

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
зі спеціальності
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:

***«Розробка автоматизованої системи керування ділянкою
тушіння коксу з використанням технології ІоТ»***

Виконав ст. гр. АКІТ-22

_____ Циба М.В.

Керівник

_____ Харламенко В.Ю.

Нормоконтроль

_____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри

_____ Рубан С. А.

Кривий Ріг – 2026

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-22 Цибі Максиму Вячеславовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Розробка автоматизованої системи керування ділянкою тушіння коксу з використанням технології IoT»

затверджено наказом по університету № 171с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 75с., презентація у Microsoft PowerPoint (13 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

_____ Розділ 1-2 _____ доц. Харламенко В.Ю.._____

_____ Нормоконтроль _____ доц. Маринич І. А. _____

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>25.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>15.05.26</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>05.06.26</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>07.06.26</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>08.06.26</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>09.06.26</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р

Керівник _____ /Харламенко В. Ю./

7. Запевнення: Я, Циба Максим Вячеславович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

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

Студент _____ / Циба М.В./

АНОТАЦІЯ

Циба М.В. Розробка автоматизованої системи керування ділянкою тушіння коксу з використанням технології IoT: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. [75]с.

Об'єкт дослідження - процес мокрого гасіння металургійного коксу та гідродинамічні процеси водяного контуру установки.

Предмет дослідження - методи, алгоритми та апаратно-програмні засоби автоматизованого керування ділянкою мокрого гасіння коксу з використанням мікропроцесорної техніки та IoT-платформ.

Метою роботи є підвищення енергоефективності насосного обладнання, стабілізація гідродинамічних параметрів процесу та подолання інформаційної ізольованості ділянки шляхом розробки інноваційної гібридної системи автоматичного керування на базі сучасного контролера Siemens, локальної панелі оператора (HMI) у шафі керування та відкритої IoT-платформи Node-RED.

У першому розділі проаналізовано технологічний процес і наявну локальну АСУ ТП ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та обґрунтовано доцільність модернізації ділянки з впровадженням частотно-регульованого приводу, ПД-регулятора та децентралізованої Web-SCADA.

У другому розділі виконано комплексну розробку апаратно-програмної частини системи автоматичного керування (САК). Обґрунтовано вибір елементної бази. Спроектовано архітектуру прикладного програмного забезпечення для логічного контролера у середовищі TIA Portal. Розроблено глобальну диспетчерську Web-SCADA з використанням протоколу S7 Communication та створено програмний «цифровий двійник» установки для тестування алгоритмів протиаварійного захисту (ПАЗ).

					КНУ КРБ.151.26.12.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Циба М.В.								
Перевір.		Харламенко В.Ю.							3	1
								КНУ АКІТ-22		
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затверд.		Маринич І.А.								

ЗМІСТ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ІНФОРМАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	8
1.1 Характеристика установки мокрого гасіння коксу як об'єкта керування	8
1.2 Опис технологічного процесу та існуючої системи автоматизації на ПАТ «АМКР»	10
1.3 Аналіз сучасних рішень та патентів у сфері автоматизації гасіння коксу	13
1.4 Постановка задачі.....	16
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ	
АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ ІОТ	19
2.1 Розробка загального алгоритму керування ділянкою мокрого гасіння коксу	19
2.2 Синтез системи автоматичного регулювання (САР) рівня води	23
2.3 Розробка структурної схеми комплексу технічних засобів.....	27
2.4 Вибір програмованого логічного контролера та модулів вводу/виводу	29
2.5 Вибір польового обладнання та виконавчих механізмів	31
2.6 Проєктування електричних схем підключення та компонування шафи керування.....	36
2.7 Розробка програмного забезпечення керування ділянкою тушіння коксу в середовищі TIA Portal	39
2.8 Розробка структури екранів панелі оператора (HMI).....	47
2.9 Проєктування мнемосхеми процесу гасіння	50
2.10 Інтеграція системи на верхній рівень (S7Communication / SCADA) та розробка IoT-додатку в Node-RED	52
2.11 – Інструкція тестування в різних режимах роботи	58
ВИСНОВОК.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	72
ДОДАТОК А – Лістинг програмного коду віртуального ПЛК в середовищі Node-RED	74

					КНУ КРБ.151.26.12.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Циба М.В.			ЗМІСТ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Харламенко В.Ю.								4	2
Н. Контр.		Маринич І.А.			КНУ АКІТ-22						
Затверд.		Маринич І.А.									

ВСТУП

Технологічний процес виробництва металургійного коксу завершується критично важливим етапом його мокрого гасіння, що забезпечує швидке та контрольоване зниження температури розпеченого вуглецевого масиву до безпечних значень. Цей процес супроводжується колосальними тепломасообмінними явищами та вимагає безперебійної циркуляції значних об'ємів технічної води. Враховуючи енергоємність насосного обладнання, що задіюється в гідродинамічному контурі башти гасіння, оптимізація експлуатаційних витрат та раціональне використання ресурсів на цій ділянці виступає пріоритетним завданням для сучасних металургійних підприємств.

Функціонування існуючих систем автоматизації мокрого гасіння коксу, зокрема на базовому підприємстві ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», спирається на локальні мікропроцесорні рішення та «товсті клієнти» SCADA-систем. Незважаючи на надійність контролерного обладнання попередніх поколінь, такі системи мають низку фундаментальних недоліків: жорстке позиційне регулювання рівня води, що провокує автоколивання та гідравлічні удари, відсутність частотного регулювання продуктивності насосів, а також глибока інформаційна ізольованість диспетчерської інфраструктури, яка суттєво обмежує оперативність прийняття рішень.

Проблема, що вирішується у даній кваліфікаційній роботі, полягає в комплексній модернізації процесу керування ділянкою шляхом переведення логіки на сучасний програмований логічний контролер промислового класу Siemens SIMATIC S7-1200. З точки зору надійності та енергоефективності, ключовим нововведенням є перехід від прямого пуску насосів до частотно-регульованого приводу SINAMICS G120C у комплексі з програмним ПД-регулюванням.

					КНУ КРБ.151.26.12.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП				
Розроб.		Циба М.В.							
Перевір.		Харламенко В.Ю.							
Н. Контр.		Маринич І.А.							
Затверд.		Маринич І.А.			КНУ АКІТ-22				

Це дозволяє реалізувати адаптивний перехід обладнання в економний режим під час технологічних пауз та повністю усунути кавітаційні явища в напірних магістралях.

Окремим завданням є подолання інформаційної «сліпоти» ділянки та розгортання багаторівневої системи диспетчеризації. Це передбачає впровадження локальної панелі оператора (HMI) для оперативного контролю безпосередньо біля шафи керування та розробку глобальної Web-SCADA на базі відкритої IoT-платформи Node-RED. Крім того, розробляється математична модель («цифровий двійник») об'єкта для безпечної імітації алгоритмів протиаварійного захисту (ПАЗ).

Аналіз сучасного стану засобів промислової автоматизації свідчить про стійку тенденцію до децентралізації управління та впровадження концепції Industry 4.0. Замість використання важких і дорогих розподілених систем керування (DCS), застосування веб-орієнтованих IoT-рішень [9] та протоколу S7 Communication [20] забезпечує кросплатформний доступ до телеметрії та гнучку інтеграцію польового рівня в глобальну інформаційну мережу підприємства.

Отже, обґрунтування актуальності теми полягає в тому, що розробка інноваційної гібридної системи автоматичного керування мокрим гасінням коксу є гострою інженерною потребою [6]. Запропоноване рішення, яке охоплює синтез алгоритмів ПЛК, впровадження частотного регулювання, вибір сучасної безконтактної КВПіА та створення віддаленого людино-машинного інтерфейсу, спрямоване на підвищення енергетичної ефективності установки, ліквідацію гідроударів та гарантування стабільних гідродинамічних показників у режимі реального часу.

Проектно-конструкторська документація та графічний матеріал кваліфікаційної роботи оформлені згідно з чинними нормативними стандартами [1, 2, 4].

					<i>КНУ КРБ.151.26.12.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

РОЗДІЛ 1

ІНФОРМАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Характеристика установки мокрого гасіння коксу як об'єкта керування

Об'єктом дослідження та автоматизації виступає комплексна промислова установка мокрого гасіння коксу (МГК), що експлуатується в умовах коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Даний об'єкт є критично важливою ланкою коксохімічного переділу, оскільки саме тут формуються кінцеві фізико-механічні властивості металургійного коксу, необхідного для стабільної роботи доменних печей підприємства. Головним технологічним завданням установки є швидке та контрольоване зниження температури розпеченого металургійного коксу з початкових 1000-1100 С до безпечних 200-250 С, при яких унеможлиблюється горіння вуглецю в атмосфері кисню

Конструктивно установка МГК являє собою складну просторову споруду, інтегровану з транспортною та гідродинамічною інфраструктурою. Основним архітектурним та функціональним елементом об'єкта є гасильна башта - залізобетонна споруда висотою 25-30 метрів, верхня частина якої переходить у звужену витяжну трубу. Вона виконує роль теплообмінника змішувального типу, де відбувається інтенсивна передача теплоти від розпеченого масиву вуглецю до диспергованих струменів води. Усередині башти змонтовано зрошувальний пристрій, який оснащений системою розпилювальних форсунок. Геометрія розташування форсунок розрахована таким чином, щоб забезпечити максимально рівномірне перекриття водяним факелом усієї площі гасильного вагона.

					КНУ КРБ.151.26.12.01.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Циба М.В.			РОЗДІЛ 1			Лім.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Харламенко В.Ю.								8	11
Н. Контр.		Маринич І.А.						КНУ АКІТ-22			
Затверд.		Маринич І.А.									

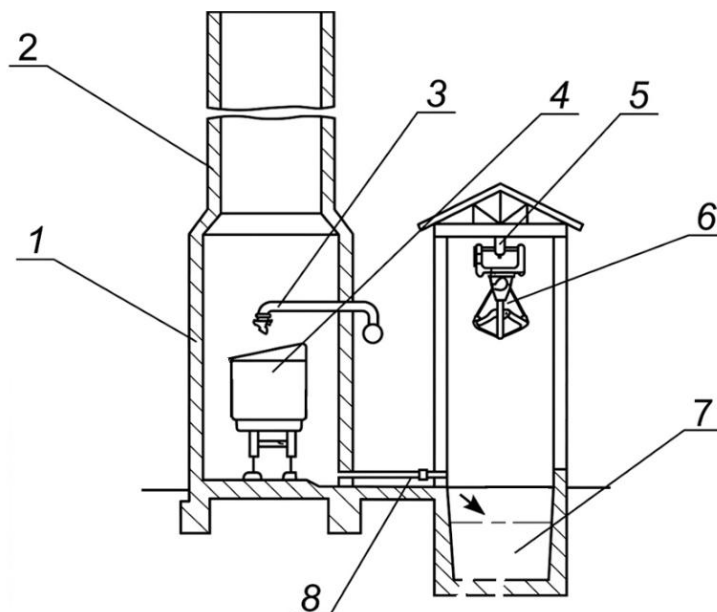


Рисунок 1.1 - Спрощена технологічна схема установки мокрого гасіння коксу

Транспортування розпеченого коксу здійснюється спеціальним великогабаритним гасильним вагоном. Вагон переміщується по залізничній колії за допомогою промислового електровоза, а його кузов має похиле днище, виконане з жалюзійних чавунних плит, що забезпечує вільне стікання надлишкової води після завершення процесу зрошення. Точне позиціонування цього рухомого складу безпосередньо під віссю зрошувального колектора є першочерговою механічною задачею об'єкта.

Невід'ємною та найбільш інерційною складовою об'єкта є замкнений оборотний контур технічної води. Через інтенсивне пароутворення (випаровується понад 500 кг води на кожну тонну коксу) та викиди парогазової суміші через трубу башти, система водопостачання потребує постійного балансування [5]. Апаратна структура цього контуру охоплює:

- Напірний бак, розташований у верхній частині башти, який акумулює необхідний об'єм води для забезпечення розрахункового гідростатичного тиску перед форсунками під час активної фази гасіння.

- Систему похилих зливних жолобів, якими відпрацьована вода разом із вимитим коксовим шламом самопливом відводиться від башти

					КНУ КРБ.151.26.12.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

- Резервуар-відстійник — багатосекційну залізобетонну споруду, де відбувається гравітаційне осадження твердих фракцій шламу.

- Насосну станцію, обладнану потужними відцентровими шламовими насосами, які здійснюють безперервне перекачування освітленої води з останньої секції відстійника назад до напірного бака.

- Магістраль підживлення, через яку в контур автоматично подається свіжа технічна або фенольна вода для компенсації втрат на випаровування.

Розглядаючи дану установку як об'єкт керування, необхідно виокремити її багатозв'язність та просторову розподіленість. Об'єкт поєднує в собі дискретні механізми (електроприводи головних швидкодіючих засувов, тягові двигуни електровоза) та безперервні гідродинамічні процеси (динаміка зміни рівня рідини у відстійнику та баці). Значна теплова інерційність, мінливість маси та температури коксового пирога, а також агресивне середовище (висока вологість, наявність сірководню та абразивного пилу) роблять цю установку складним об'єктом, що вимагає впровадження сучасних методів мікропроцесорної автоматизації та відмови від застарілих релейних схем.

1.2 Опис технологічного процесу та існуючої системи автоматизації на ПАТ «АМКР»

Функціонування ділянки мокрого гасіння коксу (МГК) в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» являє собою складний дискретно-безперервний тепломасообмінний процес. Його головним технологічним завданням є швидке та контрольоване зниження температури розпеченого металургійного коксу з початкових 1000–1100°C до безпечних 200–250°C. За такої кінцевої температури унеможлиблюється самозаймання вуглецю в атмосфері кисню під час подальшого транспортування продукту на сортування та в доменні цехи.

Технологічний цикл гасіння є жорстко циклограмованим і розпочинається з моменту видачі коксу. Після завершення періоду коксування коксовиштовхувач виштовхує розпечений масив (коковий пиріг) з камери печі безпосередньо у

					<i>КНУ КРБ.151.26.12.01.ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гасильний вагон. Завантажений електровоз прямує до гасильної башти. Система автоматики отримує дозвіл на ініціацію циклу гасіння виключно після точного позиціонування вагона в робочій зоні під зрошувальним колектором.

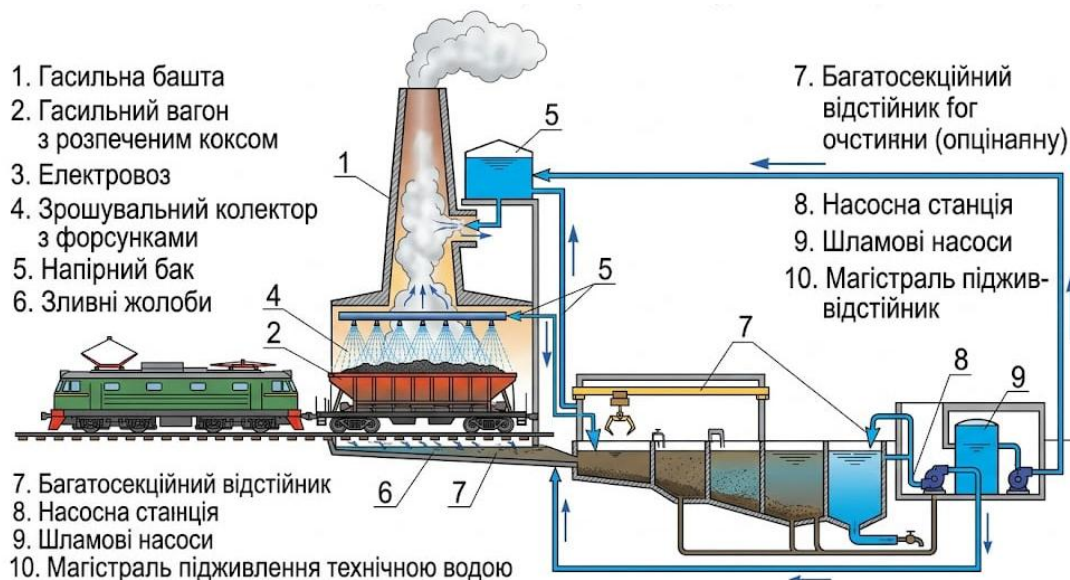


Рисунок 1.2 - Циклограма роботи механізмів башти гасіння

Активна фаза гідротермічного охолодження розпочинається з відкриття швидкодіючих засувок на напірному трубопроводі. Вода з напірного бака через розпилювальні форсунки інтенсивно обрушується на кокс. При контакті з розпеченим вуглецем вода миттєво закипає, поглинаючи колосальну кількість прихованої теплоти пароутворення. На кожен тону коксу випаровується близько 500–600 кг води. Тривалість подачі води є найважливішим керованим параметром процесу і зазвичай становить 90–120 секунд. Після закриття водяних засувок настає фаза зневоднення, під час якої гасильний вагон витримується під баштою протягом технологічної паузи для стікання надлишкової гравітаційної вологи, після чого охолоджений продукт транспортується до коксової рампи.

Паралельно з дискретним рухом вагона протікає безперервний процес циркуляції водяного контуру. Відпрацьована технічна вода разом із коксовим шламом по зливних жолобах відводиться до багатосекційного резервуара-відстійника. Просвітлена вода з останньої секції забирається відцентровими

насосами і перекачується назад у напірний бак башти [5], а втрати на випаровування компенсуються безперервним автоматичним підживленням системи.

Аналіз існуючої системи автоматизації.

На сьогодні ділянка МГК базового підприємства ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» функціонує під управлінням локальної мікропроцесорної системи. Обчислювальним ядром виступають контролери серії SIMATIC S7-300, а візуалізація процесу реалізована через стаціонарні робочі станції з локальними ліцензіями SCADA SIMATIC WinCC. Незважаючи на використання промислових ПЛК, архітектура існуючої системи зберігає низку критичних недоліків, які знижують її загальну ефективність:

- *Низька енергоефективність насосної групи.* Керування відцентровими насосами здійснюється від магнітних пускачів без використання частотних перетворювачів. Насоси постійно працюють на 100% потужності, марно перекачуючи воду через байпас під час технологічних пауз, що призводить до колосальних перевитрат електроенергії.

- *Гідродинаміка та гідроудари.* Регулювання рівня води у відстійнику здійснюється за двопозиційним (релейним) законом на базі поплавкових датчиків рівня. Відсутність ПД-регулювання унеможливорює плавне підживлення, викликає постійні автоколивання рівня та провокує руйнівні гідравлічні удари в магістралях башти.

- *Інформаційна ізолюваність («силовість» даних).* SCADA-система побудована за принципом «товстого клієнта». Доступ до мнемосхем та керування установкою жорстко прив'язаний до комп'ютера в операторній. Передача даних до загальнозаводської мережі або віддалений моніторинг зі смартфонів/планшетів керівництва неможливі без закупівлі додаткових дорогих Web-серверів.

- *Відсутність безпечного середовища для навчання.* Система не має віртуального тренажера. Перевірка логіки або відпрацювання аварійних ситуацій диспетчерами (наприклад, заклинювання засувки або відмова насоса) можливі лише на реальному обладнанні, що несе ризики для виробництва.

					КНУ КРБ.151.26.12.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.3 Аналіз сучасних рішень та патентів у сфері автоматизації гасіння коксу

Розвиток систем автоматизації на коксохімічному виробництві пройшов шлях від старих релейних схем до сучасних мікропроцесорних систем. Щоб зрозуміти, куди рухатися далі і що покращувати, варто проаналізувати існуючі промислові рішення, які вже працюють на металургійних підприємствах (наприклад, типові проекти від інституту «ДІПРОКОКС», інтеграторів «С-Інжиніринг» або Primetals Technologies).

Розглянемо дві типові архітектури систем керування для ділянок мокрого гасіння коксу (МГК), які представляють різні покоління автоматизації.

Система 1: Локальна АСУ ТП на базі SCADA WinCC та контролерів S7-300.

Більшість українських установок (старі батареї ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» чи ПрАТ «ЮЖКОКС») працюють за класичною централізованою схемою. Головним пристроєм тут є контролер серії SIMATIC S7-300 або S7-400. Керування насосами відбувається за простою схемою «увімкнути/вимкнути» через магнітні пускачі, без частотних перетворювачів. За процесом слідкують з операторної кімнати, де стоять звичайні комп'ютери з ліцензійною програмою SCADA (SIMATIC WinCC v7.x).

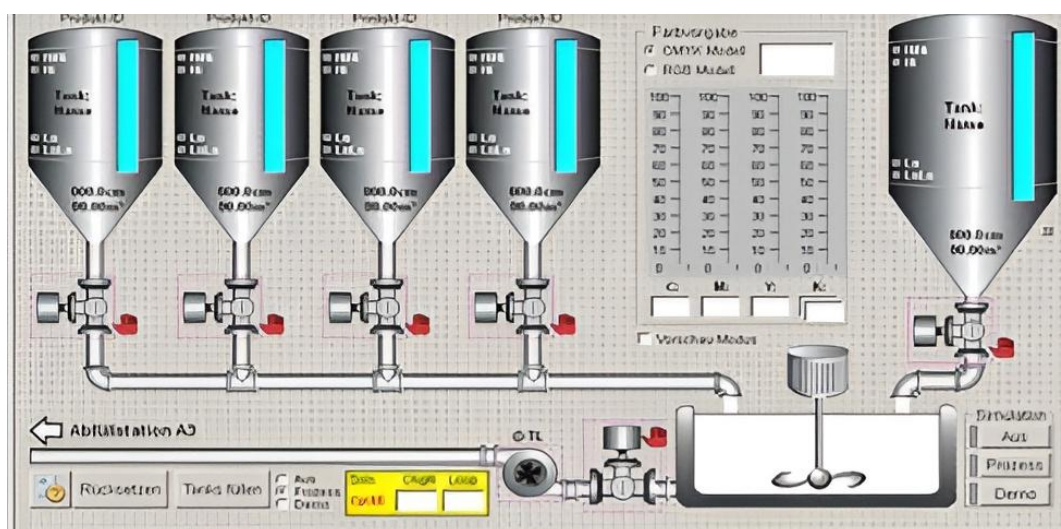


Рисунок 1.3 - Скріншот інтерфейсу диспетчера в системі SIMATIC WinCC v7 для ділянки гасіння коксу

					КНУ КРБ.151.26.12.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Переваги системи:

- Висока надійність обладнання та стабільна робота базових алгоритмів контролера.

- Використання перевіреної промислової мережі PROFIBUS DP для підключення датчиків.

Недоліки системи:

- *Інформаційна ізолюваність.* Дані можна побачити лише на комп'ютерах в операторній. Щоб передати інформацію на смартфон керівника або в загальну мережу заводу, потрібно купувати додаткові дорогі сервери та веб-ліцензії.

- *Низька енергоефективність та знос обладнання.* Регулювання рівня води у відстійнику відбувається ривками (за допомогою поплавкових датчиків). Насоси завжди працюють на 100% потужності, перекачуючи воду вхолосту через байпас під час пауз між гасіннями коксу.

Система 2: Комплексна розподілена система керування (DCS) на базі SIMATIC PCS 7.

На сучасних європейських заводах впроваджують глобальні системи (DCS), де ділянка гасіння - це лише мала частина загальнозаводської мережі. Тут уже використовують сучасні радарні рівнеміри та частотні перетворювачі для насосів. Але для збору та обробки даних такої системи потрібна ціла серверна кімната: дорогі сервери баз даних, інженерні станції, системи резервування мережі.

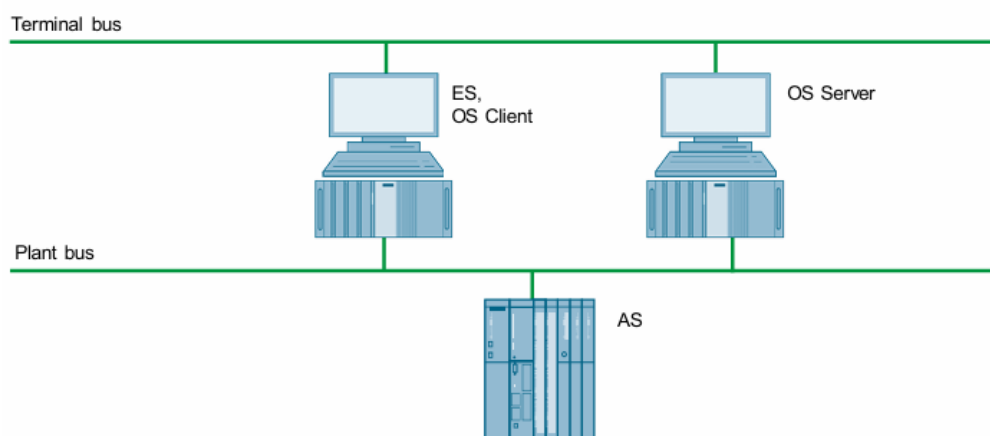


Рисунок 1.4 - Структурна схема типової архітектури DCS на базі SIMATIC PCS 7 із серверами та робочими станціями

Переваги системи:

- Дуже висока відмовостійкість завдяки дублюванню мереж та процесорів.
- Наявність вбудованих функцій плавного ПІД-регулювання, що захищає труби від гідроударів.

Недоліки системи:

- Надмірна складність та висока ціна: Купувати дорогі сервери та складні ліцензії лише для того, щоб контролювати одну башту гасіння, економічно не вигідно.
- Закритість архітектури: Щоб змінити мнемосхему на екрані або передати дані в сучасну хмарну систему, треба наймати вузькопрофільних програмістів. Система не розрахована на легкий доступ через звичайний веб-браузер.

Напрямки вдосконалення в рамках дипломного проєкту.

На основі аналізу цих реальних систем, у роботі пропонується сучасний гібридний підхід: поєднати класичну надійність промислового ПЛК Siemens S7-1200 із гнучкістю ІТ-технологій та Інтернету речей (IoT).

Основні покращення, які реалізуються в роботі:

- *Децентралізація диспетчеризації (Web-SCADA на базі Node-RED).* На противагу монолітним та комерційно закритим продуктам (на зразок SIMATIC WinCC), верхній рівень системи розгортається на відкритій IoT-платформі потокового програмування Node-RED. З інженерної точки зору, це рішення ліквідує жорстку прив'язку оператора до єдиної робочої станції. Завдяки веб-орієнтованій архітектурі, моніторинг та повноцінне керування процесом гасіння стають доступними через звичайний браузер із будь-якого пристрою [11] (наприклад, із цехового планшета або робочого смартфона інженера). Такий підхід забезпечує справжню кросплатформенність та зводить до нуля капітальні витрати на закупівлю додаткових клієнтських ліцензій при розширенні диспетчерської мережі підприємства.

- *Впровадження ПІД-регулятора та енергоефективного керування насосом.* У реальних промислових умовах ПІД-контролер є критично важливим для плавного регулювання рівня води у відстійнику та точного керування продуктивністю насоса

					КНУ КРБ.151.26.12.01.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(через частотний перетворювач). Це захищає насос від кавітації та усуває гідроудари. Проте, оскільки в нашому проєкті немає реального фізичного об'єкта, на якому можна було б зробити правильне автоналагодження (Tuning) ПД-коефіцієнтів, керування насосом у логіці ПЛК було адаптовано і розбито на декілька режимів. Під час очікування вагона система автоматично переводить насос в «Еко-режим» (50% потужності / 25 Гц), а при активному виливі води чи критичному падінні рівня - миттєво виводить на «Максимум» (100% / 50 Гц). Це дає суттєву економію електроенергії без ризику для обладнання.

- *Створення «Цифрового двійника».* У середовищі Node-RED створено математичну модель установки. Вона дозволяє візуально тестувати програму та відпрацьовувати аварії (наприклад, заклинювання засувки, зсув вагона, критичне падіння рівня) повністю віртуально, без ризику пошкодити реальне заводське обладнання.

1.4 Постановка задачі

На основі аналізу існуючої локальної АСУ ТП ділянки мокрого гасіння коксу (МГК) на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», яка характеризується вкрай низькою енергоефективністю, постійними гідравлічними ударами та інформаційною ізолюваністю, а також критичного огляду сучасних альтернативних рішень на ринку, сформовано концепцію комплексної модернізації. Просте масштабування існуючої системи на базі «товстих клієнтів» WinCC або перехід на важкі DCS-комплекси супроводжується значними капітальними витратами та не вирішує проблему мобільного доступу до даних.

Головною метою кваліфікаційної роботи є розробка інноваційної гібридної АСУ ТП, яка дозволить радикально модернізувати ділянку МГК, поєднавши безкомпромісну надійність промислового обладнання Siemens із гнучкістю відкритих IoT-технологій. Для досягнення цієї мети та усунення виявлених недоліків обґрунтовано наступні стратегічні напрямки модернізації:

					КНУ КРБ.151.26.12.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

- *Модернізація обчислювального ядра та логіки.* Фундаментальним кроком є комплексне оновлення керуючої частини на базі сучасного програмованого логічного контролера (ПЛК) промислового класу Siemens SIMATIC S7-1200 [18]. Це дозволить реалізувати високоточне циклограмування процесу, впровадити надійний скінченний автомат керування та комплексну підсистему протиаварійного захисту (ПАЗ) з пріоритетами переривань, замінивши примітивну позиційну логіку на складні багатозв'язні алгоритми.

- *Підвищення енергоефективності насосного обладнання.* Замість енергозатратного методу прямого пуску від магнітних пускачів обґрунтовано впровадження частотно-регульованого приводу (ЧРП) на базі перетворювачів частоти (наприклад, SINAMICS G120C) [19]. Це інженерне рішення, у поєднанні з програмним ПІД-регулятором контролера, дозволить реалізувати адаптивне керування: автоматичне переведення насоса в «Еко-режим» (зниження частоти до 25 Гц) у періоди технологічних пауз та плавне виведення на номінальну потужність під час активного виливу. Такий підхід мінімізує питомі витрати електроенергії (зниження на 30–40%) та повністю усуває руйнівні гідравлічні удари й ризик кавітації в напірних магістралях башти.

- *Модернізація польового контрольно-вимірювального обладнання.* Враховуючи вкрай агресивні умови коксохімічного виробництва (висока вологість, хімічно активна пара, пил), необхідно відмовитися від застарілих релейних поплавкових датчиків. Їх заміна на сучасні безконтактні аналогові засоби - індуктивні датчики позиціонування (Turck uprox+) [22] та мікрохвильові радарні рівнеміри (Endress+Hauser) [10] - забезпечить неперервний і надзвичайно точний зворотний зв'язок для контуру ПІД-регулювання, гарантуючи стабільність роботи системи без ризику хибних спрацювань.

- *Інформаційна інтеграція та цифровізація (Industry 4.0).* Для усунення інформаційної ізольованості («сліпоті») ділянки та жорсткої прив'язки операторів до стаціонарного комп'ютера обґрунтовано відмову від важких локальних SCADA-систем на користь відкритої IoT-платформи Node-RED. Архітектура нової системи використовуватиме протокол S7 Communication для розгортання повноцінної Web-

					КНУ КРБ.151.26.12.01.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

SCADA, що забезпечить кросплатформний віддалений доступ до керування через звичайний браузер. Крім того, з огляду на відсутність фізичного об'єкта, окремим завданням є створення математичної моделі («цифрового двійника») установки для автономної верифікації керуючих алгоритмів та безпечної імітації аварійних станів.

- Впровадження зазначених напрямків модернізації дозволить створити надійний апаратний базис для концепції «Цифрового підприємства», оптимізувати експлуатаційні витрати, підвищити безпеку персоналу та гарантувати стабільно високі показники якості металургійного коксу.

Підсумовуючи результати інформаційного дослідження об'єкта автоматизації у першому розділі, можна стверджувати, що комплексна модернізація ділянки мокрого гасіння коксу вимагає рішучої відмови від ізольованих релейно-контакторних та застарілих SCADA-систем. Визначені стратегічні напрямки - мікропроцесорне керування алгоритмами, впровадження частотних перетворювачів для стабілізації гідродинаміки та розгортання диспетчеризації на базі IoT-платформ - формують чітке технічне завдання. Виконання цих завдань дозволить створити надійний фундамент для другого етапу роботи: проектування комплексу технічних засобів, розробки схем підключення та синтезу прикладного програмного забезпечення.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ ІОТ

2.1 Розробка загального алгоритму керування ділянкою мокрого гасіння коксу

Програмна реалізація логіки функціонування системи автоматичного керування (САК) ділянкою мокрого гасіння коксу (МГК) базується на обробці дискретних та аналогових сигналів, що надходять від польового обладнання до програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200. Відповідно до розробленої графічної структури, загальний алгоритм роботи ПЛК організовано за двофазним принципом (у вигляді скінченного автомата станів), де в межах кожної фази виконуються чітко визначені технологічні та захисні операції.

Логіка функціонування програми принципово розділена на два незалежні паралельні процеси: неперервний фоновий контур регулювання гідродинамічних параметрів (виконується асинхронно) та дискретний скінченний автомат керування безпосередньо циклом гасіння.

Неперервний фоновий процес - цей алгоритмічний блок працює постійно, незалежно від наявності гасильного вагона під баштою, та забезпечує утримання технологічного балансу води:

- *Опитуємо аналогові датчики.* ПЛК здійснює циклічне зчитування та масштабування даних із мікрохвильових радарних рівнемірів напірної башти (LT1) та відстійника (LT2).

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Циба М.В.			РОЗДІЛ 2				Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Харламенко В.Ю.									19	51
Н. Контр.		Маринич І.А.			КНУ АКІТ-22							
Затверд.		Маринич І.А.										

- *ПІД-регулювання рівня у відстійнику.* Для компенсації води, що випарувалася, функціональний блок ПІД-регулятора безперервно обчислює розузгодження між фактичним рівнем (LT2) та заданою уставкою (3.5 м). Результатом обчислення є плавна зміна аналогового керуючого впливу (4-20 мА) на цифровому позиціонері пропорційного клапана підживлення LV2. Такий підхід повністю виключає автоколивання рівня.

- *Енергоефективне керування насосом (UZ3).* Замість дискретного вмикання/вимикання, продуктивність насоса регулюється за допомогою перетворювача частоти. У періоди очікування контролер задає мінімальну частоту обертання для підтримки циркуляції води у трубопроводах, а при зниженні рівня у напірній башті (LT1) - плавно виводить привід на номінальну потужність.

- *Протиаварійний захист (ПАЗ) насосної групи.* Якщо рівень у відстійнику падає нижче критичної позначки (аварійний Lmin), алгоритм генерує апаратне блокування насоса UZ3 для запобігання кавітаційному руйнуванню крильчатки та виводить аварійне повідомлення на НМІ.

- *Дискретний скінченний автомат (Цикл гасіння)* - логіка взаємодії з рухомим складом реалізується через послідовні кроки (фази).

Фаза 1 - Очікування та ініціалізація. Цей стан є вихідним для дискретного автомата. Система циклічно опитує дискретні індуктивні датчики просторового позиціонування гасильного вагона (SQ1, SQ2). Додатково перевіряється умова технологічної готовності системи: рівень води в напірній башті (LT1) має становити не менше 4.0 метрів. Якщо гідростатичний напір достатній, а вагон чітко зафіксовано на робочій позиції під зрошувальним колектором (SQ1 = 1 та SQ2 = 1), алгоритм ініціює безумовний перехід до виконання Фази 2.

Фаза 2 - робочий цикл (Активне гасіння та інтегрований ПАЗ). Ця фаза відповідає за безпосереднє виконання технологічної циклограми охолодження коксу при взаємодії з рухомим складом:

- Контролер аналізує тригерну умову «Вагон на позиції? (SQ1 = 1 і SQ2 = 1)». Якщо хоча б один із індуктивних датчиків не активний, система фіксує відсутність вагона у зоні башти і повертається на початок Фази 1.

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- При одночасному спрацюванні датчиків положення ПЛК ініціює початок гасіння. Виконується блок дій «Відкрити головну засувку М1. Запустити таймер гасіння Т».

- Модуль контролю ходу арматури (ПАЗ) - одразу після видачі команди на відкриття засувки запускається внутрішній таймаут (5 секунд), протягом якого аналізується логічний ромб умови «Засувка відкрилась (сигнал кінцевого вимикача)?». Якщо зворотний сигнал відсутній (фіксація заклинювання приводу), алгоритм припиняє виконання робочого циклу і переводить лінію зв'язку на відокремлений збоку блок протиаварійного захисту.

- За умови успішного відкриття арматури система переходить до циклічного моніторингу нештатних ситуацій під час зрошення. Логічний ромб виконує комплексну перевірку: «Втрата позиції вагона? ($SQ1 = 0$ АБО $SQ2 = 0$) АБО рівень води в напірному баці критичний». Якщо виникає хоча б одне з цих збурень, алгоритм негайно скасовує фазу зрошення і спрямовує стрілку до блоку ПАЗ.

- Паралельно з моніторингом збурень перевіряється логічний ромб «Таймер гасіння Т завершився?». Поки час відліку триває, алгоритм зациклюється на перевірку втрати позиції/рівня. Після закінчення параметрованого часу гасіння здійснюється перехід до блоку «Закрити головну засувку М1. Скинути таймер Т».

- Модуль контролю посадки арматури (ПАЗ): Після команди на закриття ПЛК перевіряє стан кінцевика закриття через логічний ромб «Засувка закрилась?». Якщо арматура не сіла в сидло за встановлений час, алгоритм фіксує аварію і здійснює перехід до блоку ПАЗ.

- Якщо засувка успішно закрилась, лінія алгоритму переходить до елемента «Кінець циклу», звідки по довгій вихідній стрілці повертається на початок Фази 1 («Початок циклу») для очікування наступного завантаженого вагона.

Логіка роботи відокремленого блоку протиаварійного захисту (ПАЗ) - блок ПАЗ графічно винесений в окрему вертикальну структуру збоку від основного тіла Фази 2. Він виступає єдиною точкою збору для всіх аварійних стрілок, що виникають при порушенні умов ходу засувки М1 або критичного падіння гідродинамічних параметрів.

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При переході на цей етап ПЛК виконує прямокутник дій: «Аварійне блокування засувки M1 та рухів. Вивід коду Alarm_ID на HMI-панель / Node-RED». Після цього система переходить у стан програмного блокування і циклічно опитує ромб умови «Помилку квитовано оператором з HMI?». Доки оператор не усуне несправність і не натисне кнопку скидання, система утримує виконавчі механізми в безпечному стані. Після ручного квитування стрілка виходить із ромба умови і підключається до елемента «Кінець циклу», повертаючи автоматику у вихідний режим очікування.

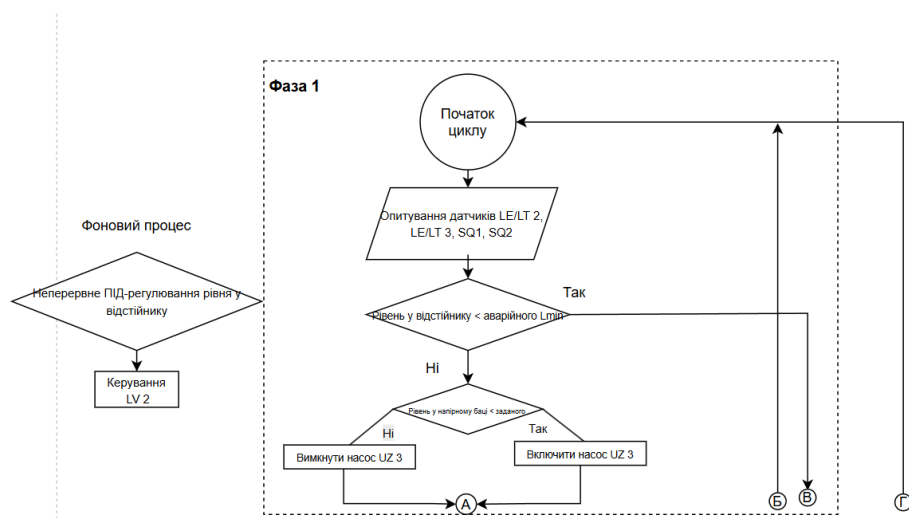


Рисунок 2.1— Зображення алгоритму роботи програмного контролера

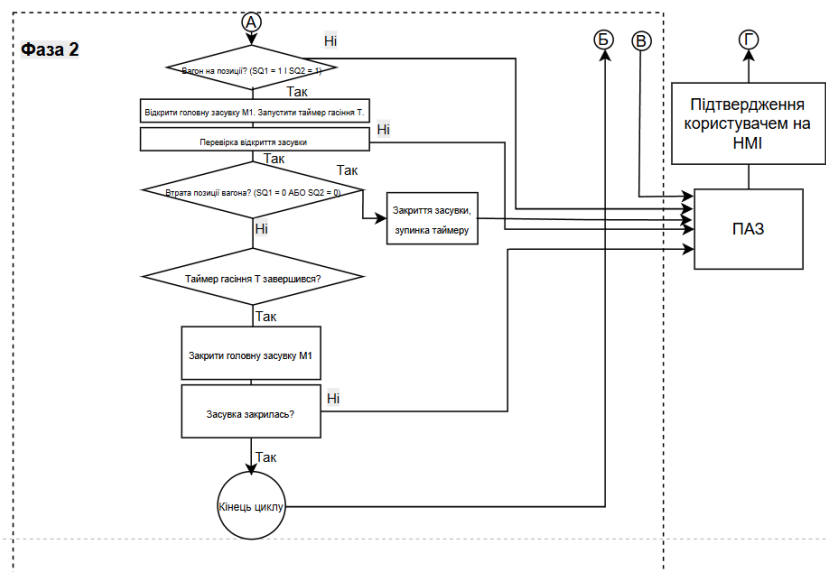


Рисунок 2.2 – Алгоритм роботи програмного контролера

Отже, розроблений графічний алгоритм, що складається з неперервного фонового процесу та дискретного скінченного автомата, забезпечує повний логічний контроль над установкою та є міцною основою для подальшого програмування ПЛК.

2.2 Синтез системи автоматичного регулювання (САР) рівня води

Під час активної фази мокрого гасіння коксу відбувається інтенсивне пароутворення, що призводить до безповоротної втрати значних об'ємів технічної води. Для забезпечення безперебійної роботи циркуляційних насосів та запобігання їх кавітації необхідно підтримувати стабільний рівень освітленої води у резервуарі-відстійнику. Цю задачу вирішує замкнена система автоматичного регулювання (САР) рівня.

Всі розрахункові параметри, наведені у даному розділі, та їх одиниці вимірювання відповідають вимогам Міжнародної системи одиниць SI [3].

Як об'єкт керування (ОК) розглядається остання секція резервуара-відстійника. Вихідною (керованою) координатою є поточний рівень води $h(t)$, а керуючим впливом - витрата води на підживлення $Q_{bx}(t)$.

Оскільки зміна об'єму рідини в резервуарі дорівнює різниці між припливом та відтоком, за динамічними властивостями відстійник є об'єктом без самовирівнювання. У термінах теорії автоматичного керування він являє собою ідеальну інтегруючу ланку, передавальна функція якої має вигляд:

$$W_{ok}(p) = \frac{k_{ok}}{p} \quad (2.1)$$

де k_{ok} - коефіцієнт передачі об'єкта, що обернено пропорційний площі поперечного перерізу відстійника

Для побудови повноцінної математичної моделі САР необхідно також описати інші елементи контуру. Наприклад:

Виконавчий механізм (ВМ).

Регулюючий пневматичний клапан Samson із цифровим позиціонером (LV 2) [21]. Враховуючи механічну та пневматичну інерційність ходу штока, динаміка клапана описується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{BM}}(p) = \frac{k_{\text{BM}}}{T_{\text{BM}}p + 1} \quad (2.2)$$

де T_{BM} - стала часу клапана, k_{BM} - коефіцієнт передачі

Пристрій зворотного зв'язку (ЗЗ).

Радарний рівнемір Endress+Hauser (LT 2). Швидкість поширення електромагнітних хвиль та обробки сигналу мікропроцесором датчика є миттєвими порівняно з інерційністю гідродинамічних процесів. Тому датчик розглядається як безінерційна (пропорційна) ланка:

$$W_{\text{ЗЗ}}(p) = k_{\text{ЗЗ}} \quad (2.3)$$

де $k_{\text{ЗЗ}}$ — коефіцієнт передачі датчика, що перетворює метри рівня в міліампери (або цифрові одиниці ПЛК).

Пристрій керування (ПК).

Оскільки об'єкт керування є інтегруючим, для забезпечення нульової статичної похибки та високої якості перехідного процесу в ПЛК програмно реалізовано пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання [7]. Передавальна функція ідеального ПІД-регулятора має вигляд:

$$W_{\text{рег}}(p) = k_P * (1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p) \quad (2.4)$$

де k_P — коефіцієнт пропорційності, T_i — час ізодрому (стала часу інтегрування), T_d — час диференціювання.

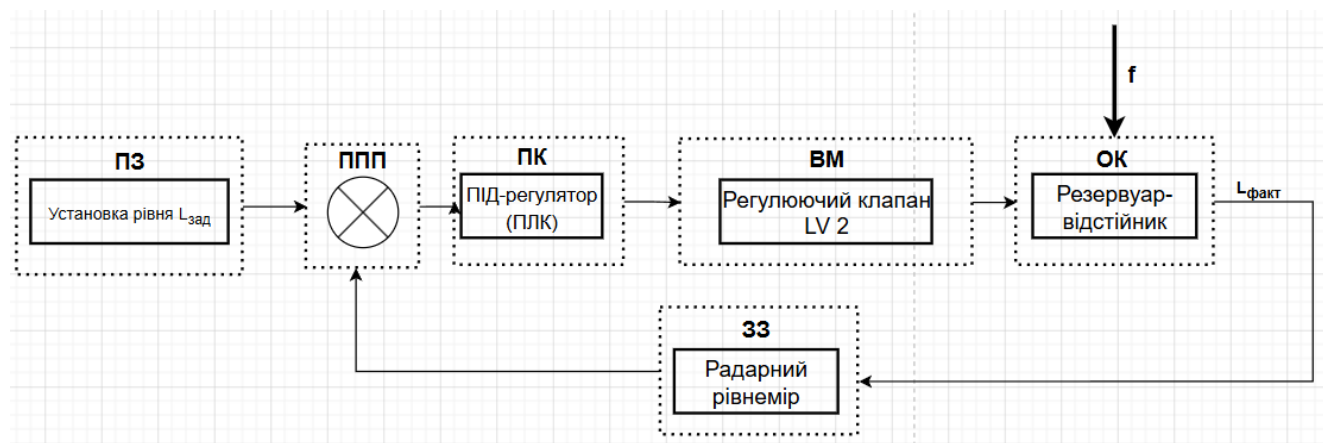


Рисунок 2.3 - Структурна схема контуру стабілізації рівня води

Передавальні функції розімкненої та замкненої систем регулювання.

Для аналізу стійкості та динамічних властивостей контуру стабілізації рівня необхідно отримати загальні передавальні функції системи. На основі розробленої структурної схеми, шляхом послідовного з'єднання пристрою керування (ПК), виконавчого механізму (ВМ) та об'єкта керування (ОК), формується передавальна функція розімкненої САР:

$$W_{\text{роз}}(p) = W_{\text{рег}}(p) * W_{\text{ВМ}}(p) * W_{\text{ОК}}(p) \quad (2.5)$$

Підставивши вирази для кожного динамічного елемента, отримаємо розгорнуте операторне рівняння розімкненого контуру:

$$W_{\text{роз}}(p) = k_p * \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right) * \frac{k_{\text{ВМ}}}{T_{\text{ВМ}} p + 1} * \frac{k_{\text{ОК}}}{p} \quad (2.6)$$

Враховуючи, що система працює за принципом відхилення і охоплена жорстким негативним зворотним зв'язком через радарний рівнемір, загальна передавальна функція замкненої САР за керуючим впливом (заданим рівнем) визначається за класичною формулою Блека:

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_{\text{роз}}(p)}{1 + W_{\text{роз}}(p) * W_{\text{зз}}(p)} \quad (2.7)$$

Отримана математична модель замкненого контуру є основою для проведення параметричного синтезу та знаходження оптимальних коефіцієнтів налаштування регулятора.

Обґрунтування та розрахунок параметрів налаштування ПД-регулятора.

Оскільки об'єкт керування (резервуар-відстійник) є інтегруючою ланкою і не має властивості самовирівнювання, випадковий вибір коефіцієнтів регулятора може призвести до автоколивань або повної втрати стійкості контуру (переливу чи спустошення резервуара).

Для знаходження оптимальних параметрів k_p , T_i , та T_d у проєкті застосовано комбінований інженерний підхід, який поєднує класичний розрахунок за методом критичних коливань Циглера-Нікольса та сучасні алгоритми цифрового автоналаштування ПЛК.

Розрахунковий етап (метод Циглера-Нікольса).

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На першому етапі параметричного синтезу контур досліджується в чисто пропорційному режимі. Шляхом поступового збільшення коефіцієнта посилення k_p фіксується граничний стан системи, за якого в контурі виникають незатухаючі гармонічні коливання рівня води. Значення коефіцієнта, при якому система переходить на межу стікливості, приймається як критичний коефіцієнт k_{cr} , а період цих коливань - як критичний період T_{cr} .

Розрахунок стартових параметрів ПІД-закону виконується за стандартними інженерними співвідношеннями:

Коефіцієнт пропорційності:

$$k_p = 0,6 * k_{cr} \quad (2.8)$$

Час інтегрування:

$$T_i = 0,5 * T_{cr} \quad (2.9)$$

Час диференціювання:

$$T_d = 0,125 * T_{cr} \quad (2.10)$$

Оскільки реальний процес мокрого гасіння характеризується випадковими збуреннями (мінлива маса та температура коксу, закоксовування форсунок), остаточна оптимізація коефіцієнтів покладається на вбудовану функцію автоналаштування програмного блоку PID_Compact в середовищі TIA Portal.

Алгоритм автоналаштування в ПЛК Siemens S7-1200 реалізує два режими:

- Pre-tuning (Попереднє налаштування): здійснює експериментальний аналіз реакції рівня на ступінчасту зміну ступеня відкриття клапана Samson (LV 2) для визначення чистого запізнення та постійної інтегрування.

- Fine-tuning (Точне налаштування): автоматично генерує невеликі коливання процесу в зоні робочої уставки (3.5 м), обчислює частотні характеристики та адаптує коефіцієнти під реальну динаміку об'єкта, забезпечуючи мінімальне перерегулювання (до 5%) та швидкий час затухання перехідного процесу.

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Розроблений контур САР з адаптивними параметрами ПІД-регулювання повністю нівелює небезпечні гідродинамічні удари в магістралях підживлення та гарантує стабільний напір води перед зрошувальними форсунками башти.

2.3 Розробка структурної схеми комплексу технічних засобів

Синтез структурної схеми комплексу технічних засобів (КТЗ) базується на принципах ієрархічної децентралізації та розподіленого збору даних. Архітектура системи автоматичного керування процесом гасіння коксу побудована за класичною трирівневою топологією, що гарантує високу експлуатаційну надійність, детермінованість часу циклу сканування та стійкість контурів регулювання до промислових збурень, притаманних коксохімічному виробництву.

Польовий рівень (нижній рівень) Нижній рівень автоматизації формує первинну інформаційну базу про стан технологічного об'єкта та забезпечує безпосередній вплив на матеріальні потоки. Структурно він поділяється на підсистему збору даних та підсистему виконавчих механізмів. До підсистеми збору даних належать безконтактні датчики рівня у напірній башті (LT1) та відстійнику (LT2), які формують стандартизований аналоговий сигнал. Використання саме безконтактних методів вимірювання (ультразвукових або радарних) обґрунтоване високою агресивністю середовища та наявністю дрібнодисперсного коксового шламу, що унеможлиблює використання поплавкових чи гідростатичних перетворювачів. Дискретні сигнали формуються шляховими вимикачами, що фіксують позиціонування гасильного вагона під баштою (SQ1, SQ2), та кінцевими вимикачами положення засувки (SQ3, SQ4). Підсистема виконавчих механізмів представлена насосним агрегатом (UZ3), що забезпечує перекачування технічної води з відстійника до напірної башти за дискретним алгоритмом керування (із завданням фіксованої швидкості через аналоговий вихід ПЛК), та засувкою з електроприводом (M1) для імпульсної подачі води на гасіння коксу. Критично важливим елементом підсистеми є пропорційний клапан підживлення (LV2), який виконує роль виконавчого органу в закритому контурі ПІД-регулювання,

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечуючи точне відпрацювання керуючого впливу ПЛК для стабілізації рівня води у відстійнику при технологічних збуреннях.

Рівень керування (середній рівень) Ядром системи виступає програмований логічний контролер (ПЛК). З огляду на необхідність обробки аналогових сигналів, підтримки промислових протоколів та реалізації закритого контуру регулювання рівня, у структурній схемі передбачено використання контролера родини SIMATIC S7-1200 (зокрема, CPU 1214C DC/DC/DC). ПЛК виконує функцію координатора: він збирає масиви даних з польового рівня, фільтрує апаратний шум з аналогових каналів, реалізує логіку блокувань (захист від сухого ходу насоса, контроль наявності вагона) та циклічно обчислює керуючий вплив у блоці PID_Compact. Завдяки апаратній підтримці швидкісних лічильників та переривань (Cyclic Interrupts), контролер забезпечує строгу періодичність розрахунку інтегральної та диференціальної складових ПІД-закону, що є критичним для запобігання автоколиванням рівня води у відстійнику.

Верхній рівень призначений для реалізації людино-машинного інтерфейсу (HMI), архівації даних та інтеграції (IoT). У даному проєкті верхній рівень структурно розділений на дві частини:

- *Локальний HMI.* Сенсорна панель оператора, вмонтована у дверцята шафи керування. Вона забезпечує черговому персоналу можливість локального моніторингу мнемосхеми, ручного керування механізмами та квіткування аварійних повідомлень безпосередньо біля об'єкта.

- *Глобальна диспетчеризація.* Передача ключових технологічних параметрів (рівні води, статус вагона, коди аварій) на віддалений сервер або хмарний сервіс за допомогою платформи Node-RED. Це дозволяє керівництву цеху або диспетчеру заводу отримувати аналітику в режимі реального часу.

Зв'язок між програмованим логічним контролером, панеллю оператора та частотним перетворювачем організовано на базі сучасного промислового протоколу PROFINET, що гарантує високу пропускну здатність, стійкість до електромагнітних завад та простоту масштабування системи в майбутньому.

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

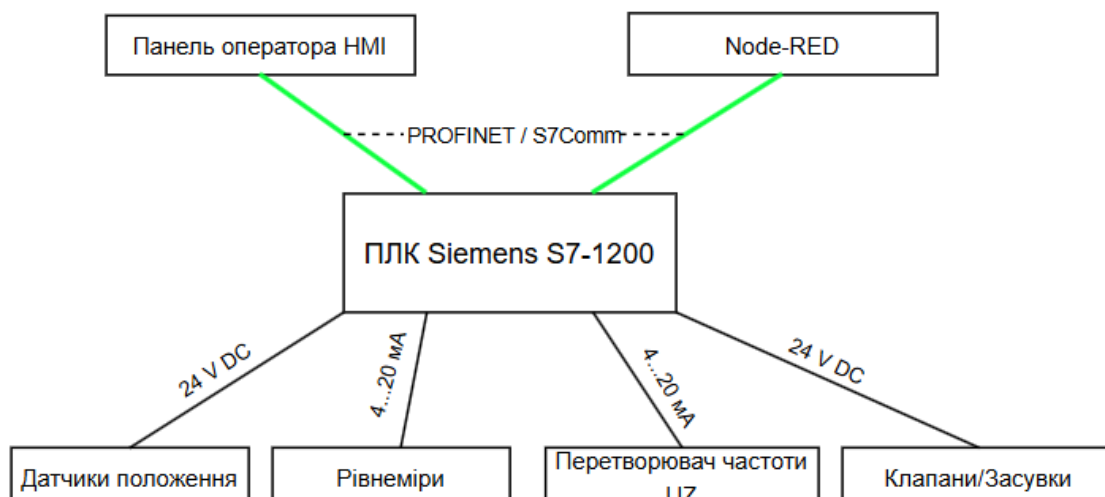


Рисунок 2.4 - Відображення взаємодії рівнів системи

Таким чином, спроектована трирівнева архітектура комплексу технічних засобів гарантує надійний збір даних на польовому рівні та їх швидку передачу до систем локальної і глобальної диспетчеризації.

2.4 Вибір програмованого логічного контролера та модулів вводу/виводу

Вибір апаратної платформи керуючого комплексу обумовлений жорсткими вимогами до швидкодії обробки інформації, надійності функціонування в умовах інтенсивних електромагнітних завад коксохімічного виробництва та необхідністю глибокої інтеграції системи у сучасний інформаційний простір ІоТ.

Базовим елементом обчислювального ядра обрано програмований логічний контролер сімейства SIMATIC S7-1200, а саме процесорний модуль CPU 1214C DC/DC/DC. Прийняття даного інженерного рішення ґрунтується на оптимальному співвідношенні обчислювальної потужності та номенклатури інтегрованих інтерфейсів. Продуктивність центрального процесора дозволяє реалізувати паралельну обробку логічних умов блокувань виконавчих механізмів (засувки M1 та насоса UZ3) із часом реакції системи на рівні мілісекунд, а також виконувати

високоточні математичні розрахунки в межах функціонального блоку PID_Compact. Наявність інтегрованого порту PROFINET із вбудованим комутирувальним пристроєм та підтримкою відкритих комунікаційних стандартів забезпечує детерміновану передачу даних до панелі оператора та безшовну взаємодію з сервером Node-RED через механізми S7-Routing (PUT/GET) без залучення додаткових дорогих комунікаційних процесорів.

Аналіз інформаційної ємності технологічного об'єкта вказує на потребу опитування групи дискретних датчиків (кінцеві вимикачі засувки, датчики позиціонування гасильного вагона) та формування керівних сигналів для пускової апаратури. Інтегрована периферія модуля CPU 1214C DC/DC/DC, що включає 14 дискретних входів (DI) та 10 дискретних виходів (DO) транзисторного типу, повністю задовольняє ці потреби. Транзисторні виходи забезпечують високий комутаційний ресурс, що є критичним фактором при інтенсивному циклічному відпрацюванні алгоритму гасіння. При цьому зберігається експлуатаційний резерв каналів на рівні 20%, що гарантує можливість подальшого масштабування системи.

Специфіка розроблених контурів регулювання вимагає обробки безперервних сигналів. Апаратна конфігурація повинна приймати два аналогові вступні сигнали від рівнемірів напірної башти (LT1) та відстійника (LT2). Водночас, синтезований алгоритм керування передбачає формування двох аналогових вихідних впливів: завдання швидкості обертання для перетворювача частоти насоса UZ3 та поточного ступеня відкриття для пропорційного клапана підживлення LV2 (вихід ПД-регулятора).

Зважаючи на те, що базова комплектація процесора CPU 1214C містить лише два вбудовані аналогові входи (з діапазоном 0-10 В) і не має інтегрованих аналогових виходів, до архітектури ПЛК включено модуль розширення аналогових сигналів SM 1234 Analog Input/Output (4 AI / 2 AO). Впровадження цього модуля гарантує належну гальванічну розв'язку вимірювальних кіл, забезпечує апаратну фільтрацію високочастотних завад шляхом інтегрування вхідного сигналу та дозволяє працювати зі стандартизованими струмовими сигналами 4-20 мА.

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Струмова петля є найменш вразливою до наведень на довгих кабельних трасах, що прокладаються від відстійника до шафи автоматики.

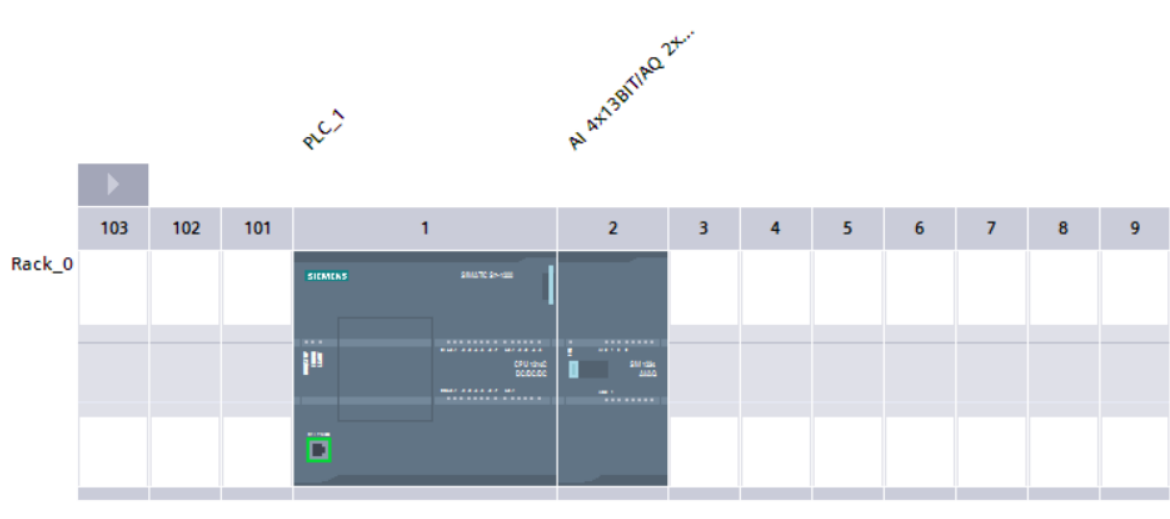


Рисунок 2.5 - Конфігурація апаратного забезпечення у середовищі TIA Portal

Отже, обрана апаратна конфігурація на базі процесора CPU 1214C та модуля SM 1234 повністю перекриває потреби системи в обробці дискретних і аналогових сигналів із необхідним експлуатаційним резервом.

2.5 Вибір польового обладнання та виконавчих механізмів

Специфіка функціонування ділянки гасіння коксу характеризується екстремальними умовами експлуатації: наявністю дрібнодисперсного абразивного пилу, високою вологістю, інтенсивним пароутворенням та різкими температурними градієнтами. З огляду на це, до польового контрольно-вимірювального обладнання та виконавчих механізмів висуваються жорсткі вимоги щодо ступеня пиловологозахисту (не нижче IP65), хімічної стійкості корпусів та стабільності вимірювального тракту при фазових переходах середовища.

Для неперервного моніторингу рівня технічної води у напірній башті (LT1) та відстійнику (LT2) традиційні поплавкові або гідростатичні методи є технічно неприйнятними через швидке замулювання сенсорів коксовим шламом. Тому як

первинні перетворювачі рівня обрано мікрохвильові радарні рівнеміри вільного випромінювання Endress+Hauser Micropilot FMR50. Високочастотний вимірювальний імпульс радару безперешкодно проникає крізь густу пару та пил, забезпечуючи формування стабільного уніфікованого аналогового сигналу 4-20 мА. Це гарантує безперебійне надходження достовірних значень до ПЛК для обчислення відмінностей в контурі ПД-регулювання.



Рисунок 2.6 – Радарний рівнемір Endress+Hauser Micropilot FMR50

Контроль просторового положення гасильного вагона під баштою (датчики SQ1, SQ2) реалізується за допомогою індуктивних безконтактних вимикачів Turck серії uprox+ (модель NI15-M30) зі збільшеною дистанцією спрацювання. На відміну від електромеханічних кінцевиків, індуктивні сенсори позбавлені рухомих механічних частин, що унеможливорює їх заклинювання в умовах налипання вологого вугільного пилу. Датчики формують чіткий дискретний сигнал (PNP, 24В DC), який безпосередньо комутується на транзисторні входи модуля CPU 1214C для ініціалізації робочої фази алгоритму.



Рисунок 2.7 – Turck uprox+ (модель NI15-M30)

Підсистема виконавчих механізмів ділянки жорстко розділена на дискретну та аналогову гілки керування. Відсікання основного потоку води з напірної башти на кокс здійснюється клиновою засувкою M1, оснащеною багатообертовим електроприводом AUMA SA [16]. Привід інтегрований у систему через вбудований блок електромеханічних кінцевих вимикачів (SQ3 – засувка відкрита, SQ4 – засувка закрыта). Ці зворотні сигнали є критичною частиною логіки скінченного автомата (FB1), формуючи апаратні блокування, що захищають напірну магістраль від гідравлічних ударів та виступають тригерами для переходу ПЛК в аварійний режим.



Рисунок 2.8 – Клинова засувка з приводом

Функцію відпрацювання керуючого впливу ПД-регулятора (аналоговий вихід Output_PER) виконує регулюючий прохідний клапан Samson 3241, укомплектований цифровим електропневматичним позиціонером Samson 3730. Позиціонер отримує від аналогового модуля розширення SM 1234 стандартизований струмовий сигнал 4-20 мА і прецизійно перетворює його на фізичне переміщення штока клапана в діапазоні від 0 до 100%. Це забезпечує плавну компенсацію втрат технічної води у відстійнику, повністю ліквідуючи автоколивання рівня.

Насосний агрегат UZ3, що транспортує освітлену воду з відстійника до напірної башти, керується через перетворювач частоти Siemens SINAMICS G120C. Інтеграція частотно-регульованого приводу по мережі PROFINET дозволяє ПЛК передавати цифрові уставки швидкості (фіксовані значення для режимів очікування та активного перекачування). Впровадження перетворювача частоти замість апаратури прямого пуску ліквідує пускові струми асинхронного двигуна, мінімізує ризик кавітації на етапі всмоктування та суттєво підвищує загальний енергетичний коефіцієнт корисної дії технологічної установки.



Рисунок 2.9 – Частотний перетворювач Siemens SINAMICS G120C

Таблиця 2.1 - Специфікація основного польового обладнання та виконавчих механізмів

Позиція за схемою	Найменування та марка обладнання	Основні технічні характеристики	Призначення в системі
LT1, LT2	Мікрохвильовий радарний рівнемір Endress+Hauser Micropilot FMR50	Робоча частота: 26 ГГц; Вихідний сигнал: 4...20 мА (HART); Напруга живлення: 24 В DC; Ступінь захисту: IP66/IP68.	Безконтактне безперервне вимірювання рівня технічної води у напірній башті та відстійнику в умовах інтенсивного пароутворення.
SQ1, SQ2	Індуктивний безконтактний вимикач Turck серії uprox+ (NI15-M30)	Номинальна відстань спрацювання: 15 мм; Вихідний сигнал: PNP (24 В DC), NO; Ступінь захисту: IP68/IP69K.	Дискретний контроль просторового положення (фіксація наявності) гасильного вагона на робочій позиції під баштою.
Позиція за схемою	Найменування та марка обладнання	Основні технічні характеристики	Призначення в системі
M1 (вкл. SQ3, SQ4)	Багато-обертовий електропривід AUMA SA у комплекті з клинковою засувкою	Живлення приводу: 3~400 В AC; Зворотний зв'язок (SQ3, SQ4): дискретні контакти 24 В DC; Ступінь захисту: IP68.	Відсікання основного потоку води на гасіння; формування апаратних сигналів крайніх положень засувки для ПЛК.
LV2	Регулюючий прохідний клапан Samson 3241 з електропневматичним позиціонером Samson 3730	Керуючий сигнал: 4...20 мА; Живлення позиціонера: від струмової петлі; Тиск повітря живлення: 1,4...6,0 бар; Ступінь захисту: IP66.	Відпрацювання аналогового керуючого впливу ПІД-регулятора для плавної компенсації витрат та стабілізації рівня у відстійнику.

UZ3	Перетворювач частоти Siemens SINAMICS G120C (для приводу насосного агрегату)	Інтерфейс зв'язку: PROFINET; Метод керування: векторне керування без датчика (SLVC); Напруга: 3~400 В AC.	Енергоефективне керування продуктивністю насоса підживлення, забезпечення плавного пуску та захист від кавітації.
-----	--	---	---

Запропонована специфікація виконавчих механізмів та безконтактних сенсорів гарантує стабільну роботу системи в агресивних умовах коксохімічного виробництва та забезпечує прецизійне відпрацювання керівних впливів від контролера.

2.6 Проєктування електричних схем підключення та компонування шафи керування

Синтез електричних принципових схем та просторове компонування шафи керування (ШК) виконано з урахуванням жорстких вимог щодо електромагнітної сумісності (ЕМС) та забезпечення експлуатаційної надійності апаратури в умовах промислових завод коксохімічного підприємства. Основною концепцією проєктування є чітке фізичне та гальванічне розділення силових кіл, кіл живлення автоматики та слабкострумових інформаційних магістралей.

Енергозабезпечення комплексу технічних засобів базується на перетворенні промислової мережі змінного струму 220 В в стабілізовану напругу 24 В постійного струму. Для цього в схему інтегровано промисловий імпульсний блок живлення (наприклад, серії SITOP PSU100S), який характеризується високим коефіцієнтом корисної дії та здатністю витримувати короткочасні перевантаження під час пускових режимів польового обладнання. З метою підвищення живучості системи реалізовано селективний захист: живлення центрального процесора (CPU 1214C), живлення модуля розширення (SM 1234) та ланцюги живлення польових датчиків розділені через окремі автоматичні вимикачі з відповідними струмо-часовими

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

характеристиками. Це гарантує, що коротке замикання на лінії одного з датчиків рівня не призведе до знеструмлення обчислювального ядра ПЛК.

Підключення дискретних первинних перетворювачів до транзисторних входів контролера реалізовано за схемою з "позитивною логікою" (PNP). Індуктивні безконтактні вимикачі (SQ1, SQ2) та блок кінцевих вимикачів електроприводу AUMA (SQ3, SQ4) комутують потенціал +24 В на відповідні клеми групи DI. Аналогічно, транзисторні виходи (DQ) ПЛК формують керівні сигнали рівня 24 В для проміжних реле, які, у свою чергу, здійснюють гальванічну розв'язку та комутацію силових кіл пускової апаратури.

Особлива інженерна увага приділена трасуванню аналогових сигналів. Підключення радарних рівнемірів (LT1, LT2) та позиціонера регулюючого клапана (LV2) до модуля SM 1234 виконано за двопровідною схемою стандартизованої струмової петлі 4-20 мА. Для мінімізації впливу синфазних завад, індукованих роботою потужних електродвигунів та частотних перетворювачів, передача аналогових сигналів проєктується виключно екранованим кабелем типу "вита пара". Екран кабелю підлягає обов'язковому односторонньому заземленню на мідну шину в шафі керування (РЕ), що унеможливає виникнення паразитних зрівнювальних струмів по екрану.

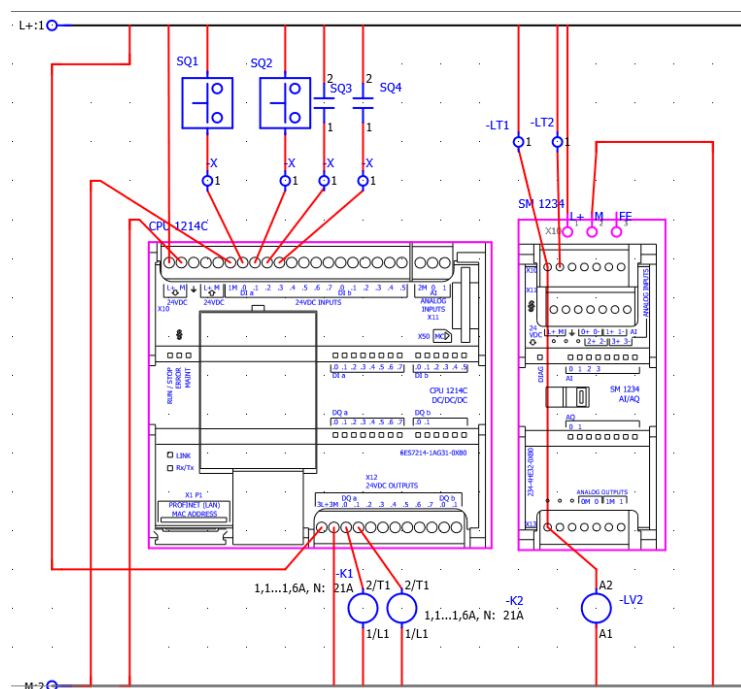


Рисунок 2.10 – Схема електрична принципова підключення ПЛК.

Шафа керування (на базі конструктивів типу Rittal) спроектована за принципом зонального розподілу. Внутрішній простір монтажної панелі візуально та фізично поділений на мікропроцесорну (ПЛК, комутатор PROFINET, блок живлення) та релейно-комутаційну зони.

Усі електронні компоненти монтуються на стандартизовані DIN-рейки (35 мм). Трасування внутрішньо-шафових зв'язків виконується у перфорованих пластикових кабельних каналах, причому сигнальні лінії та кабелі живлення прокладаються у різних каналах з дотриманням просторового інтервалу.

Оскільки в шафі може розміщуватися перетворювач частоти SINAMICS G120C, який є потужним джерелом теплового випромінювання та високочастотних гармонік, його інсталяція передбачається у нижній частині шафи. Це рішення, у комбінації з системою примусової припливно-витяжної вентиляції з фільтруючими елементами (IP54), забезпечує оптимальний тепломасообмін і гарантує, що температурний режим навколо центрального процесора ПЛК не перевищуватиме допустимі +55 °С навіть в умовах літнього максимуму температур на коксохімічному виробництві.

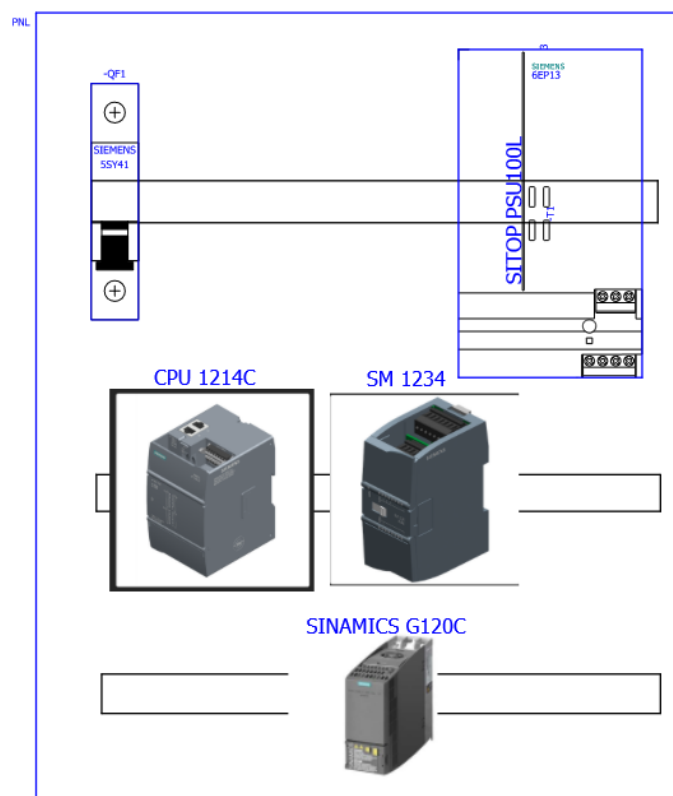


Рисунок 2.11 – Ескіз загального вигляду шафи керування

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Отже, просторове компонування шафи керування виконано з суворим дотриманням вимог електромагнітної сумісності. Це створює надійний апаратний фундамент для подальшого розгортання прикладного програмного забезпечення.

2.7 Розробка програмного забезпечення керування ділянкою тушіння коксу в середовищі TIA Portal

Прикладне програмне забезпечення системи автоматизованого керування процесом гасіння коксу розроблене в інженерному середовищі TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) для програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC) [8, 15]. Програма побудована за модульним принципом із чітким розділенням функцій збору аналогових даних, реалізації покрокової логіки керування, багатоступеневого протиаварійного захисту та безперервного автоматичного регулювання.

На першому етапі проектування виконано конфігурування апаратного складу системи. До базового процесорного модуля додано модуль розширення аналогових сигналів SM 1234. Для комунікації з частотним перетворювачем SINAMICS G120C розгорнуто промислову мережу PROFINET із використанням стандартизованої телеграми обміну Standard telegram 1 (PZD-2/2) [14]. Це забезпечує виділення фіксованої області пам'яті контролера (%QW64...%QW67) для прямої передачі цифрових команд пуску та уставок швидкості.

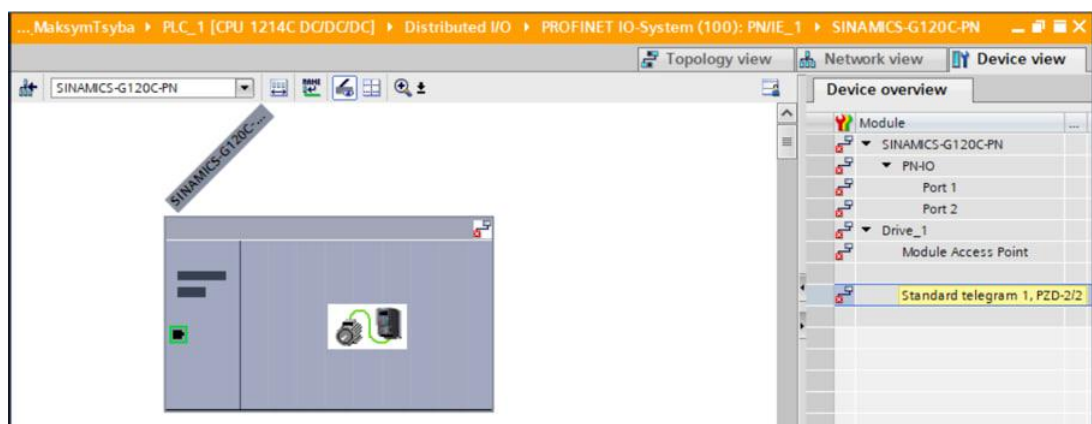


Рисунок 2.12 – Налаштування порту частотного перетворювача

Організація скінченного автомата (FB1). Логіка покрокового виконання процесу охолодження коксу реалізована у функціональному блоці Coke_Quenching_Logic [FB1], написаному мовою релейно-контактних схем LAD. Поточна фаза процесу фіксується у змінній Current_State, яка зберігається в глобальному блоці даних Quenching_Data [DB1]. Алгоритм включає п'ять станів:

- Стан 0 (Очікування) - Вихідний стан. Головна засувка M1 закрита. ПЛК безперервно опитує дискретні датчики позиціонування вагона SQ1 та SQ2.

- Стан 1 (Контроль відкриття засувки) - Перехід у цей робочий стан відбувається лише за умови виконання жорсткого апаратного блокування: система фіксує прибуття вагона (SQ1=1 та SQ2=1), а також підтверджує наявність мінімально допустимого гідростатичного напору в башті — масштабований рівень води Real_Level_LT1 (%MD108) має бути строго більшим за 4.0 метри. За цих умов ініціюється відкриття засувки та запускається 5-секундний таймер контролю ходу арматури Timer_Valve_Check.

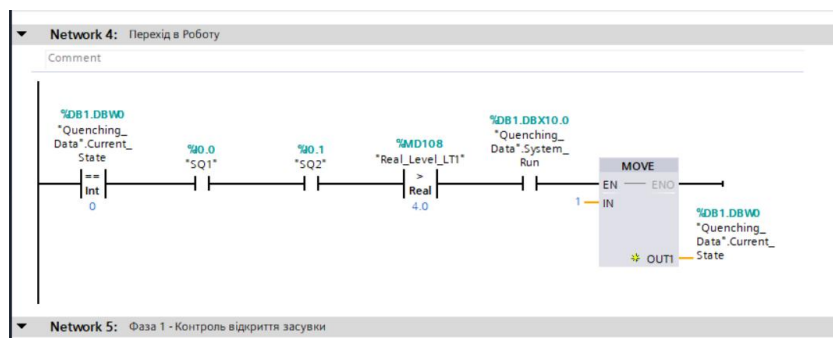


Рисунок 2.13 – Network 4

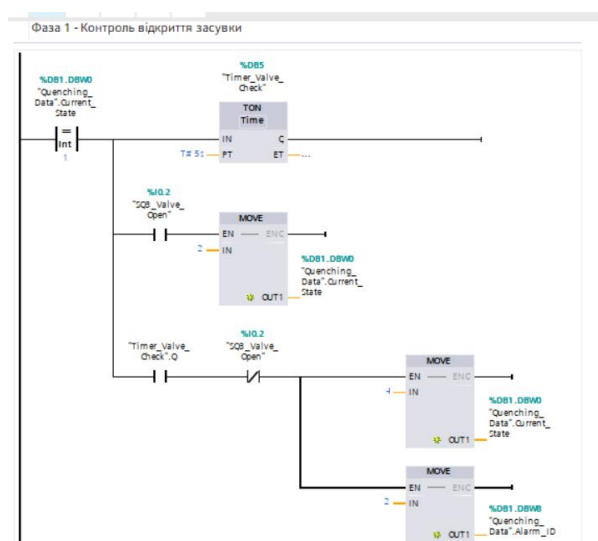


Рисунок 2.14 – Network 5

- Стан 2 (Активне гасіння) - Засувка повністю відкрита. Вода виливається на кокс. Відлік часу гасіння ведеться таймером Timer_Quenching.

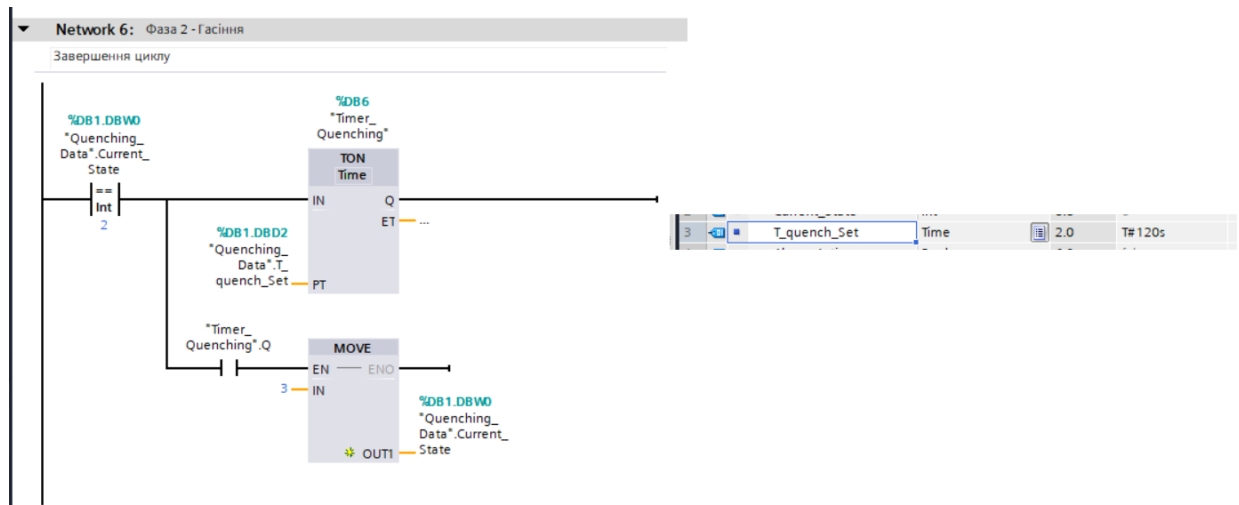


Рисунок 2.15 – Network 6

- Стан 3 (Блокування повторного пуску) - Після відпрацювання таймера засувка закривається. Система блокується до моменту повного від'їзду охолодженого вагона (розмикання датчиків SQ1, SQ2).

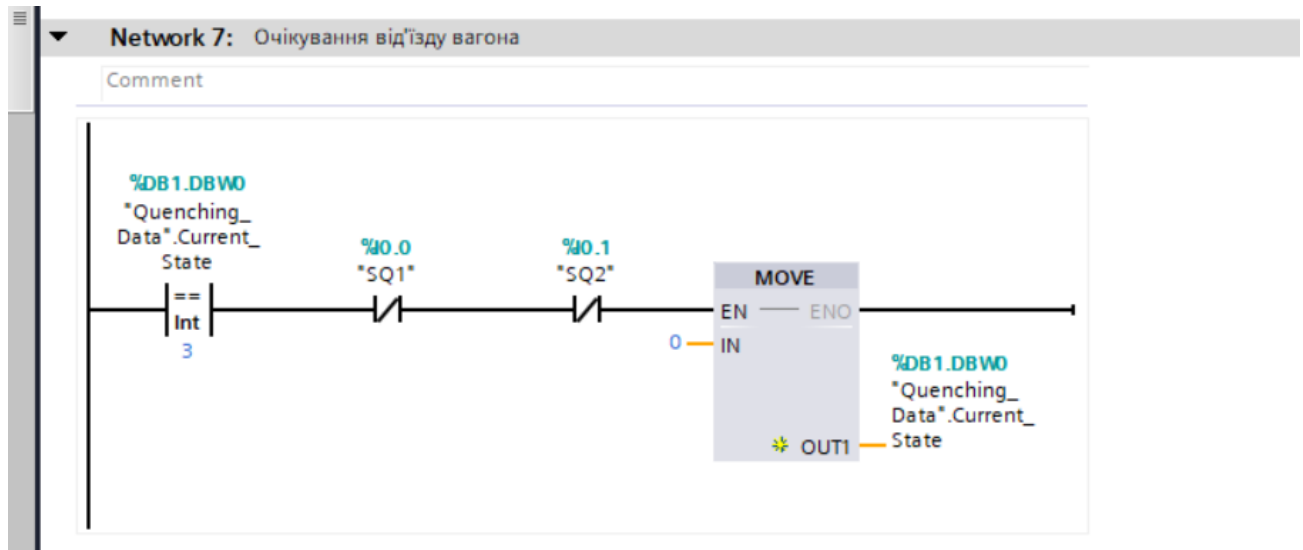


Рисунок 2.16 – Network 7

- Стан 4 (Аварійний режим ПАЗ) - Примусовий стан безпеки, який зупиняє всі механізми до ручного квітування помилки оператором.

Розширена система діагностики та протиаварійного захисту (ПАЗ).

Для забезпечення високої надійності системи у програмі реалізовано розгалужену мережу апаратних блокувань. При виникненні нештатної ситуації логіка ПЛК формує унікальний цифровий код у змінній Alarm_ID, що дозволяє точно ідентифікувати першопричину зупинки:

- ID 1 - Аварійний зсув вагона з позиції гасіння або критичне падіння рівня в башті (< 1.5 м).
- ID 2 - Заклинювання головної засувки M1 на відкриття (відсутній сигнал від кінцевого вимикача SQ3).
- ID 4 - Заклинювання засувки M1 на закриття (відсутній сигнал від SQ4).
- ID 5 - Апаратна аварія перетворювача частоти VFD_Fault.
- ID 6 - Захист насоса від кавітації (рівень у відстійнику Real_Level_LT2 впав нижче 0.5 м).
- ID 8 - Пріоритетна аварійна зупинка (E-STOP). Натискання фізичної кнопки миттєво знімає сигнали керування з насоса та засувки через інструкцію Reset та скидає стан автомата в нуль.

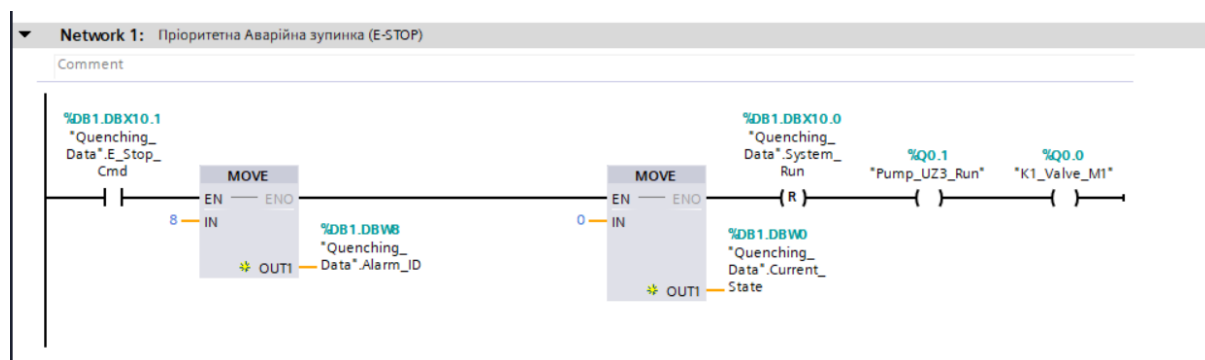


Рисунок 2.17 – Network 1

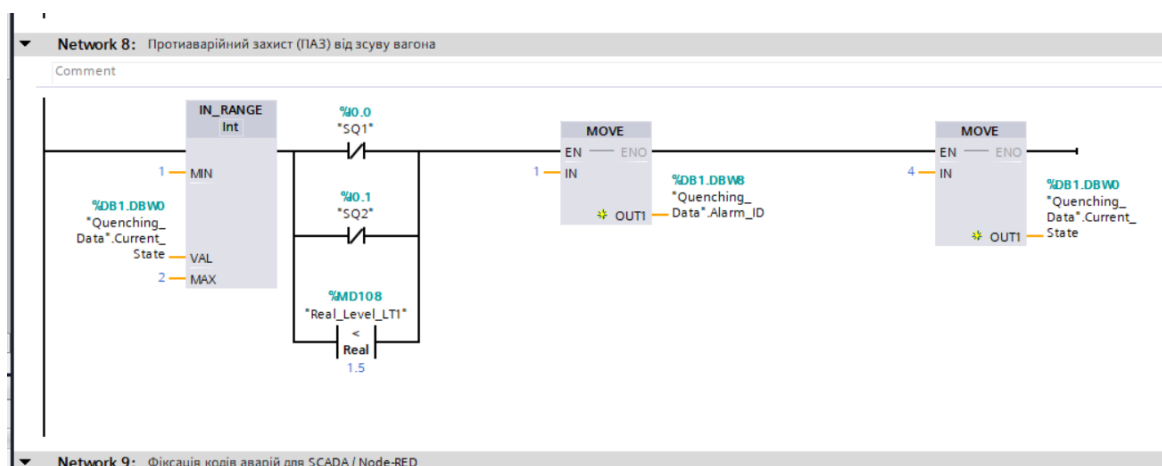


Рисунок 2.18 – Network 8

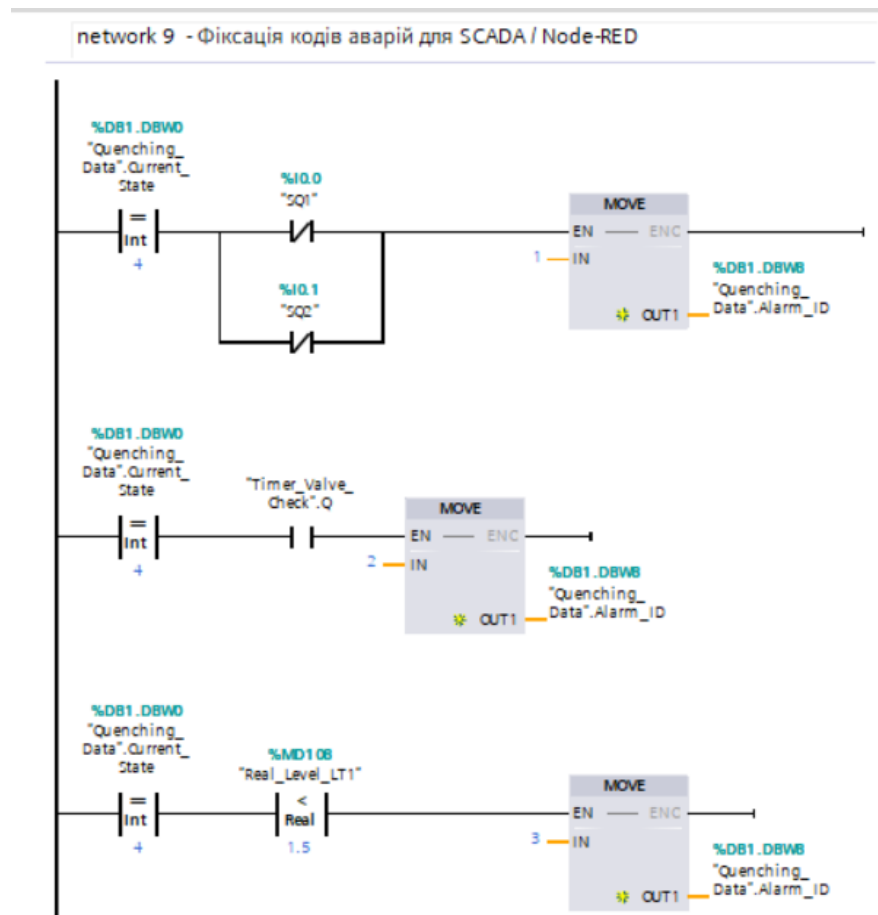


Рисунок 2.19 – Network 9

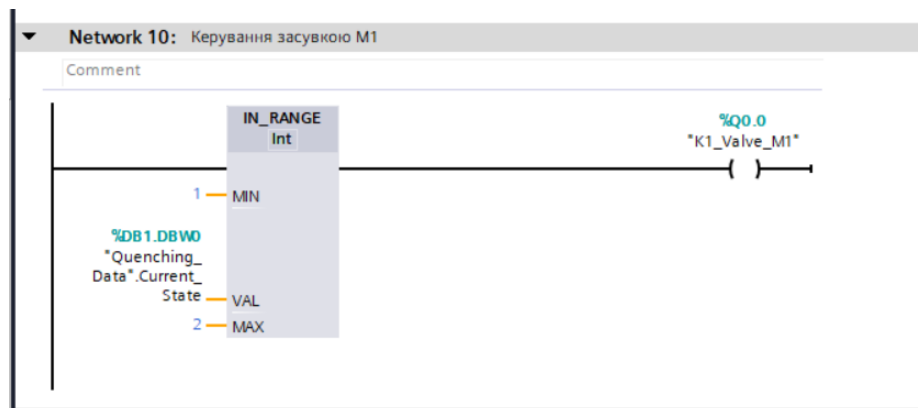


Рисунок 2.20 – Network 10

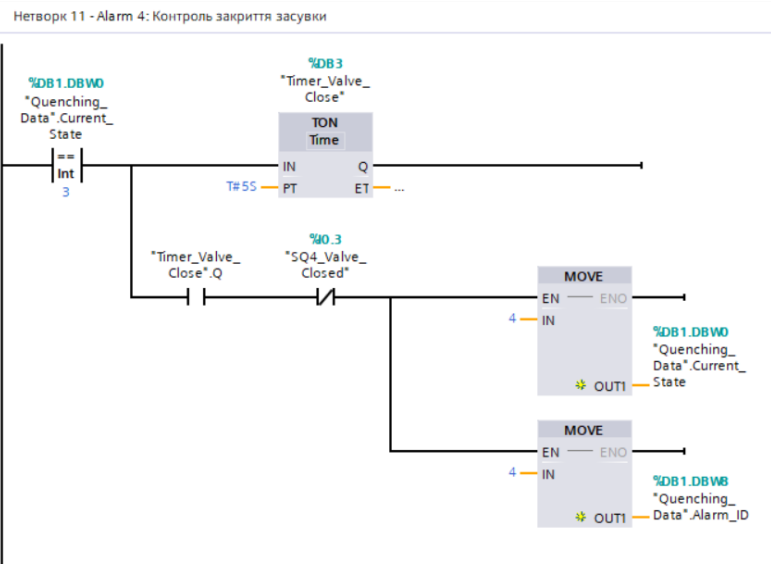


Рисунок 2.21 – Network 11

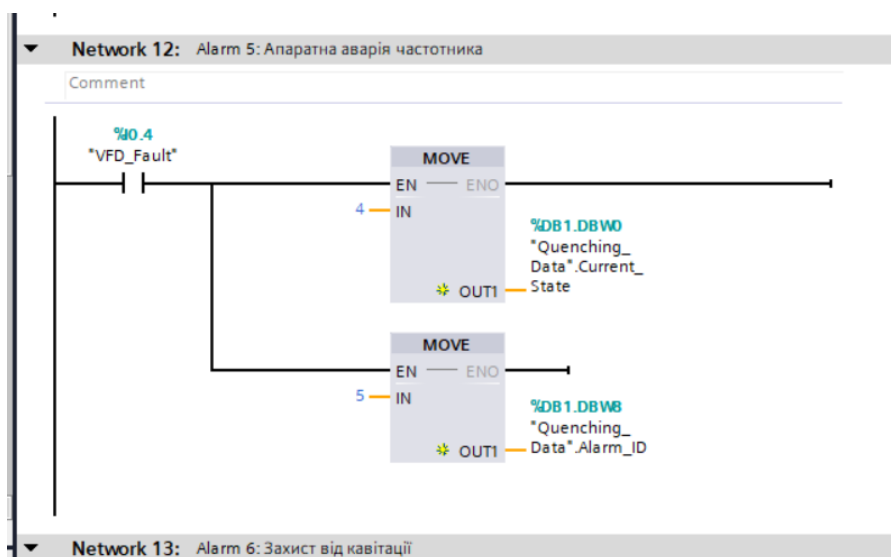


Рисунок 2.22 – Network 12

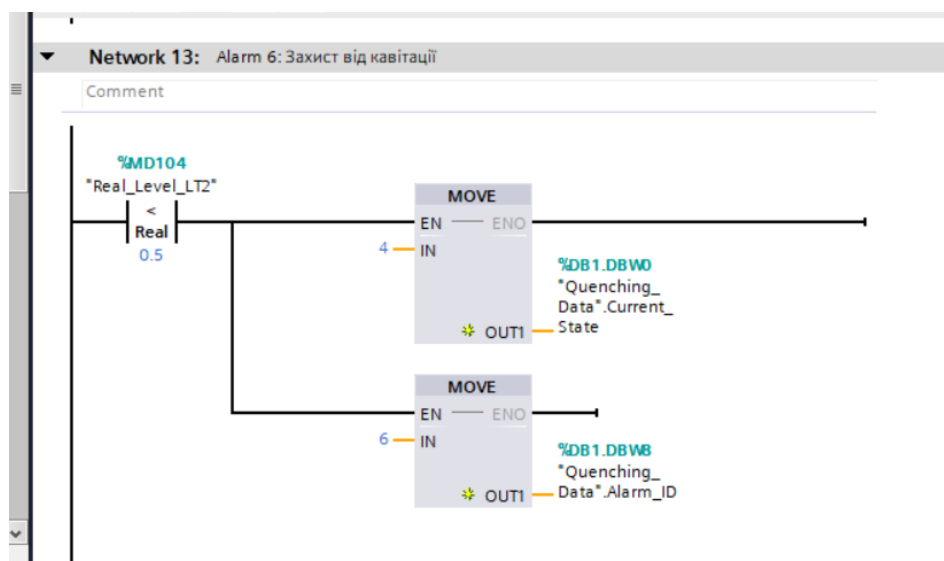


Рисунок 2.23 – Network 13

Енергоефективне керування приводом насоса (Network 15).

Паралельно з роботою засувки ПЛК здійснює оптимізацію споживання електроенергії насосним агрегатом UZ3. Завдяки інтеграції частотно-регульованого приводу, продуктивність насоса адаптується до поточних потреб системи за допомогою математичних інструкцій MOVE (Network 15).

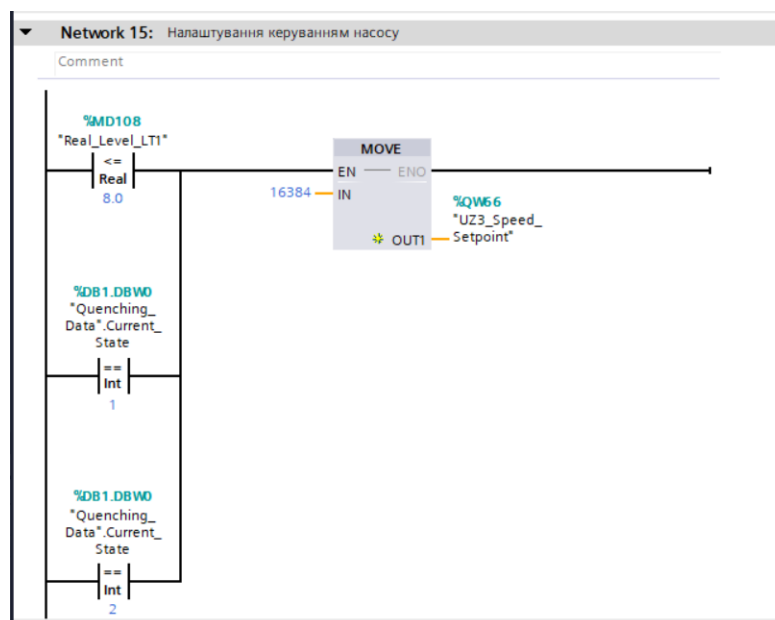


Рисунок 2.24 – Логіка адаптивного керування швидкістю насоса UZ3

Як видно з програмного коду, ПЛК аналізує поточний стан автомата та рівень води у башті. Якщо рівень у напірній башті падає нижче 8.0 метрів або система перебуває у фазі активного гасіння (Стани 1 та 2), у вихідне слово %QW66 записується значення 16384, що виводить двигун на номінальну потужність (50 Гц) для інтенсивного перекачування. Якщо ж башта заповнена (понад 8.0 м), а система очікує вагон (Стани 0 або 3), ПЛК знижує уставку до 8192 (25 Гц). Це підтримує необхідну циркуляцію води в магістралях, уникаючи застоїв, але знижує споживання електроенергії у кілька разів. При аварії (Стан 4) швидкість скидається до 0.

Реалізація ПІД-регулювання в OB30 Програмна реалізація контуру стабілізації рівня у відстійнику виконана у відокремленому організаційному блоці апаратних переривань Cyclic interrupt [OB30]. Виклик системного блоку PID_Compact саме в OB30 гарантує строго фіксований період розрахунку

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

математики ПІД-закону - 100мс [13], що повністю усуває вплив коливань часу сканування основного циклу (ОВ1) на якість регулювання. Регулятор безперервно порівнює масштабований сигнал датчика з уставкою та керує аналоговим виходом %QW96 для плавного переміщення штока клапана підживлення.

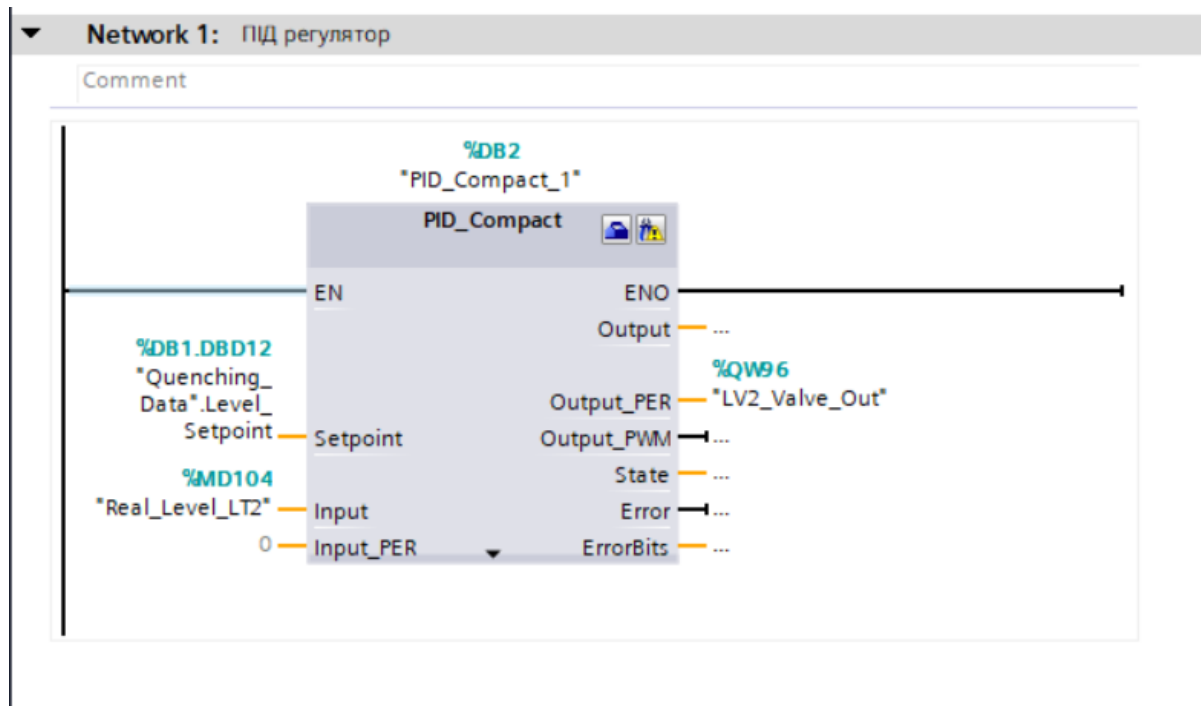


Рисунок 2.25 - Виклик функціонального блоку PID_Compact в організації ОВ30

Підготовка структур даних для Ііот-інтеграції Оскільки розроблена система автоматизації є базисом для впровадження технологій Інтернету речей (Ііот), класичної логіки керування механізмами недостатньо. Для забезпечення безшовної передачі телеметрії на верхній рівень диспетчеризації (SCADA або Node-RED) пам'ять контролера структуровано за допомогою глобального масиву даних Quenching_Data [DB1].

Quenching_Data									
	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static								
2	Current_State	Int	0.0	0		☒	☒		
3	T_quench_Set	Time	2.0	T#120s		☒	☒		уставка часу гасіння
4	Alarm_Active	Bool	6.0	false		☒	☒		прапор наявності аварії
5	Alarm_ID	Int	8.0	0		☒	☒		
6	System_Run	Bool	10.0	false		☒	☒		Пуск/Стоп
7	E_Stop_Cmd	Bool	10.1	false		☒	☒		для кнопки Аварійної зупинки
8	Level_Setpoint	Real	12.0	0.0		☒	☒		для поля введення уставки ПІД-регулятора

Рисунок 2.26 – Quenching_Data

Таким чином, створена структура глобального блоку даних Quenching_Data об'єднує всі ключові змінні технологічного процесу. Вона є стандартизованим базисом для налаштування надійної комунікації з панеллю оператора та IoT-сервером Node-RED

2.8 Розробка структури екранів панелі оператора (HMI).

Проектування людино-машинного інтерфейсу (Human-Machine Interface, HMI) є критично важливим етапом створення автоматизованої системи, оскільки саме через HMI черговий персонал здійснює моніторинг технологічних параметрів та приймає оперативні рішення. Для реалізації локального рівня візуалізації ділянки мокрого гасіння коксу обрано сенсорну панель SIMATIC HMI KTP700 Basic PN із діагоналлю 7 дюймів [17], яка підключається до центрального процесора ПЛК через промислову мережу PROFINET. Програмна розробка інтерфейсу виконана за допомогою пакету WinCC Basic, інтегрованого в єдине середовище TIA Portal.

Принципи проектування інтерфейсу.

При розробці структури екранів застосовано принципи високоефективного інтерфейсу відповідно до стандарту ISA-101. Основна концепція полягає у мінімізації когнітивного навантаження на оператора:

- Колірне кодування - Використання приглушеної (сірої) кольорової гами для нормального перебігу процесу. Яскраві кольори (червоний, жовтий) застосовуються виключно для привернення уваги до аварійних станів (Alarm_ID) або попереджень.

- Плоский дизайн (Flat Design) - Відмова від надмірної 3D-анімації механізмів, що відволікає увагу, на користь чітких, стандартизованих 2D-символів засувки, насосів та резервуарів.

- Ієрархічна навігація - Забезпечення доступу до будь-якого екрана системи не більше ніж за два-три дотики (натискання) до екрана.

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Структура проєкції поділяється на три базові екрани, що забезпечують повний контроль над установкою без перевантаження оператора зайвою навігацією:

- Головний екран процесу («Мнемосхема») - Це центральний екран диспетчеризації, на якому розгорнуто 2D-візуалізацію технологічного об'єкта (напірний бак, резервуар-відстійник, система трубопроводів із засувками та насосом UZ). Екран насичений динамічними елементами: гістограми (Bar graphs) у реальному часі відображають рівні води LT1 (0...10 м) та LT2 (0...5 м), цифрове поле показує поточний відлік таймера гасіння, а графічні індикатори сигналізують про наявність вагона (SQ1, SQ2). Також на мнемосхемі розміщено текстові панелі поточного стану скінченного автомата і кодів помилок. У нижній частині екрана згруповано пріоритетні органи керування: кнопки «ПУСК», «СТОП», «АВАРІЙНА ЗУПИНКА» (яка прив'язана до E-STOP) та кнопка ручного квітуння «Скинути аварію».

- Екран моніторингу та регулювання («Графіки рівня») - Спеціалізований екран для аналізу динаміки процесу та налаштування контуру стабілізації. Основну площу займає об'єкт «Trend View», який графічно відмальовує зміну технологічних параметрів у часі, що дозволяє оператору візуально оцінити якість роботи системи підживлення. Під графіком розташоване поле введення (I/O field), через яке безпосередньо задається технологічна уставка рівня для резервуара-відстійника.

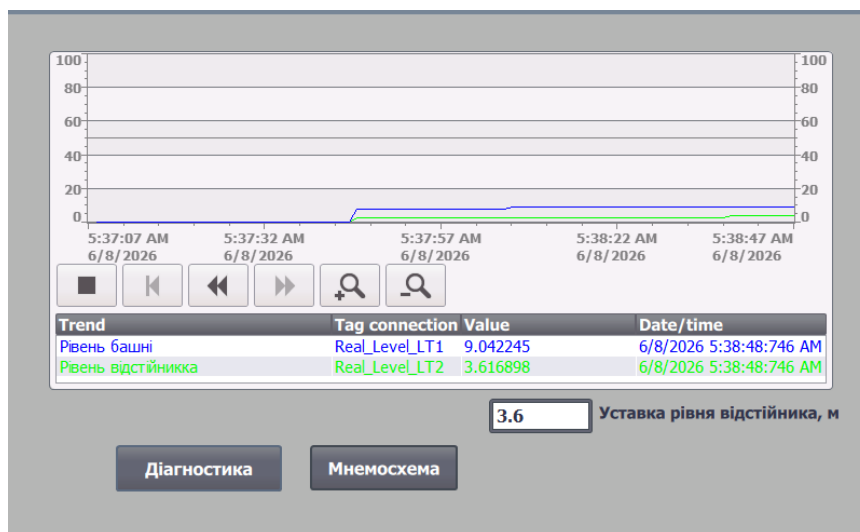


Рисунок 2.27 – Екран Графіки рівня

- Екран стану системи («Діагностика») - Лаконічний інформаційний екран, створений для швидкої ідентифікації проблем. Замість перевантаженого системного журналу тривог тут використано об'єкт «Symbolic I/O field», прив'язаний до глобального текстового списку (Text list). Залежно від значення тегу Alarm_ID, що надходить від ПЛК, на екран виводиться чітке, легкочитоване текстове повідомлення про поточний стан (наприклад, «КОД 0 (Система працює в штатному режимі)» або деталізований опис конкретної системної аварії).

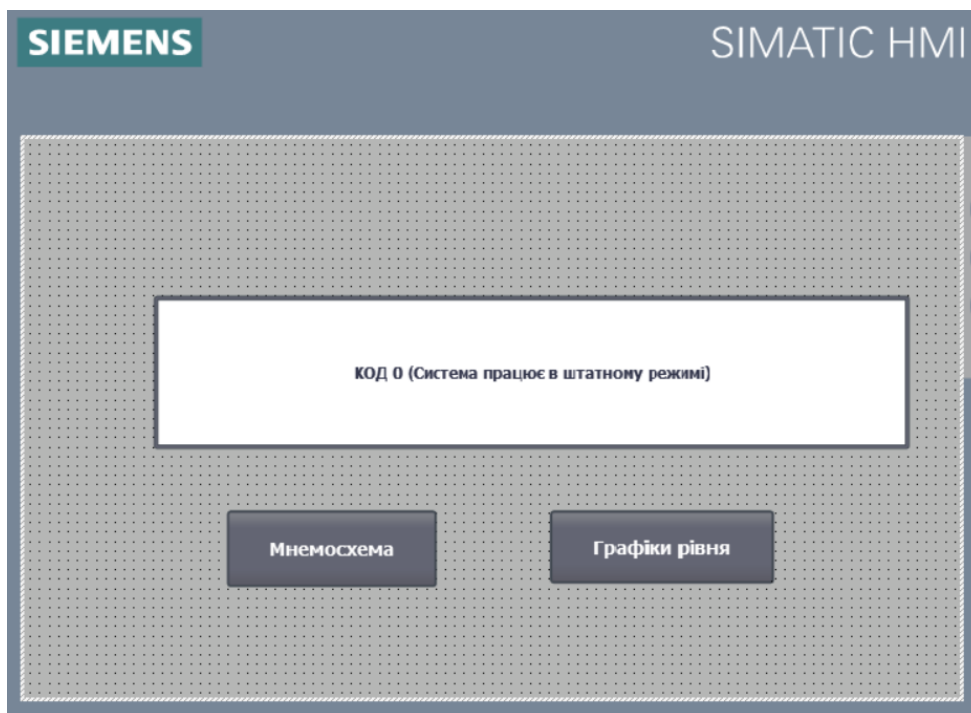


Рисунок 2.28 – Екран діагностики

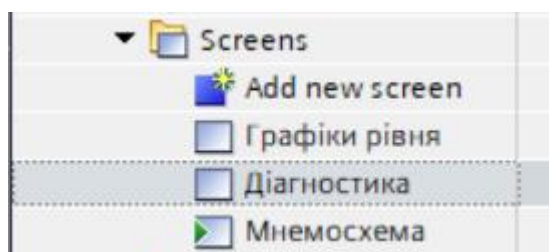


Рисунок 2.29 – Ієрархічна структура екранів HMI-панелі

Таким чином, розроблена структура людино-машинного інтерфейсу повністю покриває технологічні потреби ділянки мокрого гасіння коксу, забезпечуючи баланс між інформативністю та простотою керування, а також створює надійний локальний бар'єр безпеки для персоналу.

2.9 Проєктування мнемосхеми процесу гасіння

Головним елементом людино-машинного інтерфейсу панелі SIMATIC HMI KTP700 Basic PN є центральний екран процесу – мнемосхема. Її ключове завдання полягає у забезпеченні диспетчера інтуїтивно зрозумілою, динамічною візуалізацією всіх технологічних вузлів ділянки мокрого гасіння коксу в режимі реального часу.

Візуалізація технологічного обладнання та динамічних параметрів.

У лівій частині екрана розташовано графічний символ напірного бака башти гасіння з головною клинковою засувкою M1. У центрі зображено магістраль перекачування із насосом UZ та резервуаром-відстійником, до якого підведено трубопровід підживлення з пропорційним клапаном LV2.

Для безперервного моніторингу гідродинамічних параметрів на мнемосхемі реалізовано динамічні стовпчасті діаграми:

Індикатор «LT1 – Рівень баку»: відображає поточний запас води у напірній башті в діапазоні від 0 до 10 метрів.

Індикатор «LT2 – Рівень відстійника»: показує кількість освітленої води в межах 0...5 метрів (це значення безпосередньо стабілізується ПДД-регулятором у фоновому режимі).

Відображення статусів та дискретних датчиків.

Важливою частиною мнемосхеми є контроль дискретної логіки:

- Положення вагона. Наявність гасильного вагона під баштою візуалізується двома круглими індикаторами «SQ1» та «SQ2». Вони змінюють колір при замиканні відповідних індуктивних датчиків на польовому рівні.

- Статус засувки M1. На основі зворотного зв'язку від кінцевих вимикачів електроприводу засувка починає мигати або має закритий стан – не мигає.

- Інформаційні поля стану. Для того щоб оператор чітко розумів, на якому кроці знаходиться скінченний автомат, створено динамічне поле «Стан системи». За допомогою інструмента Symbolic I/O list, до якого прив'язана змінна "Quenching_Data".Current_State, на екран виводяться текстові повідомлення,

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наприклад: «Система готова (Вагон відсутній)». Знизу екрана також розташовано глобальний рядок, який дублює інформацію про відсутність чи наявність кодів помилок. Ці стани які показується текстом в блоках I/O list – є прописані в спеціальній таблиці:

CokeQuenching_MaksymTsyba > HMI_1 [KTP700 Basic PN] > Text and graphic lists

Text lists

	Name ▲	Selection	Comment
	Alarm_Texts	Value/Range ▼	
	State_Texts	Value/Range	
	<Add new>		

Text list entries

	Default	Value ▲	Text
	☐	0	КОД 0 (Система працює в штатному режимі)
	☐	1	АВАРІЯ 1: Зсув вагона під час гасіння!
	☐	2	АВАРІЯ 2: Заклинювання засувки M1!
	☐	3	АВАРІЯ 3: Критичне спустошення башти!
	☐	4	АВАРІЯ 4: Контроль закриття засувки
	☐	5	Аварія 5 частотного перетворювача UZ3
	☐	6	АВАРІЯ 6 : Захист від сухого ходу (немає води у ві
	☐	8	СТОП
	<Add new>		

CokeQuenching_MaksymTsyba > HMI_1 [KTP700 Basic PN] > Text and graphic lists

Text lists

	Name ▲	Selection	Comment
	Alarm_Texts	Value/Range	
	State_Texts	Value/Range ▼	
	<Add new>		

Text list entries

	Default	Value ▲	Text
	☐	0	Система готова (Вагон відсутній)
	☐	1	Фаза 1: Контроль відкриття засувки M1
	☐	2	Фаза 2: Процес гасіння коксу
	☐	3	Фаза 3: Контроль
	☐	4	АВАРІЙНЕ БЛОКУВАННЯ СИСТЕМИ!
	<Add new>		

Рисунок 2.30 – Таблиці станів

- Технологічний час. У правій частині екрана додано цифрове поле (I/O field) «Таймер», яке відображає поточний відлік часу активного гасіння.

- Органи керування та взаємодія з ПЛК. У нижній частині екрана скомпоновано панель керування, яка складається з інтерактивних кнопок. Навігаційні кнопки («Графіки», «Діагностика») дозволяють миттєво переходити до відповідних підлеглих екранів.

Для безпосереднього втручання в роботу системи передбачено кнопки керування процесом: «ПУСК» (зелена) та «СТОП» (сіра).

«АВАРІЙНА ЗУПИНКА» (червона): пріоритетна кнопка (E-STOP), натискання якої ініціює запис коду аварії Alarm_ID = 8 у ПЛК, миттєво знеструмлюючи виконавчі механізми (насос та засувку) і перериваючи будь-яку фазу скінченного автомата.

«Скинути аварію» - кнопка квітування помилок. Її натискання надсилає в ПЛК команду на обнулення коду помилки у блоці DB1 і виводить систему зі Стану

4 (Аварійний режим) назад у режим очікування, за умови усунення першопричини аварії на об'єкті.

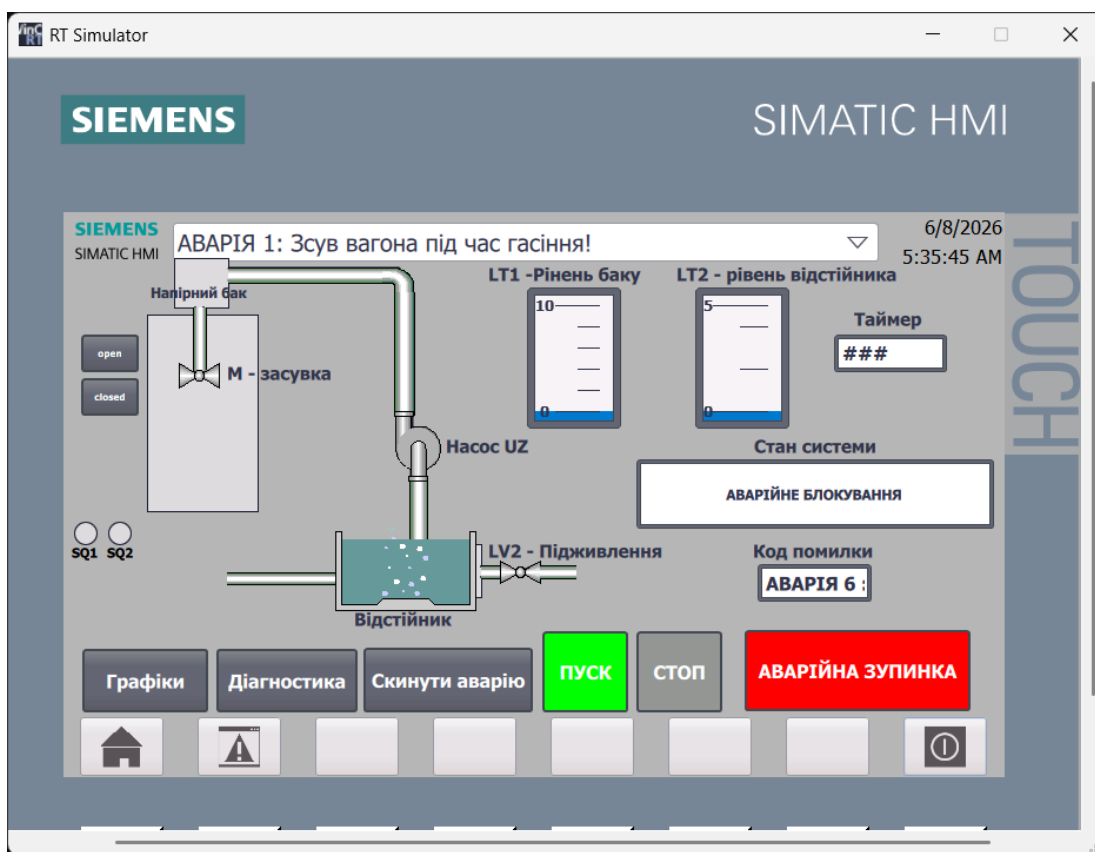


Рисунок 2.31 – Головний екран процесу гасіння

Усі теги візуалізації (HMI Tags) мають пряму абсолютну адресацію до глобального неоптимізованого блоку даних Quenching_Data [DB1] у пам'яті контролера CPU 1214C. Обмін даними здійснюється циклічно (з періодом оновлення 100-500 мс) через мережу PROFINET, що гарантує високу швидкість реакції інтерфейсу на зміни в технологічному процесі.

2.10 Інтеграція системи на верхній рівень (S7Communication / SCADA) та розробка IoT-додатку в Node-RED

Концепція побудови сучасної АСУ ТП коксохімічного виробництва вимагає обов'язкової інтеграції локальних керуючих комплексів у єдиний інформаційний простір підприємства (IoT). Для реалізації завдань глобальної диспетчеризації,

віддаленого моніторингу та аналітики обрано платформу потокового програмування Node-RED. З позицій експлуатаційної надійності, архітектура програмного забезпечення побудована за модульним принципом: реалізовано чітке розділення рівнів збору даних, їх синтаксичного аналізу (парсингу) та візуалізації. Такий підхід забезпечує гнучкість системи та дозволяє миттєво перемикатися між режимами імітаційного моделювання та роботою з реальним обладнанням.

Апаратна абстракція та підготовка до промислової експлуатації.

Фундаментальною вимогою до розробленої Web-SCADA є її повна готовність до розгортання на реальному об'єкті без необхідності переписування вихідного коду парсера чи графічного інтерфейсу. Для забезпечення прямого зв'язку з логічним контролером Siemens S7-1200 у схему інтегровано спеціалізований комунікаційний вузол s7 in, що працює за протоколом S7 Communication [20]:

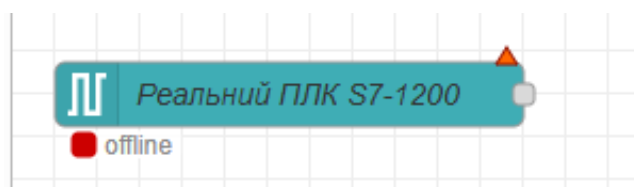


Рисунок 2.32 – Зображення вузлу s7 in

Механіка роботи комунікаційного протоколу.

Транспортний рівень обміну даними між обчислювальним ядром контролера та сервером Node-RED базується на пропрієтарному протоколі Siemens S7 Communication, який на фізичному та канальному рівнях інкапсулюється в стандартні TCP/IP-пакети з фіксацією на порту 102. Його функціональна парадигма спирається на клієнт-серверну архітектуру з використанням неявних функцій PUT/GET. У цій топології інтеграційна платформа Node-RED виступає як активний клієнт: вона ініціює високочастотні циклічні транзакції читання та запису за вказаними абсолютними адресами.

Контролер S7-1200, у свою чергу, виконує роль пасивного сервера, миттєво віддаючи зліпок пам'яті операційній системі верхнього рівня. Головна інженерна перевага цього механізму полягає у відсутності потреби написання додаткового комунікаційного коду (на кшталт блоків TSEND/TRCV) у самій програмі ПЛК -

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

операційна система контролера обробляє запити у фоновому режимі поза основним циклом сканування (OB1).

Налаштування мережевого інтерфейсу комунікаційного вузла включає параметризацію IP-адреси цільового ПЛК та вказівку топології (Rack 0, Slot 1). Критичною апаратною умовою для встановлення такого прозорого з'єднання з боку TIA Portal є активація дозволу «Permit access with PUT/GET communication from remote partner» у налаштуваннях безпеки центрального процесора. Такий архітектурний підхід забезпечує прямий доступ до глобальних блоків даних (DB), маркерної пам'яті (M) та периферії (I/Q), що робить його еталонним інструментом для швидкого прототипування та розгортання локальних систем збору телеметрії перед подальшим масштабуванням до рівня OPC UA [12].

Рисунок 2.33 – Налаштування блоку s7 in

Для коректної дешифрації телеметрії всередині вузла s7 in сформовано конфігураційну таблицю змінних (Variables), яка прецизійно дублює адресацію глобального блоку даних Quenching_Data [DB1] та фізичних входів/виходів контролера. Зокрема, налаштовано зчитування:

- Рівнів води у напірній башті та відстійнику (змінні типу Real за адресами MD108 та MD104);

- Поточного стану автомата (DB1,INT0) та коду спрацювання ПАЗ Alarm_ID (DB1,INT12);
- Апаратних сигналів позиціонування вагона (I0.0, I0.1), стану кінцевиків арматури та кнопок E-STOP;
- Завдання швидкості насоса (QW66) та мілісекундного таймера гасіння (DB1,DINT6). Цей налаштований комунікаційний блок доводить 100% готовність платформи до прийому промислової телеметрії.

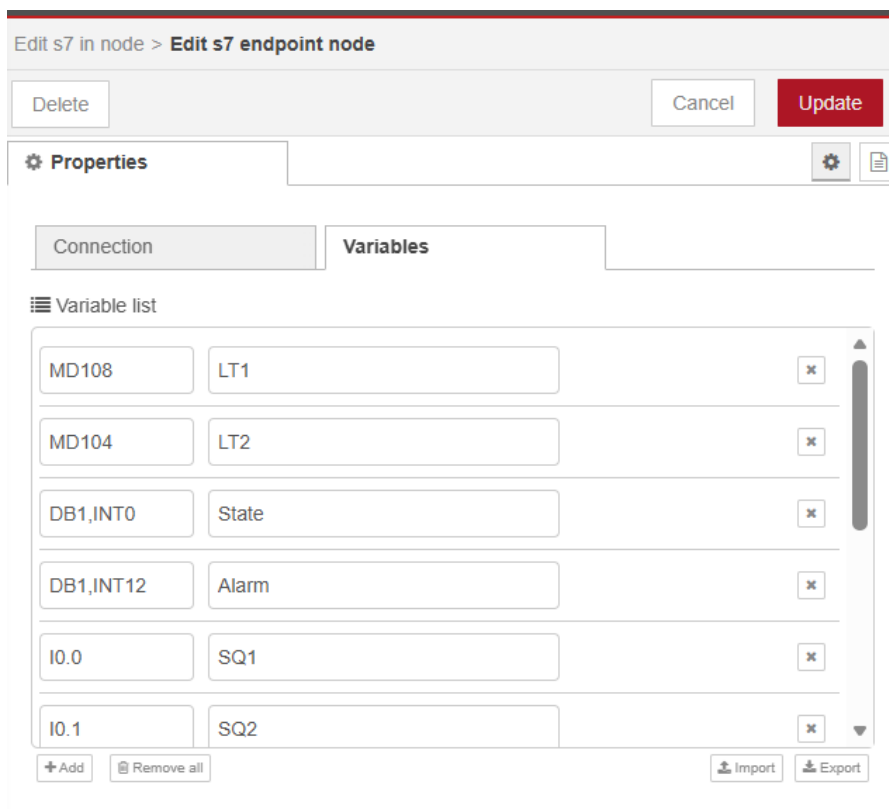


Рисунок 2.34 - Вкладка Variables у налаштуваннях вузла s7 in

Синтез "цифрового двійника" (Віртуального ПЛК).

З огляду на об'єктивну відсутність фізичного контролера на етапі прототипування та захисту кваліфікаційної роботи, для генерації технологічних даних розроблено повноцінну математичну модель об'єкта. Вона реалізована у вузлі типу function, який виконує роль Віртуального ПЛК:

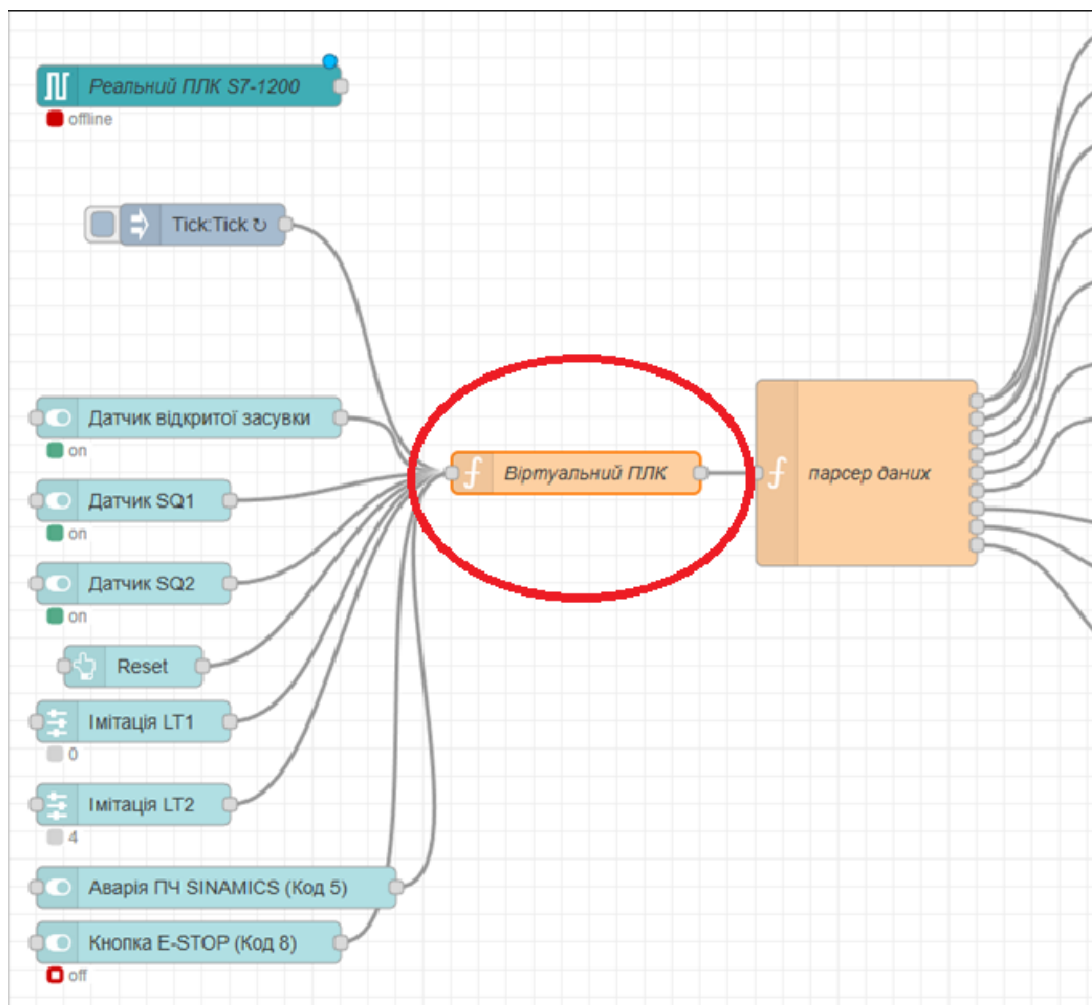


Рисунок 2.35 – Віртуальний ПЛК

Цей програмний модуль є точним алгоритмічним реплікантом скінченного автомата з TIA Portal. Скрипт мовою JavaScript циклічно (раз на секунду за допомогою генератора inject) обробляє команди з веб-інтерфейсу, симулює інерційність ходу засувки, роботу технологічних таймерів та реакцію перетворювача частоти залежно від гідростатичного напору. Крім того, у код жорстко зашита система протиаварійного захисту з пріоритетами переривань, яка здатна моделювати всі 7 розроблених кодів несправностей. Повний лістинг програмного коду мовою JavaScript, що реалізує математичну модель об'єкта та логіку протиаварійного захисту, наведено в Додатку А.

Універсальний синтаксичний аналізатор.

Ядром обробки вхідної інформації виступає вузол function під назвою «Парсер Даних». Його цільове призначення — приймати стандартизований пакет

телеметрії (незалежно від того, чи він згенерований апаратним контролером, чи цифровим двійником) та здійснювати його маршрутизацію на відповідні графічні віджети:

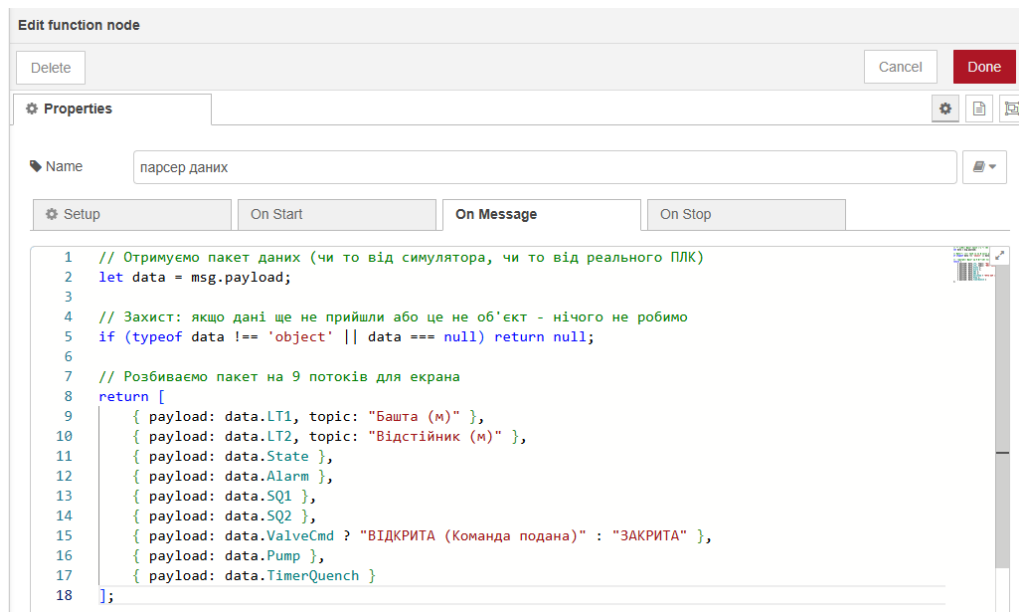


Рисунок 2.36 - Відкритий код вузла "Парсер Даних"

Побудова диспетчерського людино-машинного інтерфейсу (Web-SCADA). Візуалізація технологічного процесу та створення інтерактивного середовища диспетчера реалізовані за допомогою пакета розширення node-red-dashboard. З метою оптимізації когнітивного навантаження на персонал та дотримання ергономічних стандартів промислових інтерфейсів, графічний простір веб-дашборду жорстко структуровано на чотири незалежні функціональні кластери:

- *Гідродинаміка*. Блок безперервного моніторингу аналогових величин. Включає вузли gauge (напівкругові шкали) для оперативної оцінки запасів води у напірній башті та відстійнику, а також вузол chart для побудови багатоканальних часових трендів. У цей же кластер інтегровано вузли slider (повзунки), які дозволяють плавно імітувати зміну аналогових сигналів рівня (LT1, LT2) та перевіряти реакцію ПД-регулятора безпосередньо з екрана.

- *Статус системи*. Аналітично-діагностичний кластер, побудований на масиві вузлів text. Цей блок приймає розпаковані парсером дані та трансформує їх у деталізовану текстову інформацію: поточну фазу скінченного автомата,

розшифровку кодів протиаварійного захисту (Alarm_ID), стани індуктивних датчиків позиціонування (SQ1, SQ2), положення головної засувки M1, частотний режим роботи насоса UZ3 (у відсотках та герцах) та динамічний відлік технологічного таймера гасіння.

- *Віддалене керування.* Блок ініціалізації керівних впливів. Представлений вузлом button (кнопка RESET), який генерує команду глобального квітування аварій. Це інженерне рішення дає змогу диспетчеру дистанційно знімати програмні блокування в логічному ядрі контролера після підтвердження усунення першопричин збоїв на польовому рівні.

- *Імітація.* Спеціалізований кластер генерації дискретних збурень, укомплектований масивом вузлів switch (тумблери). Призначення цього блоку — програмна імітація спрацювання польових датчиків (наявність вагона, підтвердження ходу арматури), а також примусова ініціалізація критичних апаратних відмов (наприклад, аварія перетворювача частоти SINAMICS або натискання фізичної кнопки E-STOP) для наскрізної перевірки надійності алгоритмів ПАЗ.

2.11 – Інструкція тестування в різних режимах роботи

Тестування апаратно-програмного комплексу через локальний інтерфейс оператора (HMI).

Щоб перевірити надійність розробленої системи перед її впровадженням на реальному виробництві, ми провели наскрізне тестування всіх алгоритмів. Випробування базуються на створенні «цифрового двійника» об'єкта. Логіка контролера імітується за допомогою інструменту S7-PLCSIM у TIA Portal, а операторський контроль здійснюється через розроблений дашборд Web-SCADA. Завдяки такому підходу ми можемо безпечно відтворити будь-які технологічні збурення та перевірити реакцію системи захисту без ризику пошкодити реальне обладнання коксохімічного цеху.

Тестування штатного режиму роботи через інтерфейс HMI у TIA Portal.

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Оскільки під час симуляції фізичні датчики відсутні, для імітації сигналів від польового обладнання використовується таблиця примусового керування змінними — *Force Table*.

CokeQuenching_MaksymTsyba > PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] > Watch and force tables > Force table							
	Name	Address	Display format	Monitor value	Force value	F	Co
1	"Quenching_Data".Curr...	%DB1.DBW0	DEC+/-	0	0	☐	
2	"Quenching_Data".Alarm_ID	%DB1.DBW12	DEC+/-	0	0	☐	
3	"Real_Level_LTI"	%MD108	Floating-point number	7.957176		☐	
4	"SQ1":P	%I0.0:P	Bool	☐	TRUE	☒	
5	"SQ2":P	%I0.1:P	Bool	☐	TRUE	☒	
6	"SQ3_Valve_Open":P	%I0.2:P	Bool	☐	TRUE	☒	
7	"SQ4_Valve_Closed":P	%I0.3:P	Bool	☐	TRUE	☐	
8	"K1_Valve_M1":P	%Q0.0:P	Bool	☐	TRUE	☐	
9	"Pump_UZ3_Run":P	%Q0.1:P	Bool	☐		☐	
10	"UZ3_Speed_Setpoint":P	%QW66:P	DEC+/-	☐		☐	
11	"LT1_Tower_Level":P	%IW98:P	DEC+/-	☐	22000	☒	
12	"LT2_Sump_Level":P	%IW96:P	DEC+/-	☐	20000	☒	
13		<Add new>				☐	

Рисунок 2.37– Таблиця примусового керування

Завдяки цим налаштуванням у таблиці ми ініціалізації рівень води в напірній башті примусово фіксується на позначці 9.0 метрів, а кількість води в башті фіксується на 3,5 метрів. Це забезпечує виконання стартової умови нашого алгоритму — наявність достатнього гідростатичного напору. Всі інші механізми перебувають у режимі очікування.

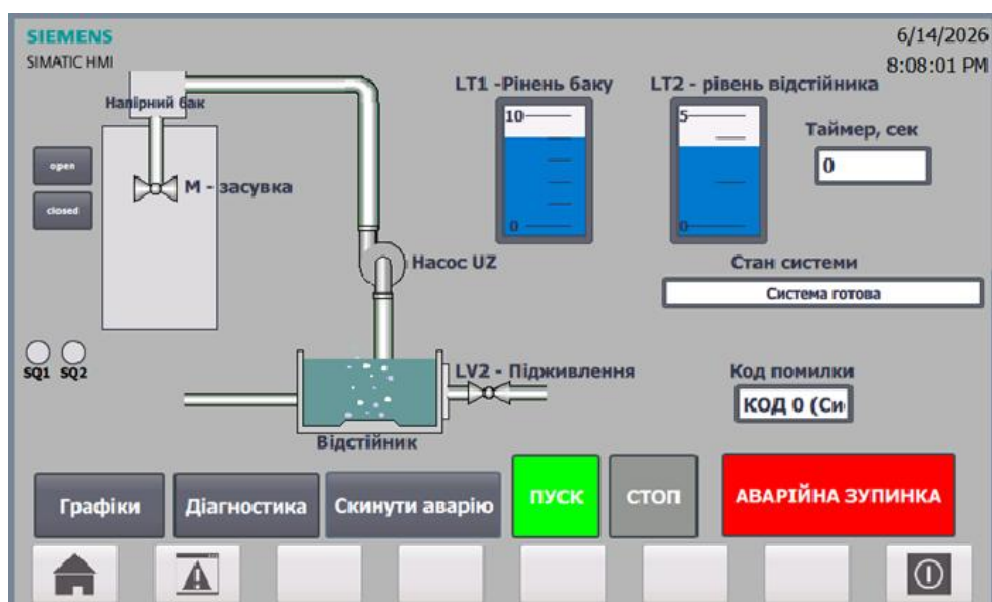


Рисунок 2.38 - Мнемосхема в стані готовності

Шляхом зміни логічних станів змінних SQ1 та SQ2 на "TRUE" імітується заїзд завантаженого гасильного вагона в робочу зону башти. Контролер миттєво обробляє ці сигнали і переводить програму у Фазу 1. На екрані НМІ з'являється візуальне підтвердження фіксації об'єкта, а система видає команду на відкриття головної водяної засувки M1 – в програмі вона починає мигати:

CokeQuenching_MaksymTsyba > PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] > Watch and force tables > Force table

	Name	Address	Display format	Monitor value	Force value	F	Comment
1	"Quenching_Data".Current..	%DB1.DBW0	DEC+/-	0	0	☐	
2	"Quenching_Data".Alarm_ID	%DB1.DBW12	DEC+/-	0	0	☐	
3	"Real_Level_LT1"	%MD108	Floating-point number	7.957176		☐	
4	"SQ1".P	%IO.0.P	Bool	☒	TRUE	☒	
5	"SQ2".P	%IO.1.P	Bool	☒	TRUE	☒	
6	"SQ3_Valve_Open".P	%IO.2.P	Bool	☒	TRUE	☒	
7	"SQ4_Valve_Closed".P	%IO.3.P	Bool	☒	TRUE	☐	
8	"K1_Valve_M1".P	%Q0.0.P	Bool	☒	TRUE	☐	
9	"Pump_UZ3_Run".P	%Q0.1.P	Bool	☒		☐	
10	"UZ3_Speed_Setpoint".P	%QW66.P	DEC+/-			☐	
11	"LT1_Tower_Level".P	%IW98.P	DEC+/-		22000	☒	
12	"LT2_Sump_Level".P	%IW96.P	DEC+/-		20000	☒	
13	<Add new>						

Рисунок 2.39 - Таблиця примусового керування з увімкненими датчиками SQ1 та SQ2

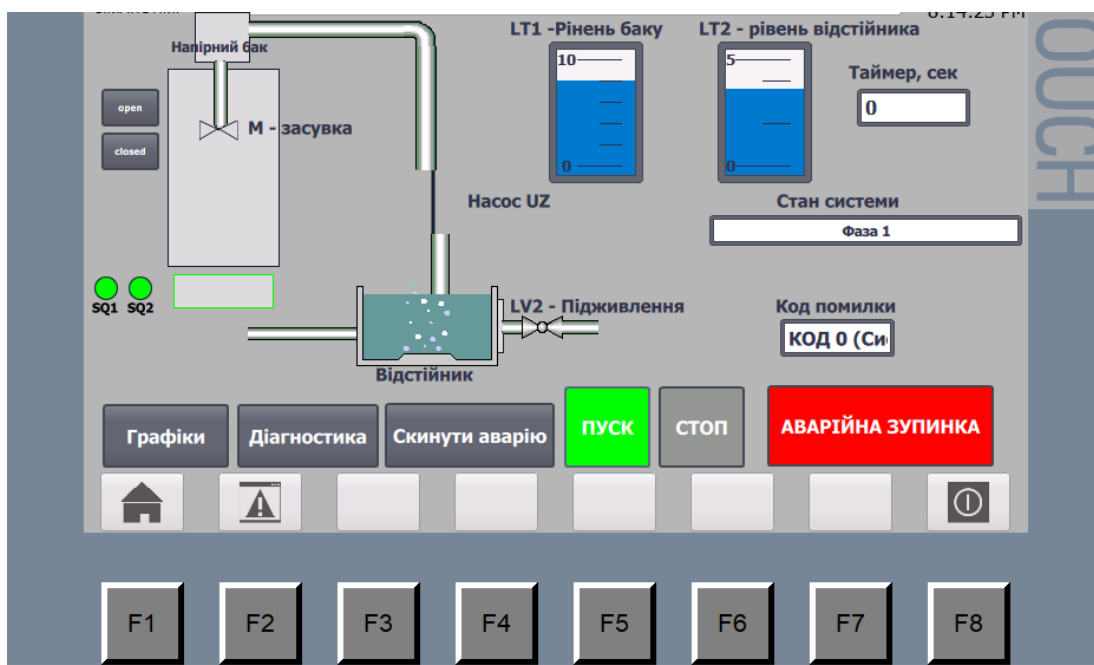


Рисунок 2.40 - Мнемодіаграма під час переходу системи у Стан 1

При підтвердженні кінцевика що засувка відкрита (ми також симулюємо це через таблицю Force table) наша система автоматично переходить до Фази 2 – Активного гасіння коксу:

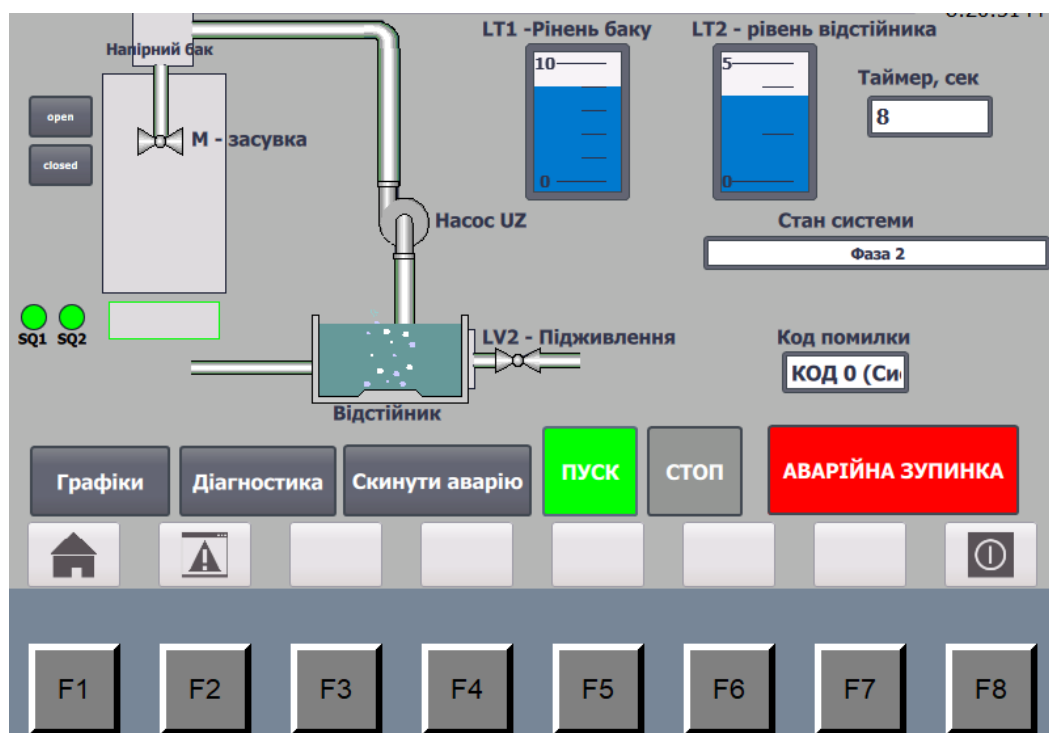


Рисунок 2.41 – Вигляд мнемोगрама під час переходу системи у Фазу 2

На інтерфейсі розташований таймер – завдяки ньому диспетчер може орієнтуватись в етапі роботи установки.

Після закінчення часу роботи таймера система перемикається в режим очікування – Фаза 3:

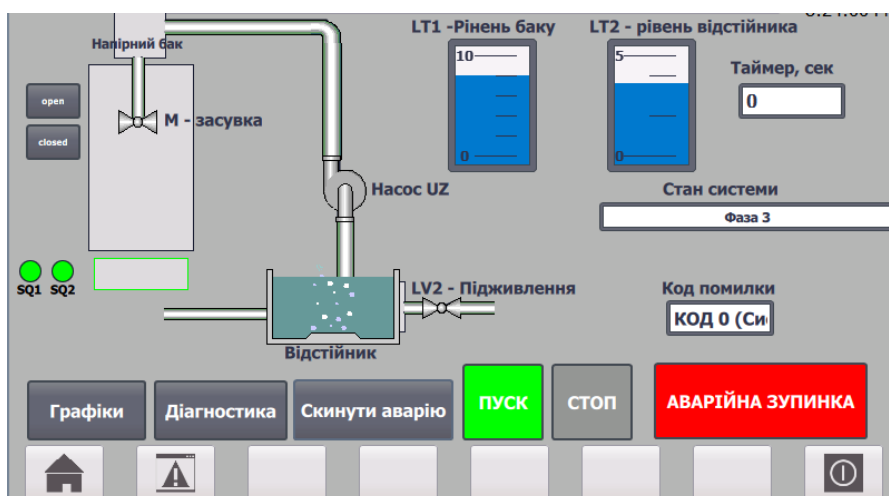


Рисунок 2.42 – Мнемोगрама під час перехідної Фази 3

Після того, як датчики більше не фіксують вагон (деактивація SQ1 та SQ2 у Force table), система автоматично переходить назад в стан очікування: алгоритм здійснює програмне скидання регістрів скінченного автомата і повертає комплекс у вихідну позицію, сигналізуючи про повну готовність до приймання наступної партії продукту:

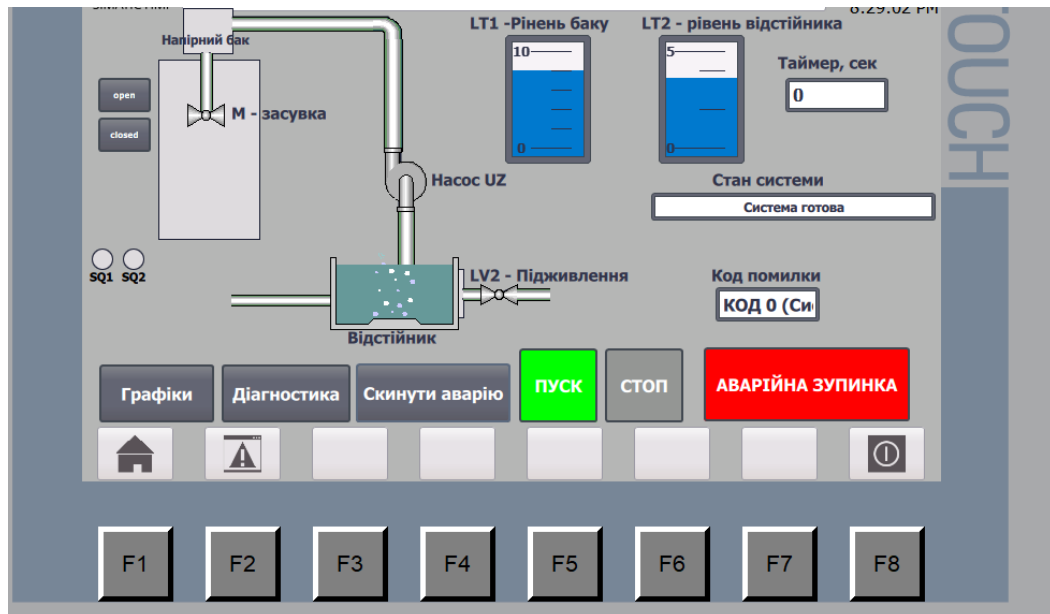


Рисунок 2.43 – Вигляд мнемोगрами в стані очікування

Імітуємо аварію заклинювання засувки(Аварія 2).

Тестування підсистеми протиаварійного захисту (ПАЗ) та діагностика збурень. З позицій збереження експлуатаційного ресурсу дороговартісного обладнання, фундаментальним завданням керуючої програми є миттєве блокування виконавчих механізмів при відхиленні параметрів за межі регламентованих допусків.

Імітація механічного заклинювання головної засувки при відкритті (Код 2) реалізується шляхом порушення таймінгів зворотного зв'язку. При ініціації циклу (Фаза 1) навмисно ігнорується встановлення сигналу SQ3_Valve_Open у Force table. По завершенню п'ятисекундного вікна очікування, програмний таймер переповнюється і генерує керуючий імпульс, який переводить систему в аварію. Диспетчерський інтерфейс візуалізує апаратне блокування, чітко вказуючи ремонтному персоналу на вузол, що потребує механічної ревізії. Налаштування

таблиці та результат моделювання на мнемосхемі з виведенням всієї необхідної інформації:

1		"Quenching_Data".Current..	%DB1.DBW0	DEC+/-	1	0	
2		"Quenching_Data".Alarm_ID	%DB1.DBW12	DEC+/-	0	0	
3		"Real_Level_LT1"	%MD108	Floating-point number	7.957176		
4	F	"SQ1".P	%IO.0.P	Bool		TRUE	☒
5	F	"SQ2".P	%IO.1.P	Bool		TRUE	☒
6		"SQ3_Valve_Open".P	%IO.2.P	Bool		TRUE	☐
7		"SQ4_Valve_Closed".P	%IO.3.P	Bool		TRUE	☐
8		"K1_Valve_M1".P	%Q0.0.P	Bool		TRUE	☐

Рисунок 2.44 – Навмисне ігнорування подачі сигналу на кінцевик засувки в Force

Table



Рисунок 2.45 – Мнемосхема з Аварією 2

Моделювання ситуації з Аварією 1.

Аварійний зсув рухомого складу під час активного виливу води (Код 1) моделюється штучною втратою сигналу просторового позиціонування. Якщо під час Фази 2 контакт індуктивного датчика SQ1 або SQ2 розмикається (переводиться у стан "FALSE"), математичний апарат ПЛК трактує це як несанкціонований рух електровоза. З метою запобігання проливу технічної води повз кузов вагона, арматура екстрено перекривається, а система випадає в стан захисного блокування до ручного квітування помилки диспетчером:

1		"Quenching_Data".Current..	%DB1.DBW0	DEC+/-	4	0	
2		"Quenching_Data".Alarm_ID	%DB1.DBW12	DEC+/-	1	0	
3		"Real_Level_LT1"	%MD108	Floating-point number	7.957176		
4	F	"SQ1".P	%IO.0.P	Bool		TRUE	☒
5		"SQ2".P	%IO.1.P	Bool		TRUE	☒
6	F	"SQ3_Valve_Open".P	%IO.2.P	Bool		TRUE	☒

Рисунок 2.46 – Моделювання ситуації «несанкціонованого руху електровоза» в

Force Table

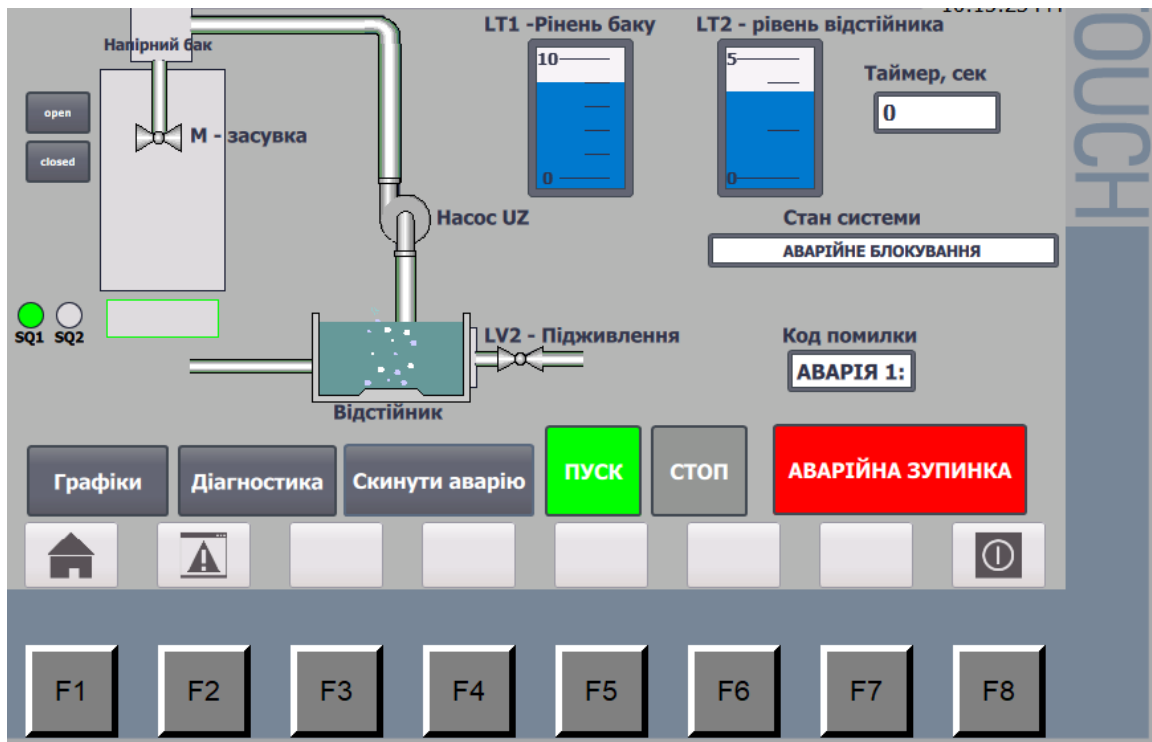


Рисунок 2.47 – Відображення аварії зсуву вагона під час гасіння

Критичне спустошення напірної башти (Код 3).

Перевіряється шляхом різкого зниження аналогового сигналу рівня. Під час роботи установки значення змінного слова LT1_Tower_Level (%IW98) у Force table примусово занижується до 2000 одиниць, що функціонально відповідає падінню стовпа рідини нижче критичної позначки у 1.5 метра. Компаратор ПЛК миттєво генерує переривання циклу, зупиняючи відцентровий насос для захисту крильчатки та формуючи відповідний лог на екрані:

1	"Quenching_Data".Curr...	%DB1.DBW0	DEC+/-	0	0	☐
2	"Quenching_Data".Alarm_IC	%DB1.DBW12	DEC+/-	3	0	☐
3	"Real_Level_LT1"	%MD108	Floating-point number	0.7233796		☐
4	"SQ1":P	%IO.0:P	Bool	☒	TRUE	☒
5	"SQ2":P	%IO.1:P	Bool	☒	TRUE	☒
6	"SQ3_Valve_Open":P	%IO.2:P	Bool	☒	TRUE	☒
7	"SQ4_Valve_Closed":P	%IO.3:P	Bool	☒	TRUE	☐
8	"K1_Valve_M1":P	%Q0.0:P	Bool	☒	TRUE	☐
9	"Pump_UZ3_Run":P	%Q0.1:P	Bool	☒		☐
10	"UZ3_Speed_Setpoint":P	%QW66:P	DEC+/-	☒		☐
11	"LT1_Tower_Level":P	%IW98:P	DEC+/-	☒	2000	☒
12	"LT2_Sump_Level":P	%IW96:P	DEC+/-	☒	20000	☒
13	<Add new>					

Рисунок 2.48 – Налаштування таблиці для відпрацювання захисту при критичному падінні гідростатичного напору

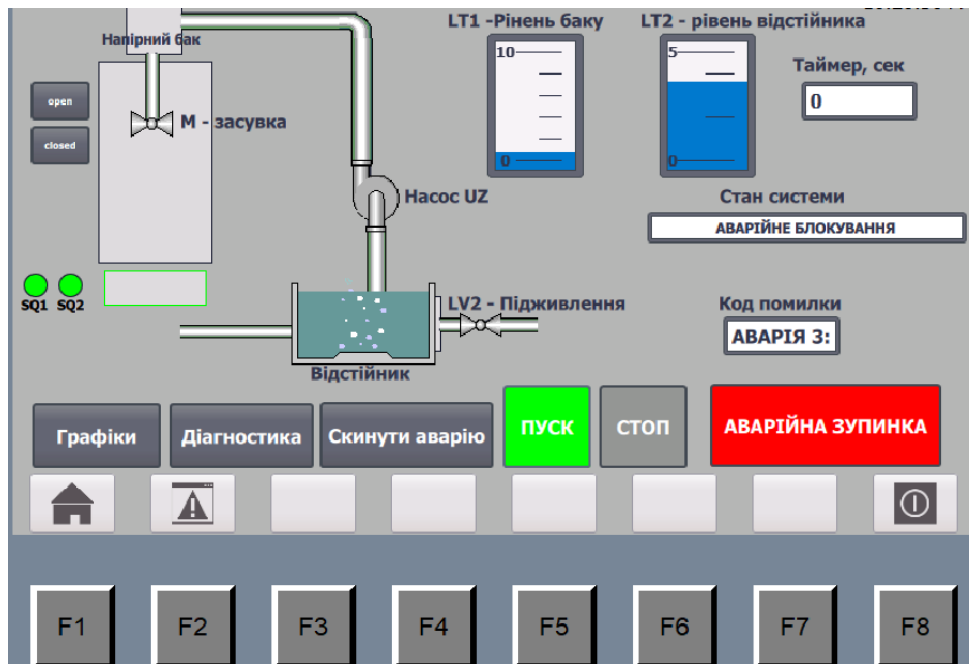


Рисунок 2.49 - Відпрацювання алгоритмів захисту при критичному падінні гідростатичного напору

Показова робота ПІД-контролера. Контролер налаштований таким чином щоб коли програма помічає зміни значення рівня води у відстійнику – система підживлення відкривала клапан LV2 рівно на стільки, на скільки не вистачає води в відстійнику. Процес вдалось симулювати на окремому вікні «Графіки рівня» - користувач може змінити рівень води в відстійнику та побачити його відновлення:

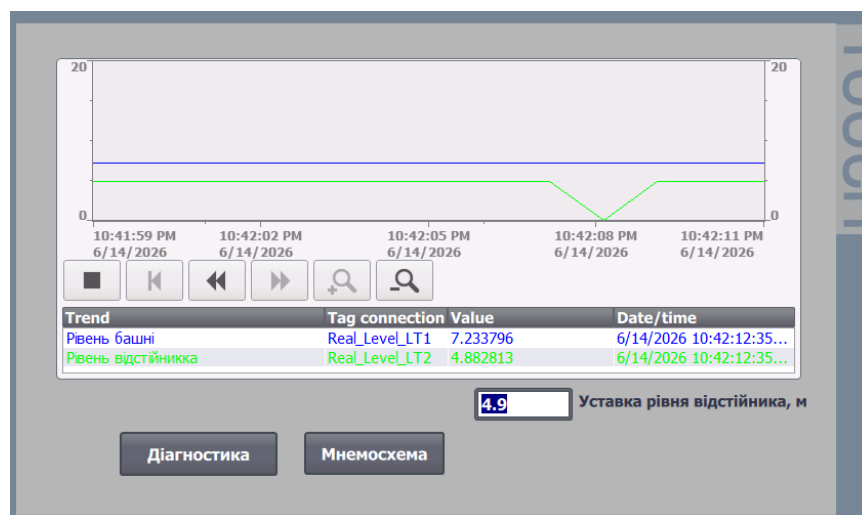


Рисунок 2.50 – Робота ПІД-контролера

На прикладі видно що рівень води спустився до 0, а ПІД-контролер відновив цей рівень.

Верифікація інтеграційної платформи SCADA та алгоритмів глобальної диспетчеризації.

Налагодження диспетчерського інтерфейсу реалізовано за допомогою вбудованого в Node-RED «цифрового двійника» (Віртуального ПЛК). Таке рішення дозволяє повноцінно протестувати роботу Web-SCADA, обробку даних та реакцію графіків повністю автономно, без підключення до реального контролера Siemens. Керування рівнями води та станами датчиків здійснюється безпосередньо через блок імітації на самому веб-дашборді.

Ініціалізація та відпрацювання штатного циклу гасіння.

Щоб підготувати систему до запуску, за допомогою повзунків на панелі SCADA встановлюємо рівень башти LT1 на 8.0 метрів, а рівень відстійника LT2 - на 4 метри. Перемиканням тумблерів «Датчик SQ1» та «Датчик SQ2» імітуємо прибуття вагона. Віртуальний ПЛК одразу обробляє ці сигнали і переводить систему у Фазу 1. Програма Node-RED миттєво оновлює текстові поля стану, а індикатори вагона стають зеленими, підтверджуючи правильну роботу інтерфейсу.

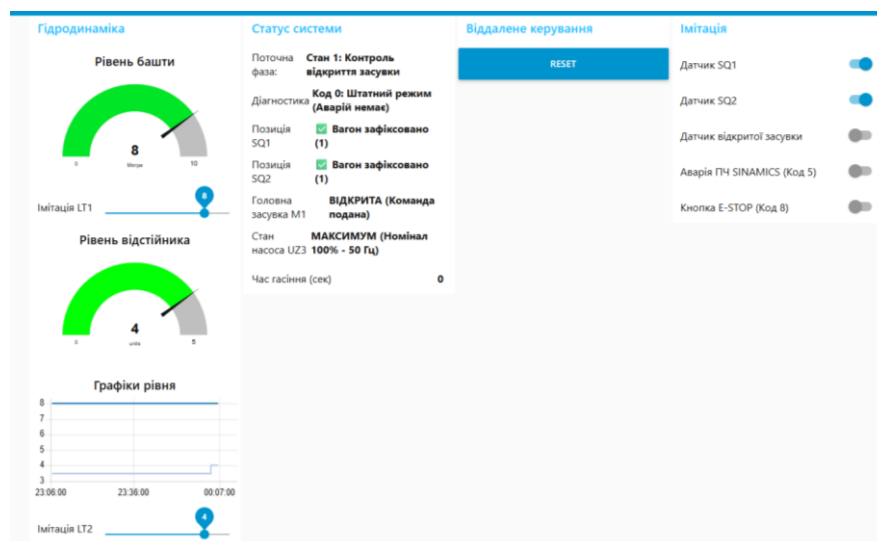


Рисунок 2.51 – Відображення інформації на Dashboard при Стані 1

Активуємо сигнал з кінцевика – тим самим сигналізуємо, що вода дійсно плетється – система перемикається в Фазу 2:

					КНУ КРБ.151.26.12.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

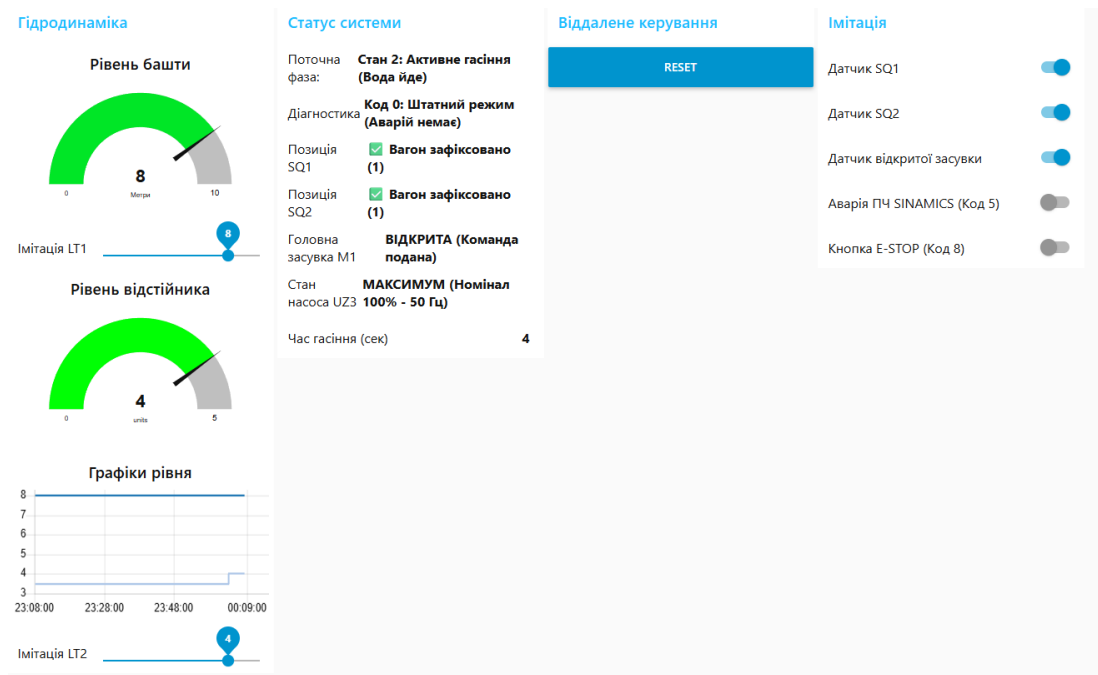


Рисунок 2.52 – Відображення роботи Фази 2

Після успішного закриття засувки, і отримання цим на Node-RED – система показує інформацію про перехід до Фази 3:

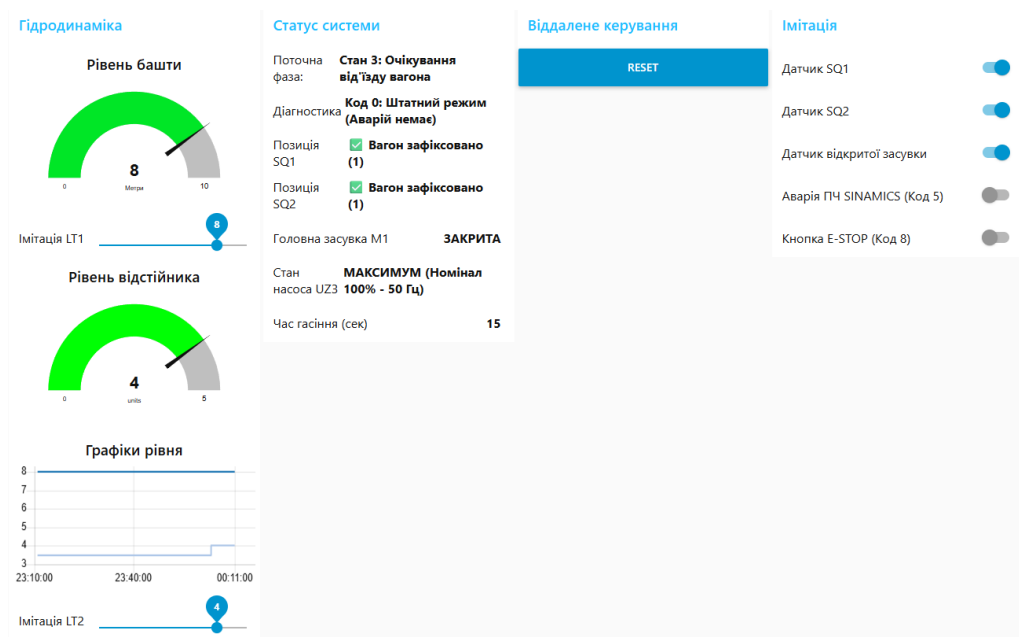


Рисунок 2.53 – Відображення фази 3

Ідентифікація механічного заклинювання виконавчих органів (Код 2)

Перевіряється шляхом ігнорування зворотного зв'язку про хід арматури. При ініціації Фази 1 сигнал відкритого положення засувки навмисно не активується.

Віртуальний ПЛК фіксує переповнення часу очікування і генерує аварійне переривання. Інтерфейс Web-SCADA миттєво зчитує зміну стану і виводить розшифроване текстове повідомлення на дашборд. З позицій експлуатаційної надійності, це дозволяє ремонтному персоналу локалізувати механічний дефект електроприводу ще до виходу на об'єкт:

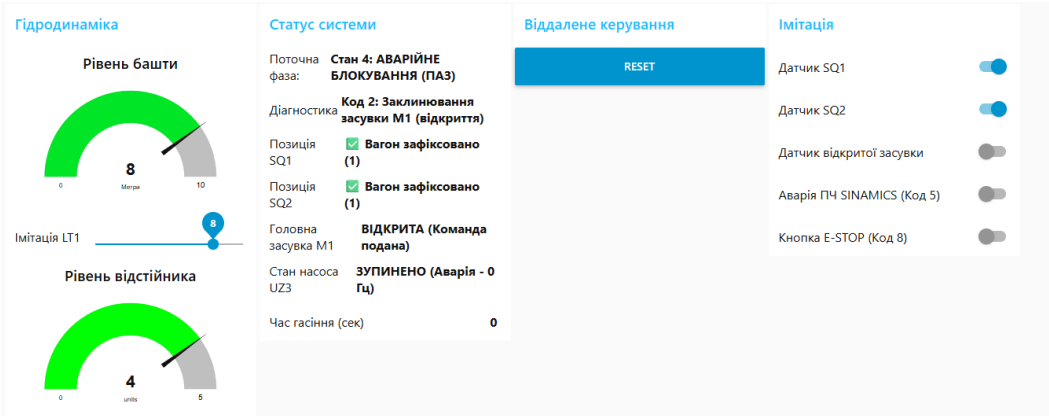


Рисунок 2.54 - Ідентифікація відмови електроприводу засувки на верхньому рівні керування

Фіксація аварійного зсуву рухомого складу (Код 1).

Моделюється вимкненням тумблера індуктивного датчика під час активного зрошення (Фаза 2). Алгоритм цифрового двійника трактує це як несанкціонований рух вагона і екстрено блокує потік води для запобігання проливу. Дашборд набуває тривожної індикації, сигналізуючи диспетчеру про порушення техніки безпеки на польовому рівні. Для відновлення процесу реалізовано алгоритм дистанційного квітування: після усунення причини диспетчер натискає кнопку «Скинути аварію» у веб-інтерфейсі, знімаючи програмне блокування:

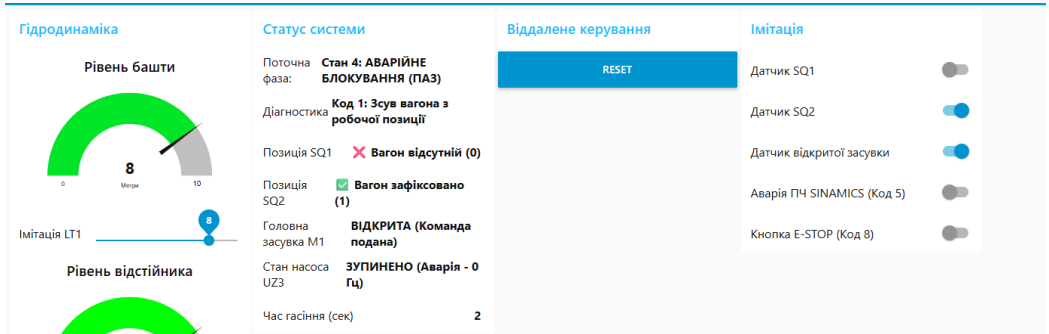


Рисунок 2.55 - Візуалізація спрацювання ПАЗ при втраті просторового позиціонування

Діагностика критичного спустошення напірної башти (Код 3).

Тестується примусовим зниженням повзунка імітації рівня башти (LT1) нижче аварійної позначки 1.5 метра. Глобальна диспетчерська одразу відмалює падіння гідростатичного напору на графіках та виводить відповідний код помилки. Зупинка відцентрового насоса та засувки відображається зміною станів виконавчих механізмів на "ЗУПИНЕНО", що підтверджує миттєву реакцію IoT-платформи на кризові гідродинамічні ситуації:

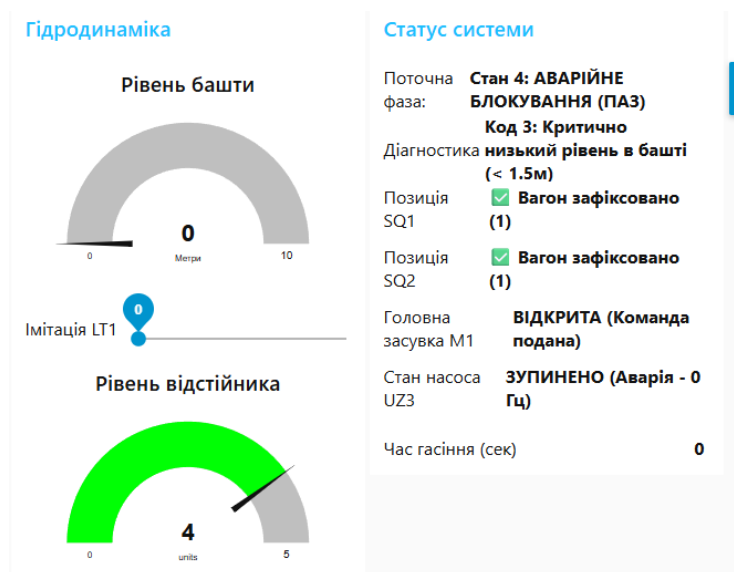


Рисунок 2.56 - Відображення параметрів системи при загрозі критичного падіння рівня води

Проведене комплексне тестування цифрового двійника підтвердило абсолютну коректність розробленої логіки. Система миттєво ідентифікує нештатні ситуації та блокує механізми, що доводить її повну готовність до впровадження на реальному об'єкті.

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі успішно вирішено актуальну інженерну задачу - розроблено комплексну гібридну систему автоматичного керування ділянкою мокрого гасіння коксу (МГК) для умов ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Перехід від локальних ізольованих SCADA-систем з жорстким позиційним керуванням до адаптивних алгоритмів на базі сучасного програмованого логічного контролера та відкритої IoT-платформи дозволив стабілізувати гідродинамічні параметри процесу та суттєво підвищити експлуатаційну надійність об'єкта.

За результатами виконання роботи зроблено наступні висновки:

- Математичне моделювання та синтез контурів керування - Процес зміни рівня води у відстійнику формалізовано для налаштування контуру регулювання. Завдяки імплементації ПІД-закону забезпечено стійкість системи керування рівнем та повну ліквідацію паразитних автоколивань і руйнівних гідравлічних ударів, які були притаманні базовій системі двопозиційного типу.

- Апаратна реалізація - Обґрунтовано та розроблено багаторівневу ієрархічну архітектуру автоматизації на базі ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200. Інтеграція перетворювачів частоти SINAMICS G120C, радарних аналогових рівнемірів Endress+Hauser та індуктивних датчиків позиціонування Turck дозволила сформувати повноцінні контури гідродинамічної стабілізації та жорсткої функціональної безпеки при позиціонуванні гасильного вагона.

- Програмне забезпечення та візуалізація - В інженерному середовищі TIA Portal розроблено прикладне ПЗ для контролера та локальний людино-машинний інтерфейс для шафи керування. Для верхнього рівня диспетчеризації розгорнуто Web-SCADA на базі IoT-платформи Node-RED, що дозволило відмовитися від ресурсоємних «товстих клієнтів» WinCC та забезпечити кросплатформний віддалений доступ.

					КНУ КРБ.151.26.12.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИі			Лім.	Арк.	Аркушів	
Розроб.		Циба М.В.									
Перевір.		Харламенко В.Ю.								70	2
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

- Імітаційне моделювання (Virtual Commissioning) - З огляду на відсутність фізичного об'єкта під час розробки, у середовищі Node-RED розроблено математичну модель установки. Це дозволило автономно верифікувати керуючі алгоритми, перевірити коректність обміну даними та безпечно протестувати реакцію підсистеми протиаварійного захисту (ПАЗ) на критичні збурення (заклинювання засувки, відмова насоса або критичне падіння рівня води).

Ключовим здобутком розробленої системи є комплексне підвищення енергоефективності технологічного процесу та оптимізація експлуатаційних витрат. Економія ресурсів на підприємстві здійснюється за рахунок трьох взаємопов'язаних факторів:

- Частотне регулювання продуктивності - Відмова від енергозатратного методу прямого пуску потужних відцентрових насосів на користь керування через частотні перетворювачі SINAMICS G120C. Програмна реалізація скінченного автомата переводить насос у економний режим (25 Гц) під час очікування вагона, що радикально знижує марні витрати електроенергії у періоди технологічних пауз порівняно з базовою системою (де насоси постійно працювали на 100%).

- Адаптивне керування гідродинамікою - Використання програмного об'єкта PID_Compact у контролері S7-1200 забезпечує прецизійне та плавне керування продуктивністю насосної групи під час активного виливу води на кокс. Це повністю усуває ризик кавітаційного зносу крильчаток насосів та зводить до нуля ймовірність виникнення гідроударів у напірних магістралях башти.

- Інформаційна гнучкість та оптимізація інфраструктури - Впровадження децентралізованої Web-SCADA усуває необхідність закупівлі дорогих ліцензій для розширення мережі стаціонарних комп'ютерів операторної. Це мінімізує капітальні витрати та дозволяє інженерному персоналу здійснювати моніторинг процесу та діагностику обладнання з будь-яких мобільних пристроїв через веб-браузер.

Розроблена проектно-конструкторська документація та успішно перевірене в режимі імітації програмне забезпечення підтверджують повну готовність запропонованої гібридної системи до фізичного впровадження

					КНУ КРБ.151.26.12.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ : ДП «УкрННЦ», 2015. 26 с.
2. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ : ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с.
3. ДСТУ 3651.0-97. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Київ : Держстандарт України, 1998. 27 с.
4. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання. Київ : ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с.
5. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід : підручник. Київ : Фірма «ІНКОС», 2006. 616 с.
6. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.
7. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 544 с.
8. Berger H. Automating with SIMATIC S7-1200: Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Basic. Publicis Publishing, 2018. 731 p.
9. Hagino T. Practical Node-RED Programming. Birmingham : Packt Publishing, 2021. 434 p.
10. Micropilot FMR50: Technical Information. Endress+Hauser AG, 2021. 112 p.
11. Node-RED User Guide. OpenJS Foundation. URL: <https://nodered.org/docs/>

					КНУ КРБ.151.26.12.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Циба М.В.			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Харламенко В.Ю.								72	3
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затвердив		Маринич І.А.									

12. OPC UA Server in S7-1200: Application Example. Siemens AG, 2021. 35 p.
13. PID Control with SIMATIC S7-1200/S7-1500: Application example. Siemens AG, 2019. 45 p.
14. PROFINET System Description. PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. 2021. 40 p.
15. Programming guideline for S7-1200/S7-1500. Siemens AG, 2021. 120 p.
16. SA 07.2 – SA 16.2 Multi-turn actuators: Operating Instructions. AUMA Riester GmbH & Co. KG, 2020. 98 p.
17. SIMATIC HMI Basic Panels 2nd Generation: Operating Instructions. Siemens AG, 2018. 234 p.
18. SIMATIC S7-1200 Programmable controller: System Manual. Siemens AG, 2022. 1848 p.
19. SINAMICS G120C converter: Operating Instructions. Siemens AG, 2021. 512 p.
20. Snap7 Open Source documentation (S7 Communication). URL: <http://snap7.sourceforge.net/>
21. Type 3241 Pneumatic Control Valve: Data Sheet T 8015 EN. SAMSON AG, 2019. 12 p.
22. Uprox+ Inductive Sensors: Data Sheet. Turck GmbH, 2022. 45 p.

					<i>KHY KPB.151.26.12.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО КОДУ ВІРТУАЛЬНОГО ПЛК В СЕРЕДОВИЩІ NODE-RED

```
// 1. ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ ПАМ'ЯТІ ВІРТУАЛЬНОГО ПЛК
let state = context.get('state') || {
  LT1: 8.0, LT2: 3.5, State: 0, Alarm: 0,
  SQ1: false, SQ2: false, SQ_Valve: false,
  fault_sinamics: false, estop: false,
  TimerQuench: 0, TimerValve: 0,
  ValveCmd: false, Pump: "ЕКО-РЕЖИМ (50% - 25 Гц)"
};
let top = String(msg.topic).trim().toLowerCase();
// 2. ЗАПИС КОМАНД ТА СИГНАЛІВ З ДАШБОРДУ В ПАМ'ЯТЬ ПЛК
if (top === "lt1") state.LT1 = Number(msg.payload);
if (top === "lt2") state.LT2 = Number(msg.payload);
if (top === "sq1") state.SQ1 = Boolean(msg.payload);
if (top === "sq2") state.SQ2 = Boolean(msg.payload);
if (top === "sq_valve") state.SQ_Valve = Boolean(msg.payload);
if (top === "fault_sinamics") state.fault_sinamics = Boolean(msg.payload);
if (top === "estop") state.estop = Boolean(msg.payload);
if (top === "reset") {
  state.Alarm = 0;
  state.State = 0;
  state.TimerQuench = 0;
  state.TimerValve = 0;
}
// 3. ОБРОБКА ЦИКЛУ ПРОГРАМИ ПЛК
if (top === "tick") {
  // --- СИСТЕМА ПАЗ (ПРОТИАВАРІЙНИЙ ЗАХИСТ) З ПРІОРИТЕТАМИ ---
  if (state.estop) {
    state.Alarm = 8; // Код 8: Натиснуто Е-STOP
    state.State = 4;
  }
  else if (state.fault_sinamics) {
    state.Alarm = 5; // Код 5: Апаратна аварія ПЧ SINAMICS
    state.State = 4;
  }
  else if (state.LT2 < 0.5) {
    state.Alarm = 6; // Код 6: Загроза кавітації насоса UZ3 (< 0.5м)
    state.State = 4;
  }
  else if (state.LT1 < 1.5) {
    state.Alarm = 3; // Код 3: Критично низький рівень в башті (< 1.5м)
    state.State = 4;
  }
  else if ((state.State === 1 || state.State === 2) && (!state.SQ1 || !state.SQ2)) {
    state.Alarm = 1; // Код 1: Зсув вагона з робочої позиції
    state.State = 4;
  }
  // --- СКІНЧЕННИЙ АВТОМАТ КЕРУВАННЯ---
  if (state.State !== 4) {
```

					<i>КНУ КРБ.151.26.12.00.ПЗ</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

switch(state.State) {
    case 0: // Очікування вагона
        state.ValveCmd = false;
        if (state.SQ1 && state.SQ2 && state.LT1 > 4.0 && state.Alarm ===
0) {
            state.State = 1;
            state.TimerValve = 0;
        }
        break;
    case 1: // Контроль відкриття засувки
        state.ValveCmd = true;
        state.TimerValve++;
        if (state.SQ_Valve) {
            state.State = 2;
            state.TimerQuench = 0;
        } else if (state.TimerValve > 5) {
            state.Alarm = 2; // Код 2: Заклинювання засувки M1 (відкриття)
            state.State = 4;
        }
        break;
    case 2: // Активне гасіння (Вода йде)
        state.ValveCmd = true;
        state.TimerQuench++;
        if (state.TimerQuench >= 15 || state.LT1 <= 4.0) {
            state.State = 3;
            state.TimerValve = 0;
        }
        break;
    case 3: // Очікування від'їзду вагона (Закриття засувки)
        state.ValveCmd = false;
        state.TimerValve++;
        if (state.SQ_Valve && state.TimerValve > 5) {
            state.Alarm = 4; // Код 4: Заклинювання засувки M1
            state.State = 4;
        }
        if (!state.SQ1 && !state.SQ2) {
            state.State = 0;
        }
        break;
}

// --- КЕРУВАННЯ НАСОСОМ (Точна копія логіки LAD з TIA Portal) ---
if (state.State === 4) {
    state.Pump = "ЗУПИНЕНО (Аварія - 0 Гц)";
} else if (state.LT1 <= 8.0 || state.State === 1 || state.State === 2) {
    state.Pump = "МАКСИМУМ (Номінал 100% - 50 Гц)";
} else if (state.LT1 > 8.0 && (state.State === 0 || state.State === 3)) {
    state.Pump = "ЕКО-РЕЖИМ (50% - 25 Гц)";
}
// Зберігаємо оновлену пам'ять
context.set('state', state);
msg.payload = state;
return msg;
}
context.set('state', state);
return null;

```

					КНУ КРБ.151.26.12.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75