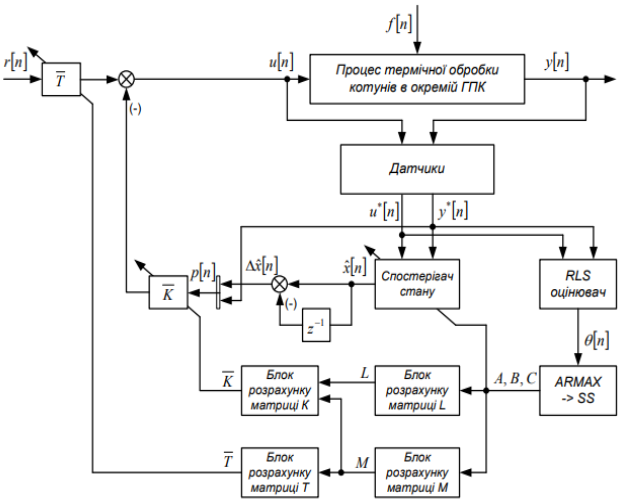


Рисунок 1.18 - Структурна схема системи адаптивного прогнозуючого керування процесом термічної обробки обкотишів з оперативним оцінюванням параметрів процесу з використанням алгоритму RLS

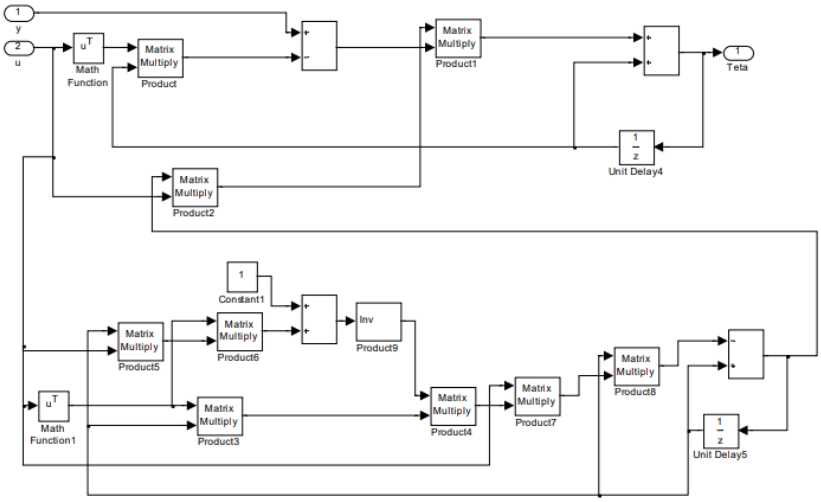


Рисунок 1.19 - Блок-схема реалізації рекурсивного алгоритму найменших квадратів

Людино-машинний інтерфейс

Дана стаття [5] Проектування та функціональні характеристики інтерфейсу «людина–машина» (HMI) мають визначальний вплив на ефективність

експлуатації та рівень безпеки при управлінні технологічними процесами. Традиційні методи роботи з тривогами здебільшого базуються на урахуванні когнітивних можливостей оператора, але зазвичай зводяться лише до реакції на отримані сигнали.

Для створення більш зручної та операторо-орієнтованої системи оповіщення особливого значення набуває використання інтуїтивно зрозумілого HMI. У сучасних дослідженнях запропоновано підхід, що інтегрує методи машинного навчання (ML) для оптимізації роботи дисплеїв на рисунку 1.20. Основна ідея полягає у використанні даних із журналів подій процесу для аналізу взаємозв'язків між діями оператора та станами системи. На основі цього будується мережева візуалізація, яка дозволяє знаходити найбільш релевантні зв'язки між логікою робочого процесу та його представленням у HMI. Такий метод сприяє створенню дисплеїв вищого рівня з чіткою структурою, ієрархією та змістовним наповненням. Практичне застосування підходу було перевірено на промисловій установці для алкілування з використанням плавикової кислоти, де було сформовано рекомендації щодо оптимізації оглядових екранів.

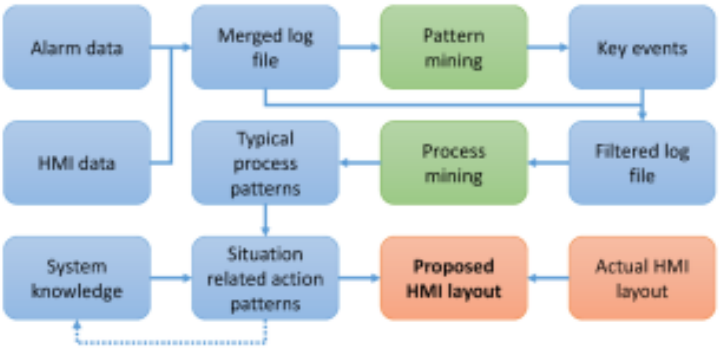


Рисунок 1.20 - Методика вдосконалення людино-машинного інтерфейсу базується на машинному навчанні з акцентом на інтерпретацію під час управління сигналами тривоги

У дослідженні [6] Системи диспетчерського керування та збору даних (SCADA) становлять собою багаторівневу архітектуру апаратно-програмних рішень, яка забезпечує моніторинг, збір, обробку та передавання технологічних даних у режимі реального часу. Отримана інформація відображається на інтерактивних екранах людино-машинного інтерфейсу (HMI), що дає змогу

оператору своєчасно реагувати на зміни стану виробничих процесів, здійснювати дистанційне керування обладнанням (наприклад, датчиками, виконавчими механізмами, приводами) та запобігати критичним відхиленням.

У промисловому середовищі (зокрема, при використанні таких рішень, як PlantSCADA у зв'язці з TIA Portal) HMI-панелі є ключовим інструментом комунікації між людиною та автоматизованою системою. Проте аналіз типових SCADA-інтерфейсів, виконаний у сучасних дослідженнях, засвідчив, що більшість візуалізацій перевантажені інформацією, мають фрагментовану структуру й не завжди враховують когнітивні особливості оператора. Це призводить до зростання часу реакції, ймовірності помилкових дій та зниження загальної ефективності.

У цій статті [7] автори описали HMI-інтерфейс, який дозволяє в реальному часі керувати ресурсами мікромережна рисунку 1.21. Показано, що прості, інтуїтивні інтерфейси забезпечують ефективне планування. Цей підхід може бути перенесений у Plant SCADA-дизайн для планування зважування, термообробки або маркування даних.

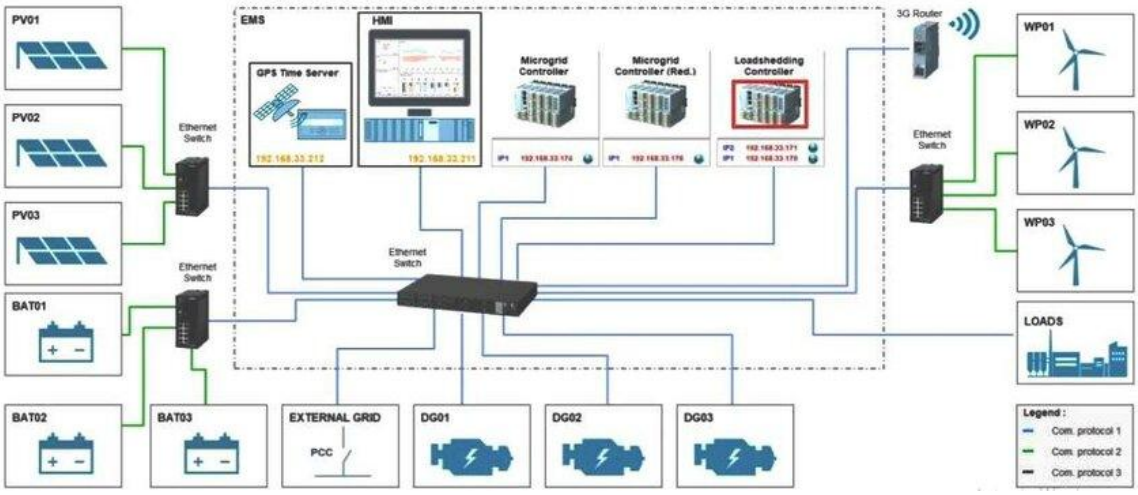


Рисунок 1.21 – Архітектура зв'язку в HMI

У статті [8], присвячена дослідженню інтеграції мобільних пристроїв у систему промислової автоматизації з метою їх застосування для моніторингу та керування технологічними процесами на рисунку 1.22. У роботі виконано аналіз і виокремлено три архітектурні підходи до використання мобільного пристрою як HMI-системи. Також представлено методику розробки людино-машинного

інтерфейсу для мобільних пристроїв із застосуванням стандарту OPC UA та продемонстровано практичну реалізацію цього рішення.

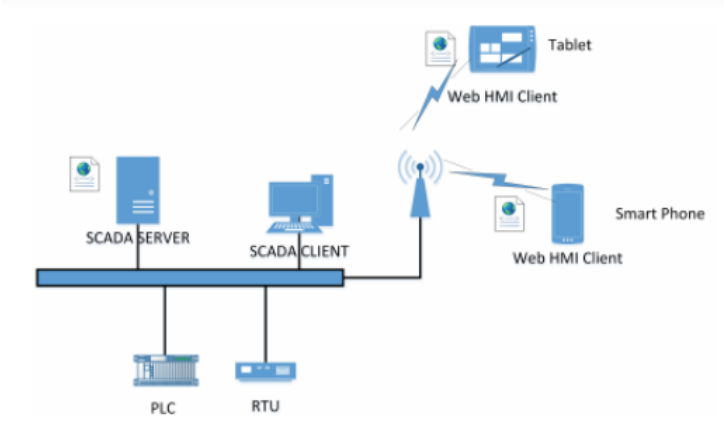


Рисунок 1.22 – Архітектура мобільного HMI на основі SCADA

Системи SCADA та їх розвиток

У цій статті [9] розглядається застосування вдосконалених моделей машинного навчання в рамках системи моніторингу та збору даних SCADA з метою підвищення рівня кіберзахисту та ефективності виявлення вторгнень. Використання алгоритмів CatBoost та XGBRegressor, здатних працювати з багатовимірними та нелінійними наборами даних, дозволило досягти суттєвих покращень у прогнозуванні та управлінні роботою об’єктів енергетичної інфраструктури, зокрема вітрових турбін.

Важливим аспектом стало впровадження методів пояснюваного штучного інтелекту (XAI), таких як аналіз значень SHAP, що забезпечують прозорість у прийнятті рішень моделлю та підвищують рівень довіри з боку операторів та зацікавлених сторін. У роботі запропоновано рекомендації щодо ефективної інтеграції моделей машинного навчання у SCADA-середовище на рисунку 1.23, їх впровадження з використанням інструментів XAI та необхідних організаційних і політичних змін для гарантування безпечного, надійного та етичного застосування штучного інтелекту у критично важливих інфраструктурних системах.

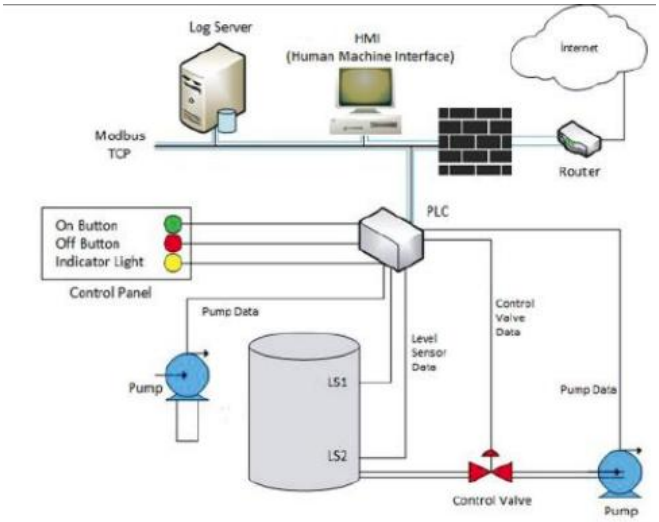


Рисунок 1.23 – SCADA система

У статті [10] Поєднання систем диспетчерського контролю та збору даних (SCADA) з технологіями Інтернету речей (IoT) та машинного навчання (ML) радикально змінює уявлення про автоматизацію, кіберзахист та продуктивність промислових процесів на рисунку 1.24. Якщо раніше SCADA традиційно використовувалася у сферах критичної інфраструктури — енергетиці, водопостачанні та виробничих комплексах, — то тепер інтеграція з IoT відкриває новий рівень можливостей.

IoT-пристрої та сенсори генерують безперервні потоки даних у реальному часі, що дозволяє системам SCADA досягати більшої ситуаційної обізнаності, організовувати віддалений моніторинг і швидко реагувати на зміни в середовищі.

Додатковий поштовх розвитку забезпечує машинне навчання, яке вводить у SCADA прогнозну аналітику та алгоритми виявлення аномалій. ML-моделі обробляють великі масиви даних, зібраних IoT-сенсорами, і тим самим:

- прогнозують відмови обладнання,
- оптимізують споживання ресурсів,
- знижують витрати на технічне обслуговування,
- скорочують час простою та підвищують ефективність виробничих процесів.

Особливу роль у такій екосистемі відіграє хмарна кібербезпека, адже інтеграція IoT і SCADA підвищує ризики несанкціонованого доступу та

кібератак. Хмарно орієнтовані захисні рішення, підсилені ML-алгоритмами, забезпечують масштабованість, гнучкість та здатність протидіяти навіть складним загрозам.

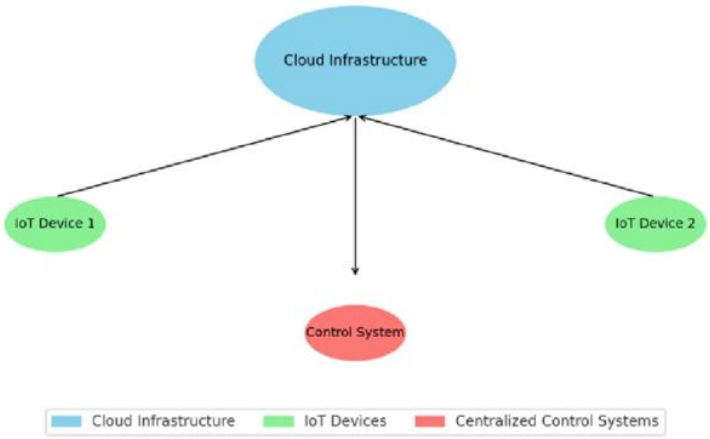


Рисунок 1.24 – Типова SCADA-система рішення, яке поєднує в собі можливості IoT, хмарної інфраструктури та централізованого керування

У статті [11], є цінною для моєї роботи, оскільки демонструє практичну інтеграцію цифрового двійника (DT) із системами SCADA, HMI та хмарними рішеннями для моніторингу та керування виробничим процесом. Використання віртуального введення в експлуатацію (VC) дозволяє тестувати програми ПЛК та стратегії керування в умовах апаратного забезпечення в циклі (HIL) до впровадження фізичної системи, що зменшує ризики та оптимізує процеси. Інтеграція через PROFINET та OPC UA забезпечує безперервний обмін даними між віртуальними моделями та контролерами, що підвищує ефективність.

Програмовані логічні контролери та інтеграційні рішення

У статті [12] Представлено дворівневу систему автоматичного керування (САУ) для регулювання швидкості конвеєра та прогнозування підвозу сировини. Моделювання показало ефективність транспортування сипких матеріалів на відстані до 100 км. Основна увага приділяється адаптації САУ до умов гірничозбагачувальних підприємств. Впровадження оптимізованого керування вантажопотоком дозволяє раціонально завантажувати конвеєр та підтримувати стабільну швидкість транспортування, враховуючи можливі перебої в постачанні гірничої маси.

У статті [13] , розглянуто спосіб інтеграції застарілих ПЛК у сучасні архітектури промислової автоматизації за допомогою агента OPC UA на рисунку 1.25. Запропонований підхід передбачає використання проміжного модуля, що працює окремо від контролера, синхронізує ключові змінні через спеціальний канал зв'язку та формує інформаційну модель OPC UA.

Дослідники створили прототип системи та продемонстрували його роботу на прикладі керування промисловим роботом, підтвердивши можливість моніторингу й управління у режимі OPC UA.

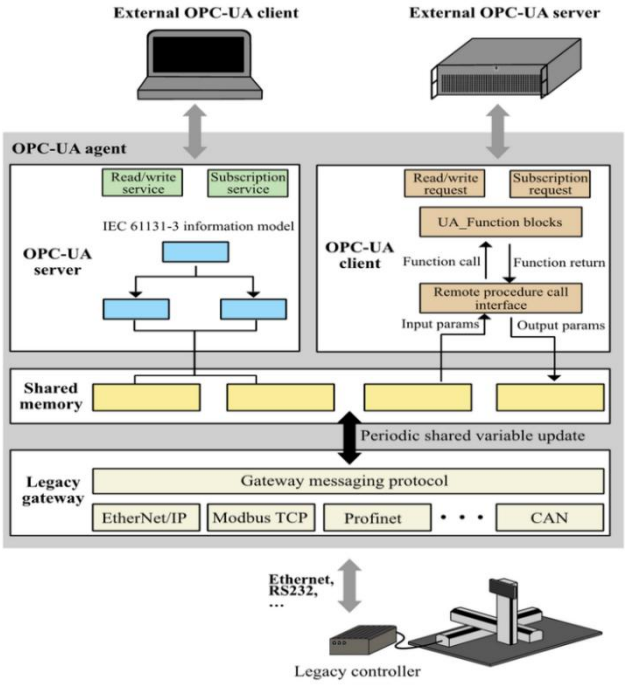


Рисунок 1.25 - Побудова OPC UA-агента

У данній статті[14], пропонується використання OPC UA як проміжного програмного забезпечення між MQTT та кросплатформними веб-застосунками, а також розробка платформи керування даними. Отримані результати демонструють переваги MQTT та OPC UA, зокрема вищу ефективність у швидкодії та підвищену безпеку застосунку.

У статті [15] розглядається практичний приклад інтеграції програмованих логічних контролерів Siemens серії S7 із середовищем Node-RED. Автори детально описують процес налаштування комунікації між ПЛК та Node-RED, зокрема акцентується увага на необхідності правильного конфігурування PUT/GET дозволів у середовищі TIA Portal. Для організації обміну даними

пропонується використовувати спеціальний модуль S7-node, що дозволяє зчитувати та передавати значення змінних контролера у середовище візуалізації чи подальшої обробки.

Представлена схема інтеграції є доволі універсальною та може бути адаптована для різних виробничих систем, що збігається з ідеєю автоматизації, розроблюваною в даній роботі.

У статті [16], цей матеріал напряму стосується моєї роботи, оскільки описує методи поєднання стандартів OPC UA та IEC 61850, які дозволяють інтегрувати промислові системи управління та SCADA-рішення у відповідності до концепцій Industry 4.0. Для моєї теми це відкриває перспективу застосування більш гнучких архітектур керування, які можна адаптувати у середовищах TIA Portal, Plant SCADA та IIoT-платформах, а також створювати модульні рішення з підтримкою масштабованості та кібербезпеки.

Інтернет речей (IoT), кіберфізичні системи та цифрові двійники

У даній статті [17], впровадження Інтернету речей (IoT) та кіберфізичних систем (CPS) змінило автоматизацію(на рисунку 1.26), сприяючи розвитку «розумних» фабрик і переходу до Industry 4.0. У статті розглянуто підхід до промислових комунікацій на платформі Node-RED із використанням протоколів Modbus і MQTT для машинної взаємодії (M2M). Пропонується інтеграція бездротових мереж для з'єднання обладнання без кабелів, що сприяє автоматизації виробничих процесів. Перспективою є розширення системи комунікацій, додаючи більше підпорядкованих пристроїв для створення масштабованої, надійної архітектури.

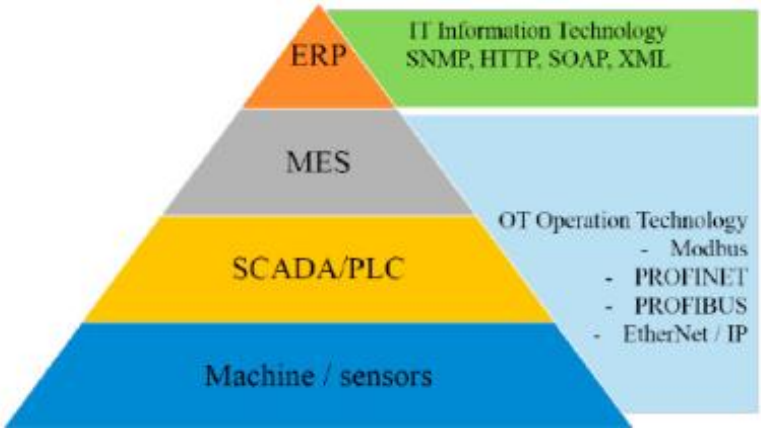


Рисунок 1.26 - Кіберфізична система

Ця стаття [18], OPC UA є ресурсоємним для впровадження в IIoT, особливо в пристроях з обмеженими ресурсами. У статті розроблено систему для тестування OPC UA як стандарту промислової взаємодобності в економічно ефективному середовищі(на рисунку 1.27), використовуючи платформу на базі Raspberry Pi.

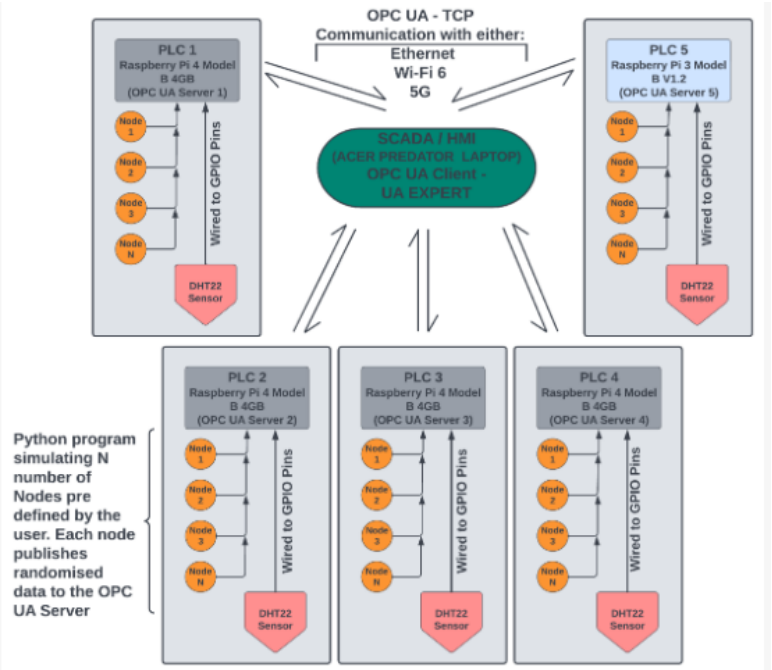


Рисунок 1.27 – Архітектура проектування системи

Тестування показало ефективність цієї системи для маломасштабного тестування протоколів та освітніх цілей. Дослідження OPC UA активно розвивається через збільшення різноманіття вузлів у IIoT. Майбутні дослідження включатимуть використання реальних сенсорних даних, розробку системи для автоматизованих експериментів і інтеграцію нових комунікаційних протоколів, таких як TSN, Wi-Fi 6/6E і 5G. Ці дослідження також
охоплюватимуть оптимізацію OPC UA для підтримки нових промислових застосунків в межах Industry 4.0.

У даній статті [19], висвітлено Node-RED забезпечує швидке прототипування, а MQTT спрощує бізнес-логіку, роблячи ці технології ефективними та економічними. Вони дозволяють легко моніторити дані датчиків та підтримують конкурентоспроможність промисловості. IIoT оптимізує процеси, знижує витрати завдяки аналізу даних і предиктивному

обслуговуванню. Дослідження охоплює масштабованість, тестування баз даних, безпеку та інтеграцію з предиктивними алгоритмами.

У статті [20], поєднання технологій штучного інтелекту (ШІ) з цифровими двійниками розглядається як ключовий чинник трансформації технічного обслуговування в межах концепції Індустрії 4.0 на рисунку 1.28. Наукові дослідження підтверджують ефективність використання контрольованого, глибинного та підкріплювального навчання для оптимізації моделей цифрових двійників і прийняття рішень на основі даних. Водночас у промисловій практиці рівень впровадження залишається обмеженим.

Основними бар'єрами є проблеми масштабованості, складність інтеграції різнорідних джерел даних та недостатня кваліфікація персоналу. Визначено три виміри розриву між науковими досягненнями та практичним використанням: масштаб, дані та модель. Для його подолання запропоновано п'ятирівневу архітектуру цифрових двійників із ШІ, що включає: фізичні активи, системи передачі даних, цифрову модель, модулі аналітики ШІ, сервіси технічного обслуговування.

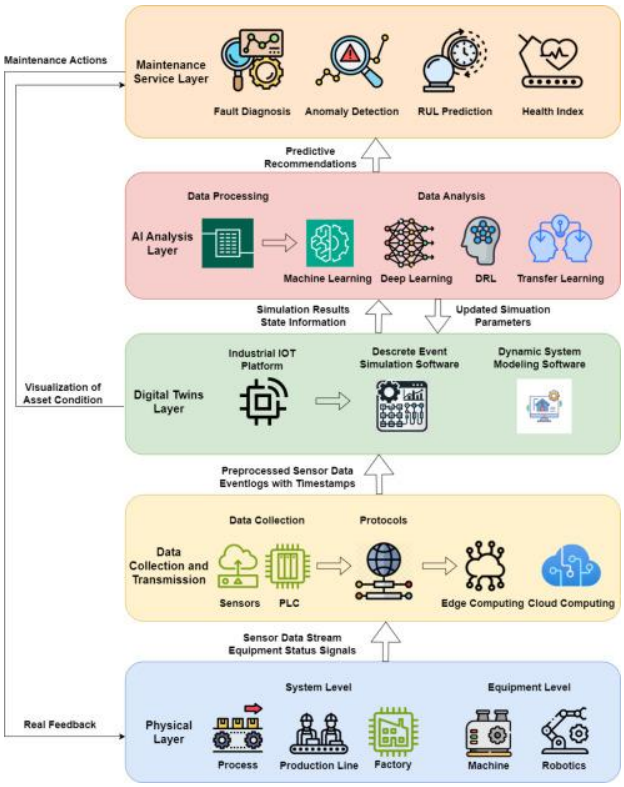


Рисунок 1.28 – Архітектурна модель цифрових двійників із застосуванням штучного інтелекту для вдосконалення технічного обслуговування

Крім того, наголошується на необхідності застосування модульних архітектур, стандартизованих протоколів обміну даними, використання гібридних рішень (edge + cloud) та систематичного підвищення кваліфікації персоналу. Це дозволить зменшити розрив між теоретичними розробками та промисловою практикою.

1.4 Патентний пошук за напрямком досліджень

У патенті[21], описується інноваційну конструкцію конвеєрного зважувача (checkweigher) із механізмом автоматичного відхилення виробів (diverting). Ключовою особливістю є використання окремих модулів-«slats» (ребер), які мають можливість вертикального руху та підтримуються на зважувальній платформі лише в зоні вимірювання. За межами цієї зони вони знаходяться в нижньому стані. Крім того, деякі slats можуть бути боково переміщені (divertible), що дозволяє автоматично відводити вироби з нестандартною вагою на відвідний конвеєр на рисунку 1.29. Управління здійснюється контролером, що аналізує вагу й активує відхилення, якщо виріб не відповідає допустимим межам на рисунку 1.29

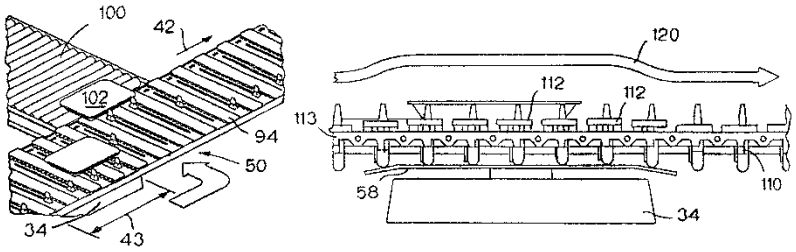


Рисунок 1.29 – Конвеєрний зважувач

У патенті[22], Метод зважування передбачає виконання таких етапів:

- ідентифікація одного чи кількох об’єктів, розташованих на верхній поверхні першої вагової платформи (A) або в зоні виявлення об’єктів над нею;
- зважування визначених об’єктів, розміщених на верхній поверхні другої вагової платформи (B).

Система зважування складається щонайменше з двох вагових пристроїв із верхніми платформами, які реалізують зазначений метод.

Запропонований підхід дає змогу:

- знизити складність алгоритмів розпізнавання завдяки кращій відповідності об’єкта до умов зважування;
- спростити робочий процес і скоротити витрати часу;
- підвищити точність і достовірність визначення параметрів об’єкта.

У патенті[23], представлено патентне рішення, що стосується системи охолодження та обігріву для електричного снігохода. Конструкція передбачає наявність теплообмінника, нагрівача, насоса та керованого клапана, які разом формують замкнений контур регулювання температури. Система працює у двох режимах – охолодження або обігрів, залежно від положення клапана, а також передбачає застосування датчика температури для зворотного зв'язку.

Попри те, що зазначений об'єкт належить до транспортної техніки, технічні принципи патенту мають ширше застосування. Зокрема, реалізовані підходи до динамічного керування потоками теплоносія та інтеграція датчиків із системами контролю можуть бути використані при створенні промислових систем термообробки деталей.

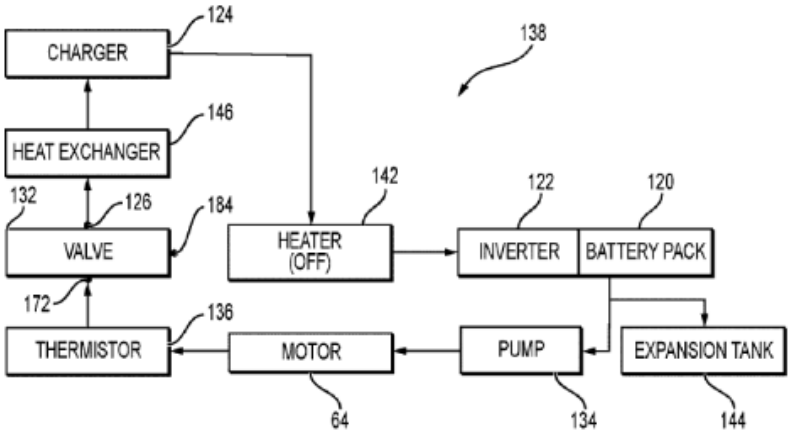


Рисунок 1.30 – Система охолодження та обігріву

У патенті [24], розглядається метод оптимізації геометричних параметрів робота SCARA на рисунку 4.3 за допомогою генетичного алгоритму. Запропонований підхід передбачає побудову математичної моделі робочого

простору, формування функцій оптимізації (швидкісної та жорсткісної характеристик), а також їхнє нормалізоване об’єднання для створення оптимізаційної моделі. Завдяки використанню еволюційних алгоритмів отримується найбільш раціональна довжина основної руки та передпліччя робота, що підвищує точність, надійність і ефективність його роботи.

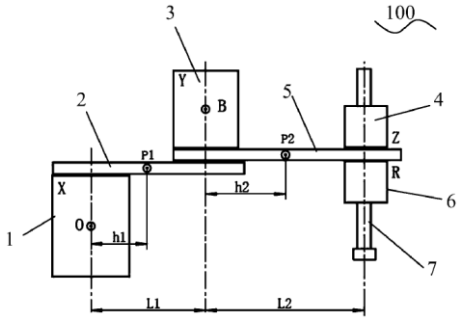


Рисунок 1.31 – SCARA robot

У патенті [25], представлено спеціалізовану безперервну виробничу лінію для прокатки та термічної обробки цирконієвих пластин високої якості на рисунку 1.32, а також метод її використання. Лінія включає два основні підсистеми: систему прокатки та систему загартування. Система прокатки містить нагрівальну піч та прокатний стан, де пластина рухається вперед та назад у зоні нагріву для забезпечення рівномірного нагріву. Система загартування включає нагрівальну піч, пристрій швидкого загартування та роликовий конвеєр, який забезпечує безперервний транспорт деталей між нагрівальною зоною і прокатним станом.

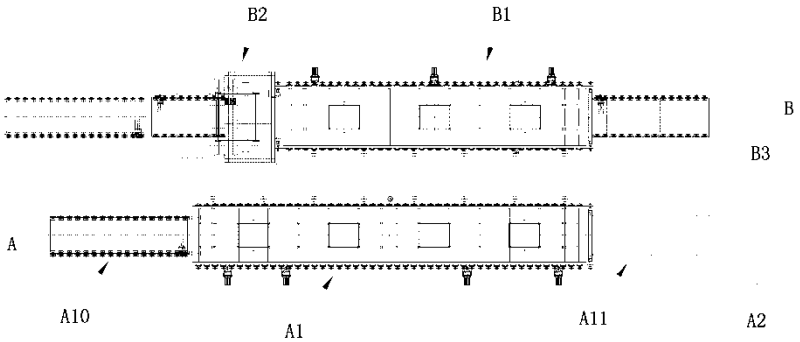


Рисунок 1.32 – Виробнича лінія

Завдяки такій інтеграції процесів прокатки і загартування досягається безперервна обробка, що підвищує продуктивність і стабільність виробництва.

Крім того, оптимальне розташування температурних зон у пічному вузлі дозволяє зменшити загальні габарити обладнання, спростити конструкцію лінії та знизити енергоспоживання.

1.5 Недоліки і переваги існуючих рішень

Аналіз сучасних підходів до автоматизації виробничих ліній показує, що існуючі системи мають ряд переваг та недоліків, які безпосередньо впливають на ефективність, безпеку та зручність керування процесами.

Переваги існуючих рішень:

1. Інтеграція з ПЛК та SCADA: Більшість сучасних систем дозволяють централізовано керувати виробничими процесами, забезпечуючи моніторинг у реальному часі та оперативне управління за допомогою HMI.
2. Використання стандартних протоколів: Підтримка OPC UA, PROFINET та інших промислових протоколів забезпечує сумісність між різними пристроями та можливість масштабування системи.
3. Підвищення продуктивності: Автоматизація процесів зважування, термообробки та маркування дозволяє зменшити втрати матеріалу, прискорити цикл виробництва та підвищити точність обробки деталей.
4. Можливість віддаленого моніторингу та керування: Використання сучасних HMI та цифрових двійників дозволяє віддалено контролювати виробничу лінію та проводити тестування у віртуальному середовищі (виртуальне введення в експлуатацію).

Недоліки існуючих рішень:

1. Складність налаштування: Інтеграція PLC, SCADA, HMI та периферійних пристроїв вимагає значних знань і часу на налаштування, що ускладнює впровадження системи.
2. Обмежена сумісність старого обладнання: Багато ПЛК або терміналів не підтримують сучасні стандарти OPC UA, що ускладнює інтеграцію старих пристроїв.

3. Перевантаження інформацією операторів: Складні дисплеї HMI та великі обсяги даних можуть ускладнювати сприйняття інформації, підвищувати когнітивне навантаження та ризик помилок.

4. Вартість та ресурси: Впровадження комплексних рішень з підтримкою цифрових двійників, SCADA та IoT потребує значних фінансових вкладень, а також спеціалізованого обслуговування та оновлення.

Висновок: Існуючі рішення дозволяють досягти високого рівня автоматизації та ефективності виробничих ліній, проте потребують адаптації та оптимізації для зручності користувача, інтеграції старого обладнання та зниження витрат на впровадження. Для моєї теми важливо враховувати ці переваги та недоліки при розробці системи візуалізації та інтеграції автоматизації.

1.6 Обґрунтування вибору методів для усунення існуючих рішень

Враховуючи недоліки та обмеження існуючих систем автоматизації виробничих ліній зважування, термообробки та маркування деталей, у даній роботі запропоновано використання комплексного підходу, який дозволяє підвищити ефективність, точність та зручність керування процесами.

Основні методи та їх обґрунтування:

1. Інтеграція PLC із SCADA та HMI: Використання програмованих логічних контролерів (PLC) у поєднанні з SCADA-системою забезпечує централізований контроль і моніторинг у реальному часі. Це дозволяє зменшити ризик помилок оператора та підвищити швидкість реагування на події. Вибір цього методу обґрунтований потребою оптимізації управління виробничими процесами та забезпечення зручності для користувача.

2. Застосування стандартів OPC UA та PROFINET: Для забезпечення сумісності між різними пристроями та модернізації старого обладнання обрано стандарти OPC UA та PROFINET. Вони дозволяють

організувати надійну передачу даних у промисловій мережі, впровадити віддалене керування та інтегрувати IoT-рішення.

3. Розробка адаптивного HMI: Впровадження інтуїтивного та адаптивного інтерфейсу HMI спрощує взаємодію оператора з системою, знижує когнітивне навантаження та підвищує ефективність прийняття рішень у реальному часі.

У процесі розробки системи автоматизації виникла проблема — при роботі у середовищі TIA Portal спостерігались збої у програмі, зокрема періодичне вилітання програми під час компіляції та завантаження проекту. Це унеможливлювало стабільну роботу проєкту та створювало ризики втрати даних і порушення логіки контролю.

Для усунення зазначеної проблеми було прийнято рішення застосувати сервер зв'язку KEPServerEX, який забезпечує надійну взаємодію між контролером Siemens S7-1200 та SCADA-системою PlantSCADA. Такий підхід дозволяє вивести частину комунікаційного навантаження із середовища TIA Portal, мінімізуючи ймовірність його збоїв.

KEPServerEX виступає універсальним OPC-сервером, що підтримує широкий спектр промислових протоколів, зокрема Siemens TCP/IP Ethernet, забезпечуючи стабільний обмін даними між контролером та візуалізаційною системою. Це рішення також підвищує гнучкість системи, оскільки PlantSCADA може напряму зчитувати змінні з KEPServer через стандарт OPC DA або OPC UA(OPC DA/UA).

Таким чином, використання KEPServerEX як проміжного рівня комунікації дозволяє:

– усунути технічну нестабільність TIA Portal під час роботи з великими проєктами;
– забезпечити стабільний і надійний обмін даними між контролером та SCADA;
– зберегти структуру змінних і налаштувань без необхідності переналаштування в TIA Portal;

– підвищити масштабованість системи за рахунок можливості додавання нових вузлів і клієнтів OPC.

Висновок:

Вибір вищезазначених методів обґрунтований потребою усунення основних недоліків існуючих рішень: складності налаштування, обмеженої сумісності старого обладнання, перевантаження інформацією та високих витрат на впровадження. Комплексне застосування цих підходів забезпечує надійну, гнучку та ефективну систему автоматизації з інтуїтивною візуалізацією для виробничої лінії зважування, термообробки та маркування деталей.

Висновок до розділу 1

У результаті проведеного аналізу встановлено, що автоматизована система керування виробничою лінією зважування, термообробки та маркування деталей є складним багаторівневим техніко-технологічним комплексом, який поєднує сучасні апаратні та програмні засоби контролю, обміну даними та візуалізації. Основними складовими системи виступають програмований логічний контролер Siemens S7-1200, вагові модулі SIWAREX, системи ідентифікації RFID, а також SCADA PlantSCADA, інтегрована через OPC-сервер KEPServerEX, що забезпечує взаємодію між усіма елементами системи.

Проведений аналіз літературних джерел та існуючих технічних рішень показав, що впровадження комплексної автоматизації технологічних етапів зважування, термообробки та маркування дозволяє значно підвищити ефективність роботи виробничих ліній. Це досягається за рахунок підвищення точності вимірювань, швидкодії процесів, зниження впливу людського фактору та оптимізації використання ресурсів.

Водночас було виявлено низку проблем, які залишаються актуальними для подальших досліджень, а саме: висока вартість сучасного обладнання, складність інтеграції різних систем автоматизації, потреба у забезпеченні кібербезпеки та стабільності обміну даними між компонентами.

Для усунення зазначених недоліків у даній роботі обґрунтовано доцільність застосування KEPServerEX як проміжного рівня зв’язку між PLC і PlantSCADA, що підвищує надійність системи, мінімізує програмні збої та забезпечує стабільну передачу даних.

Таким чином, результати першого розділу підтверджують актуальність теми дослідження та створюють науково-технічне підґрунтя для розробки у наступних розділах структурної, алгоритмічної та програмної реалізації автоматизованої системи керування виробничою лінією.

РОЗДІЛ 2
ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

2.1. Вступ до математичного моделювання

Математичне моделювання є фундаментальним інструментом при проектуванні та дослідженні автоматизованих виробничих систем.

Воно дозволяє відобразити динаміку технологічних процесів у вигляді формалізованих моделей, які описують залежності між вхідними та вихідними змінними, враховують інерційність обладнання, вплив збурень та особливості керування.

Використання моделей на етапі проєктування значно знижує ризики помилок при створенні реальної системи, забезпечує оптимізацію параметрів та скорочує витрати на експериментальні дослідження.

Основою більшості інженерних моделей є диференційні рівняння, що відображають зміну стану системи у часі. Для зручності аналізу та синтезу систем керування ці рівняння часто перетворюють у передаточні функції, які характеризують зв’язок між вхідними сигналами та вихідною реакцією об’єкта в операторній формі Лапласа.

Це дозволяє використовувати апарат класичної теорії автоматичного керування для дослідження стійкості, точності та швидкодії системи.

У випадку виробничої лінії, яка включає підсистеми зважування, термообробки та маркування, математичне моделювання має особливе значення. Кожен із технологічних етапів характеризується специфічними динамічними властивостями:

- система зважування – наявність фільтрації сигналів та аперіодичних ланок;
- термообробка – виражена теплова інерційність і нелінійні зворотні зв’язки;
- маркування на основі RFID – дискретний характер процесів і наявність затримок у передаванні даних. Тому для опису роботи всієї виробничої

лінії доцільно поєднати безперервні та дискретні моделі, що дозволить адекватно врахувати фізичну природу процесів.

MATLAB/Simulink виступає оптимальним середовищем для реалізації таких моделей. У ньому передбачені готові бібліотеки динамічних блоків, засоби опису передаточних функцій, побудови структурних схем, а також інструменти для аналізу перехідних процесів, стійкості та частотних характеристик.

Завдяки цьому розробник може не лише формально описати систему рівняннями, але й відтворити її поведінку у вигляді імітаційної моделі, яка наближено відповідає реальній виробничій лінії.

Отже, математичне моделювання у даній роботі спрямоване на:

- побудову моделей окремих підсистем (зважування, термообробки, маркування);
- інтеграцію моделей у єдину систему;
- аналіз характеристик і оптимізацію параметрів;
- практичну реалізацію в MATLAB/Simulink з подальшою перевіркою працездатності.

Таким чином, застосування математичного апарату дозволяє перейти від опису виробничої лінії як набору обладнання до формалізованої системи, придатної для аналізу, синтезу та автоматизації.

У процесі створення моделі особливо важливо забезпечити її адекватність — тобто відповідність між результатами імітаційного моделювання та реальною поведінкою системи.

Для цього проводиться верифікація та валідація моделі.

Перша спрямована на перевірку правильності реалізації математичних залежностей у середовищі MATLAB/Simulink, друга — на порівняння отриманих результатів із експериментальними даними, зібраними під час роботи виробничої лінії.

Крім того, важливим аспектом моделювання є підбір рівня деталізації: надмірно спрощена модель не враховує важливі ефекти, а занадто складна — ускладнює аналіз і керування.

Тому застосовується принцип «розумної достатності», який дозволяє зберегти баланс між точністю та обчислювальною ефективністю.

У сучасних виробничих системах математичне моделювання дедалі частіше використовується не лише для аналітичного аналізу, а й для цифрових двійників (digital twin), які забезпечують безперервний моніторинг, прогнозування станів обладнання та оптимізацію виробничих параметрів у реальному часі.

2.2. Загальні підходи до моделювання підсистем виробничої лінії

Метою цього підпункту є формалізація підходів до побудови математичних моделей підсистем виробничої лінії (зважування, термообробка, маркування), виходячи з реальної апаратної конфігурації, описаної в розділі 1: ваговий модуль SIWAREX WP231 і датчик SIWAREX, ПЛК SIMATIC S7-1200, приводи SINAMICS G120, RFID-зчитувачі RF180C / RF310R, SCARA-маніпулятор з драйверами TB6560 тощо. Моделі повинні поєднувати фізичну природу процесів і можливість ідентифікації за експериментальними даними SCADA/PLC (PlantSCADA, OPC UA).

Принципи вибору структури моделі. Фізично обґрунтована простота. Модель має містити лише ті динамічні властивості, які впливають на керування та які можна ідентифікувати з доступних вимірів.

Наприклад, для вагового вузла критичні — статична чутливість і фільтрація шуму; для печі — теплоємність та коефіцієнт тепловіддачі; для RFID — час читання і ймовірність помилки.

Комбінування безперервних і дискретних підмоделей. Частини лінії (нагрів, приводи) описуються безперервними ОДУ / передаточними функціями; частини з явним дискретним характером (RFID, логіка маршрутизації, ПЛК-цикл) — дискретними моделями або затримками.

Модульність. Кожна підсистема моделюється окремо як вузол з чітко визначеними входами і виходами (інтерфейси узгоджені зі змінними, що реєструються у SCADA/PLC). Врахування нелінійностей там, де це принципово.

Нелінійності (насичення, релєйні рішення, залежність тепловіддачі від температури) у першу чергу розглядаються як операції над лінійною базовою моделлю (лінійна апроксимація + поправкові нелінійні елементи).

Типові структурні блоки та їх математичні форми.

Для подальшої ідентифікації і синтезу регуляторів зручно використовувати набір елементарних блоків:

1. Аперіодична (першого порядку) ланка — застосовується для датчиків, фільтрів, простих приводів.

Диференційне рівняння:

$$\tau y^{\cdot}(t) + y(t) = Ku(t)$$

де K — статичне підсилення, τ — стала часу.

Передаточна функція:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

2. Інтегруюча ланка — акумулюючі величини (позиція конвеєра як інтеграл швидкості).

Диференційне рівняння:

$$y^{\cdot}(t) = Ku(t)$$

Передаточна функція:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s}$$

3. Коливальна (другого порядку) — для механічних вузлів з пружністю/інерцією:

$$G(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1}$$

де T — базова часова константа, ζ— демпфування.

4. Транспортне запізнення (зсув у часі) — для передавання блоків RFID, мережевих повідомлень:

$$G(s) = e^{-\tau d s}$$

Перша апроксимація Паде (1-го порядку):

$$e^{-\tau ds} \approx \frac{1 - \frac{\tau ds}{2}}{1 + \frac{\tau ds}{2}}$$

де τd — затримка.

5. Множинні входи/виходи та зворотні зв'язки. Підсистеми поєднуються послідовно або паралельно; у разі регулювання зазвичай вводиться петля зворотного зв'язку з виміром (наприклад, PID для підтримки температури печі).

Специфіка моделей для компонентів, згаданих у розділі 1

Нижче наведено принципову формалізацію моделей кожного технологічного вузла, яка служитиме основою для розділів 2.3–2.5.

А. Вузол зважування (SIWAREX + ваговий модуль)

Реальні ваговими датчиками притаманні: статичне підсилення K_w, часова інерційність фільтрації і шум вимірювань. Типова модель — аперіодична першого порядку з додатковим вимірювальним шумом:

$$\tau w y^{\cdot} w(t) + yw(t) = Kw\, m(t) + v(t)$$

де m(t) — справжня маса (вхід), yw(t) — вихід сигналу ваги, v(t) — шум/збурення. У операторах:

$$Gw(s) = Yw(s)M(s) = Kw\tau ws + 1$$

Ідентифікація: при дискретному кроку зняття даних Δt — використовуємо імпульсну або скачкову дію (поміщення тестової еталонної маси) і оцінюємо Kw як відношення рівноважного виходу до маси, а τw як час, за який відгук досягає 63,2% від усталеного значення.

Б. Привод конвеєра та позиціонування (SINAMICS + енкодер)

Драйв і механіка руху формують динаміку швидкості/позиції. Для регулювання швидкості привід може бути апроксимований аперіодичною ланкою першого порядку:

$$\tau cv^{\cdot}(t) + v(t) = Kc\, uv(t)$$

а положення x(t)x(t)x(t) — інтеграцією швидкості:

$$x^{\cdot}(t) = v(t) \Rightarrow Gx, u(s) = Kcs(\tau cs + 1)$$

Тут uv(t) — командний сигнал частоти/напруги з ПЛК; енкодер дає дискретний вимір x[k].

В. Система термообробки (лампи + термопара + вентилятор)

Енергетичний баланс дає початкову ОДУ:

$$CdT(t)dt = Pin(t) - hA(T(t) - Tamb) - Qfan(t)$$

Лінійна апроксимація біля робочої точки T0 призводить до аперіодичної ланки:

$$\tau th\,\Delta T^{\cdot}(t) + \Delta T(t) = Kth\,\Delta Pin(t) - Kf\,\Delta uf(t)$$

де Kth — коефіцієнт чутливості температури до зміни потужності. У частотній області:

$$GT, P(s) = \Delta T(s)\Delta Pin(s) = Kth\tau ths + 1$$

Особливість: теплові процеси повільні — необхідне вибирання більшого кроку дискретизації при синтезі регулятора та аналізі (порядки секунд).

Г. RFID-підсистема (SIMATIC IOT2000 + RF180C)

Процес зчитування/запису — дискретний, має характер затримки й імовірнісні втрати при колізіях.

Для задач синхронізації й логіки маршрутизації достатньо використовувати модель «затримка + ймовірність успіху»:

$$Grfid(s) \approx Krfid\,e - s\tau rfid$$

Для детального аналізу пропонується дискретна модель в z-домені з періодом опитування Tsrfid і ймовірністю успіху psucc (стохастична модель), що дозволяє прогнозувати середню пропускну здатність.

Д. Робот-маніпулятор (SCARA на драйверах TB6560)

Через крокові двигуни та драйвери маніпулятор має інтегруючу поведінку у положенні та обмеження за швидкістю/прискоренням.

Для задач планування руху модель приймають виглядом інтеграційної ланки з інерцією:

$$\theta^{\cdot}(t) = \omega(t), \tau r\omega^{\cdot}(t) + \omega(t) = Krur(t)$$

що дає для кута θ:

$$G\theta, u(s) = Krs(\tau rs + 1)$$

При високоточному моделюванні враховують граничні швидкості, крокову дискретність та керування струмом/кроками драйвера.

Щоб отримані аналітичні форми стали робочими моделями, потрібно провести ідентифікацію параметрів, використовуючи дані SCADA/PLC.

У виробничій лінії підсистеми пов’язані: результат зважування визначає логіку маршрутизації (релейні рішення у ПЛК), результат термообробки (температура T) впливає на якість обробки і час перебування на зоні, RFID надає метадані відносно деталі. В інтегрованій схемі ці зв’язки реалізуються як сигнальні гілки та дискретні умови . При побудові моделі слід явно вказати точки обміну даними (перемінні PLC/SCADA), щоб ідентифікація могла бути виконана локально для кожного вузла з урахуванням сигналів-збурень від інших вузлів.

У підсумку, загальний підхід до моделювання виробничої лінії ґрунтується на розбитті системи на фізично-обґрунтовані модулі, які аппроксимуються елементарними ланками (аперіодичні першого порядку, інтегратори, запізнення, коливальні ланки). Для кожного блоку визначені математичні форми, методика ідентифікації параметрів із даних SCADA/PLC та рекомендації щодо реалізації в MATLAB/Simulink. Наступні підрозділи 2.3—2.5 побудовані саме за цією методикою: спочатку — деталізація моделі підсистеми зважування з конкретними рівняннями та кроком оцінки параметрів, потім — термообробки і RFID-підсистеми; далі — інтеграція та аналіз переходів (2.6–2.7) і практична реалізація в Simulink (2.8).

Окремої уваги заслуговує інтеграція моделей підсистем із реальними даними від ПЛК та SCADA. Використання протоколів обміну даними, таких як OPC UA або Modbus TCP, дозволяє зчитувати параметри процесів у реальному часі й оновлювати модель безпосередньо під час експлуатації лінії.

Такий підхід відкриває можливість побудови адаптивних моделей, здатних змінювати свої параметри залежно від фактичних умов роботи.З практичної точки зору, при побудові комплексної моделі важливо також враховувати часову синхронізацію сигналів між підсистемами.

Наприклад, навіть незначні розбіжності у частоті дискретизації вагового модуля та ПЛК можуть призвести до спотворення результатів. Тому на етапі ідентифікації часто застосовують попередню фільтрацію або ресемплінг сигналів.

Таким чином, ефективне моделювання підсистем вимагає не лише математичної точності, а й глибокого розуміння апаратної реалізації виробничої лінії.

2.3. Математична модель підсистеми зважування

Система зважування у складі виробничої лінії складається з електронного датчика SIWAREX та вагового модуля WP231 ETHERNET, інтегрованого в середовище TIA Portal і підключеного до ПЛК Siemens S7-1200. Датчик формує аналоговий сигнал, пропорційний масі деталі, а модуль виконує первинну обробку та передавання даних у систему керування.

Основні динамічні властивості такого вузла: інерційність (сигнал не формується миттєво через фільтрацію механічних коливань платформи); похибки вимірювання (шум, викликаний вібраціями конвеєра та електромагнітними завадами); обмеження за часом вибірки (дані зчитуються ПЛК із певною частотою, наприклад, 10–20 Гц).

Таким чином, модель має описати динаміку формування вагового сигналу при подачі на вагову платформу деталі відомої маси.

Вихідний сигнал вагового модуля yw(t) пропорційний масі деталі m(t), але з урахуванням інерційності системи:

$$\tau w dyw(t)dt + yw(t) = Kw\, m(t) + v(t)$$

де: τw – стала часу (відповідає швидкості реакції датчика), Kw – коефіцієнт підсилення (грами/В або інший масштаб), v(t) – шум вимірювання.
Після перетворення Лапласа отримаємо передаточну функцію:

$$Ww(s) = Yw(s)M(s) = Kw\tau ws + 1$$

Це аперіодична ланка першого порядку, яка добре описує процес фільтрації механічних коливань і поступового встановлення значення ваги.

Для ідентифікації параметрів можна використати експериментальні дані (див. SCADA PlantSCADA або лог-файли з SIWAREX).

Коефіцієнт підсилення:

$$Kw = yустmет$$

де ууст – усталене значення виходу датчика, mет – еталонна маса.

Стала часу визначається за відгуком на сходинкове збурення (поміщення еталонної деталі). Час τw – момент, коли сигнал досягає 63,2 % від усталеного значення. На рисунку 2.1 представлено математичну модель системи.

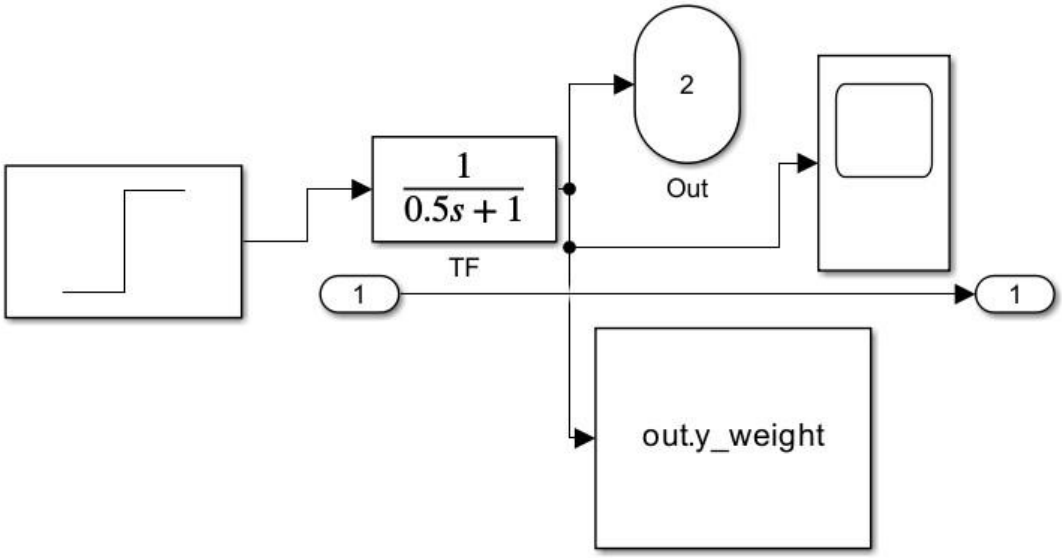


Рисунок 2.1 - Підсистема зважування

У Simulink модель підсистеми зважування побудована наступним чином:

- блок Step – імітація появи деталі на платформі (масове збурення);
- блок Transfer Fcn з параметрами Kw, τw;
- блок Band-Limited White Noise – імітація шуму вимірювань v(t);
- блок Scope або To Workspace – для аналізу реакції.

Очікуваний результат: перехідна характеристика з виходом на усталене значення; накладання шуму поверх сигналу; демонстрація фільтрації коливань системою.

На основі моделі можна зробити такі висновки:

- при малому значенні τw система швидко реагує, але погано фільтрує вібрації → можливі коливання сигналу;
- при великому τw фільтрація якісна, але час реакції на появу деталі зростає → зменшується продуктивність;
- оптимальне значення параметра τw забезпечує компроміс між швидкодією і точністю.

Таким чином, модель підсистеми зважування у вигляді аперіодичної ланки дозволяє відтворити реальні характеристики системи SIWAREX і визначити умови для оптимального налаштування вагового модуля в складі виробничої лінії.

Практичне застосування такої моделі дозволяє оптимізувати процес зважування в умовах потоку деталей.

Наприклад, за допомогою Simulink можна оцінити, при якій швидкості руху конвеєра система ще забезпечує стабільне визначення маси без перевантаження модуля WP231.

Крім того, у процесі дослідження можна моделювати випадкові збурення, що виникають через удари або вібрації конвеєра, і перевіряти ефективність різних фільтрів (Butterworth, Kalman тощо). Такий аналіз допомагає розробити алгоритми цифрової обробки сигналу, що підвищують точність вимірювань у промислових умовах.

Отримана модель є не лише теоретичною основою, а й практичним інструментом для калібрування вагових систем у складі автоматизованих виробничих комплексів.

2.4. Математична модель підсистеми термообробки

Підсистема термообробки у виробничій лінії складається з нагрівальної установки (лампи розжарювання), охолоджувального вентилятора та термопари для контролю температури.

Деталі рухаються крізь теплову зону конвеєром, де піддаються нагріву до заданого значення.

Основні динамічні властивості процесу: теплова інерційність – нагрів і охолодження відбуваються не миттєво, а з певною сталою часу; негативний зворотний зв’язок – вентилятор відводить частину тепла, знижуючи температуру; обмеження по температурі – система повинна підтримувати робочий діапазон, щоб уникнути перегріву.

Таким чином, підсистема термообробки є типовим об’єктом із повільною аперіодичною динамікою, що добре описується моделями теплового балансу.

Диференційне рівняння теплового балансу

Баланс енергії для камери термообробки можна записати у вигляді:

$$C\frac{dT(t)}{dt}=P_{in}(t)-Q_{out}(t)$$

де: C – еквівалентна теплоємність системи (деталь + камера), $P_{in}(t)$ – теплова потужність ламп, $Q_{out}(t)$ – теплові втрати у навколишнє середовище та охолодження вентилятором.

Втрати можна подати так:

$$Q_{out}(t)=hA\cdot(T(t)-T_{amb})+k_f u_f(t)$$

де: hA – коефіцієнт теплопередачі (конвекція у навколишнє середовище), T_{amb} – температура довкілля, k_f – коефіцієнт ефективності вентилятора, $u_f(t)$ – керуючий сигнал на вентилятор.

Тоді повне рівняння:

$$C\frac{dT(t)}{dt}=P_{in}(t)-hA\cdot(T(t)-T_{amb})-k_f u_f(t)$$

Передаточна функція

При лінеаризації біля робочої точки T0, отримаємо аперіодичну ланку:

$$\tau_{th}\cdot\Delta\dot{T}(t)+\Delta T(t)=K_{th}\cdot\Delta P_{in}(t)-K_f\cdot\Delta u_f(t)$$

де: $\tau_{th}=\frac{C}{hA}$ – теплова стала часу, $K_{th}=\frac{1}{hA}$ – коефіцієнт підсилення для нагріву, $K_f=\frac{k_f}{hA}$ – коефіцієнт охолодження від вентилятора.

У операторній формі:

$$G_{T,P}(s)=\frac{\Delta T(s)}{\Delta P_{in}(s)}=\frac{K_{th}}{\tau_{th}s+1}$$

Таким чином, вплив нагрівача і вентилятора можна моделювати як два входи до одного виходу (багатовходова система).

Оцінка параметрів

Для оцінки параметрів τ_{th}, K_{th}, K_f можна використати експериментальні дані з SCADA (журнали температури і потужності).

- Стала часу: визначається за часом досягнення 63 % приросту температури після ввімкнення нагріву.
- Коефіцієнт нагріву:

$$K_{th}=\frac{\Delta T_{уст}}{\Delta P_{in}}$$

де ΔТуст – усталене збільшення температури, ΔPin – приріст потужності ламп.

– Коефіцієнт охолодження вентилятора:

$$Kf=\Delta T_{уст}\Delta uf$$

На рисунку 2.2 представлено математичну модель системи.

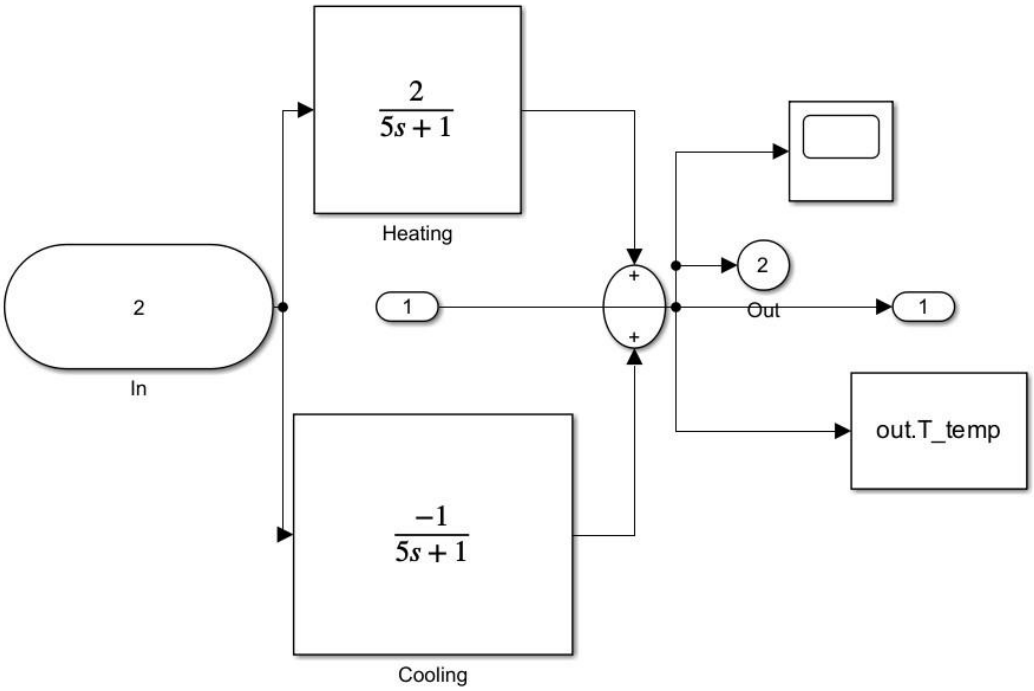


Рисунок 2.2 - Підсистема термообробки

Модель у Simulink будується за принципом:

- блок Step – подача теплової потужності ламп;
- блок Transfer Fcn для моделювання реакції камери;
- другий вхід – дія вентилятора (негативне підсилення);
- блоки Scope або XY Graph – для аналізу перехідних процесів.

Таким чином, підсистема термообробки описується аперіодичною динамічною моделлю з двома входами (нагрів і охолодження).

Її коректне моделювання дає змогу оптимально налаштувати керування температурою та уникнути перегріву деталей у виробничій лінії.

У процесі моделювання термообробки доцільно враховувати також теплові втрати через корпус установки та вплив температури довкілля. У

реальних умовах саме ці фактори часто спричиняють коливання температури навіть за стабільної потужності нагріву.

Крім класичного PID-регулювання, можна розглядати використання більш сучасних алгоритмів — наприклад, адаптивних або нечітких регуляторів (Fuzzy Logic Controller), що враховують нелінійність теплових процесів.

Додатково модель може бути розширена підсистемою контролю енергоспоживання, що дозволяє аналізувати ефективність роботи нагрівального елемента та знаходити оптимальні режими роботи для зменшення витрат електроенергії.

2.5. Математична модель підсистеми маркування (RFID-система)

У виробничій лінії для ідентифікації деталей використовується RFID-система, що складається зі зчитувачів SIMATIC RF180C та RF310R, інтегрованих у промислову мережу PROFINET, і транспондерів (міток), закріплених на деталях.

Принцип дії такий: при проходженні деталі крізь зону зчитування антенна система активує транспондер, виконує операцію читання/запису і передає дані в ПЛК. Особливості цього процесу: дискретність – операції читання/запису виконуються за певний цикл часу; затримка – між моментом появи деталі у зоні та отриманням результату зчитування існує час τ_{rfid}; імовірність помилки – через завади або кілька транспондерів у полі можуть виникати колізії (неуспішне зчитування).

Диференційне та дискретне представлення

Для спрощення аналізу RFID-підсистему можна представити як систему із затримкою та логічним виходом:

$$y_{rfid}(t)=K_{rfid}\cdot u_{rfid}(t-\tau_{rfid})+e(t)$$

де: $u_{rfid}(t)$– вхід (поява мітки у полі зчитування), $y_{rfid}(t)$ – вихід (успішне зчитування = 1, неуспішне = 0), τ_{rfid}– затримка операції, K_{rfid} – коефіцієнт успіху (ідеально = 1), $e(t)$ – випадковий процес помилок.

У операторній формі (для детермінованого випадку):

$$W_{rfid}(s)=K_{rfid}\, e^{-\tau_{rfid} s}$$

Передаточна функція з урахуванням затримки

Для моделювання в Simulink затримка τrfid може бути реалізована як транспортне запізнення:

$$W(s)=e-\tau rfids$$

Оскільки функція експоненціального запізнення незручна для частотного аналізу, часто використовують апроксимацію Паде:

$$e-\tau s\approx 1-\tau 2s1+\tau 2s$$

На рисунку 2.3 представлено математичну модель системи.

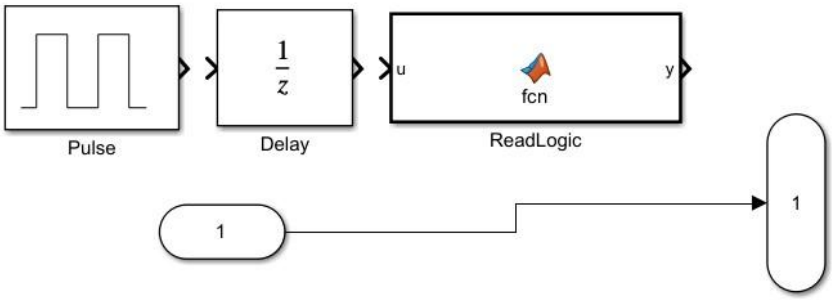


Рисунок 2.3 - Підсистема маркування

У середовищі Simulink RFID-систему можна реалізувати таким чином:

- блок Pulse Generator – модель появи деталей у зоні зчитування;
- блок Transport Delay – реалізація часу зчитування τrfid;
- блок Bernoulli Random Number – моделювання імовірності успіху/відмови;
- блок Logical Operator – поєднання сигналів (читання + успіх);
- блок Scope – відображення послідовності операцій зчитування.

Модель дозволяє змоделювати реальну ситуацію: не кожна деталь буде ідентифікована з першої спроби, іноді потрібне повторне зчитування або дублювання станцій.

Імітація роботи RFID-підсистеми в Simulink дозволяє оцінити:

- середній час ідентифікації деталі ;
- пропускну здатність системи ;
- ймовірність затримки всієї лінії у разі невдалого зчитування;
- ефективність різних стратегій.

Таким чином, RFID-система у моделі описується як дискретний стохастичний блок із транспортним запізненням. Це дозволяє інтегрувати її у загальну модель виробничої лінії та аналізувати поведінку лінії в умовах можливих збоїв.

У практичних експериментах з RFID-системами особливу роль відіграє орієнтація транспондерів і швидкість руху деталей. При надто великій швидкості або неправильному положенні мітки ймовірність успішного зчитування суттєво знижується.

Модель, побудована в Simulink, дає змогу оцінити ці фактори й запропонувати технічні рекомендації — наприклад, оптимальну відстань між антенами, мінімальний час перебування мітки в полі та кількість повторних зчитувань.

Крім того, результати моделювання можуть бути використані для перевірки стратегії обробки помилок у ПЛК, коли відсутність зчитування не зупиняє лінію, а ініціює повторний цикл. Це підвищує стійкість усієї системи до зовнішніх завад.

2.6. Інтегрована модель виробничої лінії

Виробнича лінія складається з послідовно з’єднаних підсистем:

1. Зважування — визначає масу деталі та передає значення у ПЛК для прийняття рішення.
2. Термообробка — здійснює нагрів та контроль температури відповідно до технологічних параметрів.
3. Маркування (RFID) — виконує ідентифікацію та запис даних про деталь.

Математичне моделювання окремих вузлів (розділи 2.3–2.5) дозволяє поєднати їх у єдину модель виробничого процесу. Така інтеграція забезпечує можливість оцінювати динамічні характеристики всієї лінії, а не лише її окремих елементів.

Структурна схема моделі

Інтегрована система подана у вигляді блок-схеми. Вхід системи — потік деталей (модельований сигналом *Pulse Generator* або *Step Sequence* у Simulink).

Підсистема зважування — аперіодична ланка з коефіцієнтом підсилення Kw та сталою часу τw:

$$Ww(s) = Kw\tau ws + 1$$

Підсистема термообробки — аперіодична ланка з двома входами (нагрів і охолодження):

$$WT(s) = Kth\tau ths + 1 - Kf\tau ths + 1$$

Підсистема маркування (RFID) — дискретна система із затримкою:

$$Wrfid(s) = Krfid\, e - \tau rfids$$

Вихід системи — оброблена ідентифікована деталь із прикріпленими даними.

Усі підсистеми з'єднуються в єдину схему, де вихід одного блоку є входом наступного. Для цього застосовується *Subsystem* у Simulink, що дозволяє створювати ієрархічні блоки.

Динамічна взаємодія підсистем

Зважування визначає масу і передає сигнал у систему керування. Якщо маса відповідає нормі, деталь рухається далі.

У зоні термообробки система реагує на сигнал про запуск нагріву, температура описується аперіодичною динамікою.

Далі RFID-система ідентифікує деталь, формуючи затримку у загальному потоці виробництва.

Таким чином, інтегрована модель враховує як безперервні процеси (зважування, нагрів), так і дискретні операції (RFID-ідентифікація).

Інтегрована модель дозволяє: виявляти «вузькі місця» (наприклад, надмірні затримки у зважуванні чи RFID); прогнозувати продуктивність лінії за різних параметрів; перевіряти ефективність регуляторів (PID для температури, фільтрів для зважування); досліджувати поведінку лінії у разі збоїв (некоректне зчитування мітки, перегрів деталі, шум у сигналі датчика).

Особливу цінність інтегрована модель має для проведення віртуальних експериментів. У середовищі MATLAB/Simulink можна змінювати параметри окремих підсистем і спостерігати, як це впливає на загальну продуктивність. Наприклад, можна змоделювати ситуацію збільшення швидкості конвеєра або

затримку RFID-зчитування і оцінити, чи не призведе це до накопичення деталей у черзі.

Також модель може використовуватися для навчання операторів — у вигляді симулятора виробничої лінії, де можна без ризику відпрацьовувати режими роботи, тестувати сценарії збоїв і перевіряти алгоритми резервного керування.

Таким чином, інтегрована модель виконує функції як аналітичного, так і навчально-виробничого інструменту.

2.7. Аналіз перехідних процесів і характеристик системи

Аналіз перехідних процесів є ключовим етапом дослідження інтегрованої моделі виробничої лінії. Він дозволяє оцінити: час реакції підсистем (швидкодія вагового модуля, інерційність нагріву, затримка RFID); якість регулювання (точність підтримання температури, стабільність сигналу ваги, стійкість системи до шумів); загальну продуктивність лінії (час проходження деталі від входу до виходу).

Для цього використовуються класичні показники теорії автоматичного керування: час установлення $t_{уст}$, перерегулювання σ, амплітуда коливань, стійкість системи та вплив запізнень.

Перехідні процеси у підсистемі зважування

Сигнал від SIWAREX можна представити як відгук аперіодичної ланки першого порядку.

- При появі деталі з масою mет вихідна характеристика описується:

$$yw(t) = Kwmет(1 - e - \frac{t}{\tau w})$$

- Час установлення:

$$tуст \approx 3\tau w$$

- Якщо τw занадто малий → швидка реакція, але зростає чутливість до шуму.
- Якщо τw завеликий → згладжування шуму, але збільшується затримка результату, що знижує продуктивність.

Перехідні процеси у підсистемі термообробки

Температурна динаміка описується рівнянням теплового балансу:

$$T(t) = Tуст(1 - e - \frac{t}{\tau th})$$

- Час установлення:

$$tуст \approx 3\tau th$$

У разі різкого вимкнення вентилятора спостерігається перерегулювання (короткочасний перегрів). Використання PID-регулятора дозволяє зменшити перерегулювання та стабілізувати температуру навколо робочої точки.

Перехідні процеси у підсистемі RFID

RFID-модуль моделюється як система із запізненням і ймовірністю успішного зчитування.

- Затримка:

$$\tau rfid = tчитання$$

- Імовірність успіху:

$$psucc = NуспNзаг$$

де Nусп – кількість успішних зчитувань, Nзаг – кількість спроб.

Графіки у Simulink (Bernoulli Random Number + Scope) показують серію сигналів 1/0, що відповідають успішним і невдалим операціям.

Важливий показник — середній час ідентифікації:

$$tcp = \tau rfidpsucc$$

Об’єднавши результати трьох підсистем, можна оцінити динамічну поведінку всієї лінії.

1. Загальний час проходження деталі:

$$tзаг = tзв + tth + trfid$$

де tзв – час реакції вагової системи, tth – час термообробки, trfid – час ідентифікації.

2. Чутливість до шумів: вагова система генерує випадкові коливання; необхідно налаштувати цифровий фільтр у Simulink.

3. Вплив запізнень: RFID вносить випадкові затримки, що може знизити продуктивність.
4. Стійкість:
   - підсистема зважування та термообробки — стабільні (аперіодичні ланки),
   - затримка RFID може стати критичною при зростанні потоку деталей → потрібно дублювати станції зчитування.

Підсистема зважування має знайти баланс між швидкодією і якістю фільтрації шумів. Підсистема термообробки демонструє повільну аперіодичну динаміку з можливим перерегулюванням, що компенсується PID-регулятором.

Підсистема RFID вносить дискретні затримки й стохастичні збої, що потрібно враховувати при синхронізації лінії. Інтегрована модель дозволяє прогнозувати продуктивність і стійкість лінії при різних параметрах та визначати вузькі місця процесу. Окрім класичних показників часу реакції та стійкості, доцільно також досліджувати енергетичні характеристики системи — зокрема, споживану потужність під час перехідних процесів.

Це дозволяє оцінити не лише динамічну ефективність, а й економічність керування.

У сучасних виробничих комплексах аналіз перехідних процесів часто доповнюють методами спектрального аналізу сигналів, що допомагає виявити приховані коливання та резонансні частоти.

Результати аналізу є базою для подальшої оптимізації параметрів регуляторів і забезпечують стабільну роботу системи навіть у разі змін навантаження або зовнішніх умов.

2.8. Практична реалізація в MATLAB/Simulink

MATLAB/Simulink надає зручні інструменти для побудови моделей виробничих процесів. Кожна підсистема (зважування, термообробка, RFID) була реалізована у вигляді окремого Subsystem, що спрощує інтеграцію у єдину модель.

Модель підсистеми зважування

Модель реалізована як аперіодична ланка першого порядку з коефіцієнтом підсилення Kw і сталою часу τw.

Параметри Simulink-блоку Transfer Fcn:

$$\mathrm{Ww(s)} = \mathrm{Kw\tau ws} + 1$$

Для врахування шуму підключено блок Band-Limited White Noise. Вхід – *Step input* (поява деталі масою mет). Вихід – сигнал yw(t), що демонструє поступове встановлення значення ваги.

Графік у Scope показує наростання сигналу до усталеного рівня та коливання через шум. На рисунку 2.4 зображено графік підсистеми зважування

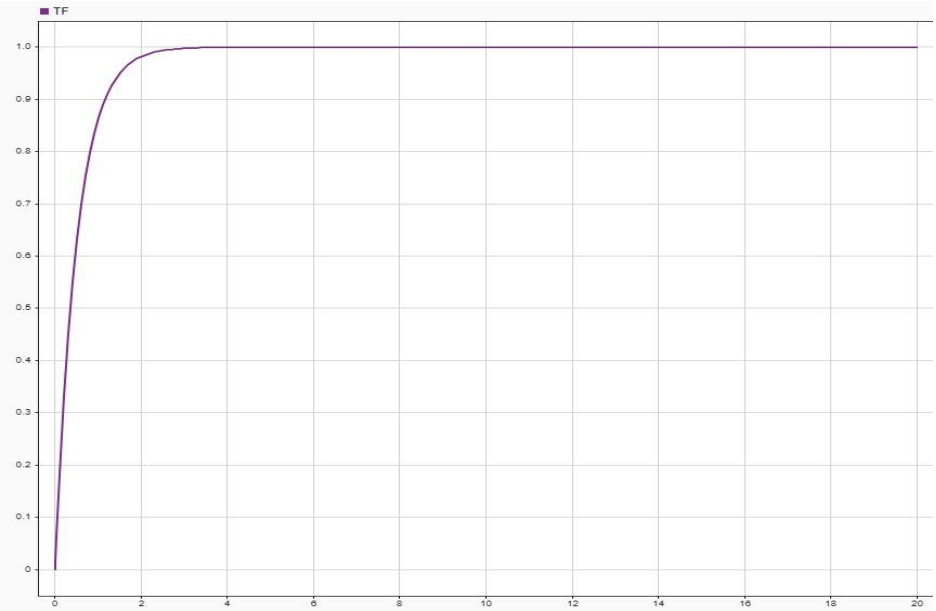


Рисунок 2.4 - Графік підсистеми зважування

Модель підсистеми термообробки

Теплова динаміка реалізована через Transfer Fcn з двома входами: потужність нагріву Pin і швидкість вентилятора ufu.

$$\mathrm{GT(s)} = \mathrm{Kth\tau ths} + 1 - \mathrm{Kf\tau ths} + 1$$

PID Controller застосований для стабілізації температури навколо заданої точки. Вхід – сигнал-завдання температури Тзад.

Вихід – керуючий сигнал для нагрівача.

На рисунку 2.5 представлено рафік підсистеми термообробки

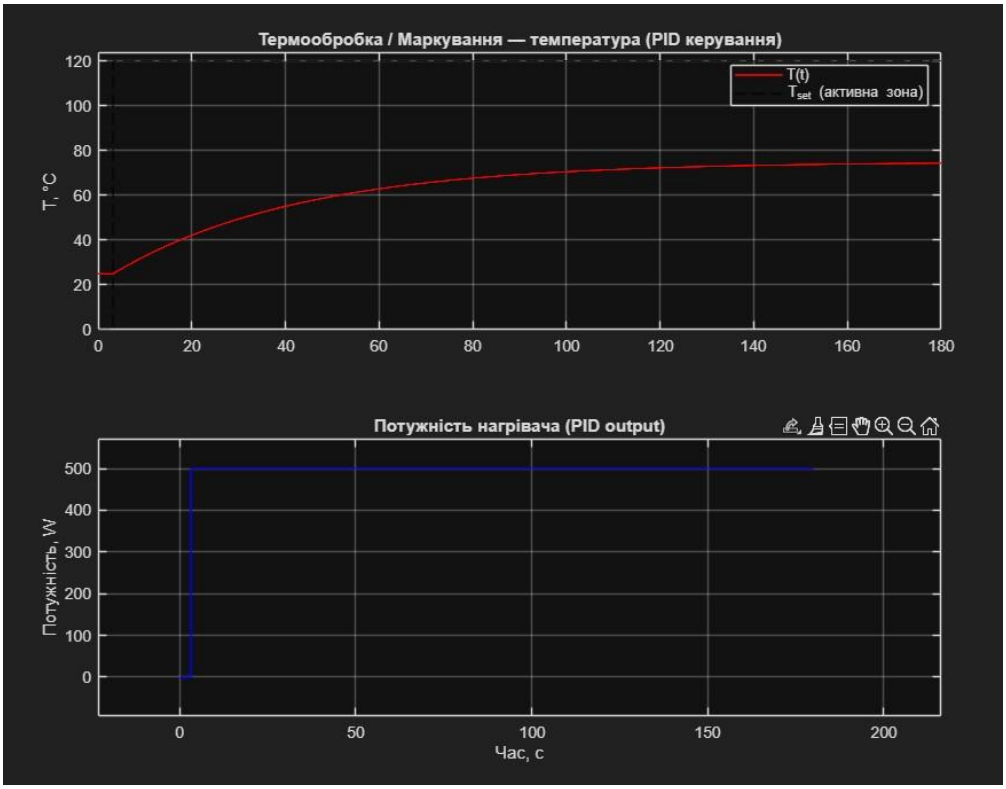


Рисунок 2.5. Графік підсистеми термообробки

Модель RFID-підсистеми

RFID-модуль реалізовано як дискретний блок:

- Pulse Generator – імітація появи деталі;
- Transport Delay – час зчитування τrfid;
- Bernoulli Random Number – ймовірність успішного зчитування psucc;
- Logical AND – поєднання сигналів "наявність деталі" і "успіх зчитування".

Вихід – послідовність сигналів 1/0, що відповідають успішним та невдалим операціям.

На рисунку 2.6 зображено графік підсистеми маркування

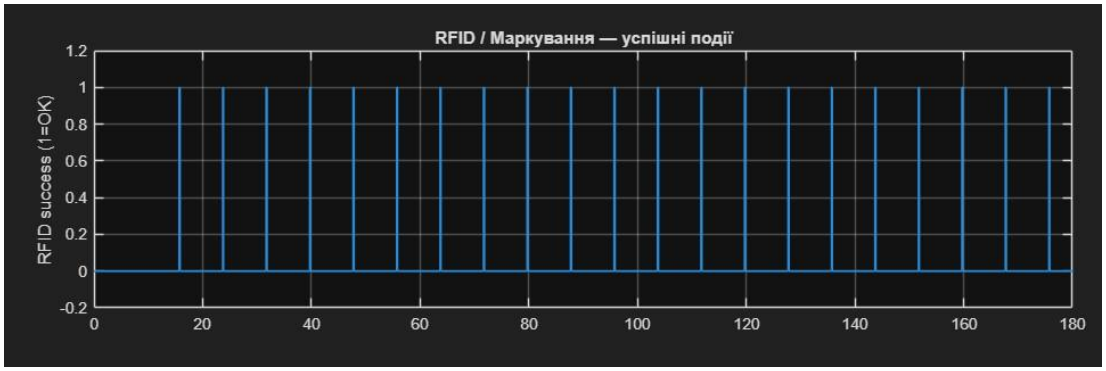


Рисунок 2.6 - Графік підсистеми маркування

На рисунку 2.7 зображено графік розподілу часу обробки деталей

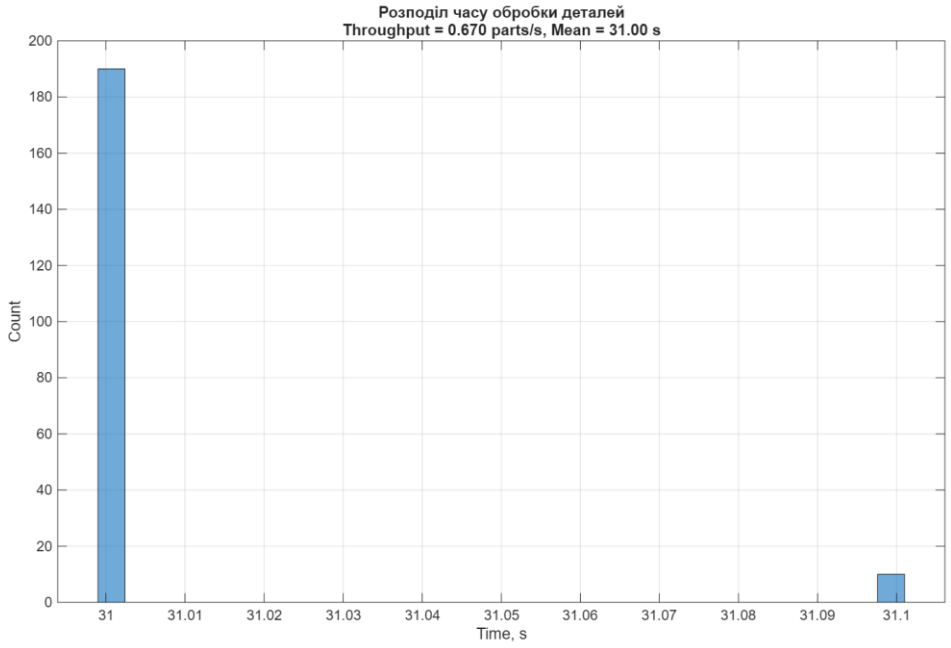


Рисунок 2.7 - Графік розподілу часу обробки деталей

Інтегрована модель виробничої лінії

Усі підсистеми були об’єднані у єдину Simulink-модель на рисунку 2.8:

- вхід – генератор потоку деталей (*Step Sequence*);
- послідовність обробки – Weighing → Thermal Processing → *RFID*;
- вихід – ідентифікована деталь з параметрами ваги та температури.

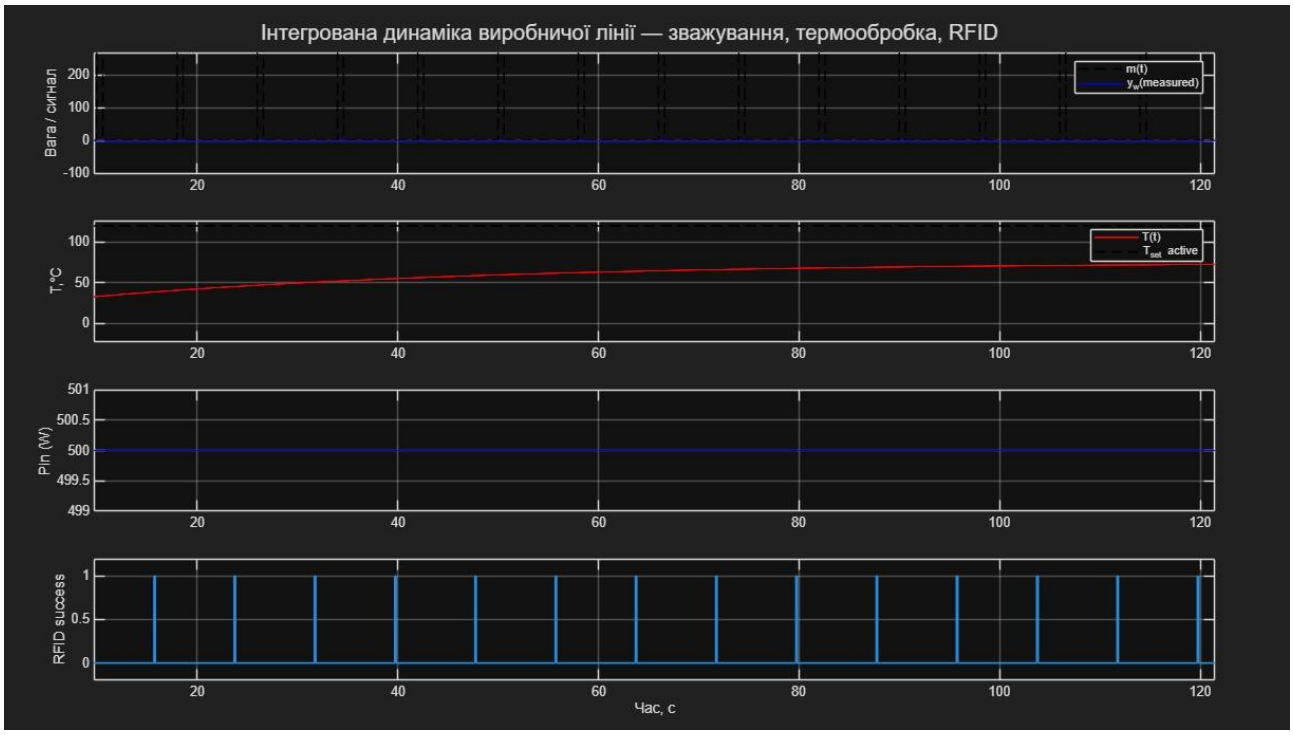


Рисунок 2.8 - Графік інтегрованої динаміки виробничої лінії

2.9. Числові значення параметрів, використані в імітаційному моделюванні

Наведені значення були використані для моделювання динамічної роботи підсистем виробничої лінії (підсистема зважування, підсистема термообробки з PID-регулюванням, RFID-підсистема — маркування/зчитування).

Значення вибрані наближено відповідно до типової промислової практики і пристосовані для демонстрації перехідних процесів, затримок і стохастичної поведінки RFID.

1. Загальні параметри моделювання
   - крок інтегрування: Δt=0.01 с;
   - тривалість моделювання: T_{end}=180 с;
   - інтервал появи деталей: T_{arr}=8 с;
   - час перебування на ваговій платформі: t_{weigh}=0.6 с;
   - транспортний час від ваги до печі: t_{trans}=1.2 с;
   - час у зоні термообробки (маркування): $t_{thermal}$=12 с;
   - затримка перед RFID (після печі): t_{rfid_delay}=0.5 с.
2. Параметри підсистеми зважування
   - статичне підсилення (чутливість): Kw=1.0×10^{-3}(відносні одиниці, напр. В/г);
   - стала часу датчика ваги: τ_w=0.25 с;
   - еталонна маса для тестів: $m_{ет}$=500 г;
   - рівень вимірювального шуму (фільтрований): приблизно 2.5×10^{-3} відносних од.
3. Параметри підсистеми термообробки / маркування
   - еквівалентна теплоємність: C=400 Дж/°C;
   - коефіцієнт тепловіддачі: hA=10 Вт/°C;
   - стала часу теплової підсистеми: τ_{th}=C/hA=40 с;
   - коефіцієнт підсилення температури по потужності: K_{th}=1/hA=0.1 °C/W;
   - максимальна потужність нагрівача, що використана в моделі: P_{max} =500 Вт;

- цільова температура маркування: T_{set}=120∘C.

4. Параметри RFID / маркування (дискретні події)
   - час однієї спроби читання/запису: τ_{rfid}=0.05 с;
   - час запису/маркування : t_{write}=0.12 с;
   - ймовірність успішного зчитування/запису при одній спробі: p_{succ} =0.90;
   - максимальна кількість повторних спроб: N_{max}=6.

Практична реалізація інтегрованої моделі в MATLAB/Simulink підтвердила працездатність математичних моделей, розроблених у підрозділах 2.3–2.5. Модульна побудова дозволяє гнучко змінювати параметри та досліджувати вплив різних факторів на роботу виробничої лінії. Особливо важливим є можливість врахування випадкових процесів у RFID-системі, що надає реалістичності моделі. Таким чином, створена модель є інструментом для подальшої оптимізації процесів і перевірки алгоритмів керування до впровадження на реальному обладнанні. Після успішного тестування моделі в Simulink результати можуть бути використані для створення цифрового двійника виробничої лінії в реальному часі. Це передбачає інтеграцію моделі з контролером S7-1200 через Simulink Real-Time або OPC Server, що дозволяє відстежувати фактичні параметри обладнання та коригувати керування на основі моделювання. Крім того, розроблена модель може бути застосована для подальшого дослідження оптимізації виробничого графіка, прогнозування зношення елементів системи та оцінки впливу різних сценаріїв навантаження. Таким чином, практична реалізація моделі в MATLAB/Simulink є не лише демонстрацією теоретичних результатів, а й важливим кроком до впровадження концепції «розумного виробництва» (Smart Manufacturing) на базі цифрових технологій.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було сформовано цілісну методологічну основу для побудови математичної моделі виробничої лінії та синтезу алгоритмів її керування. На основі аналізу фізичних характеристик обладнання, представленого у розділі 1, були визначені ключові динамічні властивості кожної підсистеми – зважування, термообробки та маркування – та обґрунтовано вибір відповідних математичних структур для їх опису. Це дало можливість перейти від загального технологічного опису до формалізованих моделей, придатних для подальшої ідентифікації та оптимізації.

Кожна підсистема була представлена у вигляді окремого функціонального модуля: ваговий вузол описано як аперіодичну ланку першого порядку з урахуванням шумів, теплова камера – як інерційний об’єкт із двома керуючими впливами, а RFID-підсистема – як дискретний стохастичний процес із транспортним запізненням. Такий підхід забезпечив можливість адекватно відтворити різнорідну природу процесів, що поєднують безперервні й дискретні елементи, а також врахувати вплив збурень і невизначеностей, характерних для реального виробництва.

У межах розділу також було сформовано загальні принципи моделювання, серед яких: фізично обґрунтована простота, модульність, можливість ідентифікації параметрів за даними PLC/SCADA, урахування нелінійних ефектів там, де вони суттєво впливають на поведінку системи. Особливу увагу приділено питанням верифікації та валідації моделей, а також вибору рівня деталізації, що дозволяє зберегти баланс між точністю та обчислювальною ефективністю.

Реалізація моделей у середовищі MATLAB/Simulink продемонструвала можливість наочно відтворити роботу кожної підсистеми окремо та в складі інтегрованої лінії. Це забезпечило інструмент для аналізу перехідних процесів, оцінки стійкості, продуктивності, впливу затримок та шумів, а також тестування різних алгоритмів керування (зокрема PID-регулювання у тепловій частині). У процесі моделювання стало очевидно, що інтеграція безперервних та дискретних

компонентів відіграє ключову роль у відтворенні реальних умов роботи виробничої лінії.

Загалом, результати розділу 2 створюють фундамент для подальших досліджень. Побудовані математичні моделі можуть використовуватися не лише для аналізу та оптимізації параметрів керування, а й для розроблення цифрового двійника виробничої системи, що відкриває можливості для прогнозування стану обладнання, оптимізації технологічних режимів і впровадження елементів «розумного виробництва». Отриманий інструментарій дозволяє оцінювати поведінку лінії до її фізичної реалізації, знижуючи ризики помилок і підвищуючи ефективність упровадження автоматизованих систем у промислових умовах.

РОЗДІЛ 3
ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

3.1 Загальна архітектура програмно-технічного комплексу

Програмно-технічна реалізація автоматизованої виробничої лінії зважування, термообробки та маркування деталей ґрунтується на інтеграції сучасних апаратних засобів, промислових контролерів та систем візуалізації, що разом утворюють єдиний комплекс управління технологічним процесом. Архітектура системи побудована за принципом трирівневої ієрархічної моделі, яка є типовою для сучасних комп'ютерно-інтегрованих виробничих систем і забезпечує оптимальний розподіл задач, надійність та масштабованість.

Польовий рівень (Field Level) є основою всієї системи автоматизації, оскільки забезпечує безпосередню взаємодію з виробничим обладнанням. Саме на цьому рівні відбувається первинний збір технологічної інформації та виконання команд керування, що надходять від контролерів верхнього рівня.

До складу польового рівня входять такі апаратні елементи:

- Ваговий модуль SIWAREX — забезпечує точне вимірювання маси заготовки, виконуючи фільтрацію сигналів та калібрування. Він є критично важливим для прийняття рішення про відповідність деталі вимогам виробництва та для подальшої маршрутизації.
- Термопара та модуль нагріву термічної зони — здійснюють контроль та стабілізацію температурного режиму у процесі термообробки. Значення температури передається у контролер для подальшої обробки регулятором PID.
- Оптичні датчики OGP100 — здійснюють виявлення наявності деталей у певних зонах транспортної системи, забезпечуючи синхронізацію руху та підвищуючи рівень безпеки.
- RFID-зчитувач RF180C у поєднанні з модулем SIMATIC IOT2000 — забезпечує ідентифікацію кожної деталі, зчитування

унікальних тегів, формування бази даних проходження деталі через технологічні етапи та запис параметрів термообробки і зважування.

- Крокові двигуни та електроприводи — відповідають за позиціонування маніпулятора та рух конвеєрної стрічки. Керування двигунами забезпечується спеціальними драйверами, а зворотний зв'язок забезпечує коректність переміщень та синхронність технологічних операцій.

Польовий рівень забезпечує формування первинної інформації про стан технологічної лінії та є основою для реалізації логіки керування на рівні PLC.

Другим рівнем архітектури є рівень керування, який реалізовано на базі трьох промислових контролерів Siemens S7-1200 (CPU 1215C). Такий підхід забезпечує модульність системи, підвищує надійність та дозволяє виконувати паралельну обробку незалежних технологічних процесів. Кожний контролер відповідає за певний функціональний модуль:

- PLC №1 — зона зважування. Здійснює збір даних із вагового модуля SIWAREX, виконує алгоритми фільтрації, порівняння з граничними значеннями та прийняття рішення про подальшу маршрутизацію деталі.
- PLC №2 — зона термообробки. Реалізує PID-регулювання температури, контроль часу перебування деталі у печі, захист від перегріву та керування нагрівачами.
- PLC №3 — зона маркування та маніпулятори. Відповідає за роботу RFID-зчитувача, обробку унікальних ідентифікаторів, запис технологічних даних на мітку, а також за керування кроковими двигунами робота, який здійснює позиціонування деталі перед маркуванням.

Взаємодія між PLC здійснюється через промислову мережу PROFINET, що забезпечує високу швидкість обміну даними (до 1 мс), низькі затримки та можливість діагностики у реальному часі. Комунікацію між контролерами підтримують комутатори Siemens CSM 1277, які виконують роль центрального мережевого вузла.

Системний рівень моніторингу та візуалізації. На верхньому рівні архітектури розташована система моніторингу та керування — PlantSCADA 2023, яка забезпечує комплексну візуалізацію технологічного процесу, створення операторських екранів, архівування змінних, а також фіксацію подій і аварійних ситуацій.

Основні функції системи PlantSCADA:

- відображення стану обладнання в реальному часі;
- візуальний контроль зон зважування, термообробки та маркування;
- формування та перегляд трендів температури, маси й інших ключових параметрів;
- ведення журналів подій та аварій;
- віддалене керування елементами лінії;
- забезпечення безпечного доступу операторів згідно з рівнем прав.

Для взаємодії SCADA з PLC використовується проміжний комунікаційний сервер KEPServerEX, який завдяки драйверу Siemens TCP/IP Ethernet забезпечує стабільний обмін даними у форматах OPC DA та OPC UA. Використання KEPServerEX дозволяє спростити інтеграцію та забезпечити незалежність SCADA від конкретної моделі контролерів.

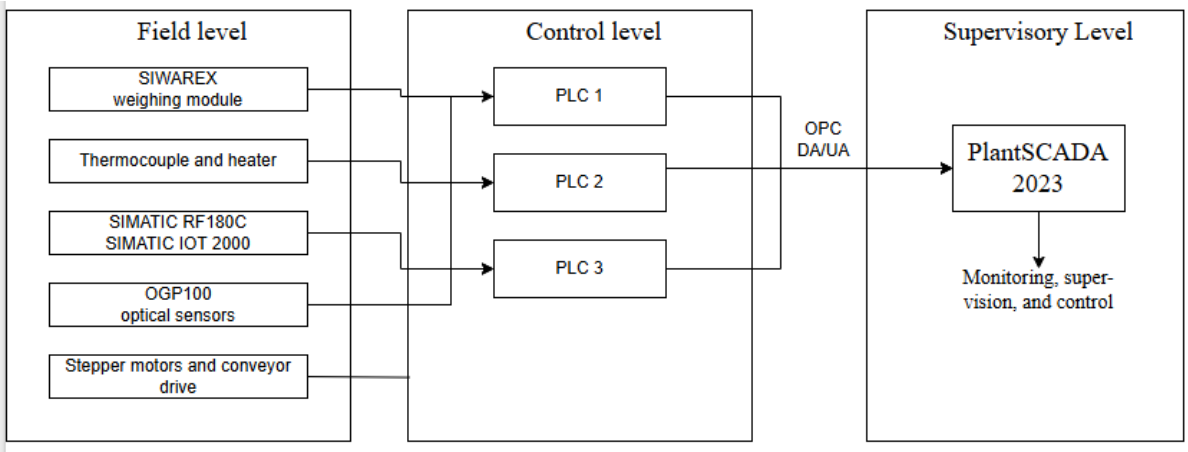


Рисунок 3.1 – Рівні пристроїв

Логічна структура функціональних підсистем

Архітектура системи складається з трьох функціонально завершених підсистем, кожна з яких відповідає за окрему частину технологічного процесу:

– Підсистема зважування. Реалізує збір та обробку вагових даних, виконує порівняння з технологічними нормами та визначає подальший маршрут деталі: на термообробку або в секцію браку.
– Підсистема термообробки. Стабілізує температурний режим, здійснює PID-регулювання, контролює час перебування заготовки у зоні нагріву та забезпечує аварійний захист від перегріву.
– Підсистема маркування. Забезпечує ідентифікацію деталей, зберігає та записує технологічні параметри на RFID-мітку, а також здійснює керування маніпулятором.

Усі три підсистеми інтегровані між собою за допомогою мережі PROFINET і об’єднані в єдиний візуальний комплекс PlantSCADA, що забезпечує централізоване управління та діагностику у режимі реального часу. Структурна схема зображена виробничої лінії на рисунку 3.2.

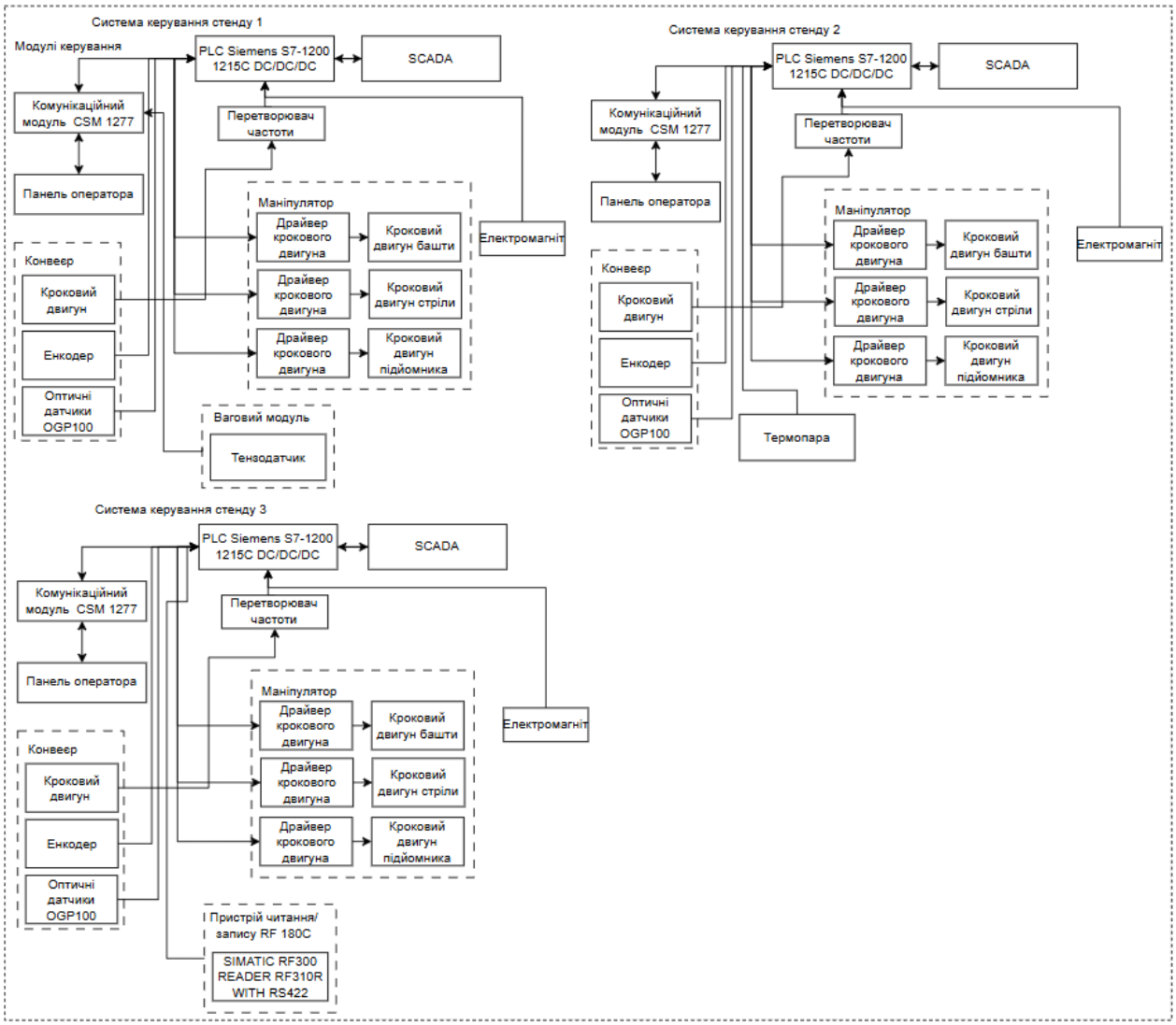


Рисунок 3.2 – Структурна схема

У межах багаторівневої архітектури Industry 4.0 саме рівень пристроїв формує основу всієї автоматизованої системи, оскільки на цьому етапі виникають первинні дані про стан технологічного обладнання та здійснюється прямий вплив на виконавчі механізми. Для виробничої лінії, що включає етапи зважування, термообробки та маркування деталей, цей рівень відповідає за обробку сигналів датчиків, управління силовими компонентами та передачу вимірювальної інформації на вищі рівні керування та моніторингу.

Центральним елементом управління є програмований логічний контролер сімейства Siemens S7-1200. У реалізованій конфігурації застосовується модель CPU 1215C, яка має достатній функціональний резерв для обробки дискретних та аналогових каналів, необхідних для роботи з ваговими перетворювачами, температурними датчиками, приводами транспортної системи та модулем маркування. Контролер виконує такі функції:

- приймання даних від сенсорів маси, температури й положення елементів механізмів;
- генерування команд для електродвигунів, нагрівачів, виконавчих механізмів та вузла маркування;
- реалізація алгоритмів регуляції температури у камері термообробки та стабілізації режимів;
- обробка технологічних переходів та подій у реальному часі;
- передача структурованих і підготовлених даних до SCADA-рівня та OPC UA-сервера.

Для роботи з аналоговими сигналами застосовується модуль SM1234, який підтримує підключення перетворювачів струму та напруги, а також термопар. Завдяки цьому забезпечується можливість інтегрування високоточних вагових модулів і температурних сенсорів без необхідності змінювати базову конфігурацію контролера.

Архітектура підключення обладнання на рівні пристроїв містить такі ключові елементи на рисунку 3.3:

- клемні блоки XT1 для підведення трифазної напруги силового обладнання;

- автоматичні вимикачі QF1–QF3, що забезпечують захист силових контурів;
- частотний перетворювач SINAMICS G120, який керує приводами транспортера та виконує точне регулювання швидкості;
- електродвигуни потужністю 0,12–0,25 кВт, призначені для транспортування деталей між технологічними модулями;
- аналогові температурні та вагові датчики, інтегровані до PLC через модуль SM1234.

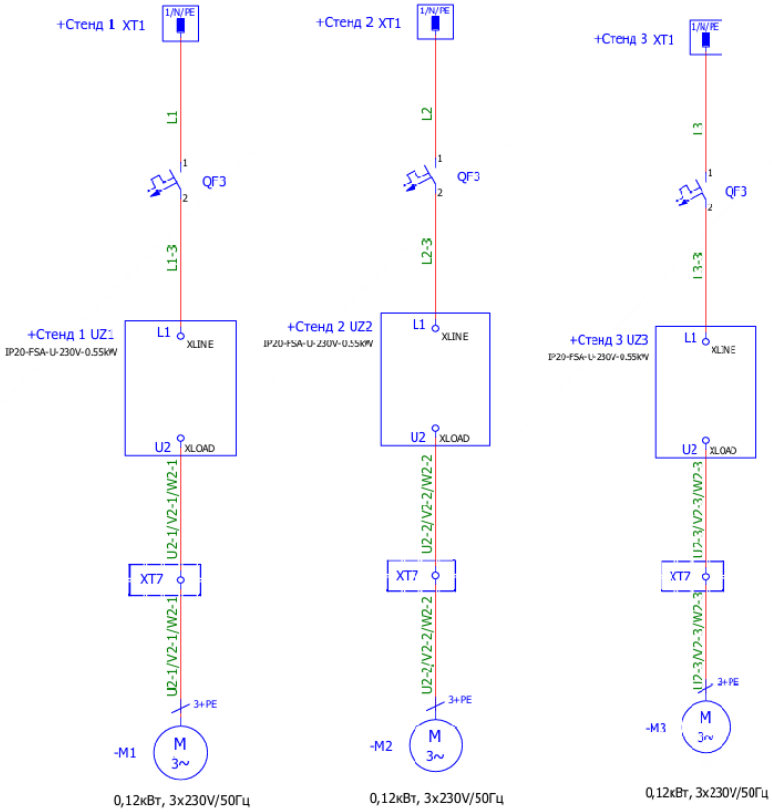


Рисунок 3.3 – Принципова схема живлення та керування двигуном

Модуль SINAMICS G120 оснащений інтелектуальним блоком керування з підтримкою PROFINET, що забезпечує високошвидкісну взаємодію з PLC, розширені можливості діагностики та точність керування приводами.

Живлення системи формується за допомогою окремих джерел на рисунку 3.4:

- PM1207 (24 В DC) — для підживлення PLC та модулів вводу/виводу;
- LOGO!Power 5 В — для малопотужних сенсорів та електроніки маркувального вузла;

– PSU100D (24 В DC) — для живлення периферійних виконавчих механізмів.

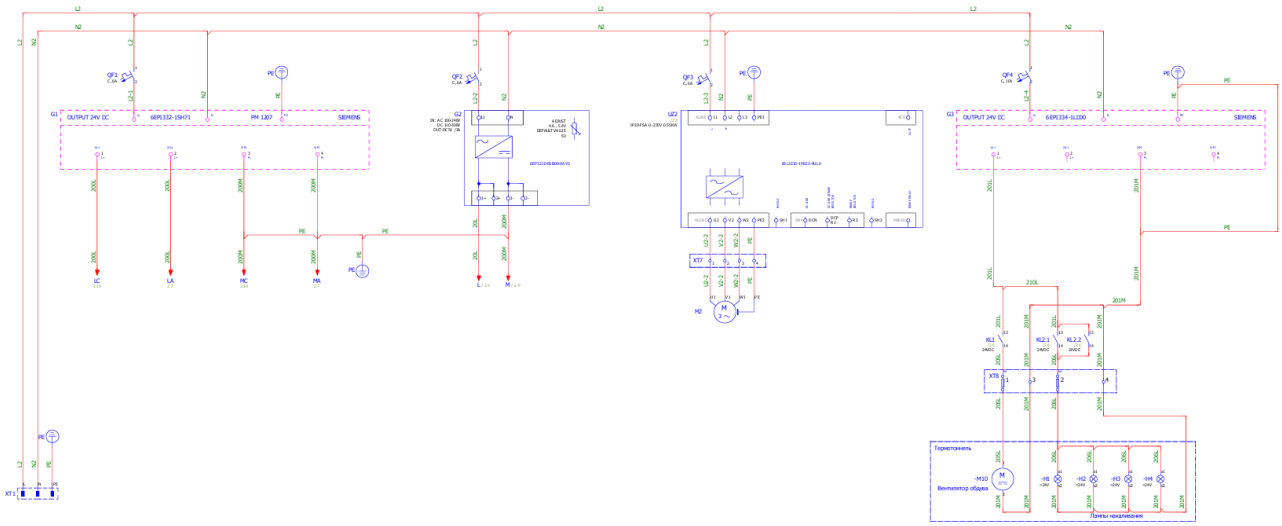


Рисунок 3.4 - Принципова схема живлення

Комунікація між пристроями забезпечується модулем CSM1277, який формує локальну мережу PROFINET для взаємодії PLC, приводів, датчиків та інженерної станції на рисунку 3.5. На польовому рівні використовується протокол PROFINET, що гарантує синхронність, оперативність і діагностичне забезпечення усіх компонентів у режимі реального часу.

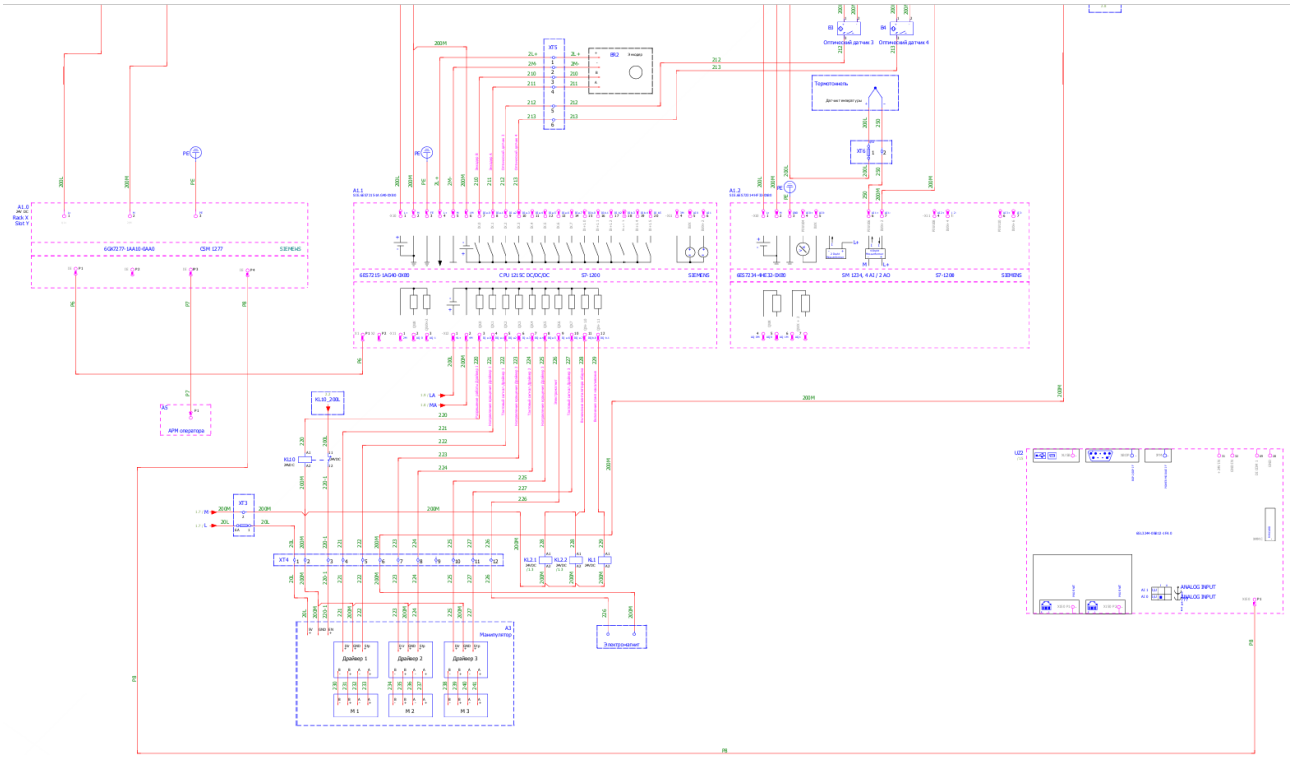


Рисунок 3.5 - Принципова схема стенду 2

Передача даних з контролера на рівень SCADA та IoT-інтеграції здійснюється через OPC UA. Використання цього протоколу забезпечує:

- незалежність від платформи та операційної системи;
- підтримку сучасних криптографічних механізмів захисту;
- масштабованість при розширенні складу обладнання;
- здатність обробляти значні обсяги даних;
- просту інтеграцію з KEPServerEX та PlantSCADA.

Таким чином, рівень пристроїв у розробленій системі формує технічну основу автоматизації, забезпечуючи збір даних, управління виконавчими механізмами та надійну комунікацію з вищими рівнями виробничої архітектури. Комбінація PROFINET на польовому рівні та OPC UA для міжсистемної інтеграції дозволяє досягти високої гнучкості, безпеки та відповідності принципам Industry 4.0.

3.2 Функціональний огляд середовища автоматизації TIA Portal

Інженерне середовище Siemens TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) є базовою платформою, у якій здійснюється розроблення, налагодження та тестування програмного забезпечення для контролера Siemens S7-1200, що використовується в системі автоматизації виробничої лінії зважування, термообробки та маркування деталей. Цей програмний комплекс об’єднує інструменти конфігурації обладнання, створення мережевої інфраструктури, розроблення алгоритмів керування та організації обміну даними з вищими рівнями системи — SCADA, OPC UA-сервером та середовищем візуалізації.

Початковим етапом роботи у TIA Portal є створення нового проекту та додавання до нього контролера відповідної моделі. У рамках даної системи застосовується SIMATIC S7-1200 CPU 1215C, що має розширений набір апаратних функцій і широкий спектр підтримуваних інтерфейсів зв’язку на рисунку 3.6. Після додавання контролера виконується його параметрування: задається IP-адреса пристрою, налаштовується PROFINET-з’єднання та вмикаються необхідні комунікаційні сервіси на рисунку 3.7. Коректне мережеве

конфігурування забезпечує стабільну взаємодію між PLC, частотними перетворювачами, ваговими модулями та SCADA-системою.

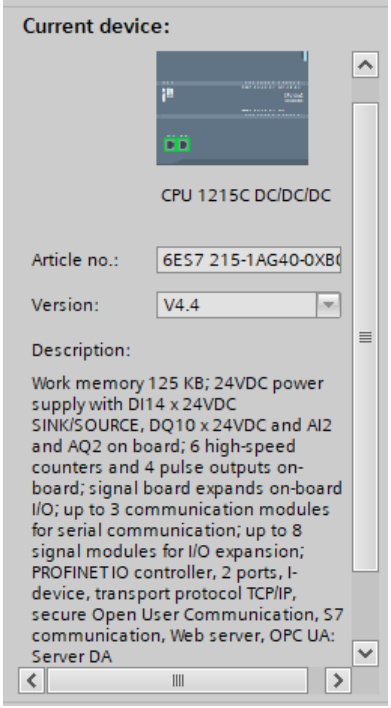


Рисунок 3.6 – Контролер SIMATIC S7-1200 CPU 1215C

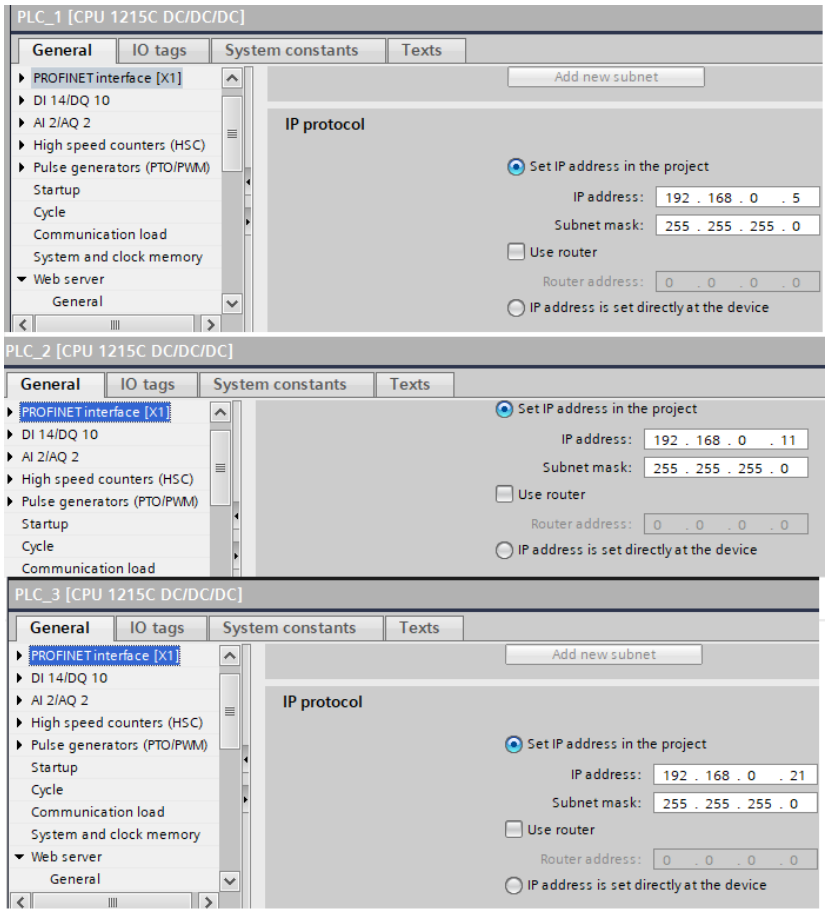


Рисунок 3.7 - IP-адреса пристрою

Однією з ключових можливостей TIA Portal є вбудована підтримка OPC UA Server, який використовується для передачі технологічних даних до KEPServerEX, а також для інтеграції з системою PlantSCADA. У параметрах CPU активується OPC UA-інтерфейс, додається необхідний сертифікат безпеки та визначаються змінні, які будуть доступні для зовнішніх клієнтів на рисунку 3.8. Таке рішення забезпечує уніфікований доступ до інформації з різних рівнів системи — від польового обладнання до програмних платформ візуалізації та аналітики.

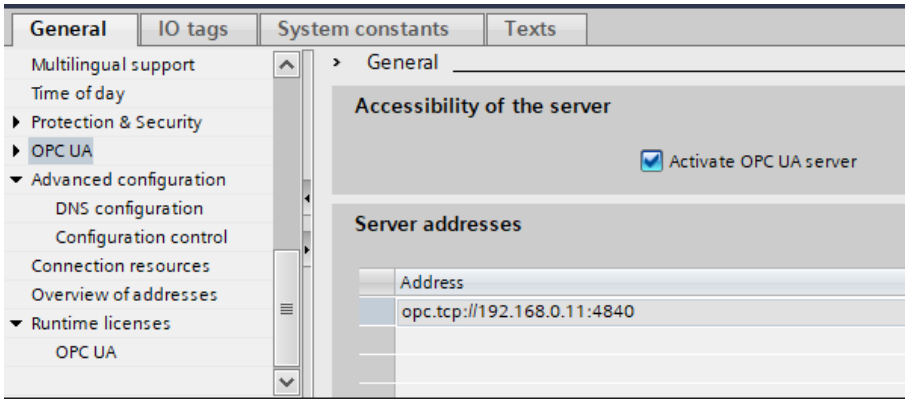


Рисунок 3.8 - вбудована підтримка OPC UA Server

Після завершення конфігурації обладнання в середовищі TIA Portal було виконано формування структури даних контролера. У межах проєкту була виконана побудова мережевої інфраструктури системи автоматизації трьох навчально-виробничих стендів на рисунку 3.9, що реалізують етапи виробничої лінії: зважування, термообробки та маркування деталей. Конфігурацію обладнання виконано у середовищі TIA Portal в області Devices & Networks.

На кожному стенді реалізовано окрему локальну мережу PROFINET, до якої підключені контролери серії Siemens S7-1200, панелі оператора TP1900 Comfort, а також частотні перетворювачі G120 CU240E-2. На третьому стенді додатково використано модуль RFID-зчитування RF180C, інтегрований у мережу PROFINET для обміну ідентифікаційними даними виробів.

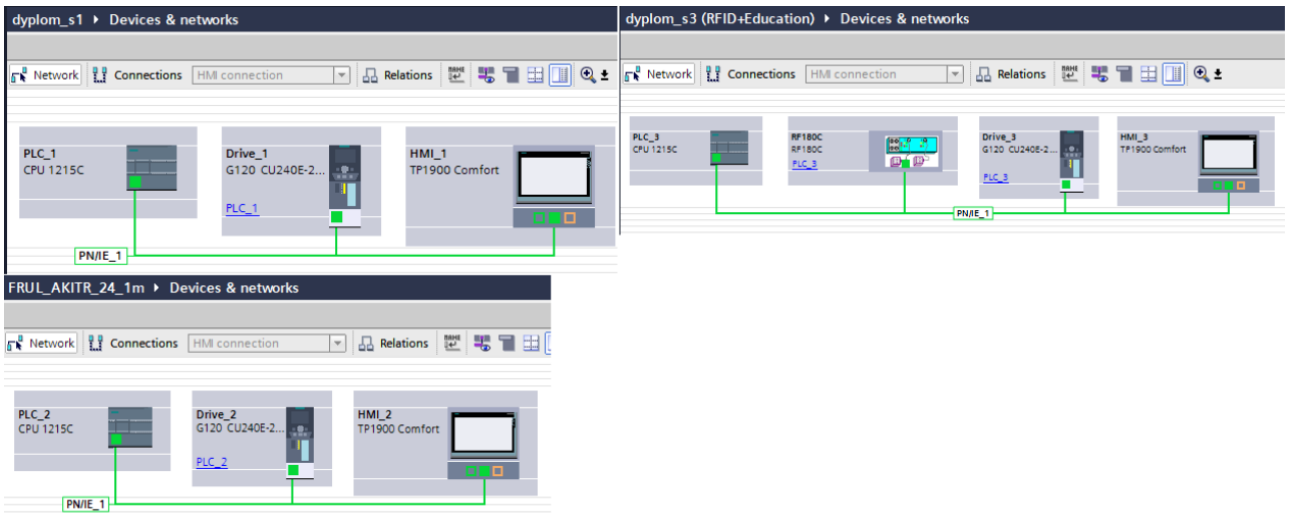


Рисунок 3.9 – Мережева структура виробничої лінії

Для забезпечення коректного обміну інформацією зі SCADA-системою та OPC-сервером (KepServerEX) створено окремі бази даних (Data Blocks), у яких розміщено технологічні змінні, що відповідають за поточні та задані параметри оберту башти, положення механізмів, стан виконавчих пристроїв, а також результати вимірювань.

З метою забезпечення зручності адресації та однозначності доступу в SCADA-системі всі змінні були згруповані та структуровані у відповідних DB-блоках, що відображено на рисунку 3.10-3.15.

dyplom_s1 ▸ PLC_1 [CPU 1215C DC/DC/DC] ▸ Program blocks ▸ Data_block_1 [DB7]

Keep actual values | Snapshot | Copy snapshots to start values | Load start values as actual values

Data_block_1 (snapshot created: 12/9/2025 3:34:09 PM)

	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static									
2	On/off D1	Bool	0.0	false		☑	☑	☑		Дозвіл на роботу - оберт башти
3	reset D1	Bool	0.1	false		☑	☑	☑		Скидання позиції - оберт башти
4	home D1	Bool	0.2	false		☑	☑	☑		Базова позиція - оберт башти
5	move D1	Bool	0.3	false		☑	☑	☑		Пуск - оберт башти
6	angle D1	Int	2.0	0		☑	☑	☑		Задана позиція - оберт башти
7	stop D1	Bool	4.0	false		☑	☑	☑		Стоп - оберт башти
8	On/off D2	Bool	4.1	false		☑	☑	☑		Дозвіл на роботу - оберт стріли
9	reset D2	Bool	4.2	false		☑	☑	☑		Скидання позиції - оберт стріли
10	home D2	Bool	4.3	false		☑	☑	☑		Базова позиція - оберт стріли
11	move D2	Bool	4.4	false		☑	☑	☑		Пуск - оберт стріли
12	angle D2	Int	6.0	0		☑	☑	☑		Задана позиція - оберт стріли
13	stop D2	Bool	8.0	false		☑	☑	☑		Стоп - оберт стріли
14	On/off D3	Bool	8.1	false		☑	☑	☑		Дозвіл на роботу - підйомника
15	reset D3	Bool	8.2	false		☑	☑	☑		Скидання позиції - підйомника
16	home D3	Bool	8.3	false		☑	☑	☑		Базова позиція - підйомника
17	move D3	Bool	8.4	false		☑	☑	☑		Пуск - підйомника
18	angle D3	Int	10.0	0		☑	☑	☑		Задана позиція - підйомника
19	stop D3	Bool	12.0	false		☑	☑	☑		Стоп - підйомник
20	conv ON/OFF	Bool	12.1	false		☑	☑	☑		Дозвіл на роботу - конвеєра
21	conv home	Bool	12.2	false		☑	☑	☑		Базова позиція - конвеєра
22	conv reset	Bool	12.3	false		☑	☑	☑		Скидання позиції - конвеєра
23	conv stop	Bool	12.4	false		☑	☑	☑		Стоп - конвеєра
24	conv move	Bool	12.5	false		☑	☑	☑		Пуск - конвеєра
25	conv position	Int	14.0	0		☑	☑	☑		Задана позиція - конвеєра
26	conv speed	Int	16.0	0		☑	☑	☑		Швидкість конвеєра

Рисунок 3.10 – Блок даних системи зважування

dyplom_s1 ▸ PLC_1 [CPU 1215C DC/DC/DC] ▸ Program blocks ▸ dyplom_stend1 [DB42]

Keep actual values | Snapshot | Copy snapshots to start values | Load start values as actual values

dyplom_stend1 (snapshot created: 12/9/2025 3:34:10 PM)

	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static									
2	Actual_position_1	Real	0.0	0.0						Поточне значення - оберт башти
3	Actual_position_2	Real	4.0	0.0						Поточне значення - оберт стріли
4	Actual_position_3	Real	8.0	0.0						Поточне значення - підйомника
5	Actual_position_4	Real	12.0	0.0						Поточне значення - конвеєра
6	Conveyor_ActualVelo...	Real	16.0	0.0						Поточне значення - Швидкість конвеєра
7	weight_of_the_part	Real	20.0	0.0						Вага деталі

Рисунок 3.11 – Блок даних системи зважування

FRUL_AKITR_24_1m ▸ PLC_2 [CPU 1215C DC/DC/DC] ▸ Program blocks ▸ Data_block_1 [DB7]

Keep actual values | Snapshot | Copy snapshots to start values | Load start values as actual values

Data_block_1 (snapshot created: 12/8/2025 11:31:55 PM)

	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static									
2	On/off D1	Bool	0.0	false						Дозвіл на роботу - оберт башти
3	reset D1	Bool	0.1	false						Скидання позиції - оберт башти
4	home D1	Bool	0.2	false						Базова позиція - оберт башти
5	move D1	Bool	0.3	false						Пуск - оберт башти
6	angle D1	Int	2.0	0						Задана позиція - оберт башти
7	stop D1	Bool	4.0	false						Стоп - оберт башти
8	On/off D2	Bool	4.1	false						Дозвіл на роботу - оберт стріли
9	reset D2	Bool	4.2	false						Скидання позиції - оберт стріли
10	home D2	Bool	4.3	false						Базова позиція - оберт стріли
11	move D2	Bool	4.4	false						Пуск - оберт стріли
12	angle D2	Int	6.0	0						Задана позиція - оберт стріли
13	stop D2	Bool	8.0	false						Стоп - оберт стріли
14	On/off D3	Bool	8.1	false						Дозвіл на роботу - підйомника
15	reset D3	Bool	8.2	false						Скидання позиції - підйомника
16	home D3	Bool	8.3	false						Базова позиція - підйомника
17	move D3	Bool	8.4	false						Пуск - підйомника
18	angle D3	Int	10.0	0						Задана позиція - підйомника
19	stop D3	Bool	12.0	false						Стоп - підйомник
20	conv ON/OFF	Bool	12.1	false						Дозвіл на роботу - конвеєра
21	conv home	Bool	12.2	false						Базова позиція - конвеєра
22	conv reset	Bool	12.3	false						Скидання позиції - конвеєра
23	conv stop	Bool	12.4	false						Стоп - конвеєра
24	conv move	Bool	12.5	false						Пуск - конвеєра
25	conv position	Int	14.0	0						Задана позиція - конвеєра
26	conv speed	Int	16.0	0						швидкість конвеєра

Рисунок 3.12 – Блок даних системи термообробки

FRUL_AKITR_24_1m ▸ PLC_2 [CPU 1215C DC/DC/DC] ▸ Program blocks ▸ DYPLOM_stend2 [DB21]

Keep actual values | Snapshot | Copy snapshots to start values | Load start values as actual values

DYPLOM_stend2 (snapshot created: 12/8/2025 11:31:55 PM)

	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static									
2	Axis_1_ActualPosition	Real	0.0	0.0						Поточне значення - оберту башти
3	Axis_1_StatusBits_Error	Bool	4.0	false						
4	Axis_2_ActualPosition	Real	6.0	0.0						Поточне значення - оберту стріли
5	Axis_2_StatusBits_Error	Bool	10.0	false						
6	Axis_3_ActualPosition	Real	12.0	0.0						Поточне значення - підйомника
7	Axis_3_StatusBits_Error	Bool	16.0	false						
8	Conveyor_ActualPosit...	Real	18.0	0.0						Поточне значення - конвеєра
9	Conveyor_ActualVelo...	Real	22.0	0.0						Поточне значення - конвеєра швидкості
10	Conveyor_StatusBits_...	Bool	26.0	false						
11	Actual_temperature	Real	28.0	0.0						%MD10

Рисунок 3.13 – Блок даних системи термообробки

dyplom_s3 (RFID+Education) ▸ PLC_3 [CPU 1215C DC/DC/DC] ▸ Program blocks ▸ Data_block_1 [DB44]

Keep actual values | Snapshot | Copy snapshots to start values | Load start values as actual values

Data_block_1

	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static									
2	On/off D1	Bool	0.0	false		☑	☑	☑		Дозвіл на роботу - оберт башти
3	reset D1	Bool	0.1	false		☑	☑	☑		Скидання позиції - оберт башти
4	home D1	Bool	0.2	false		☑	☑	☑		Базова позиція - оберт башти
5	move D1	Bool	0.3	false		☑	☑	☑		Пуск - оберт башти
6	angle D1	Int	2.0	0		☑	☑	☑		Задана позиція - оберт башти
7	stop D1	Bool	4.0	false		☑	☑	☑		Стоп - оберт башти
8	On/off D2	Bool	4.1	false		☑	☑	☑		Дозвіл на роботу - оберт стріли
9	reset D2	Bool	4.2	false		☑	☑	☑		Скидання позиції - оберт стріли
10	home D2	Bool	4.3	false		☑	☑	☑		Базова позиція - оберт стріли
11	move D2	Bool	4.4	false		☑	☑	☑		Пуск - оберт стріли
12	angle D2	Int	6.0	0		☑	☑	☑		Задана позиція - оберт стріли
13	stop D2	Bool	8.0	false		☑	☑	☑		Стоп - оберт стріли
14	On/off D3	Bool	8.1	false		☑	☑	☑		Дозвіл на роботу - підйомника
15	reset D3	Bool	8.2	false		☑	☑	☑		Скидання позиції - підйомника
16	home D3	Bool	8.3	false		☑	☑	☑		Базова позиція - підйомника
17	move D3	Bool	8.4	false		☑	☑	☑		Пуск - підйомника
18	angle D3	Int	10.0	0		☑	☑	☑		Задана позиція - підйомника
19	stop D3	Bool	12.0	false		☑	☑	☑		Стоп - оберт підйомника
20	conv ON/OFF	Bool	12.1	false		☑	☑	☑		Дозвіл на роботу - конвеєра
21	conv home	Bool	12.2	false		☑	☑	☑		Базова позиція - конвеєра
22	conv reset	Bool	12.3	false		☑	☑	☑		Скидання позиції - конвеєра
23	conv stop	Bool	12.4	false		☑	☑	☑		Стоп - конвеєра
24	conv move	Bool	12.5	false		☑	☑	☑		Пуск - конвеєра
25	conv position	Int	14.0	0		☑	☑	☑		Задана позиція - конвеєра
26	conv speed	Int	16.0	0		☑	☑	☑		Швидкість конвеєра
27	test	String	18.0	''		☑	☑	☑		

Рисунок 3.14 – Блок даних системи маркування

dyplom_s3 (RFID+Education) ▸ PLC_3 [CPU 1215C DC/DC/DC] ▸ Program blocks ▸ dyplom_s3 [DB59]

Keep actual values | Snapshot | Copy snapshots to start values | Load start values as actual values

dyplom_s3

	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static									
2	Axis_1_ActualPosition	Real	0.0	0.0		☑	☑	☑		Поточне значення - оберту башти
3	Axis_1_StatusBits_Error	Bool	4.0	false		☑	☑	☑		
4	Axis_2_ActualPosition	Real	6.0	0.0		☑	☑	☑		Поточне значення - оберту стріли
5	Axis_2_StatusBits_Error	Bool	10.0	false		☑	☑	☑		
6	Axis_3_ActualPosition	Real	12.0	0.0		☑	☑	☑		Поточне значення - підйомника
7	Axis_3_StatusBits_Error	Bool	16.0	false		☑	☑	☑		
8	Conveyor_ActualPosit...	Real	18.0	0.0		☑	☑	☑		Поточне значення - конвеєра
9	Conveyor_ActualVelo...	Real	22.0	0.0		☑	☑	☑		Поточне значення - конвеєра швидкості
10	Conveyor_StatusBits_...	Bool	26.0	false		☑	☑	☑		

Рисунок 3.15 – Блок даних системи маркування

Для забезпечення обміну даними між контролером Siemens S7-1200 та OPC-сервером KepServerEX у середовищі TIA Portal було сформовано таблицю тегів, яка містить основні змінні керування та індикації. До структури включено дискретні сигнали режимів роботи, команди пуску та зупинки, а також службові змінні, необхідні для інтеграції з візуалізаційною системою Plant SCADA.

Усі теги мають визначений тип даних, адресу в пам’яті контролера та відповідні атрибути доступу (читання/запис), що дозволяє OPC-серверу безпосередньо зчитувати й записувати значення. На рисунках 3.16-3.18 представлено фрагмент стандартної таблиці тегів (Default tag table), що використовується для передачі даних у KepServerEX.

dyplom_s1 ▸ PLC_1 [CPU 1215C DC/DC/DC] ▸ PLC tags ▸ Default tag table [90]

Tags

Default tag table

	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Comment
1	Axis_1_Pulse	Bool	%Q0.2		☑	☑	☑	Оберт башти імпульс
2	Axis_1_Direction	Bool	%Q0.1		☑	☑	☑	Оберт башти напрямок
3	Enabled	Bool	%Q0.0		☑	☑	☑	Дозвіл на роботу приводів маніпулятора
4	magnit	Bool	%Q0.6		☑	☑	☑	Активація магніта
5	weight	Real	%MD12		☑	☑	☑	Вага деталі
6	Switch_AUT/MAN	Bool	%M4.0		☑	☑	☑	Режим роботи Авто/Ручн
7	Start_AUT	Bool	%M4.1		☑	☑	☑	Пуск в автоматичному режимі
8	Stop_AUT	Bool	%M4.2		☑	☑	☑	Стоп в автоматичному режимі
9	AUTO_mode_work	Bool	%M4.4		☑	☑	☑	Автоматичний режим в роботі

Рисунок 3.16 – Теги системи зважування

FRUL_AKITR_24_1m ▸ PLC_2 [CPU 1215C DC/DC/DC] ▸ PLC tags ▸ Default tag table [99]

Default tag table

	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Comment
1	Axis_1_Pulse	Bool	%Q0.2		☑	☑	☑	Оберт башти імпульс
2	Axis_1_Direction	Bool	%Q0.1		☑	☑	☑	Оберт башти напрямок
3	Enabled	Bool	%Q0.0		☑	☑	☑	Дозвіл на роботу приводів маніпулятора
4	magnit	Bool	%Q0.6		☑	☑	☑	Активація магніта
5	Switch_AUT/MAN	Bool	%M4.0		☑	☑	☑	Режим роботи Авто/Ручн
6	Start_AUT	Bool	%M4.1		☑	☑	☑	Пуск автоматичного режиму
7	Stop_AUT	Bool	%M4.2		☑	☑	☑	Стоп в автоматичному режимі
8	thermo_tunnel_blower_fan	Bool	%Q1.1		☑	☑	☑	Активація вентилятора обдува термотунелю
9	thermo_tunnel_ lamps	Bool	%Q1.0		☑	☑	☑	Активація ламп розжарювання термотунелю
10	Actual_temperature	Real	%MD10		☑	☑	☑	Температура термотунелю
11	Set_temperature	Real	%MD16		☑	☑	☑	Задана температура
12	Out_temperature	Real	%MD20		☑	☑	☑	Вихід ПІД-регулятора температура

Рисунок 3.17 – Теги системи термообробки

dyplom_s3 (RFID+Education) ▸ PLC_3 [CPU 1215C DC/DC/DC] ▸ PLC tags ▸ Default tag table [126]

Tags

Default tag table

	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Comment
73	Education_step_D3	Bool	%M8.5		☑	☑	☑	
74	PickUpCargo	Bool	%M8.6		☑	☑	☑	
75	PutDownCargo	Bool	%M8.7		☑	☑	☑	
76	WrireMode	Bool	%M6.2		☑	☑	☑	Режим запису
77	RedMode	Bool	%M6.1		☑	☑	☑	Режим читання
78	Mode	Bool	%M6.0		☑	☑	☑	Вибір режима траспордера (Читання - ...
79	Stop_AUT	Bool	%M4.2		☑	☑	☑	Стоп автоматичного режиму
80	Start_AUT	Bool	%M4.1		☑	☑	☑	Пуск автоматичного режиму
81	Switch_AUT/MAN	Bool	%M4.0		☑	☑	☑	Режим роботи АВТО/РУЧН
82	magnit	Bool	%Q0.6		☑	☑	☑	Активація магніта

Рисунок 3.18 – Теги системи маркування

У програмному блоці Main (OB1) реалізовано передачу даних між внутрішніми змінними та тегами зовнішнього інтерфейсу за допомогою функціональних блоків MOVE, що забезпечує коректне формування значень, які надалі зчитуються KepServerEX через OPC-протоколна рисунках 3.19-21.

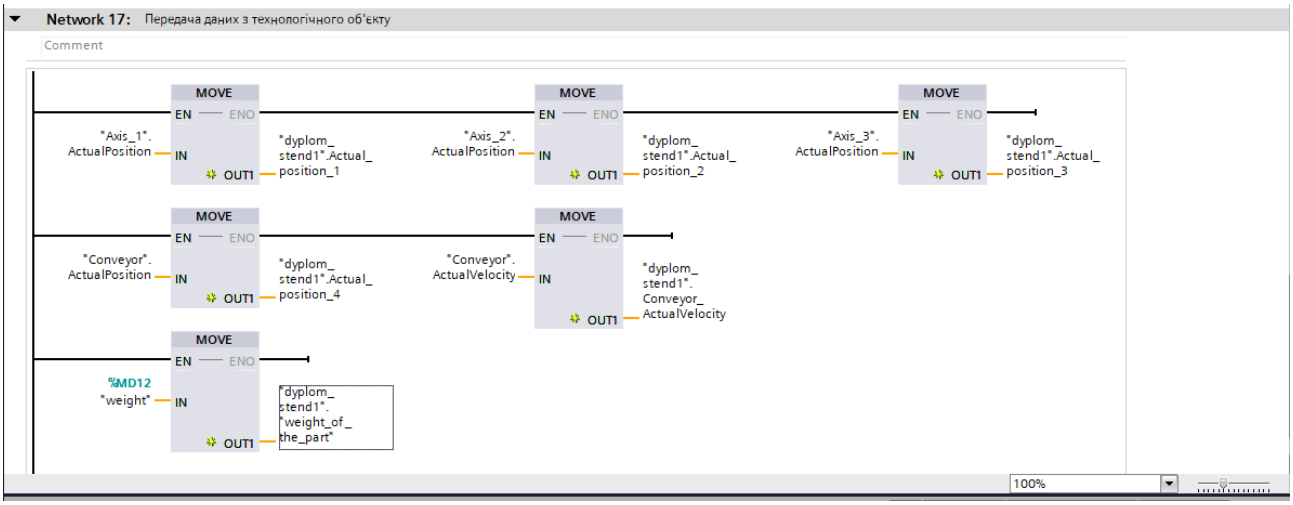


Рисунок 3.19 - функціональні блоки MOVE системи зважуваня

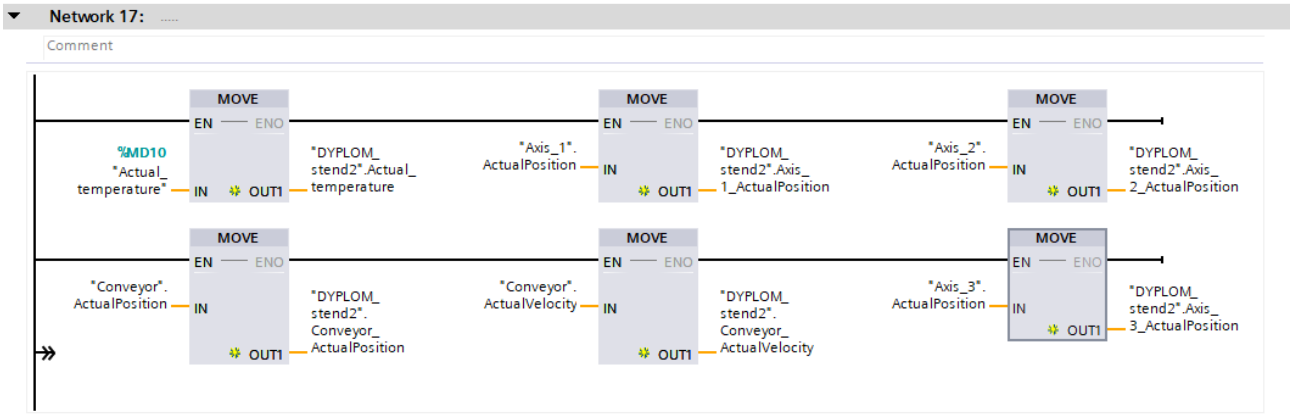


Рисунок 3.20 - функціональні блоки MOVE системи термообробки

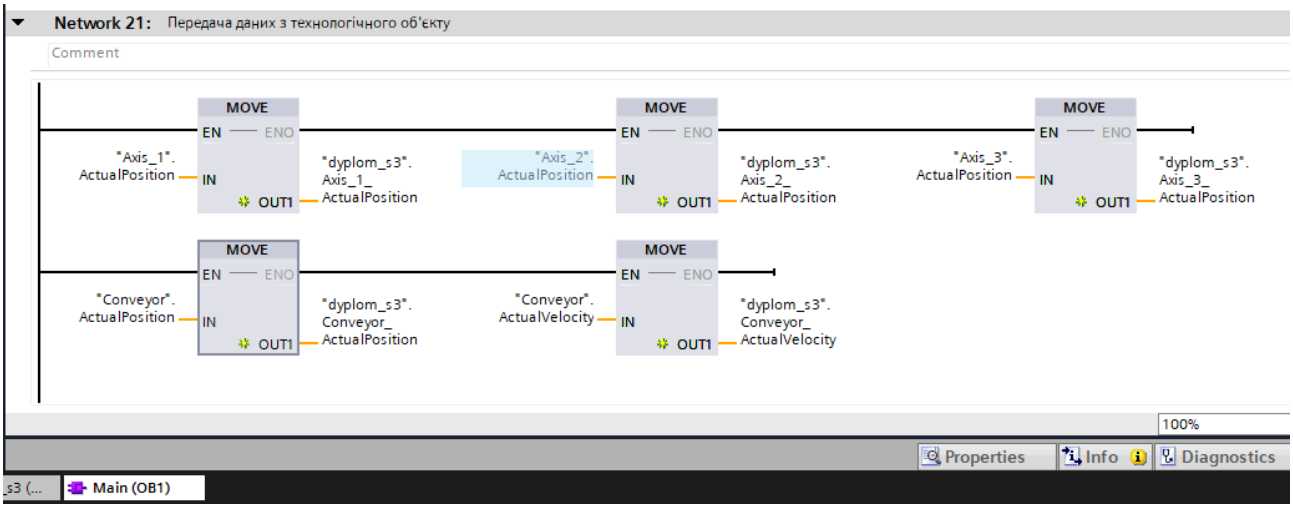


Рисунок 3.21 - функціональні блоки MOVE системи маркування

Такий підхід забезпечує:

- уніфіковану структуру змінних для подальшої інтеграції з Plant SCADA;
- прозору логіку формування даних між PLC та SCADA;
- стабільну та передбачувану роботу OPC-клієнта під час читання тегів;

- зручність налагодження, візуалізації та тестування системи.

Розробка логіки керування виконується з використанням мови релейно-контактних схем (Ladder Diagram, LD), яка є одним із базових стандартів у промисловій автоматизації. У середовищі TIA Portal формуються окремі програмні блоки, що реалізують функції зважування, підтримання температурного режиму, керування приводом транспортувальної системи та роботою вузла маркування. Платформа забезпечує зручні інструменти для перевірки алгоритмів у симуляційному режимі, детального аналізу роботи кожного блоку та моніторингу стану змінних у режимі реального часу.

Серед додаткових переваг TIA Portal — розширені можливості діагностики. Інтегровані засоби дозволяють контролювати статус пристроїв PROFINET-мережі, аналізувати помилки вводу-виводу, переглядати лог системних подій та виконувати оперативне налагодження без зупинки всієї виробничої лінії. Завдяки цьому досягається висока надійність роботи автоматизованої системи.

У середовищі TIA Portal в окремій вкладці HMI [TP1900 Comfort] створено проєкт панелі оператора, яка забезпечує візуалізацію та керування всіма підсистемами виробничої лінії на рисунках 3.22-3.24. Для панелі TP1900 Comfort розроблено структуру екранів, що охоплює основне меню, сторінки зважування, термообробки, транспортування та маркування, а також сервісні та діагностичні сторінки. На цих екранах реалізовано відображення поточних параметрів, індикацію станів механізмів, тренди, журнали повідомлень, кнопки ручного/автоматичного керування та налаштування заданих значень.

Завдяки інтеграції HMI із PLC S7-1200 у межах єдиного середовища TIA Portal забезпечується швидкий обмін даними, синхронізація тегів та можливість онлайн-діагностики. Панель TP1900 Comfort виступає основним інтерфейсом оператора, що дозволяє у реальному часі контролювати роботу виробничої лінії та оперативно реагувати на зміни технологічного процесу.

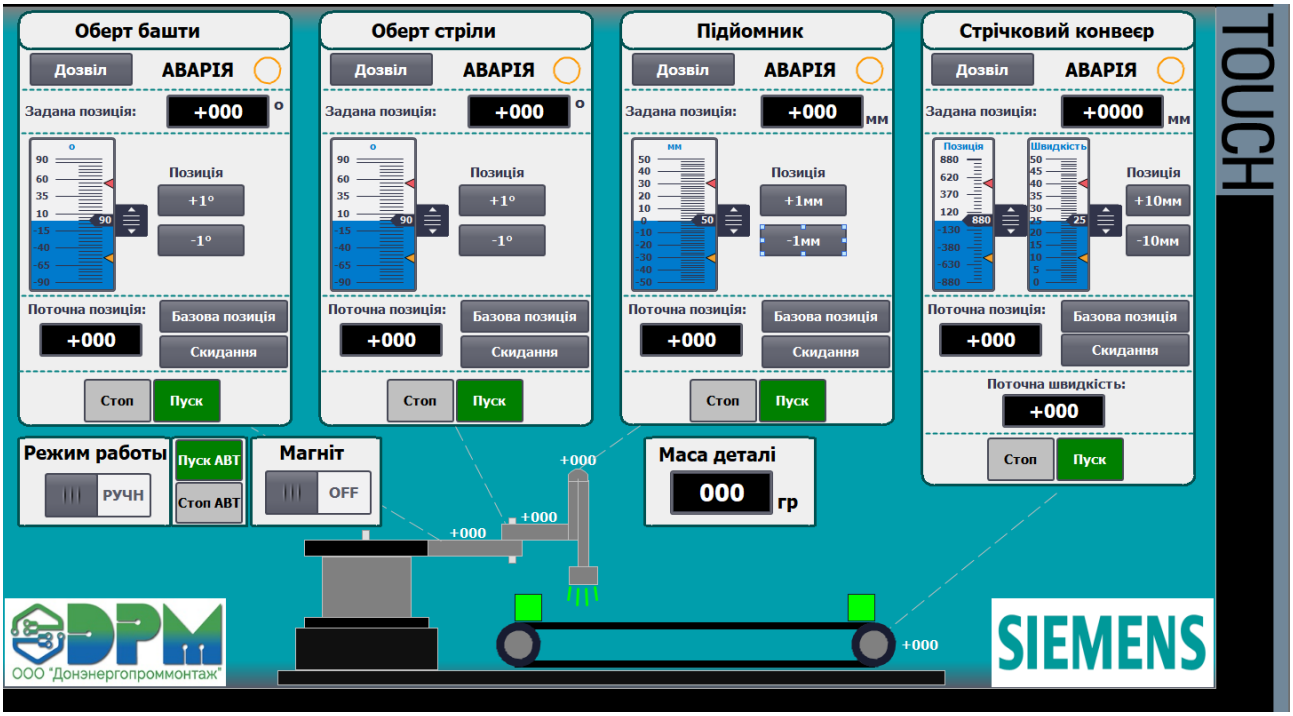


Рисунок 3.22 – HMI панель підсистеми зважування

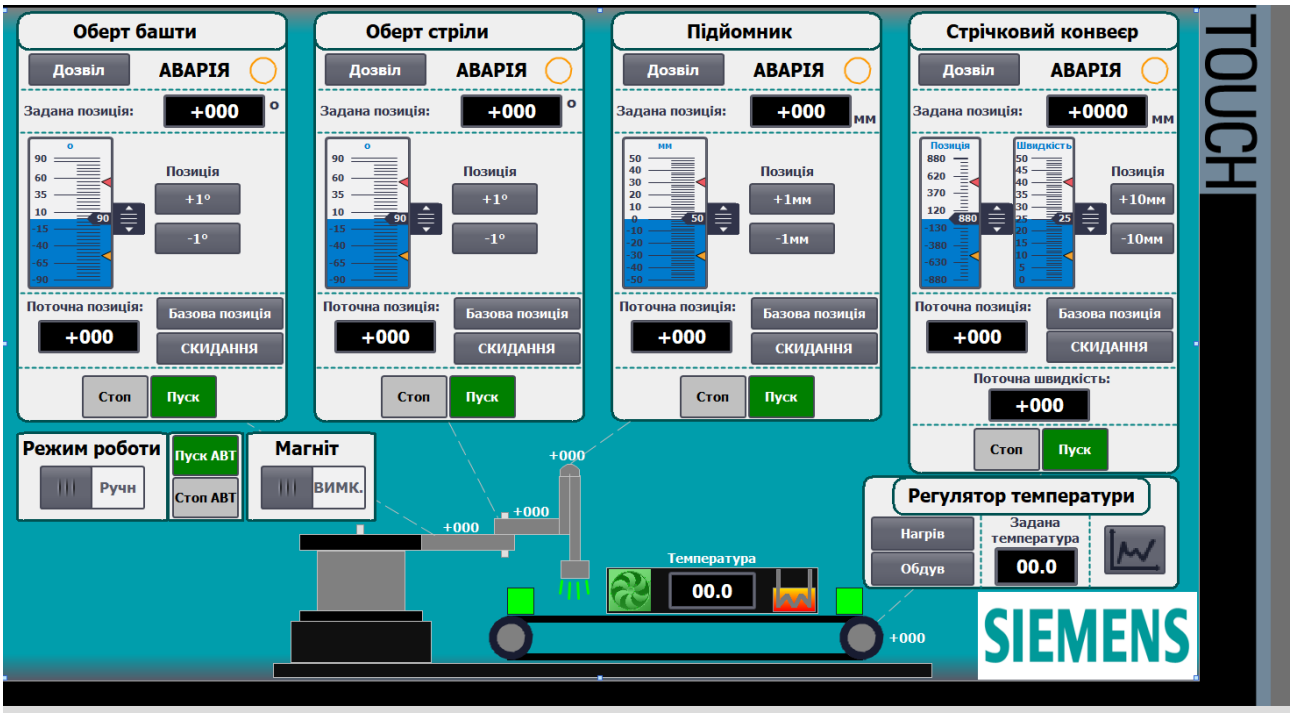


Рисунок 3.23 - HMI панель підсистеми термообробки

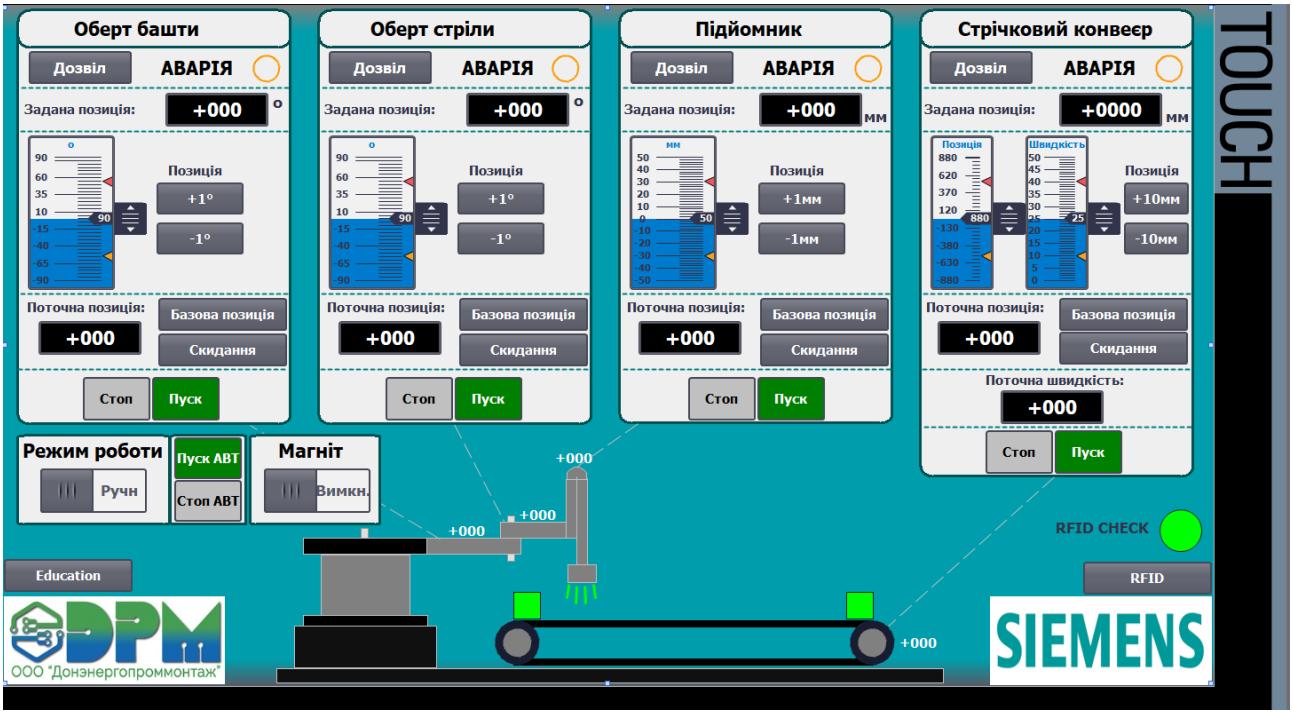


Рисунок 3.24 - HMI панель підсистеми маркування

Таким чином, TIA Portal виступає єдиною інтегрованою платформою, яка охоплює повний цикл робіт — від налаштування апаратної структури та розроблення алгоритмів керування до організації комунікаційних протоколів і передачі даних на SCADA-рівень. Застосування цього інструменту забезпечує узгоджену роботу всіх технологічних вузлів виробничої лінії та гарантує можливість масштабування системи відповідно до вимог концепції Industry 4.0.

3.3 Організація промислового обміну даними через KEPServerEX

Організація стабільного та уніфікованого обміну даними між контролером і системою візуалізації є ключовою умовою коректної роботи автоматизованої виробничої лінії. У цьому проєкті функцію універсального комунікаційного шлюзу виконує KEPServerEX — промисловий OPC-сервер, який забезпечує інтеграцію PLC Siemens S7-1200 із SCADA-системою PlantSCADA та іншими інформаційними компонентами архітектури Industry 4.0.

KEPServerEX виступає проміжним шаром, що стандартизує доступ до змінних контролера та надає їх у форматі OPC UA/DA. Завдяки цьому SCADA, системи моніторингу, аналітики та інші клієнти можуть отримувати узгоджені

дані незалежно від типу обладнання, протоколів обміну чи виробника. Такий підхід підвищує масштабованість і дозволяє без складнощів розширювати систему новими модулями чи інформаційними сервісами.

Процес налаштування KEPServerEX включає кілька основних етапів. Першим кроком є створення нового каналу зв’язку, де обирається драйвер Siemens TCP/IP Ethernet, який підтримує роботу зі стандартом S7-комунікації. Після цього задається IP-адреса контролера, номер CPU та параметри підключення на рисунку 3.25. На наступному етапі формується список пристроїв (Devices), що відповідають окремим вузлам або модулям контролера на рисунках 3.26-3.28.

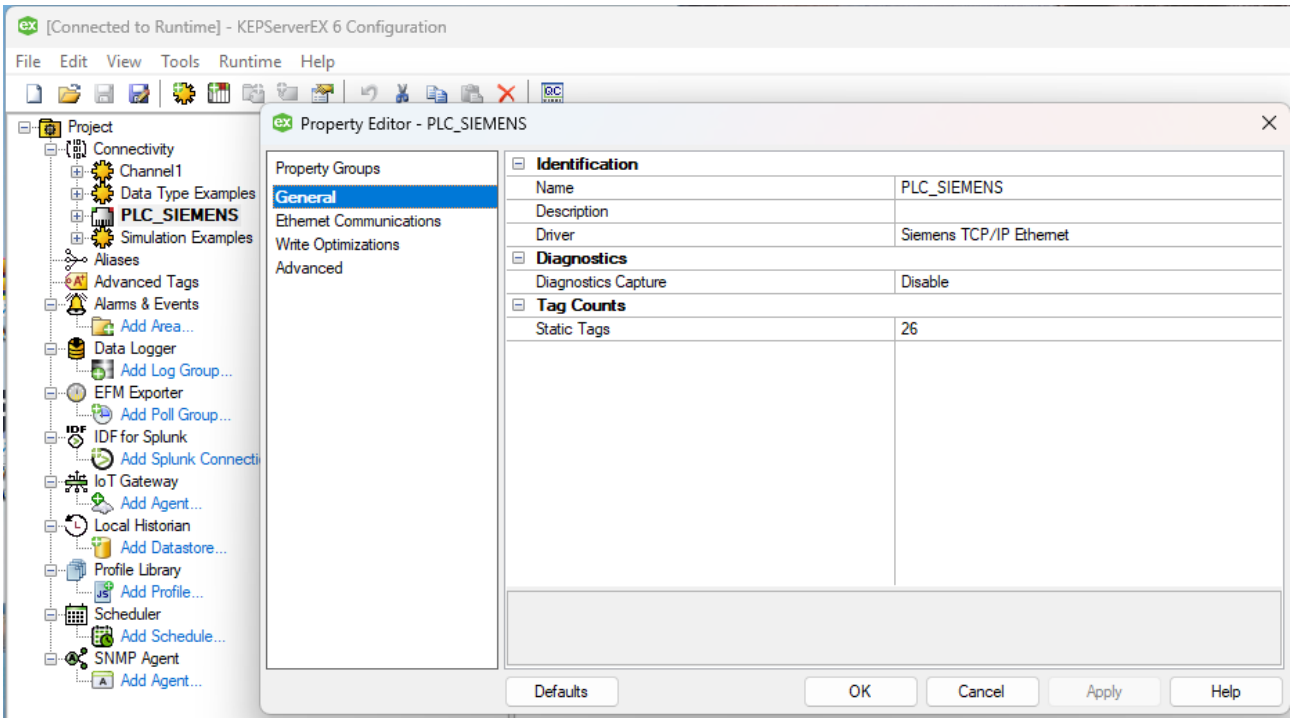


Рисунок 3.25 – Вікно властивостей створеного каналу зв’язку

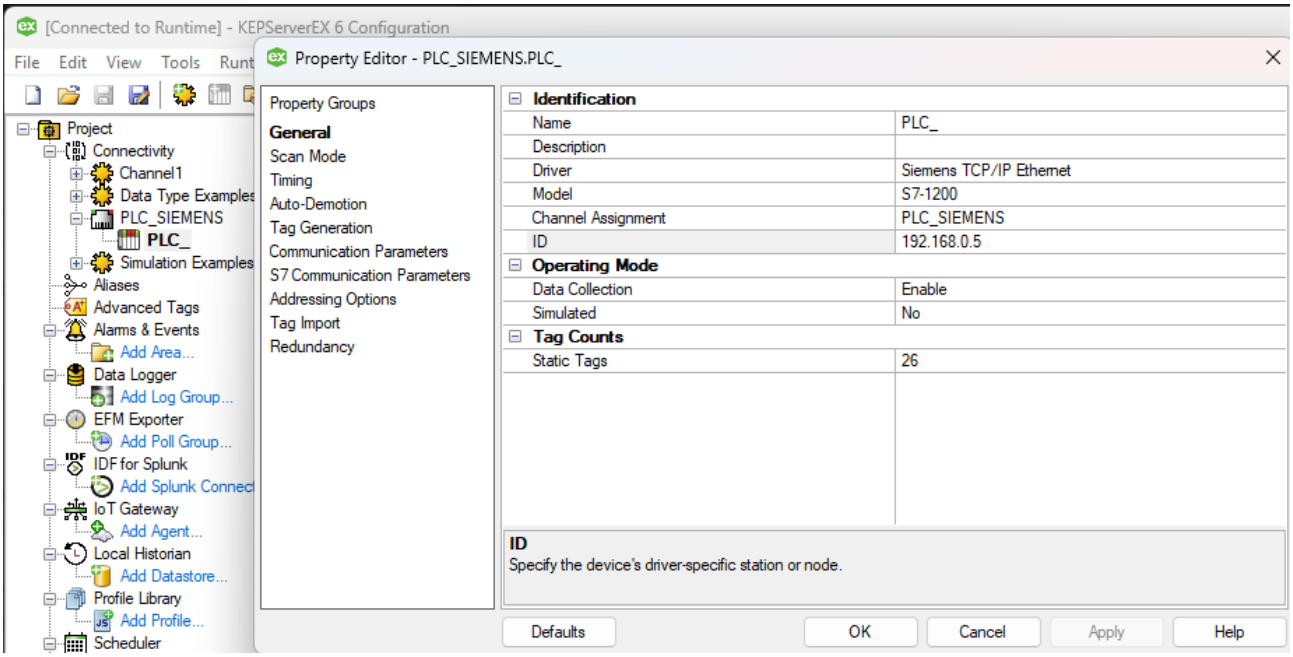


Рисунок 3.26 – Вікно властивостей створеного пристрою зв’язку

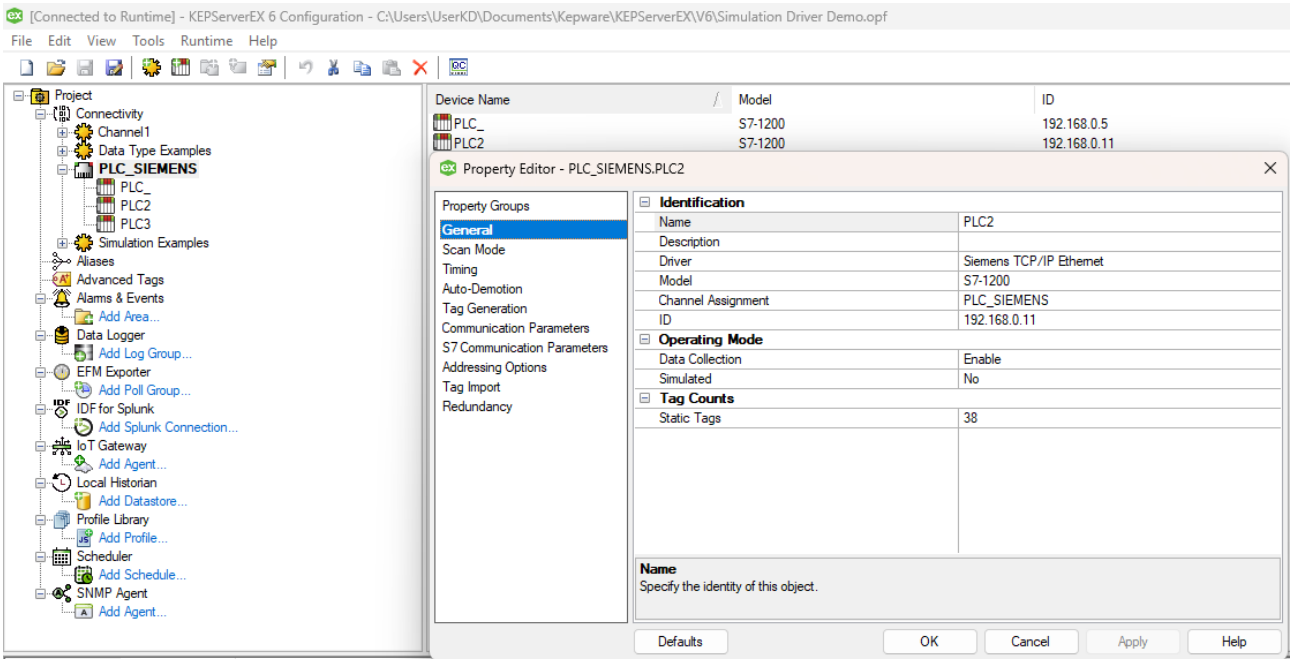


Рисунок 3.27 - Вікно властивостей створеного пристрою зв’язку

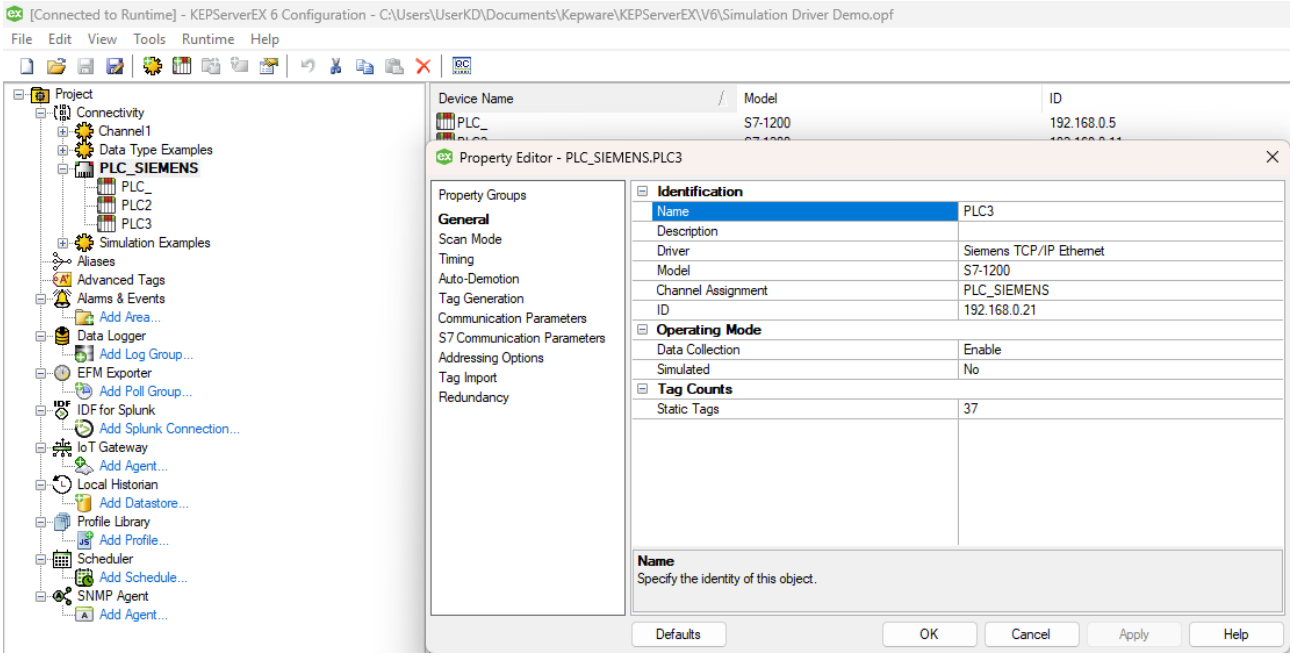
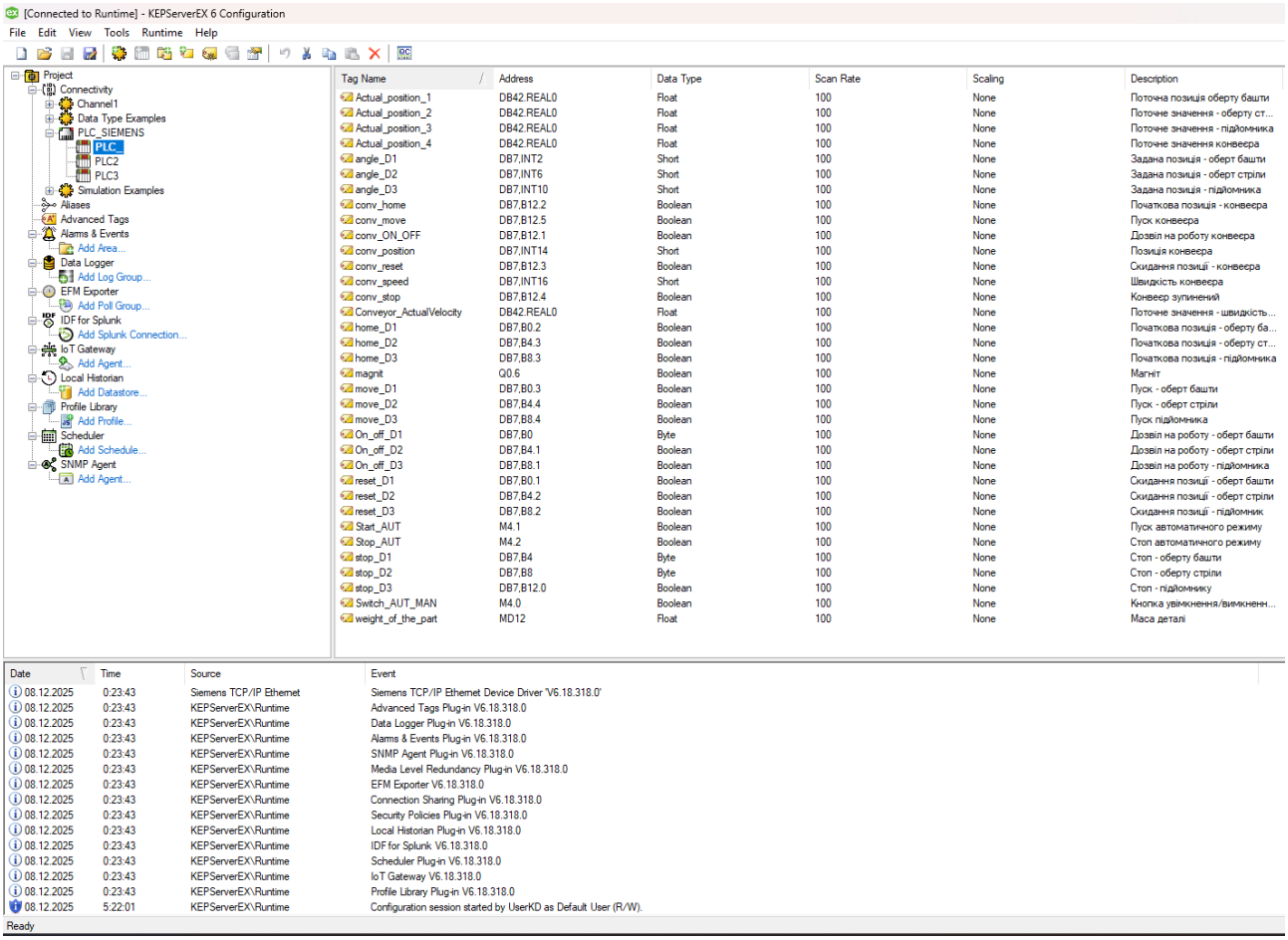


Рисунок 3.28 - Вікно властивостей створеного пристрою зв’язку

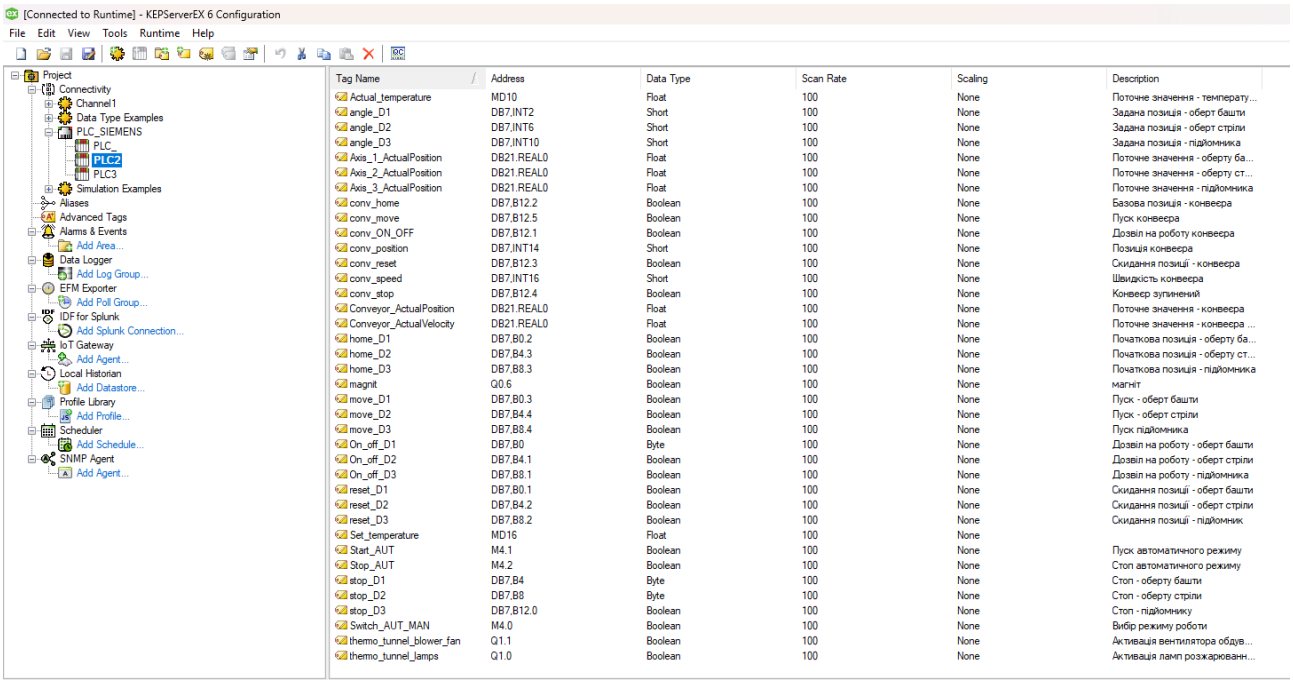
Ключовою операцією є налаштування тегів OPC (Items), кожен з яких прив’язується до конкретної змінної в PLC — вагового модуля, аналогового входу температури, дискретних станів виконавчих механізмів чи внутрішніх регістрів логіки керування. Адресація тегів задається у форматі DB, I/Q або M-пам’яті відповідно до структури програми в TIA Portal. Для кожного тегу вказується тип даних, частота опитування, доступність на читання/запис та допустимий діапазон значень, що гарантує коректність обміну та мінімізує затримки на рисунку 3.29.



Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
Actual_position_1	DB42.REAL0	Float	100	None	Поточна позиція оберту башти
Actual_position_2	DB42.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - оберту ст...
Actual_position_3	DB42.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - підйомника
Actual_position_4	DB42.REAL0	Float	100	None	Поточне значення конвеера
angle_D1	DB7,INT2	Short	100	None	Задана позиція - оберт башти
angle_D2	DB7,INT6	Short	100	None	Задана позиція - оберт стріли
angle_D3	DB7,INT10	Short	100	None	Задана позиція - підйомника
conv_home	DB7,B12.2	Boolean	100	None	Початкова позиція - конвеера
conv_move	DB7,B12.5	Boolean	100	None	Пуск конвеера
conv_ON_OFF	DB7,B12.1	Boolean	100	None	Дозвіл на роботу конвеера
conv_position	DB7,INT14	Short	100	None	Позиція конвеера
conv_reset	DB7,B12.3	Boolean	100	None	Скидання позиції - конвеера
conv_speed	DB7,INT16	Short	100	None	Швидкість конвеера
conv_stop	DB7,B12.4	Boolean	100	None	Конвеер зупинений
Conveyor_ActualVelocity	DB42.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - швидкість...
home_D1	DB7,B0.2	Boolean	100	None	Початкова позиція - оберту ба...
home_D2	DB7,B4.3	Boolean	100	None	Початкова позиція - оберту ст...
home_D3	DB7,B8.3	Boolean	100	None	Початкова позиція - підйомника
magnit	Q0.6	Boolean	100	None	Магніт
move_D1	DB7,B0.3	Boolean	100	None	Пуск - оберт башти
move_D2	DB7,B4.4	Boolean	100	None	Пуск - оберт стріли
move_D3	DB7,B8.4	Boolean	100	None	Пуск підйомника
On_off_D1	DB7,B0	Byte	100	None	Дозвіл на роботу - оберт башти
On_off_D2	DB7,B4.1	Boolean	100	None	Дозвіл на роботу - оберт стріли
On_off_D3	DB7,B8.1	Boolean	100	None	Дозвіл на роботу - підйомника
reset_D1	DB7,B0.1	Boolean	100	None	Скидання позиції - оберт башти
reset_D2	DB7,B4.2	Boolean	100	None	Скидання позиції - оберт стріли
reset_D3	DB7,B8.2	Boolean	100	None	Скидання позиції - підйомник
Start_AUT	M4.1	Boolean	100	None	Пуск автоматичного режиму
Stop_AUT	M4.2	Boolean	100	None	Стоп автоматичного режиму
stop_D1	DB7,B4	Byte	100	None	Стоп - оберту башти
stop_D2	DB7,B8	Byte	100	None	Стоп - оберту стріли
stop_D3	DB7,B12.0	Boolean	100	None	Стоп - підйомнику
Switch_AUT_MAN	M4.0	Boolean	100	None	Кнопка увімкнення/вимкненн...
weight_of_the_part	MD12	Float	100	None	Маса деталі

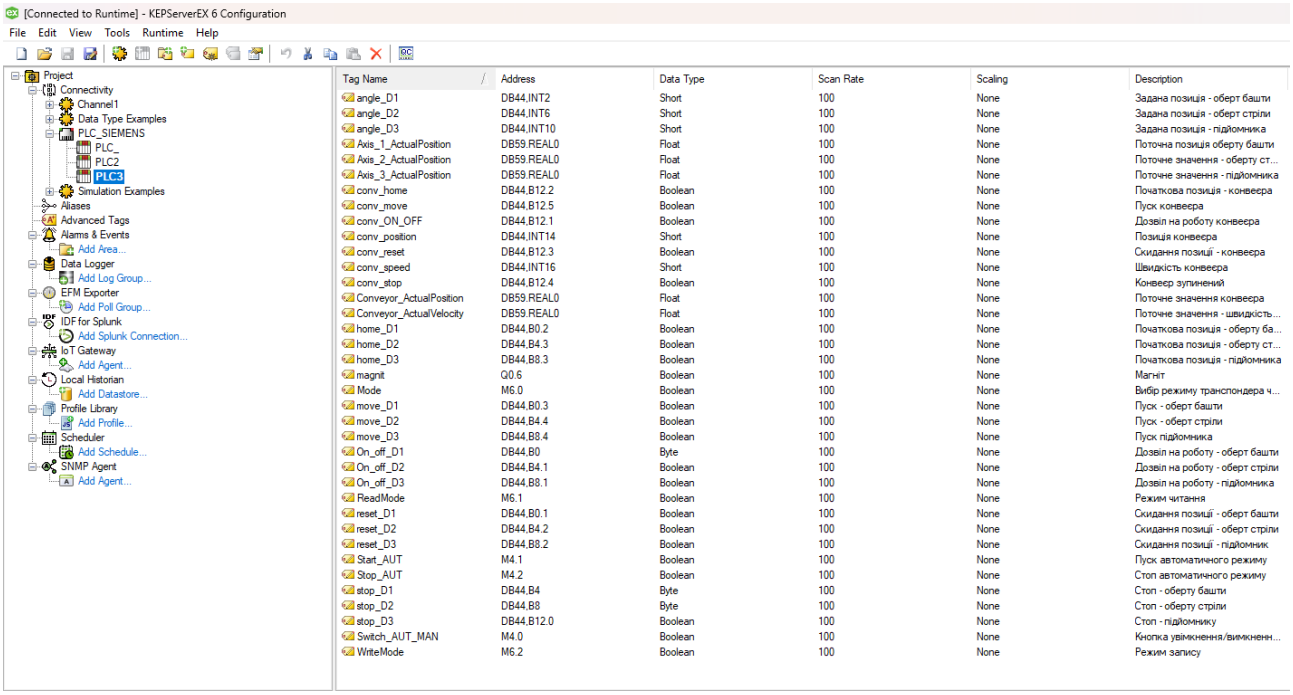
Date	Time	Source	Event
08.12.2025	0:23:43	Siemens TCP/IP Ethernet	Siemens TCP/IP Ethernet Device Driver 'V6.18.318.0'
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	Advanced Tags Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	Data Logger Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	Alarms & Events Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	SNMP Agent Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	Media Level Redundancy Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	EFM Exporter V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	Connection Sharing Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	Security Policies Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	Local Historian Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	IDF for Splunk V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	Scheduler Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	IoT Gateway V6.18.318.0
08.12.2025	0:23:43	KEPServerEX\Runtime	Profile Library Plug-in V6.18.318.0
08.12.2025	5:22:01	KEPServerEX\Runtime	Configuration session started by UserKD as Default User (R/W).

Рисунок 3.29 – Додані теги



Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
Actual_temperature	MD10	Float	100	None	Поточне значення - температу...
angle_D1	DB7,INT2	Short	100	None	Задана позиція - оберт башти
angle_D2	DB7,INT6	Short	100	None	Задана позиція - оберт стріли
angle_D3	DB7,INT10	Short	100	None	Задана позиція - підйомника
Axis_1_ActualPosition	DB21.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - оберту ба...
Axis_2_ActualPosition	DB21.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - оберту ст...
Axis_3_ActualPosition	DB21.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - підйомника
conv_home	DB7,B12.2	Boolean	100	None	Базова позиція - конвеера
conv_move	DB7,B12.5	Boolean	100	None	Пуск конвеера
conv_ON_OFF	DB7,B12.1	Boolean	100	None	Дозвіл на роботу конвеера
conv_position	DB7,INT14	Short	100	None	Позиція конвеера
conv_reset	DB7,B12.3	Boolean	100	None	Скидання позиції - конвеера
conv_speed	DB7,INT16	Short	100	None	Швидкість конвеера
conv_stop	DB7,B12.4	Boolean	100	None	Конвеер зупинений
Conveyor_ActualPosition	DB21.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - конвеера
Conveyor_ActualVelocity	DB21.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - конвеера ...
home_D1	DB7,B0.2	Boolean	100	None	Початкова позиція - оберту ба...
home_D2	DB7,B4.3	Boolean	100	None	Початкова позиція - оберту ст...
home_D3	DB7,B8.3	Boolean	100	None	Початкова позиція - підйомника
magnit	Q0.6	Boolean	100	None	магніт
move_D1	DB7,B0.3	Boolean	100	None	Пуск - оберт башти
move_D2	DB7,B4.4	Boolean	100	None	Пуск - оберт стріли
move_D3	DB7,B8.4	Boolean	100	None	Пуск підйомника
On_off_D1	DB7,B0	Byte	100	None	Дозвіл на роботу - оберт башти
On_off_D2	DB7,B4.1	Boolean	100	None	Дозвіл на роботу - оберт стріли
On_off_D3	DB7,B8.1	Boolean	100	None	Дозвіл на роботу - підйомника
reset_D1	DB7,B0.1	Boolean	100	None	Скидання позиції - оберт башти
reset_D2	DB7,B4.2	Boolean	100	None	Скидання позиції - оберт стріли
reset_D3	DB7,B8.2	Boolean	100	None	Скидання позиції - підйомник
Set_temperature	MD16	Float	100	None	
Start_AUT	M4.1	Boolean	100	None	Пуск автоматичного режиму
Stop_AUT	M4.2	Boolean	100	None	Стоп автоматичного режиму
stop_D1	DB7,B4	Byte	100	None	Стоп - оберту башти
stop_D2	DB7,B8	Byte	100	None	Стоп - оберту стріли
stop_D3	DB7,B12.0	Boolean	100	None	Стоп - підйомнику
Switch_AUT_MAN	M4.0	Boolean	100	None	Вибір режиму роботи
thermo_tunnel_blower_fan	Q1.1	Boolean	100	None	Активація вентилятора обдув...
thermo_tunnel_lamps	Q1.0	Boolean	100	None	Активація ламп розжарюванн...

Рисунок 3.30 – Додані теги



Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
angle_D1	DB44.INT2	Short	100	None	Задана позиція - оберт башти
angle_D2	DB44.INT6	Short	100	None	Задана позиція - оберт стріли
angle_D3	DB44.INT10	Short	100	None	Задана позиція - підйомника
Axis_1_ActualPosition	DB59.REAL0	Float	100	None	Поточна позиція оберту башти
Axis_2_ActualPosition	DB59.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - оберту ст...
Axis_3_ActualPosition	DB59.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - підйомника
conv_home	DB44.B12.2	Boolean	100	None	Початкова позиція - конвеера
conv_move	DB44.B12.5	Boolean	100	None	Пуск конвеера
conv_ON_OFF	DB44.B12.1	Boolean	100	None	Дозвіл на роботу конвеера
conv_position	DB44.INT14	Short	100	None	Позиція конвеера
conv_reset	DB44.B12.3	Boolean	100	None	Скидання позиції - конвеера
conv_speed	DB44.INT16	Short	100	None	Швидкість конвеера
conv_stop	DB44.B12.4	Boolean	100	None	Конвеер зупинений
Conveyor_ActualPosition	DB59.REAL0	Float	100	None	Поточне значення конвеера
Conveyor_ActualVelocity	DB59.REAL0	Float	100	None	Поточне значення - швидкість...
home_D1	DB44.B0.2	Boolean	100	None	Початкова позиція - оберту ба...
home_D2	DB44.B4.3	Boolean	100	None	Початкова позиція - оберту ст...
home_D3	DB44.B8.3	Boolean	100	None	Початкова позиція - підйомника
magnit	Q0.6	Boolean	100	None	Магніт
Mode	M6.0	Boolean	100	None	Вибір режиму транспондера ч...
move_D1	DB44.B0.3	Boolean	100	None	Пуск - оберт башти
move_D2	DB44.B4.4	Boolean	100	None	Пуск - оберт стріли
move_D3	DB44.B8.4	Boolean	100	None	Пуск підйомника
On_off_D1	DB44.B0	Byte	100	None	Дозвіл на роботу - оберт башти
On_off_D2	DB44.B4.1	Boolean	100	None	Дозвіл на роботу - оберт стріли
On_off_D3	DB44.B8.1	Boolean	100	None	Дозвіл на роботу - підйомника
ReadMode	M6.1	Boolean	100	None	Режим читання
reset_D1	DB44.B0.1	Boolean	100	None	Скидання позиції - оберт башти
reset_D2	DB44.B4.2	Boolean	100	None	Скидання позиції - оберт стріли
reset_D3	DB44.B8.2	Boolean	100	None	Скидання позиції - підйомник
Start_AUT	M4.1	Boolean	100	None	Пуск автоматичного режиму
Stop_AUT	M4.2	Boolean	100	None	Стоп автоматичного режиму
stop_D1	DB44.B4	Byte	100	None	Стоп - оберту башти
stop_D2	DB44.B8	Byte	100	None	Стоп - оберту стріли
stop_D3	DB44.B12.0	Boolean	100	None	Стоп - підйомнику
Switch_AUT_MAN	M4.0	Boolean	100	None	Кнопка увімкнення/вимкненн...
WriteMode	M6.2	Boolean	100	None	Режим запису

Рисунок 3.31 – Додані теги

KEPServerEX також забезпечує діагностику підключення в режимі реального часу. У вікні Quick Client можна переглядати значення змінних, затримки оновлення, статус з’єднання та можливі помилки комунікації на рисунку 3.32-3.34. Це значно спрощує пошук несправностей як на рівні контролера, так і в SCADA. Надійність роботи OPC-сервера критично важлива для виробничої лінії, оскільки порушення обміну може призвести до зупинки транспортувального приводу, некоректного виконання термообробки або помилок маркування.

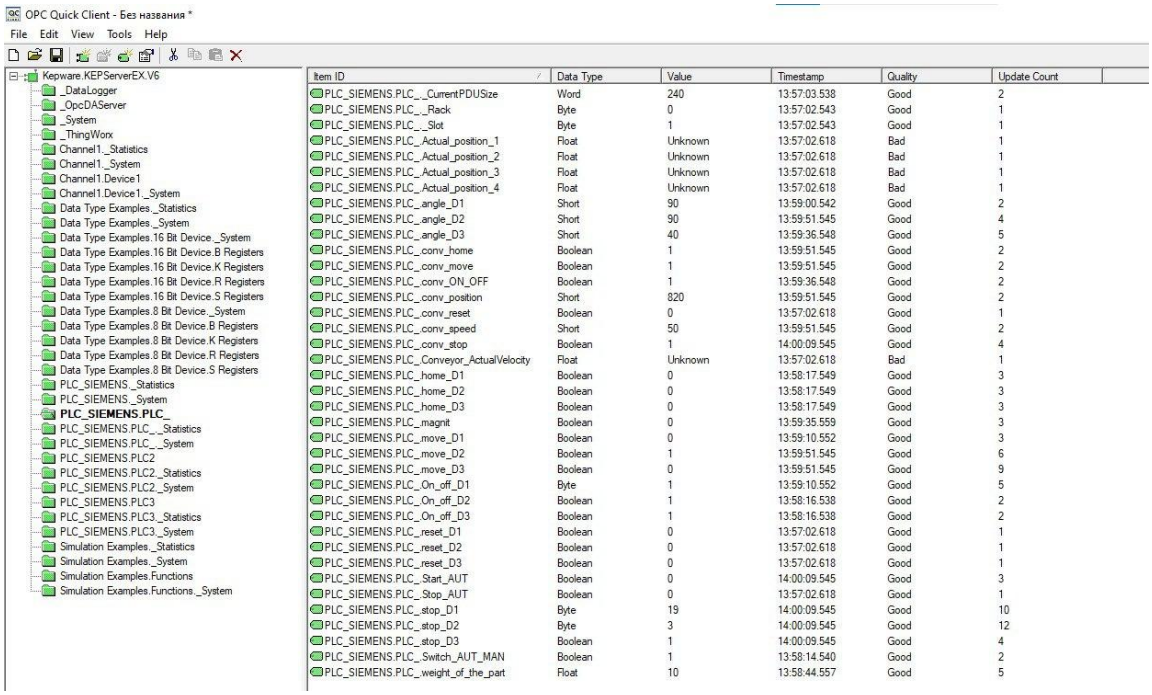


Рисунок 3.32 – Вид вікна Quick Client

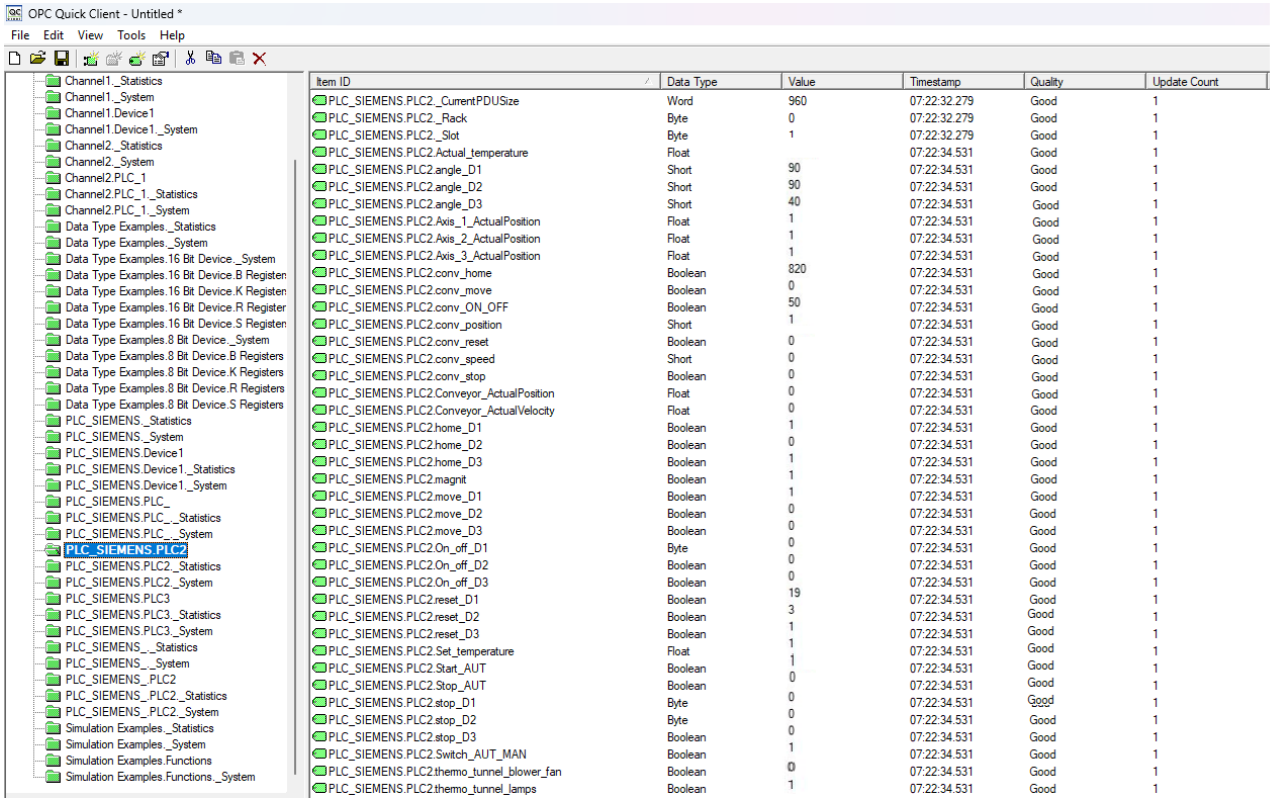
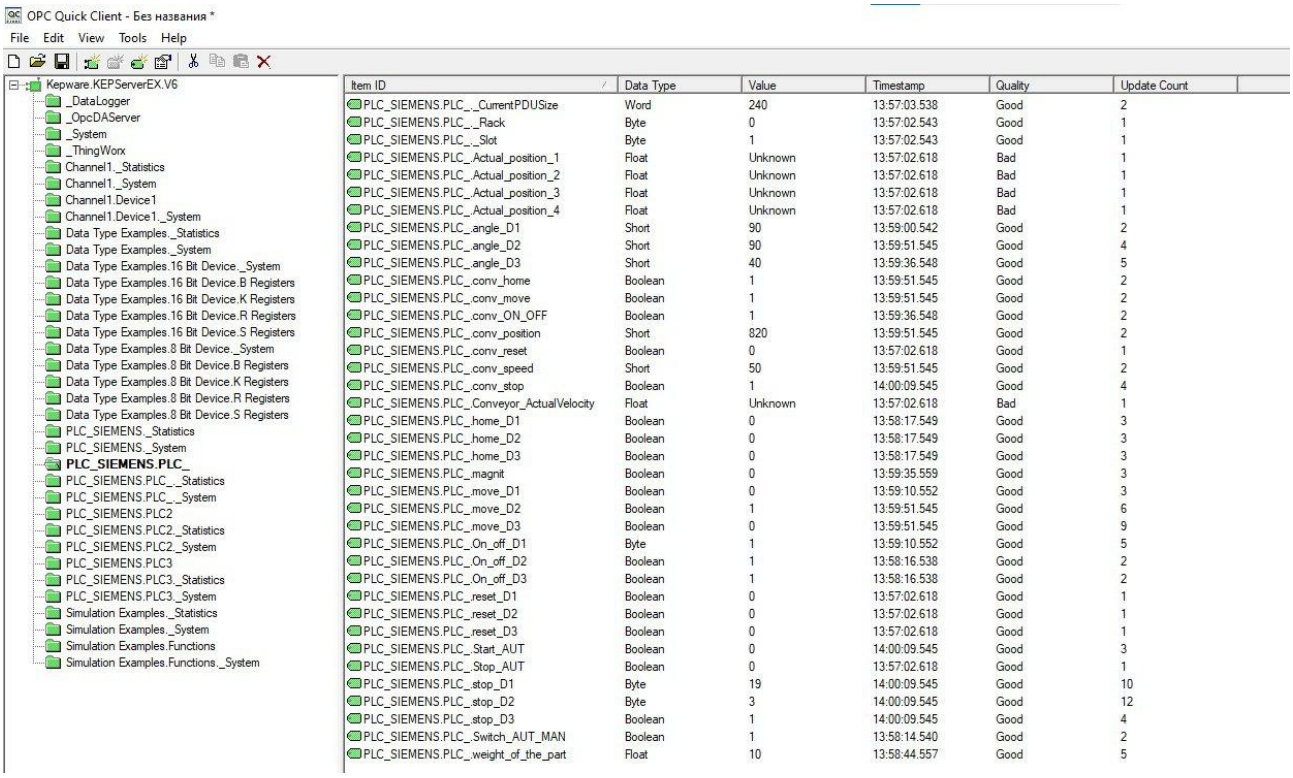


Рисунок 3.33 – Вид вікна Quick Client



Item ID	Data Type	Value	Timestamp	Quality	Update Count
PLC_SIEMENS.PLC_._CurrentPDUSize	Word	240	13:57:03.538	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_._Rack	Byte	0	13:57:02.543	Good	1
PLC_SIEMENS.PLC_._Slot	Byte	1	13:57:02.543	Good	1
PLC_SIEMENS.PLC_.Actual_position_1	Float	Unknown	13:57:02.618	Bad	1
PLC_SIEMENS.PLC_.Actual_position_2	Float	Unknown	13:57:02.618	Bad	1
PLC_SIEMENS.PLC_.Actual_position_3	Float	Unknown	13:57:02.618	Bad	1
PLC_SIEMENS.PLC_.Actual_position_4	Float	Unknown	13:57:02.618	Bad	1
PLC_SIEMENS.PLC_.angle_D1	Short	90	13:59:00.542	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.angle_D2	Short	90	13:59:51.545	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.angle_D3	Short	40	13:59:36.548	Good	5
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_home	Boolean	1	13:59:51.545	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_move	Boolean	1	13:59:51.545	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_ON_OFF	Boolean	1	13:59:36.548	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_position	Short	820	13:59:51.545	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_reset	Boolean	0	13:57:02.618	Good	1
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_speed	Short	50	13:59:51.545	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_stop	Boolean	1	14:00:09.545	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.Conveyor_ActualVelocity	Float	Unknown	13:57:02.618	Bad	1
PLC_SIEMENS.PLC_.home_D1	Boolean	0	13:58:17.549	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.home_D2	Boolean	0	13:58:17.549	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.home_D3	Boolean	0	13:58:17.549	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.magnit	Boolean	0	13:59:35.559	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.move_D1	Boolean	0	13:59:10.552	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.move_D2	Boolean	1	13:59:51.545	Good	6
PLC_SIEMENS.PLC_.move_D3	Boolean	0	13:59:51.545	Good	9
PLC_SIEMENS.PLC_.On_off_D1	Byte	1	13:59:10.552	Good	5
PLC_SIEMENS.PLC_.On_off_D2	Boolean	1	13:58:16.538	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.On_off_D3	Boolean	1	13:58:16.538	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.reset_D1	Boolean	0	13:57:02.618	Good	1
PLC_SIEMENS.PLC_.reset_D2	Boolean	0	13:57:02.618	Good	1
PLC_SIEMENS.PLC_.reset_D3	Boolean	0	13:57:02.618	Good	1
PLC_SIEMENS.PLC_.Start_AUT	Boolean	0	14:00:09.545	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.Stop_AUT	Boolean	0	13:57:02.618	Good	1
PLC_SIEMENS.PLC_.stop_D1	Byte	19	14:00:09.545	Good	10
PLC_SIEMENS.PLC_.stop_D2	Byte	3	14:00:09.545	Good	12
PLC_SIEMENS.PLC_.stop_D3	Boolean	1	14:00:09.545	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.Switch_AUT_MAN	Boolean	1	13:58:14.540	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.weight_of_the_part	Float	10	13:58:44.557	Good	5

Рисунок 3.34 – Вид вікна Quick Client

У контексті Industry 4.0 KEPServerEX виконує роль відправної точки для побудови цифрового шару підприємства, оскільки підтримує інтеграцію не лише зі SCADA, але й із зовнішніми аналітичними платформами, базами даних та хмарними сервісами. OPC UA забезпечує безпечний доступ, шифрування та механізми авторизації, що дозволяє масштабувати систему у напрямку глибшої аналітики, штучного інтелекту або предиктивної діагностики обладнання.

Таким чином, застосування KEPServerEX забезпечує стандартизований, безпечний та високопродуктивний обмін даними між PLC, SCADA та іншими компонентами архітектури. Він є центральним інформаційним вузлом, що гарантує узгодженість технологічних параметрів, стабільність роботи системи та готовність виробничої лінії до подальшої цифрової трансформації.

3.4 Налаштування та розробка системи візуалізації в PlantSCADA

У межах проєкту важливою складовою верхнього рівня автоматизації є система візуалізації PlantSCADA, яка забезпечує моніторинг, керування та діагностику технологічного процесу в реальному часі. Середовище PlantSCADA

застосовується як надбудова над OPC-інфраструктурою, отримуючи дані від контролера Siemens S7-1200 через промисловий сервер KEPServerEX. Такий підхід забезпечує гнучкість, масштабованість та сумісність із сучасними комунікаційними стандартами Industry 4.0.

Розроблення операторських екранів починається зі створення нового проєкту та визначення основних сторінок інтерфейсу (HMI-screens). Для кожної технологічної зони — станція зважування, камера термообробки та вузол маркування — формуються окремі візуалізаційні сторінки з відображенням ключових параметрів обладнання, індикаторів станів, елементів керування та сигналізації. Структура проєкту передбачає наявність головної сторінки «Overview» на рисунку 3.35, яка виконує навігаційну функцію та дозволяє швидко перемикатися між підсистемами на рисунках 3.36-3.38.

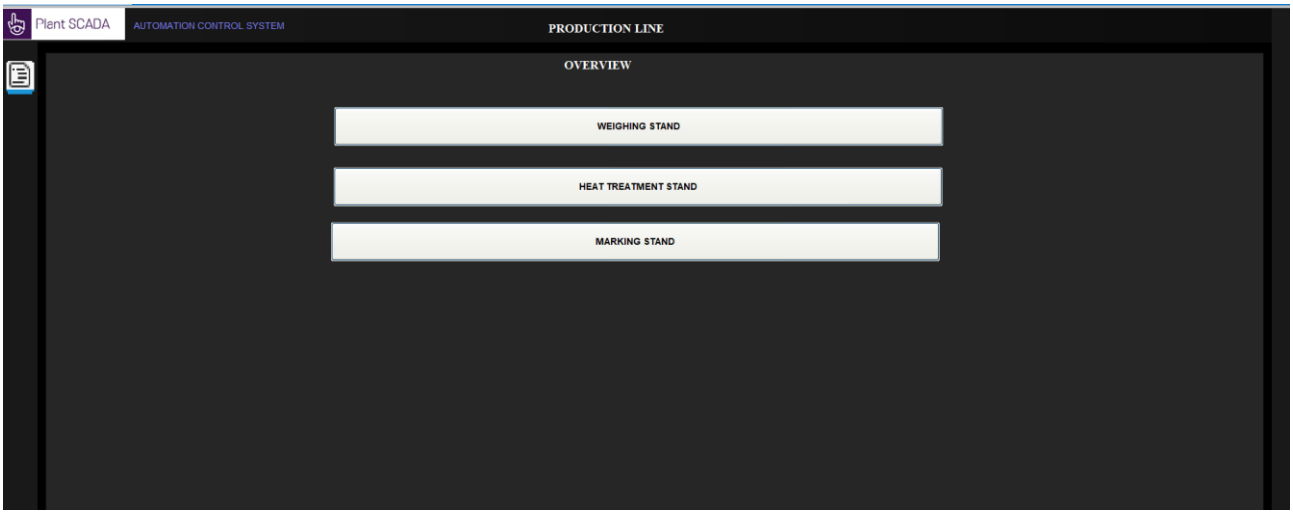


Рисунок 3.35 – Вид сторінки «Overview»

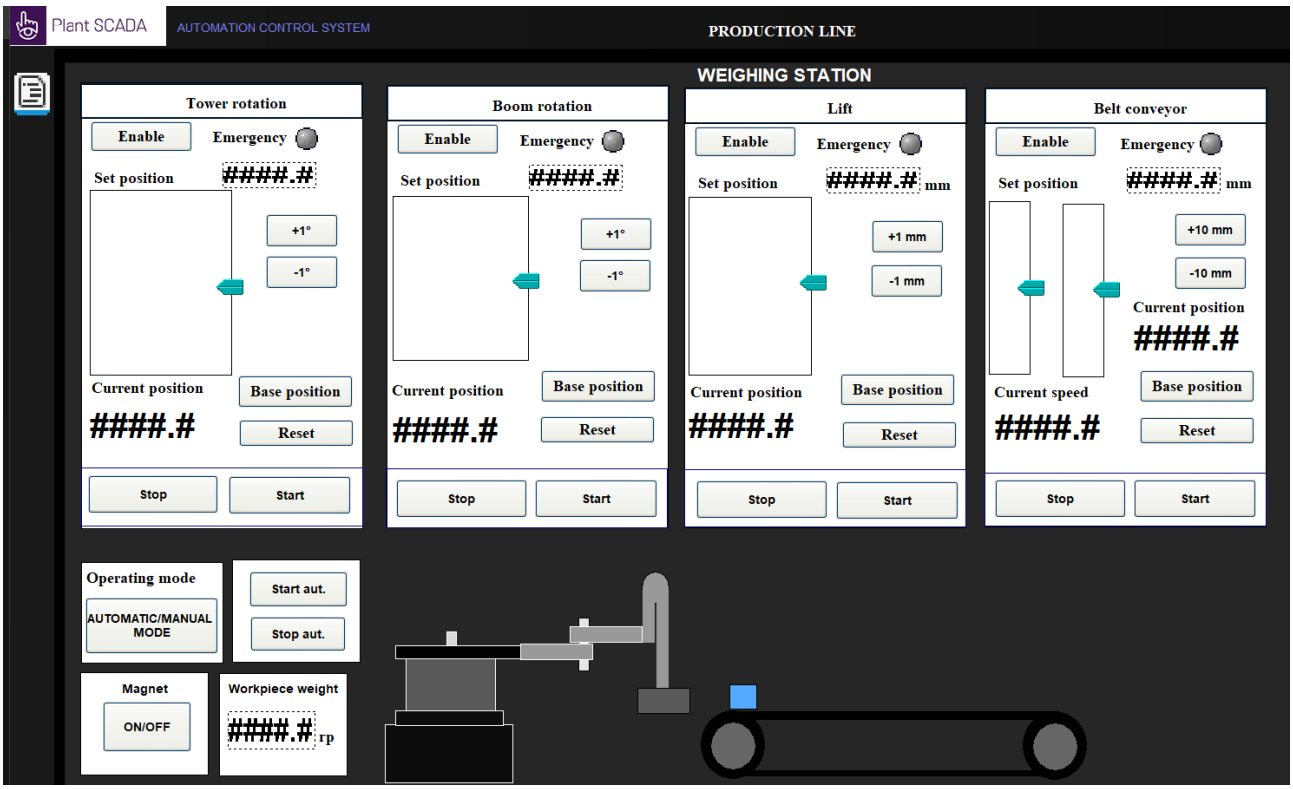


Рисунок 3.36 – Вид сторінки «WEIGHING STATION»

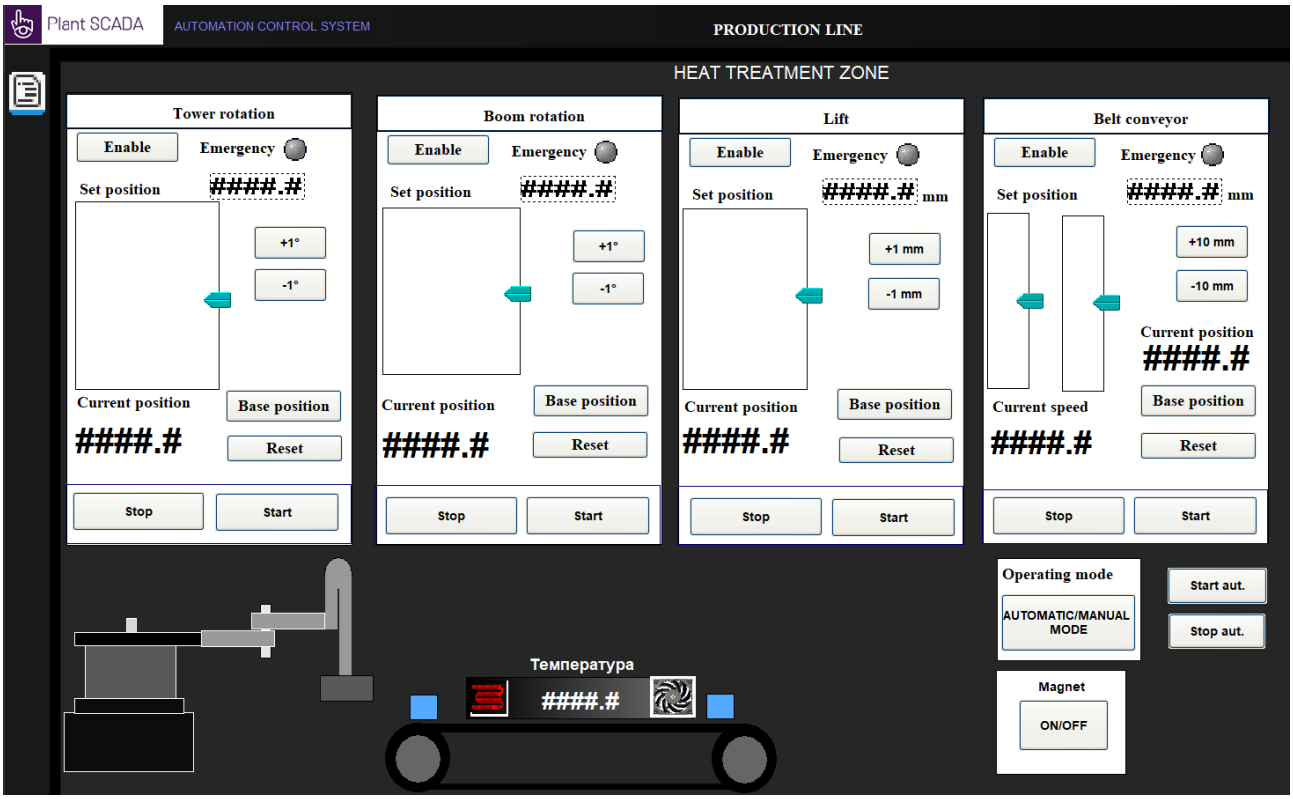


Рисунок 3.37 – Вид сторінки «HEAT TREATMENT ZONE»

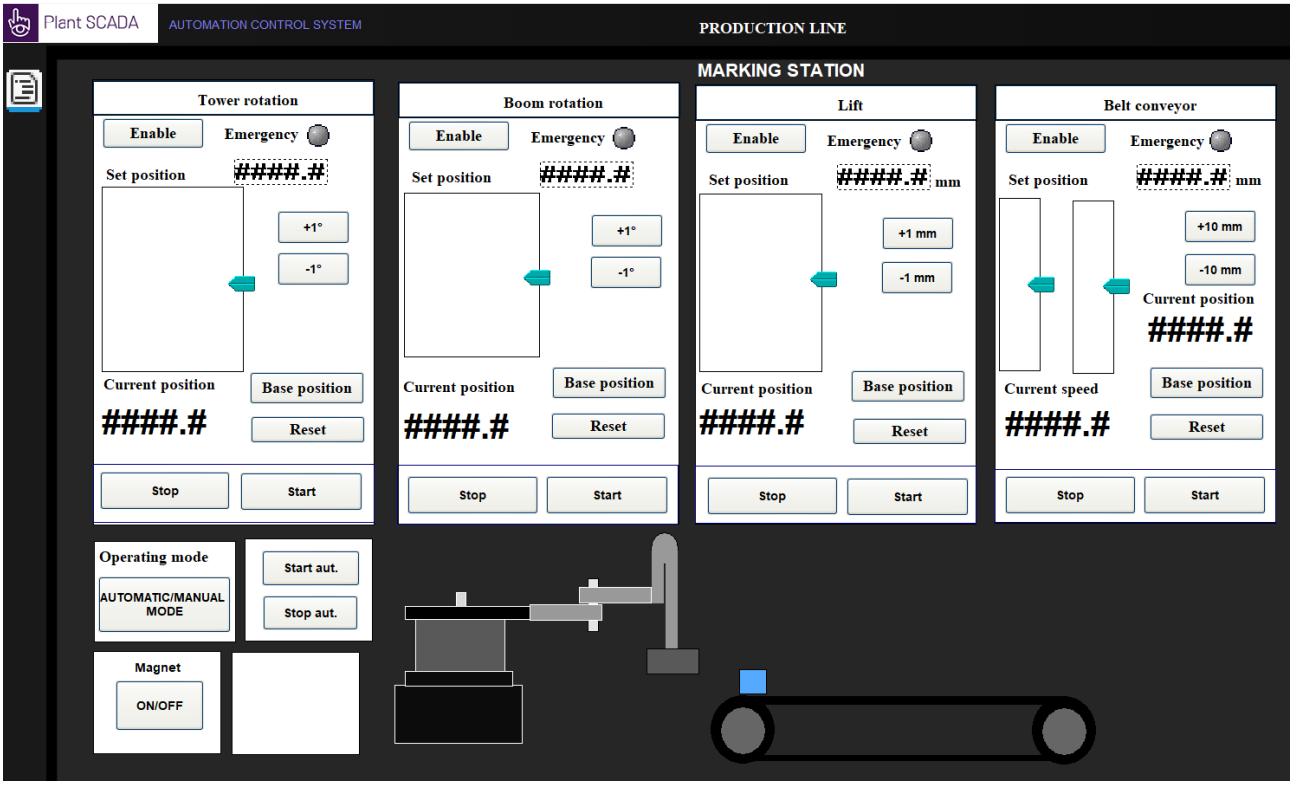


Рисунок 3.38 – Вид сторінки «MARKING STATION»

На етапі конфігурації каналів даних виконується прив’язка тегів SCADA до відповідних змінних OPC-UA/DA, що були попередньо налаштовані у KEPServerEX. Для кожного тегу визначаються параметри опитування, тип даних, діапазони та допустимі значення. Це забезпечує коректне відображення інформації на екранах SCADA та підвищує надійність взаємодії з PLC.

PlantSCADA надає розширені інструменти створення графічних елементів: анімованих індикаторів, цифрових і аналогових дисплеїв, трендів, кнопок керування, систем повідомлень і журналювання подій. Для зручності оператора були створені інтерактивні панелі керування транспортним приводом, режимом нагріву та механізмом маркування, що дозволяють запускати технологічні операції безпосередньо з інтерфейсу.

Таким чином, PlantSCADA виступає ключовим компонентом верхнього рівня автоматизованої системи, забезпечуючи повноцінну інтеракцію оператора з виробничою лінією, зручну візуалізацію технологічних параметрів та безпечне керування процесами зважування, термообробки та маркування.

3.4.1 Реалізація скриптів керування в PlantSCADA

У процесі розробки візуалізації було створено низку командних елементів (Button, Rectangle, Indicator), логіка роботи яких реалізована мовою Cicode/CMD. Нижче наведено приклади найбільш важливих скриптів.

Приклад 1 – Перемикач режиму AUTOMATIC/MANUAL на рисунку 3.39

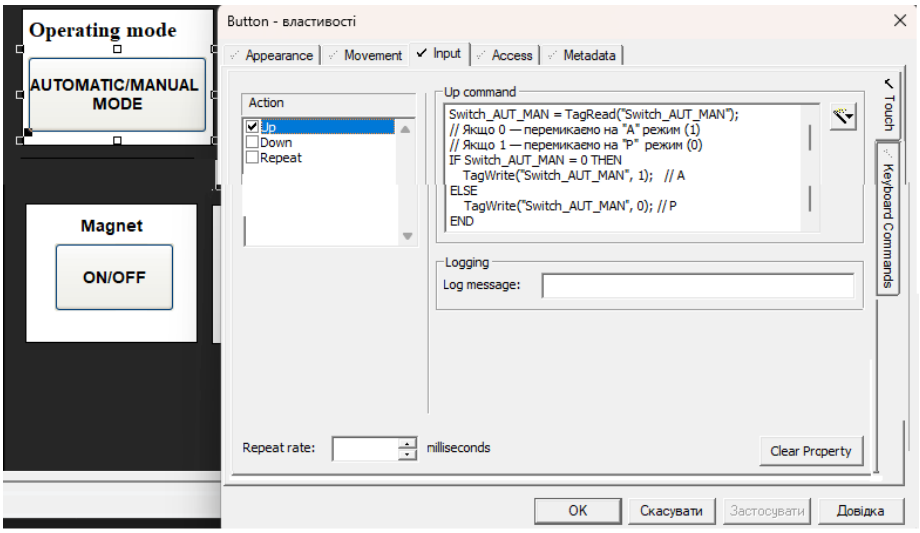


Рисунок 3.39 – Властивості елементу

Приклад 2 – Кнопка "Start aut." На рисунку 3.40

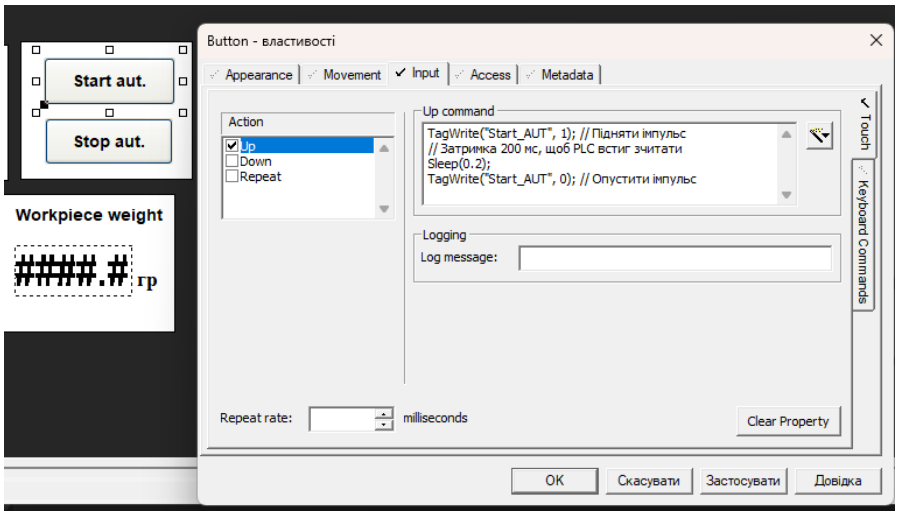


Рисунок 3.40 – Властивості елементу

Приклад 3 – Вмикання/вимикання магніту на рисунку 3.41

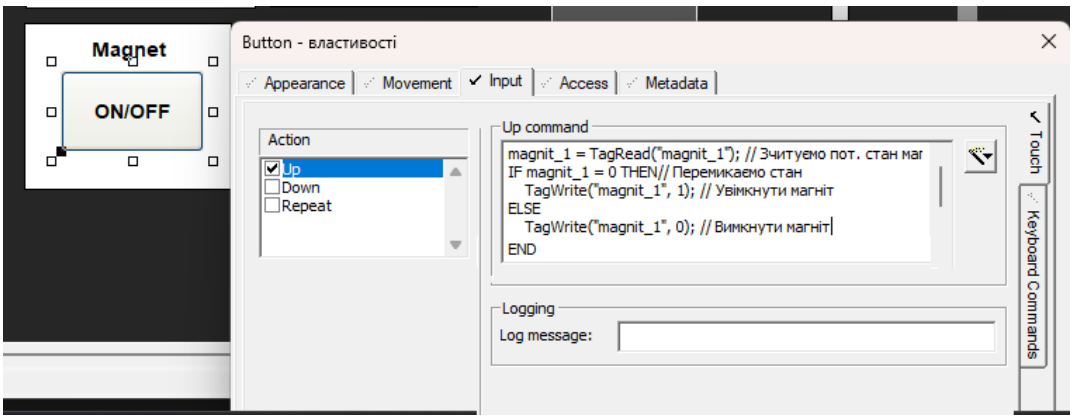


Рисунок 3.41 - Властивості елементу

Приклад 4 налаштування анімації прямокутника "Башта" на рисунку 3.42

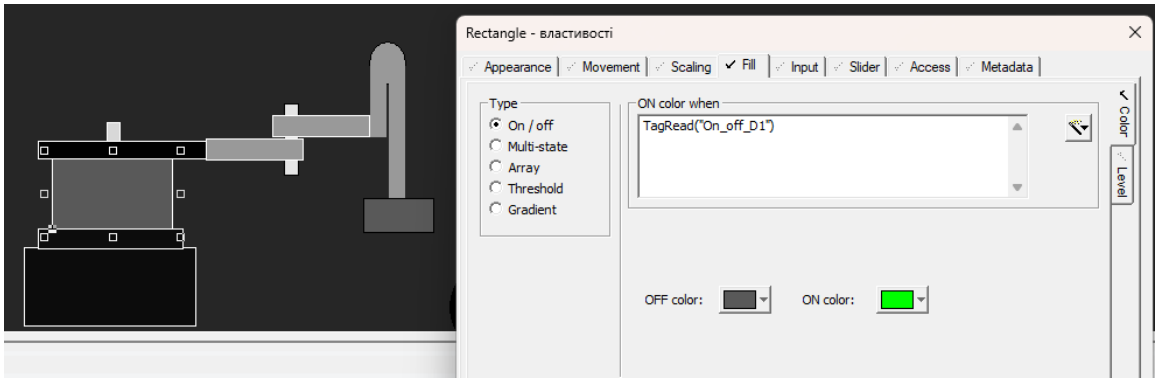


Рисунок 3.42 - Анімація прямокутника "Башта"

Приклад 5 надання дозволу на роботу елементу SCARA-робота на рисунку 3.43

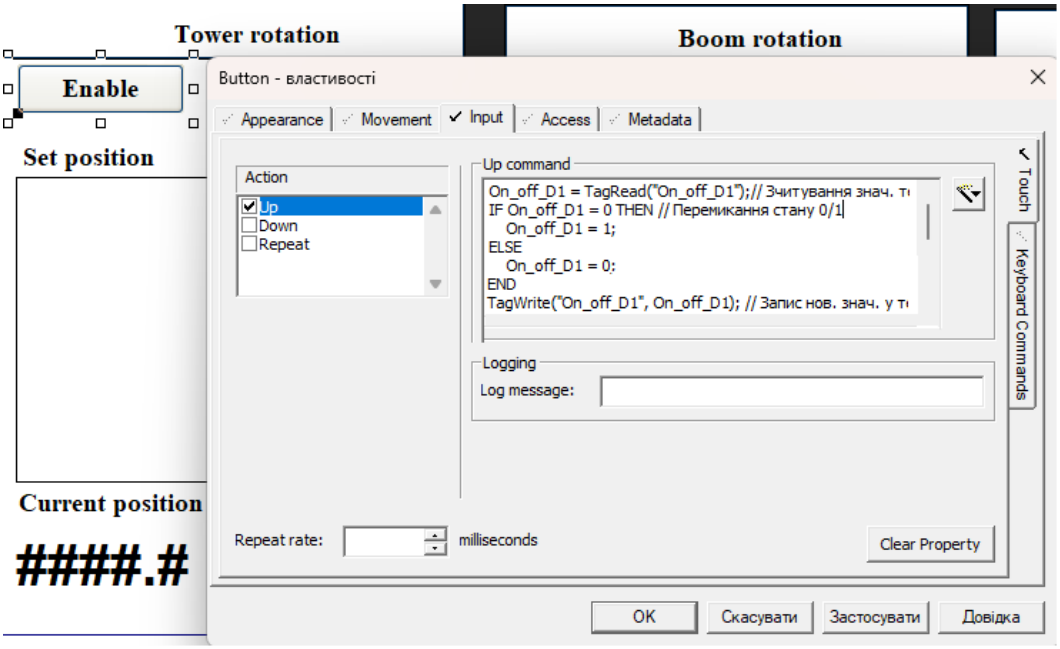


Рисунок 3.43 – Властивості елементу

Таким чином, використання скриптів Cicode забезпечило більш гнучке управління елементами інтерфейсу та підвищило інтерактивність SCADA-системи. Усі події оператора коректно передаються до PLC через OPC DA/UA і миттєво впливають на роботу технологічної лінії.

3.4.2 Режим симуляції

Режим симуляції був використаний для перевірки коректності роботи алгоритмів керування, обміну даними між програмованим логічним контролером (ПЛК), SCADA-системою та панелями HMI без задіяння реального обладнання.

Для цього була розгорнута інтегрована симуляційна інфраструктура, що включає:

- TIA Portal V16 – створення проєкту ПЛК, HMI та конфігурації тегів.
- PLCSIM V16 – емуляція контролера Siemens S7-1200.
- NetToPLCSim (s7:0) – інструмент для маршрутизації трафіку між OPC-сервером / SCADA і віртуальним PLCSIM.
- KepServerEX / OPC Quick Client – перевірка коректності OPC-з’єднання та читання тегів.
- Plant SCADA – створення операторських екранів і тестування взаємодії з віртуальним ПЛК.
- WinCC Runtime – запуск HMI-панелі, розробленої у TIA Portal.

Етап 1. Емуляція ПЛК у TIA Portal

У середовищі TIA Portal було завантажено програму керування для S7-1200, яка включає:

- алгоритми ручного та автоматичного режимів,
- роботу з координатами приводів,
- управління конвеєром, магнітом і датчиками,
- логіку аварійних станів,
- обмін із ваговим модулем і підсистемою маркування.

Після цього проєкт був запущений у PLCSIM V16, що створило віртуальний контролер із доступом через TCP-порт.

Етап 2. Підключення віртуального ПЛК через NetToPLCSim

Оскільки PLCSIM не підтримує пряме OPC-з'єднання, було використано NetToPLCSim**.**

Програма створює віртуальний інтерфейс **s7:0**, який перенаправляє запити OPC-клієнтів до PLCSIM.

Після налаштування:

- OPC-сервер успішно під'єднався до віртуального ПЛК,
- з’явилася можливість читати й записувати всі теги проєкту у реальному часі.

Етап 3. Тестування OPC-зв’язку через OPC Quick Client

Через KepServerEX + OPC Quick Client були перевірені:

- значення тегів (позиції, команди руху, аварії, перемикачі режимів),
- якість сигналів (усі – *Good*),
- коректність оновлення даних (Update Count зростає відповідно до активності процесу).

На отриманих скріншотах видно, що:

- позиції приводів (angle_D1, angle_D2, angle_D3, conv_position) змінюються відповідно до команд;
- команди руху (move_D1, move_D2, move_D3, conv_move) правильно активуються/деактивуються;
- відображення станів (home_D1, reset_D1, stop_D1 тощо) відповідає програмній логіці;
- OPC-клієнт отримує дані без затримок.

Це підтверджує правильну параметризацію тагів та коректність маршрутизації даних.

Етап 4. Симуляція HMI WinCC

За допомогою WinCC Runtime були протестовані операторські панелі:

- Модулі "Поворот башні", "Поворот стріли", "Підйомник", "Конвеєр".
- Кнопки *Старт/Стоп*, *Базова позиція*, *Скидання*, *Дозвіл*.
- Візуалізація поточної позиції та аварій.

Команди з панелі HMI:

- успішно передавалися у PLCSIM,
- відображались у OPC Quick Client,
- повертали коректну відповідь у вигляді значень датчиків та позицій.

Етап 5. Симуляція Plant SCADA

У PlantSCADA була створена друга операторська станція для перевірки:

- дистанційного керування приводами;
- відображення маси заготовки з OPC-тегу *weight_of_the_part*;
- роботи магніту та вибору режимів;
- повністю віртуальної анімації механізму.

Дані успішно синхронізуються між:

1. PLCSIM
2. OPC Server
3. PlantSCADA
4. HMI WinCC

Це означає, що вся система працює як у реальності. Отримані результати симуляції на рисунках 3.44-3.46

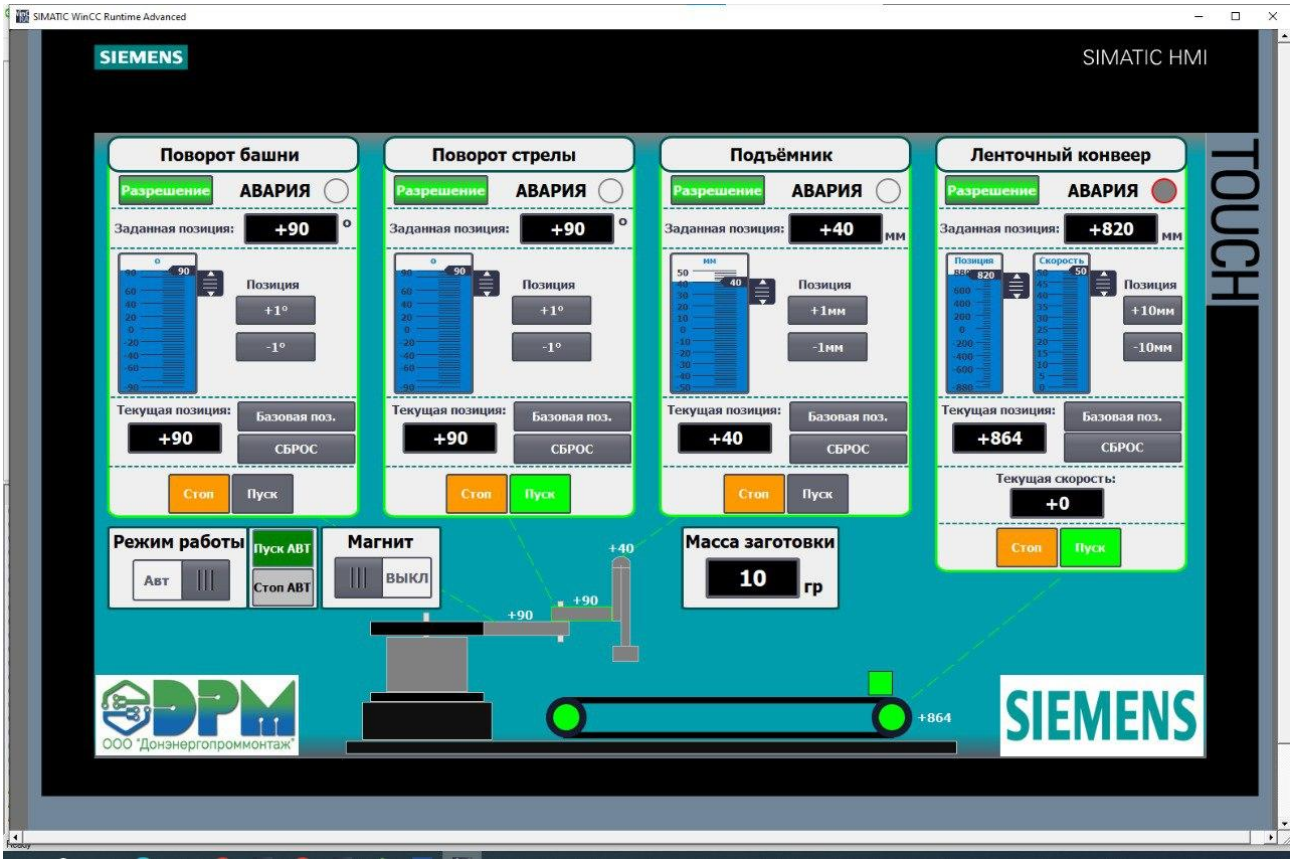
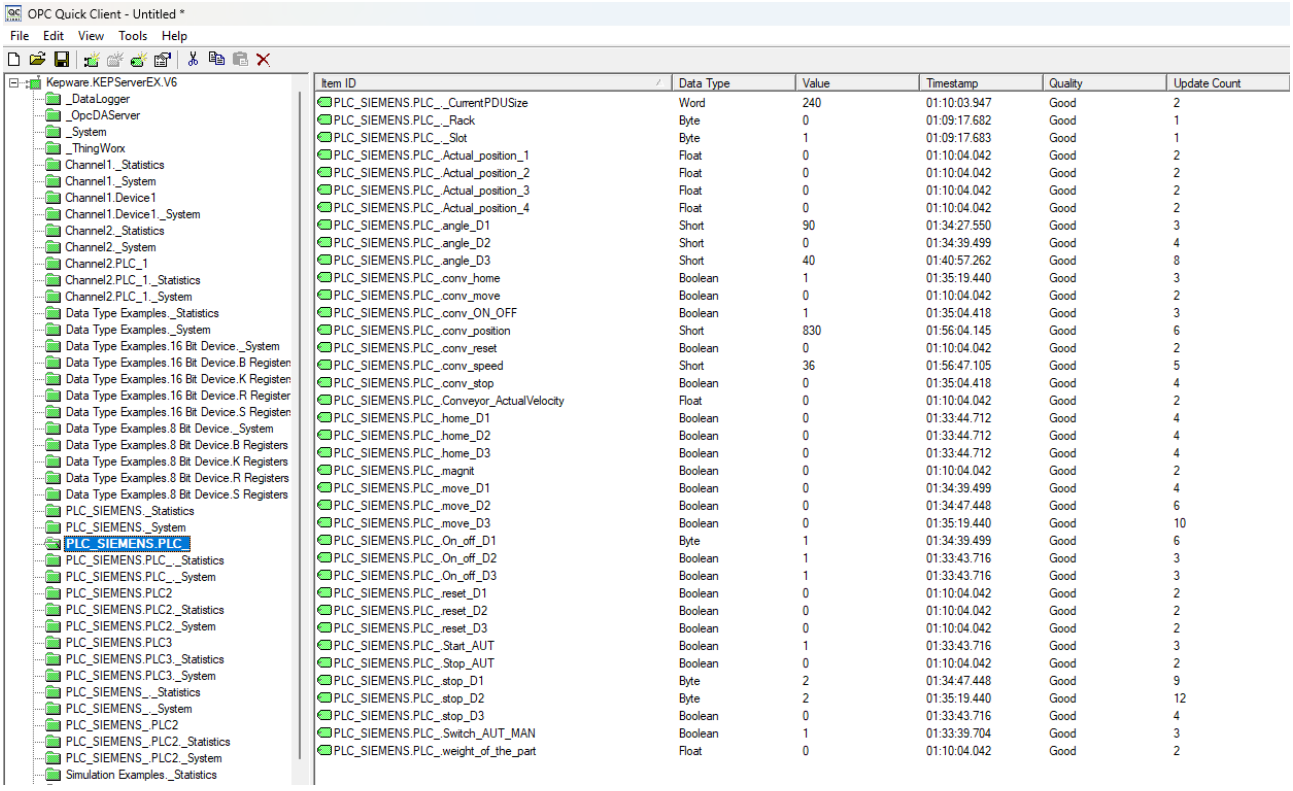


Рисунок 3.44 – Вид симуляції



Item ID	Data Type	Value	Timestamp	Quality	Update Count
PLC_SIEMENS.PLC_._CurrentPDUSize	Word	240	01:10:03.947	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_._Rack	Byte	0	01:09:17.682	Good	1
PLC_SIEMENS.PLC_._Slot	Byte	1	01:09:17.683	Good	1
PLC_SIEMENS.PLC_.Actual_position_1	Float	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.Actual_position_2	Float	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.Actual_position_3	Float	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.Actual_position_4	Float	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.angle_D1	Short	90	01:34:27.550	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.angle_D2	Short	0	01:34:39.499	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.angle_D3	Short	40	01:40:57.262	Good	8
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_home	Boolean	1	01:35:19.440	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_move	Boolean	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_ON_OFF	Boolean	1	01:35:04.418	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_position	Short	830	01:56:04.145	Good	6
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_reset	Boolean	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_speed	Short	36	01:56:47.105	Good	5
PLC_SIEMENS.PLC_.conv_stop	Boolean	0	01:35:04.418	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.Conveyor_ActualVelocity	Float	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.home_D1	Boolean	0	01:33:44.712	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.home_D2	Boolean	0	01:33:44.712	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.home_D3	Boolean	0	01:33:44.712	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.magnit	Boolean	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.move_D1	Boolean	0	01:34:39.499	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.move_D2	Boolean	0	01:34:47.448	Good	6
PLC_SIEMENS.PLC_.move_D3	Boolean	0	01:35:19.440	Good	10
PLC_SIEMENS.PLC_.On_off_D1	Byte	1	01:34:39.499	Good	6
PLC_SIEMENS.PLC_.On_off_D2	Boolean	1	01:33:43.716	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.On_off_D3	Boolean	1	01:33:43.716	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.reset_D1	Boolean	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.reset_D2	Boolean	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.reset_D3	Boolean	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.Start_AUT	Boolean	1	01:33:43.716	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.Stop_AUT	Boolean	0	01:10:04.042	Good	2
PLC_SIEMENS.PLC_.stop_D1	Byte	2	01:34:47.448	Good	9
PLC_SIEMENS.PLC_.stop_D2	Byte	2	01:35:19.440	Good	12
PLC_SIEMENS.PLC_.stop_D3	Boolean	0	01:33:43.716	Good	4
PLC_SIEMENS.PLC_.Switch_AUT_MAN	Boolean	1	01:33:39.704	Good	3
PLC_SIEMENS.PLC_.weight_of_the_part	Float	0	01:10:04.042	Good	2

Рисунок 3.45– Вид симуляції

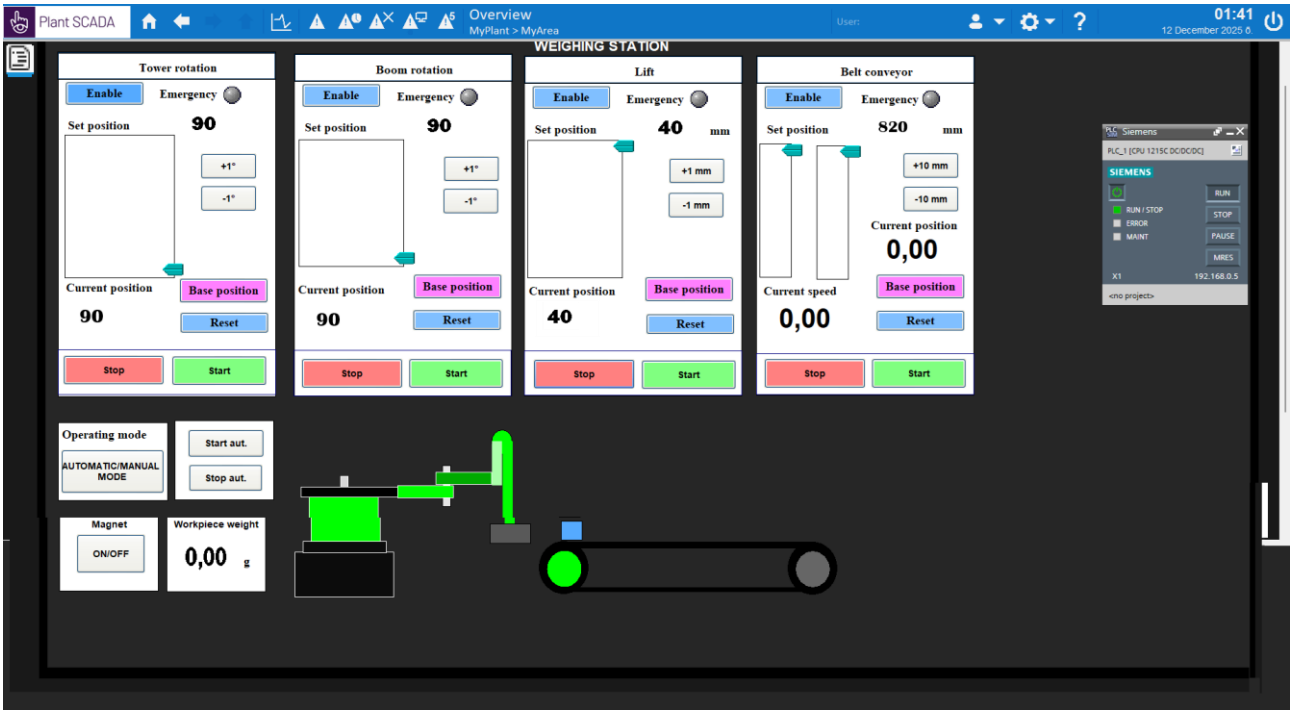


Рисунок 3.46– Вид симуляції

З наведених скріншотів видно:

- інтегрована система PLC → OPC → HMI → SCADA функціонує стабільно;
- керування приводами та конвеєром працює відповідно до алгоритмів;
- значення позицій у OPC відповідають значенням на HMI/SCADA;
- аварійні сигнали відображаються і передаються правильно;
- PlantSCADA повністю відтворює роботу реальної виробничої лінії.

Симуляційний режим дозволив:

- випробувати алгоритми без фізичного обладнання,
- перевірити коректність усіх інтерфейсів,
- протестувати аварійні сценарії,
- протестувати логіку автоматичного режиму,
- мінімізувати ризики помилок перед пусконалагодженням на об’єкті.

Режим симуляції забезпечив повноцінну перевірку проєкту в умовах, максимально наближених до реальних.
Всі взаємодіючі компоненти — TIA Portal, PLCSIM, NetToPLCSim, OPC-сервер, WinCC та PlantSCADA — продемонстрували стабільний обмін даними та повну відповідність очікуваній логіці роботи.
Таким чином, симуляційна модель підтверджує готовність системи до впровадження на реальному обладнанні.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі було виконано розробку та обґрунтування програмно-технічної реалізації автоматизації виробничої лінії зважування, термообробки та маркування деталей. Проведений аналіз та практична реалізація дозволили сформувати завершений комплекс керування, який відповідає сучасним вимогам галузі автоматизації та концепції Industry 4.0.

У результаті:

1. Сформовано архітектуру програмно-технічного комплексу**,** що включає польовий рівень сенсорів та виконавчих механізмів, рівень керування на основі ПЛК Siemens S7-1200 та рівень візуалізації PlantSCADA.
2. **Р**озроблено мережеву структуру системи з використанням промислового протоколу PROFINET, що забезпечує синхронний та надійний обмін даними між контролерами, частотними перетворювачами, RFID-модулями та ваговими системами.
3. Виконано програмування та налагодження контролерів Siemens S7-1200 у TIA Portal, включно зі створенням структурованих DB-блоків, реалізацією алгоритмів управління у мовах LD, FBD і SCL, конфігурацією OPC UA-сервера та налаштуванням мережевої взаємодії.
4. Інтегровано PLC з KEPServerEX, що дало змогу реалізувати уніфікований промисловий обмін через OPC DA/UA та забезпечити сумісність із SCADA-системою PlantSCADA.
5. Створено повнофункціональну систему візуалізації, яка надає оператору можливість контролювати режими роботи всіх технологічних зон, виконувати запуск і зупинку обладнання, відстежувати тренди та аварійні події, а також керувати роботою SCARA-робота та механізмами лінії.
6. Розроблено Cicode-скрипти, що забезпечують інтерактивність операторського інтерфейсу, реалізують алгоритми керування магнітами, приводами, нагрівачами та режимами роботи.

Отже, створений програмно-технічний комплекс забезпечує високу точність контролю технологічних параметрів, стабільність процесів термообробки та маркування, а також надійність і безпечність експлуатації виробничої лінії. Розроблена система автоматизації є масштабованою, адаптивною та готовою до інтеграції з інтелектуальними аналітичними рішеннями, що підтверджує її відповідність сучасним тенденціям розвитку автоматизованих виробництв.

ВИСНОВОК

У магістерській роботі вирішено комплексне завдання з проєктування та впровадження автоматизованої системи керування виробничою лінією зважування, термообробки та маркування деталей із подальшою розробкою системи візуалізації технологічного процесу. У ході дослідження було проведено аналіз технологічної схеми, визначено функціональні вимоги до системи та сформовано архітектуру керування на основі сучасних апаратних і програмних засобів.

У результаті реалізовано робочу структуру автоматизації на базі контролера Siemens S7-1200, яка забезпечує синхронізовану взаємодію між підсистемами зважування, термообробки та маркування. Для програмування логіки використано середовище TIA Portal, де створено та налагоджено програми мовами LD, FBD і SCL, що дало змогу реалізувати надійну, масштабовану та доступну до подальшого розширення систему керування.

Розроблена система візуалізації на HMI-панелі Siemens TP1900 Comfort забезпечує зручний інтерфейс оператора, контроль технологічних параметрів у реальному часі, відображення аварійних ситуацій та дій оператора, а також історію процесу. Використання OPC-сервера KEPServerEX дало змогу організувати стандартизований промисловий обмін даними між контролером, HMI та SCADA-рівнем.

У межах роботи створено структуру верхнього рівня диспетчеризації на базі PlantSCADA, що забезпечує централізований моніторинг, архівацію основних параметрів, візуальне представлення процесів термообробки та маркування, а також розширені інструменти аналітики для прийняття оперативних рішень.

Запропонована автоматизована система повністю відповідає вимогам сучасного виробництва, підвищує точність зважування, стабільність режимів термообробки, знижує кількість похибок маркування та оптимізує взаємодію оператора з технологічним обладнанням. Система демонструє високу надійність,

гнучкість та відповідність концепції Industry 4.0, що робить її придатною для інтеграції в більш масштабні виробничі комплекси.

Отримані результати підтверджують ефективність розроблених технічних рішень та створюють основу для подальшої модернізації виробничих процесів, включно з впровадженням систем предиктивної аналітики, віддаленого моніторингу й інтеграції з корпоративними платформами управління виробництвом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація зважування на автомобільних URL: https://surl.li/trjavp (Дата звернення: 03.08.2025)
2. Резнік Н.П. , Іванець І.О. Використання RFID-технології в області логістики та управління ланцюгами постачань. переваги та недоліки використання технології. 2022
3. Технологія радіочастотної ідентифікації для автоматизації процесів промисловості URL: https://surl.li/skaxro (Дата звернення 03.08.2025)
4. Рубан С. А. Адаптивне прогнозуюче керування процесом термічної обробки обкотишів з оперативним оцінюванням параметрів процесу з використанням рекурсивного алгоритму найменших квадратів. 2015.
5. Методика вдосконалення людино-машинного інтерфейсу URL: https://surl.lu/zbprjw (Дата звернення: 02.08.2025).
6. Евристична оцінка дисплеїв для SCADA-системи URL: https://surl.lt/vptgas (Дата звернення: 04.08.2025).
7. Дослідження інтерфейсу ЛМІ в мікромережах URL: https://surli.cc/rbpvvu (Дата звернення: 06.08.2025).
8. Mobile HMI based OPC UA for SCADA URL: https://surli.cc/qloawo (Дата звернення: 15.08.2025).
9. Комплексний аналіз даних SCADA-системи URL: https://surl.li/dqgktk (Дата звернення 04.08.2025)
10. SCADA в еру інтернету речей URL: https://surl.li/fgmfur
11. Industrial Internet of Things URL: https://surl.li/vhdowv (Дата звернення: 16.08.2025).
12. Єфіменко Л. І. та ін. Оптимізація вантажопотоку конвеєрної лінії. 2019. PhD Thesis. Криворізький національний університет.
13. Analysis of Internet of Things Networking Protocol OPC UA URL: https://surl.lu/ihysjc (Дата звернення: 14.08.2025).

14. Results of the implementation of a sensor network based on Arduino devices and multiplatform applications using the standard OPC UA URL: https://surl.li/jwpdxr(Дата звернення: 05.02.2025).
15. Integrating Siemens S7 with NODE-RED URL: https://surl.li/ldkiqe (Дата звернення: 15.08.2025).
16. SCADA and Edge Systems based on OPC UA, TSN and MTP Standards URL: https://surl.li/miapdk (Дата звернення: 15.08.2025).
17. Tabaa, Mohamed, et al. Industrial communication based on modbus and node-RED. Procedia computer science, 2018, 130: 583-588. (Дата звернення: 11.08.2025
18. Performance Analysis of OPC UA for Industrial Interoperability towards Industry 4.0 URL: https://surl.li/auuqjj (Дата звернення: 14.08.2025
19. Using Node-RED platform in an industrial environment URL: https://surl.li/ypkapw (Дата звернення: 14.08.2025).
20. AI-enhanced digital twins in maintenance: Systematic Review URL: https://surl.lt/micbuy (Дата звернення: 16.08.2025).
21. Контрольні ваги URL: https://surl.li/zdekfk (Дата звернення: 17.08.2025).
22. Weighing system and weighing method with object recognition URL: https://surl.li/avspsy (Дата звернення: 18.08.2025).
23. Cooling and heating system for electric snowmobile URL: https://surl.li/exsosm (Дата звернення: 18.08.2025).
24. SCARA robot URL: https://surl.li/mamytv (Дата звернення: 20.08.2025).
25. Безперервна технологічна лінія для прокатки та гартування цирконієвих пластин ядерної якості та спосіб її застосування URL: https://surl.lu/zsycyx (Дата звернення: 21.08.2025).
26. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50с.
27. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

28. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
29. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)
30. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).