МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМ КОТЛОАГРЕГАТОМ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ ПРОТИАВАРІЙНОГО ЗАХИСТУ

Здобувача вищої освіти
Бондарчук Юлії Миколаївни
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»)

_____
(підпис)

Науковий керівник:
д.т.н., професор Селюков О.В.

_____
(підпис)

Національна шкала_____
Кількість балів_____
Оцінка: ECTS

Київ – 2026

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра Інженерних систем та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
_____Наталія ОМЕЦИНСЬКА
«____» _____2025_року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Бондарчук Юлії Миколаївни

1. Тема роботи: Система автоматичного керування промисловим котлоагрегатом на основі алгоритмів протиаварійного захисту_____

керівник роботи: _д.т.н., професор Селюков О.В._____

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від «7 » листопада 2025 № 138/1-ОД

2. Строк подання студентом роботи: 25.05.2026_____

3. Вихідні дані до роботи: Промисловий водогрійний твердопаливний котел КВм-1,75 (паливо – деревина вологістю 15-55%, теплопродуктивність до 2700 кВт).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати технологічні особливості твердопаливного котлоагрегата як об'єкта управління та виявити ключові проблеми кібервразливості сучасних систем автоматизації; Обґрунтувати вибір апаратно-програмних засобів (Siemens) та розробити алгоритми ПІ-регулювання і протиаварійного захисту в середовищі TIA Portal; Обґрунтувати доцільність розшарування промислової мережі та розробити комплекс заходів кібербезпеки із застосуванням брандмауера і демілітаризованої зони (DMZ); Провести аналіз потенційно небезпечних факторів виробництва та розробити технічні і організаційні заходи з охорони праці, пожежної безпеки та реагування у надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації_____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	професор Олександр СЄЛЮКОВ		
Розділ 2	професор Олександр СЄЛЮКОВ		
Розділ 3	професор Олександр СЄЛЮКОВ		
Розділ 4	професор Олександр СЄЛЮКОВ		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	*Назва етапів бакалаврської роботи*	*Термін виконання етапів роботи*	*Заключний документ етапу*
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об’єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 I розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 II розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 III розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

ЗМІСТ

ВСТУП……08
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТА ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ……...11
Висновок до розділу 1……...19
РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЛОКАЛЬНОГО ТА СУПЕРВІЗОРНОГО РІВНІВ УПРАВЛІННЯ…….22
2.1 Характеристика апаратних та програмних засобів локального рівня ПТКЗА ……..22
2.2 Опис програмно-технічних рішень супервізорного рівня ПТКЗА……28
2.3 Опис програмного забезпечення локального рівня ПТКЗА ……...30
2.4 Опис програмного забезпечення супервізорного рівня ПТКЗА ……42
Висновок до розділу 2……...46
РОЗДІЛ 3. АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ КІБЕРБЕЗПЕКИ ТА ЗАХИСТУ МЕРЕЖЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ……48
3.1 Сегментація та розшарування мережі ……..48
3.2 Пристрої захисту меж доменів та архітектура розшарування мережі …….49
3.3 Налаштування брандмауера ……..53
3.4 Керування віддаленим доступом, процеси аутентифікації та авторизації …...59
Висновок до розділу 3……...60
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ……..62
4.1 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації котельні ….63
4.2 Технічні рішення та організаційні заходи з гігієни праці і виробничої санітарії ……..69
4.3 Забезпечення пожежної безпеки котельні, що проектується……..70
4.4 Охорона та безпека в надзвичайних ситуаціях ……72
Висновок до розділу 4……...74
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК……..76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….78

АНОТАЦІЯ

Бондарчук Ю. М. Система автоматичного керування промисловим котлоагрегатом на основі алгоритмів протиаварійного захисту. – Рукопис.

Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено технологічний процес роботи промислового твердопаливного котла КВм-1,75 та розроблено комплексну систему його автоматичного керування локального (на базі ПЛК Siemens S7-300) та супервізорного (SCADA SIMATIC WinCC) рівнів. Запропоновано алгоритми автоматичного ПІ-регулювання теплового навантаження, розрідження в топці та вмісту кисню у відхідних газах, а також інтегровано підсистеми технологічного захисту й аварійного блокування. Виконано проектування архітектури кібербезпеки із застосуванням брандмауера Siemens SCALANCE S623 та створенням демілітаризованої зони (DMZ) для надійного захисту промислової мережі від зовнішніх втручань. Практичне значення полягає у можливості впровадження розробленого програмно-технічного комплексу для підвищення енергоефективності, екологічності, а також експлуатаційної та кібернетичної безпеки котельних установок.

Об’єкт дослідження – процес автоматичного керування промисловим твердопаливним котлоагрегатом та забезпечення його безпечної експлуатації.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та програмно-апаратні рішення для створення системи автоматизації, протиаварійного захисту та кібербезпеки теплотехнічного обладнання.

Мета роботи – розробка комплексної системи автоматичного керування промисловим водогрійним котлоагрегатом із застосуванням алгоритмів протиаварійного захисту та сучасних засобів кібербезпеки.

Методи дослідження – системний аналіз, математичне моделювання систем керування, програмування логічних контролерів, проектування людино-машинних інтерфейсів (SCADA), методи захисту інформації в індустріальних мережах.

Ключові слова: промисловий котлоагрегат, автоматична система керування, ПЛК, SCADA-система, алгоритми ПІ-регулювання, протиаварійний захист, кібербезпека, демілітаризована зона (DMZ), брандмауер.

ABSTRACT

Bondarchuk Yu. M. Automatic control system for an industrial boiler unit based on emergency protection algorithms. – Manuscript.

Qualification bachelor's thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadsky Tavrichesky National University, Kyiv, 2026.

In the bachelor's qualification work, the technological process of the industrial solid fuel boiler КВм-1.75 was investigated and a comprehensive system of its automatic control at the local (based on the Siemens S7-300 PLC) and supervisory (SCADA SIMATIC WinCC) levels was developed. Algorithms for automatic PI-regulation of the heat load, rarefaction in the furnace and oxygen content in the exhaust gases were proposed, and subsystems of technological protection and emergency blocking were also integrated. A cybersecurity architecture design was performed using the Siemens SCALANCE S623 firewall and the creation of a demilitarized zone (DMZ) for reliable protection of the industrial network from external interference. The practical significance lies in the possibility of implementing the developed software and hardware complex to increase energy efficiency, environmental friendliness, as well as operational and cyber security of boiler plants.

The object of research is the process of automatic control of an industrial solid fuel boiler unit and ensuring its safe operation.

The subject of research is methods, algorithms and software and hardware solutions for creating an automation system, emergency protection and cybersecurity of heat engineering equipment.

The purpose of the work is to develop a comprehensive automatic control system for an industrial water-heating boiler unit using emergency protection algorithms and modern cybersecurity tools.

Research methods are system analysis, mathematical modeling of control systems, programming of logic controllers, design of human-machine interfaces (SCADA), methods of information protection in industrial networks.

Keywords: industrial boiler unit, automatic control system, PLC, SCADA system, PI control algorithms, emergency protection, cybersecurity, demilitarized zone (DMZ), firewall.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСУ ТП – автоматична система управління технологічним процесом;

ТОУ – технологічний об’єкт управління;

РО – регулюючий орган;

ВМ – виконавчий механізм;

ФСА – функціональна схема автоматизації;

ПТКЗА – програмно-технічний комплекс засобів автоматизації;

ПК – персональний комп’ютер;

ПЛК – програмно-логічний контролер;

ПЗ – програмне забезпечення;

РСТ – робоча станція обробки текстової інформації;

HMI – Human Machine Interface;

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition;

TCP/IP – Transmission Control Protocol / Internet Protocol;

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор;

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

РАФХ – розширена амплітудно-фазова характеристика;

АП-2 – аперіодична ланка другого порядку;

РСК – розподілена система керування;

MGMT – Recovery Management Team;

FAC – Recovery Facilities Team;

TECH – Recovery Tech Support Team;

ВСТУП

На сьогоднішній день у сфері систем автоматизованого керування чітко простежуються дві взаємопов'язані ключові тенденції. Перша полягає у масовому переході засобів промислового управління на універсальні стандарти мережевого зв'язку, зокрема архітектуру Ethernet, що сприяє глибокій інтеграції технологічних процесів. Друга тенденція є прямим наслідком першої і характеризується стрімким розвитком та поширенням специфічного шкідливого програмного забезпечення, яке цілеспрямовано орієнтоване на атаки проти промислових систем керування (ПСК). З одного боку, впровадження сучасних інформаційних технологій (ІТ) в автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП) суттєво розширює їхній функціонал та операційну ефективність, піднімаючи загальний рівень автоматизації на якісно нову ступінь. Проте, з іншого боку, така технологічна конвергенція призвела до того, що промислові системи успадкували абсолютно всі вразливості та кіберзагрози, які традиційно притаманні класичним ІТ-інфраструктурам.

У міру безперервного розвитку та вдосконалення інформаційних технологій, сучасні промислові підприємства дедалі активніше впроваджують комплексні системи класу ERP (Enterprise Resource Planning). Ці програмні комплекси беруть на себе критично важливі функції загального планування та глобального управління виробничими ресурсами, формуючи розгалужену корпоративну мережу. Для забезпечення ефективної роботи така корпоративна інфраструктура постійно потребує отримання актуальних телеметричних даних безпосередньо від промислової мережі нижнього рівня, що об'єктивно створює серйозні вектори потенційних інформаційних загроз. Необхідно розуміти, що базова природа та характер мережевого трафіку в цих двох сегментах кардинально відрізняються. У той час як для корпоративної мережі є абсолютною нормою вільний доступ до глобальної мережі Інтернет, активне використання електронної пошти та надання широкого віддаленого доступу користувачам, для ізольованої мережі АСК ТП такі дії є категорично неприпустимими з міркувань кібербезпеки. Крім того, жорсткі регламенти контролю за заміною апаратного мережевого обладнання,

суворі процедури оновлення конфігурацій та внесення будь-яких змін до базового програмного забезпечення, які є життєво необхідними для промислового сегмента, часто ігноруються або виконуються неповною мірою в офісному корпоративному середовищі. Відповідно, якщо критично важливий промисловий мережевий трафік АСК ТП починає циркулювати в межах значно менш захищеної корпоративної мережі, виникає високий ризик його несанкціонованого перехоплення, деструктивної модифікації або проведення цілеспрямованої хакерської атаки.

Сама лише потенційна можливість будь-якого несанкціонованого доступу із зовнішнього неконтрольованого середовища до внутрішньої архітектури АСК ТП багаторазово підвищує ймовірність успішної кібератаки та зловмисного втручання в безперервний технологічний процес промислового підприємства. Наслідки такого незаконного втручання можуть мати катастрофічний характер, призводячи не лише до масштабних фінансових та матеріальних збитків, але й до непоправних людських втрат, а також до повної втрати довіри з боку клієнтів та критичного падіння ділової репутації компанії на глобальному ринку.

В якості безпосереднього об’єкта даного дослідження розглядається автоматизована система водогрійного котла, що працює на твердому паливі. Цей теплотехнічний агрегат класифікується як об’єкт підвищеної небезпеки, а тому об'єктивно вимагає впровадження виключно надійних інженерних рішень та забезпечення найвищого рівня експлуатаційної безпеки. Враховуючи сучасні вимоги до оптимізації виробництва, які передбачають обов'язкову наявність функцій дистанційного моніторингу, управління та постійного мережевого зв’язку з основною корпоративною IT-інфраструктурою компанії, питання проектування та практичної організації максимально захищеної від зовнішніх втручань системи керування даним котельним обладнанням набуває надзвичайної актуальності та наукової нагальності.

Важливість та пріоритетність вирішення даного завдання зумовлена тим, що у критичному випадку повної або часткової відмови систем автоматики котла, яка може бути спричинена як випадковим апаратним збоєм, так і спланованою кібератакою, можуть миттєво виникнути вкрай небезпечні аварійні ситуації. До

спектру таких критичних інцидентів належать недопустимий перегрів трубної системи, неконтрольоване загоряння залишків палива та накопиченої сажі в димоході, що в кінцевому підсумку здатне призвести до руйнівного теплового вибуху всієї котельної установки. Як наслідок, подібні техногенні аварії несуть за собою не лише тотальне фізичне пошкодження дороговартісного технологічного обладнання та тривалий економічно збитковий простій всього виробничого комплексу, але й створюють пряму, безпосередню загрозу для життя та здоров’я робочого персоналу, що обслуговує об'єкт.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТА ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

Ключові техніко-експлуатаційні параметри досліджуваного теплогенеруючого агрегату систематизовано та представлено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Базові специфікації та робочі показники котельної установки

Характеристика	Опис
Кількість контурів нагрівання	1
Номінальна теплопродуктивність (деревина, вологість 15%)	2 700 кВт
Номінальна теплопродуктивність (деревина, вологість 30%)	2 500 кВт
Номінальна теплопродуктивність (деревина, вологість 45%)	2 300 кВт
Номінальна теплопродуктивність (деревина, вологість 55%)	2 100 кВт
Тип робочого теплоносія	Вода
Максимально допустима температура теплоносія	109°C
Витрата теплоносія (протік)	86 $м^3$/год
Робочий тиск у системі	6 бар
Встановлена електрична потужність	47 кВт
Гарантовані показники викидів в атмосферу	
Вміст твердих частинок (пил)	150 mg/Nm^3 сухої 11% d`O_2
Оксид вуглецю (CO)	250 mg/Nm^3 сухої 11% d`O_2
Діоксид азоту (NO2)	500 mg/Nm^3 сухої 11% d`O_2
Леткі органічні сполуки (COV)	50 mg/Nm^3 сухої 11% d`O_2
Вимоги до паливної сировини	
Нижча теплота згоряння (PCI)	Від 4210 кВт·год/т (деревина 15% вологості) до 1930 кВт·год/т (деревина 55% вологості)
Допустимий діапазон вологості	Від 15% до 55%
Насипна щільність (густина)	Від 200 кг/$м^3$ (вологість 15%) до 400 кг/$м^3$ (вологість 55%)
Допустимий вміст дрібної фракції (пилу)	3% (<1 мм)
Система складування палива	Комплекс типу «живе дно»
Механізм транспортування до котла	Ланцюговий конвеєр

Вузол подачі в топкову камеру	Шнековий пристрій паливоподачі
Конструкція топкового пристрою	Механізована чавунна колосникова решітка
Система розподілу дуттьового повітря	Роздільна (первинний та вторинний потоки)
Конструкція теплообмінного апарату	Трубний теплообмінник двоходового типу
Вузол газоочищення	Батарейний циклон (мультициклон)
Механізм шлаковидалення з-під топки	Система вологого видалення золи з-під колосників до приймального бункера та шнекова вигрузка під мультициклоном
Тривалість циклу роботи «живого дна»	1/10 с

Конструктивно цей тепловий агрегат формується з комплексу взаємопов'язаних технологічних вузлів та функціональних блоків.

До основних елементів системи належать:

- безпосередньо корпус котла (який включає опорну базу з інтегрованими рухомими колосниками, топковий простір з теплообмінним апаратом, систему технологічних та ревізійних люків, а також мультициклон);
- механізм безперервної подачі паливної маси (реалізований на базі плунжера або шнека);
- група дуттьових вентиляторів;
- ексгаустер (димосос) для евакуації продуктів згоряння;
- комплекс автоматизованого шлаковидалення;
- гідравлічна обв'язка із запобіжними клапанами;
- сучасна система автоматизації з відповідними сенсорами (зокрема, з використанням кисневого зонда для тонкого налаштування горіння);
- а також спеціалізована система пневматичного очищення поверхонь нагріву.

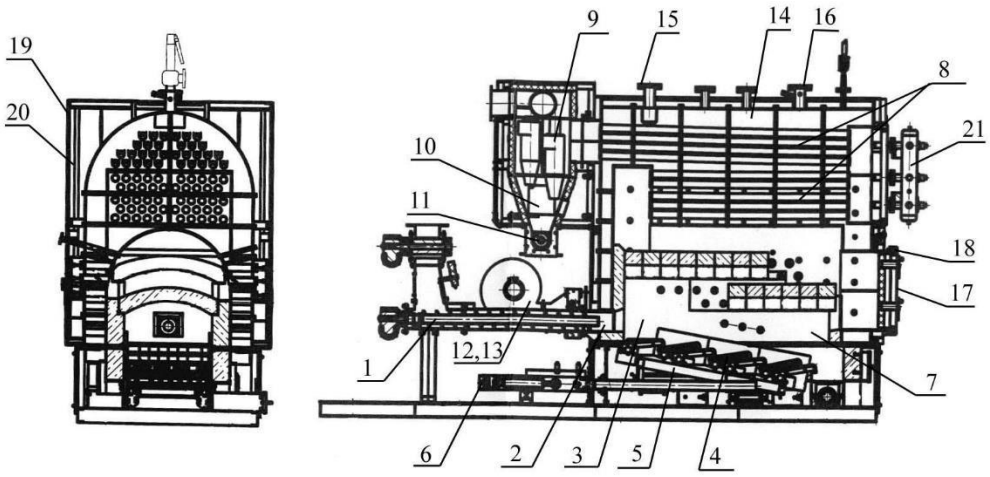
Процес функціонування установки розпочинається з транспортування паливної маси за допомогою гвинтового конвеєра (поз. 1) у спеціальний живильний тракт (поз. 2). Звідти сировина потрапляє безпосередньо до топкової камери (поз. 3), нижня частина якої облаштована чавунною колосниковою решіткою рухомого типу (поз. 4). Конструктивно полотно виконано таким чином,

що кожен другий ряд колосників жорстко закріплений на рухомій каретці (поз. 5), яка здійснює зворотно-поступальні рухи. Чергування статичних та динамічних рядів гарантує стабільне просування паливного шару вздовж усієї площини горіння. Привід рухомої рами забезпечується потужним гідроциліндром, що живиться від штатної маслостанції, при цьому крайні положення штока фіксуються відповідними електронними датчиками.

Потрапляючи у високотемпературне середовище топки, біомаса проходить кілька послідовних стадій термохімічної трансформації. На початковому етапі відбувається інтенсивне випаровування залишкової вологи під дією теплового випромінювання, що візуально супроводжується виділенням густого білого диму. Після повного зневоднення матеріалу ініціюється стадія піролізу, під час якої генерується значний об'єм летких горючих газів (слід зазначити, що деревина містить близько 70% таких летких речовин). Залишкова тверда вуглецева фракція продовжує своє горіння під час повільного просування до нижньої частини камери. На момент досягнення краю колосникової решітки процес оксидації повністю завершується, залишаючи лише мінеральний залишок у вигляді золи. Леткі ж фракції, що виділилися під час піролізу, згоряють у газоподібному стані. Це полум'яне горіння ініціюється безпосередньо над шаром твердого палива і продовжується в об'ємі першого газоходу (камери згоряння). Габарити цього простору спеціально розраховані для забезпечення достатнього часу перебування розпечених частинок у зоні активного полум'я до повного їх вигоряння.

Для підтримки оптимального режиму такого багатостадійного спалювання система подачі кисню має чітко розраховану архітектуру. Нагнітання первинного потоку повітря здійснюється у підколосниковий простір, розподіляючись по різних зонах, що відповідають конкретним етапам перетворення палива (підсушування, інтенсивне виділення піролізних газів, допалювання коксового залишку). У випадках, коли котельна установка проектується для утилізації сировини з високим вмістом вологи, вона додатково комплектується контуром попередньої підготовки: розігріті димові гази спрямовуються в нижню частину агрегату, де перемішуються з первинним повітрям безпосередньо перед його подачею під решітку. В інших модифікаціях застосовується зворотний підхід –

підмішування охолоджених газів до первинного дуття. Метою такого рішення є створення інтенсивного потоку, що ефективно охолоджує колосники, але при цьому не призводить до надлишку кисню в зоні поверхневого горіння.



Специфікація основних вузлів: 1 – механізм шнекової подачі; 2 – тракт завантаження паливної сировини; 3 – простір топки; 4 – набір чавунних колосників; 5 – рухома балка-каретка; 6 – привідний гідроциліндр; 7 – об'єм камери згоряння; 8 – пучок теплообмінних труб; 9 – блок мультициклону; 10 – накопичувальний зольний бункер; 11 – конвеєр видалення шлаку; 12 – нагнітач вторинного дуття; 13 – нагнітач первинного дуття; 14 – контур теплообміну; 15 – прямий патрубок тепломережі; 16 – зворотний патрубок; 17 – люки для ревізії та обслуговування; 18 – візуальний порт (вікно); 19 – зовнішня захисна обшивка; 20 – шар теплової ізоляції; 21 – комплекс пневматичного очищення; 22 – клапан скидання надлишкового тиску.

Рис. 1.1 – Структурно-компонувальна схема водогрійного агрегату КВм-1,75

Потік вторинного повітря інжектується через спеціальні канали, розташовані у верхній зоні котельного агрегату, безпосередньо перед входом до першого ряду жаротрубного пучка. Саме цей повітряний об'єм є критично важливим для забезпечення повноцінного допалювання газів піролізу. Отвори обладнані механічними рустовками, які дозволяють персоналу вручну коригувати прохідний переріз зовні агрегату; конструкція також допускає зміну їх кількості та просторової локалізації. Загальна кількість встановлених вентиляторів розраховується з огляду на необхідність забезпечення максимальної витрати дуття для виходу на пікову теплову потужність. При роботі на знижених режимах інтенсивність повітряного потоку пропорційно зменшується шляхом використання шиберних заслінок та частотно-регульованих приводів. Об'єм

подачі вторинного повітря динамічно коригується автоматикою залежно від цільового показника вільного кисню у відхідних газах.

Поділ процесу оксидації на кілька послідовних фаз є основою технології «ступеневого спалювання». Цей метод застосовується для максимізації теплового коефіцієнта корисної дії при одночасному радикальному зниженні емісії токсичних сполук. Оскільки активне горіння локалізується не лише на рівні колосникового полотна, загальна температура в цій нижній зоні утримується на безпечному рівні, що блокує механізм утворення термічних оксидів азоту. Недопалені компоненти з первинної зони остаточно вступають в реакцію на висоті введення вторинного дуття, де формується яскраве та стабільне полум'я, і де чадний газ повністю окислюється до вуглекислого газу.

З метою подальшої жорсткої мінімізації викидів NOx, низка моделей додатково оснащується системами рециркуляції димових газів. Це інженерне рішення особливо актуальне при спалюванні палива з екстремально низькою вологістю або сировини, багатої на азотисті сполуки. Відпрацьовані гази, пройшовши етап очищення, частково повертаються у топковий простір і розподіляються над колосниковою решіткою. Інжекція цієї суміші, збідненої на кисень, ефективно пригнічує процеси утворення шкідливих оксидів. Механіка руху палива забезпечується тим, що сировина, накопичена в живильному тракті, подається на решітку з жароміцного хромистого чавуну. Алгоритм роботи такий: під час прямого ходу гідроциліндра рухомі балки просуваються вперед, проштовхуючи шар палива по поверхні нерухомих елементів; при зворотному ході рухомі ряди ковзають назад під статичними, внаслідок чого паливна маса залишається на місці, змістившись на один крок вперед. Для промислових котлів з великою площею топки колосникове полотно поділяється на кілька незалежних секцій, кожна з яких має власний ізольований привід.

Внутрішні поверхні топкової камери (стінки та звід) надійно футеровані спеціальним жаростійким бетоном. Така масивна теплова ізоляція є необхідною умовою для підтримки високого температурного ядра, що гарантує стабільне протікання термохімічних реакцій без переривань. Необхідне аеродинамічне розрідження в об'ємі топки генерується за допомогою ексгаустера. В

автоматизованому режимі цей агрегат безперервно евакуює димові гази, підтримуючи заданий показник негативного тиску (як правило, на рівні 8 мм вод. ст.). Коригування продуктивності димососа здійснюється автоматикою шляхом зміни частоти обертання електродвигуна. Передбачена також можливість переходу на ручне керування, що зазвичай застосовується під час планових зупинок агрегату для інтенсивного розхолоджування топки перед сервісним очищенням.

Залежно від конфігурації установки, витрата повітря керується комбінованим способом: через зміну обертів вентиляторів та позиціонування засувок. Для лінії первинного дуття ці параметри визначають робочий діапазон потужності котла. Регулювання вторинного дуття тісно прив'язане до показників залишкового кисню, які безперервно фіксуються лямбда-зондом на виході з котла. Загальні принципи правильного налаштування зводяться до наступного: по-перше, необхідно гарантувати мінімально допустимий потік первинного повітря для захисту чавунних колосників від термічного руйнування; по-друге, розподіл повітря повинен чітко забезпечувати ступеневість горіння (надмірне первинне дуття переміщує зону горіння виключно на решітку і посилює винесення незгорілих частинок); по-третє, вторинне дуття має бути достатнім для точного коригування кисню. Весь цей процес вимагає регулярного візуального контролю через спеціальні оглядові порти: полум'я повинно формуватися у верхній частині камери, без появи ознак білого вогню (що свідчить про надлишок повітря знизу). Точне юстирування системи рекомендується проводити із застосуванням газоаналізаторів (контроль CO, CO_2 та O_2) після повного виходу котла на стабільний тепловий режим. При штатній зупинці котла або спрацюванні аварійного захисту автоматика негайно перекриває заслінки первинного повітря і відкриває вторинне дуття для інтенсивного провітрювання камери.

Подолавши трубний теплообмінний апарат, газовий потік спрямовується до мультициклону – пристрою для сухої очистки, який ефективно вловлює великі зольні включення, гарантовано знижуючи їх концентрацію на викиді до нормативних 150 мг/м^3. Принцип дії мультициклону базується на відцентрових силах: потік тангенціально заводиться у малі циклони, де набуває стрімкого

обертального руху. Важкі частинки відкидаються до стінок і осідають у нижній бункер, а очищений газ виводиться через центральні труби вгору. Критично важливою умовою працездатності цього вузла є стовідсоткова герметичність системи вивантаження. Зібрана зола через герметичні шлюзи скидається на шнековий конвеєр і транспортується назовні.

Сам теплогенеруючий агрегат виготовляється з міцної товстолистової сталі, масивно футерується вогнетривкими матеріалами та ретельно ізолюється мінераловатними плитами на основі базальту. Усі елементи конструкції інтегровані на загальній несучій рамі.

Комплексна автоматизована система забезпечення паливом спроектована для прийому, безтарного зберігання та порційного розподілу сипкої маси до витратних бункерів групи котельних установок, змонтованих в єдину лінію. Жорсткі технологічні вимоги до палива лімітують його геометричні фракції (не більше 8х8х40 мм) та максимальний показник сумарної вологості на рівні 10%.

До стандартної заводської комплектації обладнання лінійки CAT 019 «Силос» входять: каркасний бункер для накопичення палива об'ємом 100 м^3 (поз. 1); гвинтовий конвеєр (поз. 2); спеціальний дозатор-ворушитель (поз. 3); а також інтелектуальна система моніторингу рівня заповнення та диспетчеризації (поз. 4).

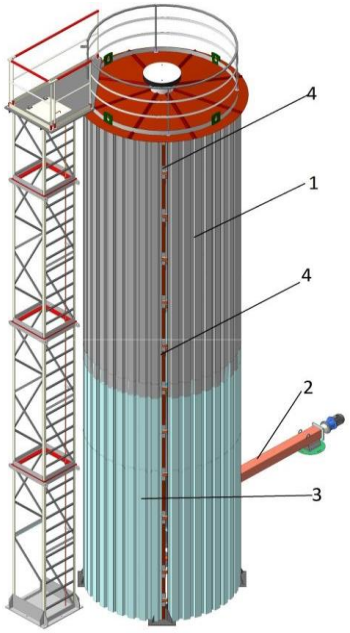


Рис. 1.2 – Загальний вигляд системи зберігання та подачі палива CAT 019

Дана інженерна конструкція постачається у вигляді стовідсотково готового

модульного виробу, повністю зібраного на заводському стапелі. Такий підхід радикально спрощує монтажні операції на об'єкті замовника та нівелює капітальні витрати на облаштування складних бетонних фундаментів. Завантаження головного силосу здійснюється повністю механізованим (за допомогою приймального лотка та ковшової норії) або пневматичним способом. З основного сховища біомаса транспортується через ворушитель за допомогою шнека безпосередньо до проміжного бункера агрегату. АСУТП котельні в режимі реального часу відстежує рівень заповнення, ініціює автоматичну зупинку ліній у разі виникнення позаштатних ситуацій, забезпечує світлозвукову індикацію та захищає приводні механізми від струмових перевантажень.

Алгоритм спалювання реалізується за описаною раніше класичною схемою: формування летких газів у процесі високотемпературного піролізу та подальше вигоряння вуглецевого залишку по мірі просування вниз по колосниковому полотну. Газова фаза згоряє у верхній частині камери та у першому конвективному газоході. Для забезпечення цього процесу окислювачем, первинне дуття подається під решітку (забезпечуючи етапи термічного розкладання), а вторинне інжектується через спеціальні вікна перед трубним пучком для остаточного допалювання. Управління інтенсивністю генерації тепла на часткових навантаженнях здійснюється за допомогою комплексу шиберів та частотних перетворювачів вентиляторів, строго орієнтуючись на показники вимірювання залишкового кисню. Впровадження методу «ступеневого горіння» дозволяє досягти найвищого ККД при мінімальній емісії забруднювачів, оскільки температурний режим на колосниках утримується в межах, що запобігають утворенню термічних NOx, а остаточна реакція окислення чадного газу відбувається в зоні вторинного дуття.

Окремо варто відзначити специфіку конструкції колосникового полотна, яка забезпечує режим роботи «без просипів». Це мінімізує експлуатаційні втрати тепла від механічного недопалу та суттєво полегшує обслуговування підколосникового простору. Чергування рухомих і нерухомих рядів, що синхронно приводяться в дію гідравлічним механізмом з кінцевими сенсорами, гарантує безперебійне просування палива.

При утилізації специфічних видів біомаси, таких як агропелета чи солома, виникає проблема надзвичайно агресивного впливу сполук хлору на поверхні нагріву (вміст хлору може сягати 0,97% в сухій масі). Для нейтралізації цієї хімічної корозії застосовується глибоке футерування камери високоглиноземистим бетоном (Al_2O_3). Крім того, зважаючи на високу схильність золи від соломи до плавлення при відносно низьких температурах (близько 700°C) та підвищений вміст азоту, розробниками імплементовано ряд превентивних інженерних рішень. Зокрема, інтенсивне повітряне охолодження елементів топкового зводу та самих колосників, а також масоване застосування системи рециркуляції димових газів, яка одночасно знижує емісію оксидів азоту та надійно запобігає шлакуванню грат.

Віддавши свій тепловий потенціал робочому теплоносію під час проходження через камеру допалювання та конвективний двоходовий пучок, відпрацьовані димові гази транспортуються до мультициклону. Використання надміцних литих деталей у корпусах циклонів гарантує тривалий ресурс роботи обладнання навіть в умовах максимального абразивного зносу, забезпечуючи ступінь очищення від твердих суспензій не нижче 97%. Вловлена відцентровим способом зола акумулюється в накопичувальному бункері і за допомогою шнека скидається у загальний контур шлаковидалення, після чого очищені гази викидаються в атмосферу.

Високотехнологічний комплекс завершується інтегрованою системою пневматичного очищення жарових труб. Цей модуль зводить до мінімуму необхідність ручного втручання персоналу в роботу котла і підтримує стабільно високий коефіцієнт теплопередачі. Увесь пил, вибитий під час роботи пневмоочистки, також перехоплюється мультициклоном і автоматично вивантажується у зольні контейнери. Завдяки модульному концепту та попередньому заводському монтажу на єдиній платформі, весь цей складний теплотехнічний комплекс інсталюється на об'єкті без необхідності масштабних будівельних робіт та заливання складних фундаментів.

Висновок до розділу 1

У першому розділі було проведено детальний аналітичний огляд об'єкта

управління, яким є промисловий водогрійний котел на твердому паливі, що класифікується як об'єкт підвищеної небезпеки. Основним видом палива для нього слугує деревина з вологістю від 15% до 55%. Даний теплотехнічний агрегат характеризується номінальною теплопродуктивністю до 2700 кВт, робочим тиском у системі на рівні 6 бар та використовує воду як робочий теплоносій із максимально допустимою температурою 109°С.

Особлива увага в розділі приділяється технологічному процесу роботи котлоагрегату, що базується на технології «ступеневого спалювання». Цей метод застосовується для максимізації теплового коефіцієнта корисної дії при одночасному радикальному зниженні емісії токсичних сполук, зокрема термічних оксидів азоту. Процес функціонування установки включає автоматизовану подачу паливної маси шнековим механізмом із комплексної системи САТ 019 «Силос», багатостадійну термохімічну трансформацію палива на рухомій чавунній колосниковій решітці (сушка, піроліз, горіння вуглистих залишків), а також чітко розраховану систему роздільного нагнітання первинного та вторинного дуттьового повітря.

Для дотримання жорстких екологічних норм та забезпечення довговічності обладнання конструкція котла передбачає використання спеціальних систем очищення та апаратного захисту. Відпрацьовані димові гази проходять через мультициклон, який забезпечує ефективне вловлювання твердих суспензій зі ступенем очищення не нижче 97%. Разом з цим, для нейтралізації агресивного впливу хімічної корозії та запобігання шлакуванню колосникових грат застосовується глибоке футерування топкової камери жаростійким бетоном та впроваджена технологія рециркуляції димових газів.

Важливим аспектом дослідження є аналіз вразливостей сучасних автоматизованих систем. Масовий перехід засобів промислового управління на стандарти мережевого зв'язку типу Ethernet та інтеграція ізольованих мереж АСК ТП із глобальними корпоративними ERP-системами суттєво розширюють їхній функціонал, проте роблять промислові об'єкти мішенню для специфічних кіберзагроз. Потенційна можливість несанкціонованого зовнішнього доступу багаторазово підвищує ризик цілеспрямованих хакерських атак. Оскільки будь-

яка відмова систем автоматики або зловмисне кібервтручання може призвести до катастрофічних аварійних ситуацій, таких як недопустимий перегрів труб, загоряння сажі в димоході або навіть руйнівний вибух котельної установки, виникає беззаперечна і нагальна необхідність розробки надійної системи автоматичного керування котлоагрегатом, що базується на стійких алгоритмах протиаварійного захисту.

РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЛОКАЛЬНОГО ТА СУПЕРВІЗОРНОГО РІВНІВ УПРАВЛІННЯ

2.1 Характеристика апаратних та програмних засобів локального рівня ПТКЗА

Фундаментальною складовою базового (нижнього) рівня автоматизації виступає програмований логічний контролер (ПЛК) серії Siemens S7-300. Інформація від первинних перетворювачів (давачів), а також сигнали зворотного зв'язку від електричних виконавчих механізмів та приводів надходять до обчислювального ядра через спеціалізовані модулі аналогового та дискретного вводу, зокрема Siemens SM331, а також з використанням інтегрованих вхідних каналів самого контролера. Зворотній процес – формування та передача керуючих впливів на частотні перетворювачі та приводи механізмів – реалізується за допомогою модулів виводу (наприклад, SM334) та вбудованих вихідних інтерфейсів ПЛК. Детальна специфікація всіх вхідних інформаційних сигналів та вихідних керуючих команд, що обробляються на локальному рівні управління, наведена у таблицях 2.1 та 2.2 відповідно.

Таблиця 2.1

Перелік та характеристики вхідних сигналів системи

Найменування параметра	Робочий діапазон вимірювання	Клас точності	Формат та тип сигналу	Функціональне призначення
Температурний показник води на виході з котлоагрегата	0-200°C	0,5	Аналоговий струмовий, 4-20 мА	Моніторинг та автоматичне регулювання
Температурний показник води у зворотному трубопроводі (на вході)	0-200°C	0,5	Аналоговий струмовий, 4-20 мА	Тільки моніторинг
Температурний режим у зоні спалювання летких речовин	0-600°C	0,5	Аналоговий струмовий, 4-20 мА	Тільки моніторинг
Температурний режим у зоні розташування колосникової решітки (t2)	0-1250°C	0,5	Аналоговий струмовий, 4-20 мА	Тільки моніторинг
Температура відхідних димових газів	0-200°C	0,5	Аналоговий струмовий, 4-20 мА	Тільки моніторинг
Дублюючий контроль	0-200°C	0,5	Аналоговий	Тільки

температури на виході з котла			струмовий, 4-20 мА	моніторинг
Гідравлічний тиск води в подаючому трубопроводі (на виході)	0-1 МПа	0,5	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Тільки моніторинг
Гідравлічний тиск води у зворотному трубопроводі (на вході)	0-1 МПа	0,5	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Тільки моніторинг
Показник розрідження в топковому просторі	0-100 Па	0,5	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Моніторинг та автоматичне регулювання
Концентрація залишкового кисню (O_2) у сухих відхідних газах	0-21%	0,5	Аналоговий струмовий, 4-20 мА	Моніторинг та автоматичне регулювання
Ступінь відкриття виконавчого механізму (ВМ) клапана подачі вторинного дуття	0-100%	±0.5%	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Тільки моніторинг
Ступінь відкриття виконавчого механізму (ВМ) клапана подачі первинного дуття	0-100%	±0.5%	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Тільки моніторинг
Зворотний сигнал від частотного перетворювача (привід дуттьового вентилятора)	0-100%	±0.5%	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Тільки моніторинг
Зворотний сигнал від частотного перетворювача (привід механізму паливоподачі)	0-100%	±0.5%	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Тільки моніторинг
Статус функціонування вентилятора подачі вторинного повітря	1 (вкл/викл)	-	Дискретний (сухий контакт), 0/24 В	Моніторинг та апаратне блокування (при зупинці)
Статус функціонування ексгаустера (димососа)	1 (вкл/викл)	-	Дискретний (сухий контакт), 0/24 В	Моніторинг та апаратне блокування (при зупинці)

Таблиця 2.2 – Перелік та характеристики вихідних керуючих сигналів

Об'єкт управління (регулюючий вплив)	Клас точності	Формат та тип сигналу	Функціональне призначення
Сигнал завдання на частотний перетворювач механізму подачі палива	0,5	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Автоматичне регулювання
Сигнал завдання на частотний перетворювач електродвигуна димососа	0,5	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Автоматичне регулювання
Команда на зміну ступеня відкриття повітряної заслінки первинного дуття	0,5	Аналоговий сигнал напруги, 0-10 В	Автоматичне регулювання
Команда запуску/зупинки на частотний перетворювач вентилятора первинного дуття	0,5	Дискретний керуючий сигнал, 0/24 В	Автоматичне регулювання
Команда запуску/зупинки на частотний перетворювач вентилятора вторинного дуття	0,5	Дискретний керуючий сигнал, 0/24 В	Автоматичне регулювання
Команда на зміну ступеня відкриття повітряної заслінки вторинного дуття	0,5	Аналоговий струмовий сигнал, 4-20 мА	Автоматичне регулювання
Керування станом вентилятора подачі вторинного повітря (ввімкнути/вимкнути)	-	Дискретний керуючий сигнал, 0/24 В	Автоматичне регулювання
Керування станом димососа (ввімкнути/вимкнути)	-	Дискретний керуючий сигнал, 0/24 В	Автоматичне регулювання

2.1.1 Алгоритм розробки прикладного програмного забезпечення ПЛК

Розробка та налагодження керуючого програмного забезпечення для обраного програмованого логічного контролера реалізується за допомогою потужного інтегрованого інженерного середовища SIMATIC STEP 7 версії V15, що входить до складу платформи TIA Portal. Безпосередній процес програмування ПЛК розпочинається з ініціалізації програмного комплексу на робочій станції інженера та створення нового проектного файлу. Для цього розробник використовує системне меню «Create new project», де передбачена можливість як ручного введення унікальної назви створюваного проекту, так і використання стандартного найменування, яке автоматично генерується системою за замовчуванням.

Наступним важливим етапом є формування апаратної конфігурації системи

управління. Здійснивши перехід до режиму глобального перегляду проекту, в ієрархічному навігаційному дереві «Devices» інженер активує розділ налаштування обладнання та комунікаційних мереж – «Project Devices & networks». Саме тут, використовуючи вкладку електронного апаратного каталогу («Hardware catalog» із переходом до підменю «Catalog»), фахівець виконує точний підбір необхідної моделі центрального процесорного модуля ПЛК. Після цього до базового контролера послідовно додаються всі необхідні периферійні модулі розширення (зокрема модулі вводу-виводу аналогових та дискретних сигналів), жорстко дотримуючись розробленої раніше технічної специфікації проекту.

Після успішного завершення процедури апаратного конфігурування та збереження налаштувань, розробник переходить безпосередньо до формування логічної структури програмного коду. Шляхом виклику команди «Add new block» з навігаційного меню «Program blocks» ініціюється створення головного організаційного блоку, який слугуватиме основою для циклічного виконання програми мікропроцесором. У діалоговому вікні, що з'являється, користувач має обов'язково визначити цільову мову програмування, обравши одну з тих, що суворо регламентовані міжнародним стандартом IEC 61131-3 (наприклад, графічні або текстові мови типу LAD, FBD, SCL чи STL). Відповідно до зробленого вибору, інженерне середовище активує спеціалізований редактор коду, в якому фахівець детально прописує всі необхідні алгоритми автоматичного регулювання, технологічних блокувань та загального керування об'єктом.

Фінальною стадією процесу розробки є компіляція написаного коду та його фізичне завантаження у внутрішню пам'ять контролера. Ця операція виконується за допомогою вбудованої функції «Download to device», яка вимагає від розробника попереднього вказування типу використовуваного комунікаційного інтерфейсу та ідентифікації контролера в промисловій мережі (наприклад, за його унікальною IP-адресою). Після успішного встановлення зв'язку з апаратним забезпеченням, процедура прошивки остаточно завершується натисканням віртуальної клавіші «Load», що переводить ПЛК у стан готовності до виконання завантажених технологічних алгоритмів керування котлоагрегатом.

2.1.2 Алгоритми функціонування локальних контурів автоматичного регулювання

Програмно-технічний комплекс нижнього (польового) рівня забезпечує виконання ряду критично важливих функцій автоматичного регулювання безперервного технологічного процесу. Одним із ключових завдань є стабілізація та комплексне управління тепловим навантаженням котельної установки. Для отримання достовірної інформації про поточний температурний стан теплоносія використовується високоточний первинний перетворювач температури моделі Symaro-T QAE3075.010. Цей промисловий датчик генерує уніфікований струмовий сигнал у стандартному діапазоні від 4 до 20 мА, який фізично надходить на відповідний канал аналогового вводу програмованого логічного контролера. У програмному середовищі обчислювального пристрою математично реалізована класична одноконтурна система автоматичного керування, базовим елементом якої виступає пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор. Після обчислення необхідного керуючого впливу контролер через внутрішню комунікаційну шину передає цифрові дані на спеціалізований модуль розширення SM1234. Даний модуль здійснює цифро-аналогове перетворення та формує вихідний струмовий сигнал номіналом 4-20 мА, що безпосередньо керує частотним перетворювачем серії ATV-900. Плавна зміна частоти обертання підключеного дуттьового вентилятора дозволяє системі опосередковано впливати на інтенсивність подачі та загальну витрату паливної маси, тим самим надійно підтримуючи необхідний температурний графік агрегату.

Не менш важливою функцією локальної автоматики є безперервне підтримання оптимального аеродинамічного розрідження в просторі топки котла, що є абсолютною запорукою безпечного та енергоефективного спалювання твердого палива. Фактичне значення цього технологічного параметра, тобто величина негативного тиску в камері згоряння, вимірюється за допомогою спеціалізованого мембранного датчика тиску-розрідження типу Symaro QBM65-1. На своєму виході цей прилад формує уніфікований сигнал напруги постійного струму в межах 0-10 В. Отримана аналогова величина зчитується відповідним вхідним каналом модуля аналогового вводу-виводу SM1234 і миттєво передається

до центрального процесора ПЛК для подальшої обробки. Аналогічно до попереднього контуру, програмна ліквідація неузгодженості базується на використанні типової одноконтурної архітектури з імплементованим ПІ-законом регулювання. На основі розрахованої динамічної похибки контролер безперервно генерує вихідний аналоговий струмовий сигнал (4-20 мА). Цей керуючий вплив цілеспрямовано спрямовується на локальний частотний перетворювач ATV900, який здійснює точне регулювання швидкості обертання потужного електродвигуна ексгаустера (димососа). Відповідна зміна продуктивності витяжного агрегату дозволяє оперативно компенсувати будь-які зовнішні чи внутрішні збурення та стабілізувати тягу в топці на чітко заданому номінальному рівні.

Третім фундаментальним завданням, яке успішно вирішується програмно-апаратними засобами нижнього рівня управління, є еколого-економічна оптимізація процесу горіння шляхом прецизійного регулювання залишкового вмісту вільного кисню у відхідних димових газах. Безперервний хімічний моніторинг концентрації O_2 здійснюється за допомогою надійного промислового газоаналізатора марки Siemens OXYMAT6. Цей аналітичний прилад характеризується високою точністю вимірювань і видає пропорційний уніфікований струмовий сигнал в індустріальному стандарті 4-20 мА. Цей сигнал інтегрується в загальну систему управління через аналоговий вхід вже згаданого модуля SM1234. Застосовуючи класичну одноконтурну схему керування з оптимально налаштованим ПІ-регулятором, обчислювальне ядро контролера постійно порівнює фактичну концентрацію кисню в димоході із заданою технологічною картою (уставкою). Результат математичних обчислень конвертується контролером в аналоговий керуючий сигнал струмового типу (4-20 мА), який передається безпосередньо на електричний привід позиціонування моделі ANT3-11.11. Цей інтелектуальний виконавчий механізм безступенево змінює просторове положення регулюючої повітряної заслінки, відповідно збільшуючи або зменшуючи масову витрату свіжого повітря, що подається в зону горіння. Такий алгоритм гарантує досягнення максимального теплового коефіцієнта корисної дії котельної установки при одночасному забезпеченні

мінімально можливої емісії шкідливих домішок в атмосферу.

2.1.3 Організація ручного (дистанційного) керування обладнанням

На додаток до автоматичних режимів роботи, система передбачає можливість прямого ручного втручання оперативного персоналу. Ця функція реалізована через людино-машинний інтерфейс (HMI) – сенсорну операторську панель Siemens TP900 Comfort. З її допомогою оператор має змогу перевести окремі контури в ручний режим та безпосередньо задавати відсоток відкриття повітряних заслінок або встановлювати бажану частоту обертання для двигунів, підключених до частотних перетворювачів, ігноруючи при цьому виходи автоматичних ПІ-регуляторів.

2.2 Опис програмно-технічних рішень супервізорного рівня ПТКЗА

Верхній, або супервізорний, рівень розроблюваної автоматизованої системи керування базується на використанні сучасної SCADA-системи. У контексті даної кваліфікаційної роботи ключове призначення цього програмного комплексу полягає у наданні оператору зручного та інтуїтивно зрозумілого людино-машинного інтерфейсу. Розроблена система забезпечує наочне графічне відображення розгорнутих мнемосхем усього технологічного процесу горіння, а також здійснює динамічну візуалізацію поточних значень критично важливих технологічних параметрів у режимі реального часу. Крім того, на цей рівень покладено життєво необхідні функції безперервної реєстрації фактів спрацювання попереджувальної та аварійної технологічної сигналізації, ведення архівів та забезпечення надійного, безперебійного двостороннього інформаційного обміну даними з базовим програмованим логічним контролером.

Як базове середовище для проектування та повноцінної розробки зазначеної диспетчерської системи було обрано потужний спеціалізований інструментарій від компанії Siemens – програмний пакет WinCC. Багатофункціональний програмний комплекс SIMATIC Windows Control Center надає розробнику та кінцевому користувачеві абсолютно всі необхідні програмні інструменти для ефективного та безпечного керування складними промисловими процесами.

Зазначене програмне середовище володіє розширеним функціоналом, який дозволяє автоматизовано генерувати детальні аналітичні звіти, здійснювати високоточну реєстрацію динаміки зміни вимірюваних фізичних величин, а також надійно фіксувати та каталогізувати архівні дані для подальшого ретроспективного аналізу. Важливою складовою є вбудована підсистема адміністрування, яка гарантує гнучке управління обліковими записами оперативного персоналу та суворе розмежування прав їхнього доступу до керування агрегатом. Робоче середовище WinCC здатне підтримувати безперервний контроль якості ведення технологічного режиму, що на практиці означає постійний моніторинг, відстеження та детальне протоколювання будь-яких втручань, модифікацій параметрів чи системних подій.

Окремої уваги заслуговує той факт, що SIMATIC WinCC включає надзвичайно багату вбудовану бібліотеку готових графічних символів, потужні алгоритми для швидкої обробки великих масивів телеметричних даних, а також зручний графічний модуль, побудований за принципами об'єктно-орієнтованого програмування з можливістю глибокого індивідуального налаштування кожного візуального компонента. Додатковою перевагою комплексу є передбачена розробниками можливість оперативного коригування конфігурації та внесення нових системних змінних безпосередньо в працюючий проект у режимі реального часу, що супроводжується ідеальною сумісністю та безшовною інформаційною взаємодією з програмним пакетом програмування контролерів SIMATIC Step 7. Архітектура даного програмного забезпечення пропонує інженеру цілий спектр унікальних вбудованих редакторів та підсистем, які застосовуються для детального проектування. Серед базових системних модулів варто обов'язково виділити WinCC Graphics Designer, який виконує роль надзвичайно потужного графічного редактора для створення інтерактивних технологічних кадрів, мнемосхем та складних діалогових вікон оператора. Для надійної конфігурації та управління підсистемою тривалого архівування історичних трендів і технологічних змінних задіюється інструментарій WinCC Tag Logging, тоді як за безперервне формування, категоризацію та логіювання всіх системних сповіщень, включаючи інформаційні, оперативні та критично аварійні повідомлення,

відповідає спеціалізований модуль WinCC Alarm Logging.

Структурно розроблена SCADA-програма конструюється з комплексу взаємопов'язаних діалогових екранів, кожен з яких оснащений інтуїтивними інструментами навігації, панелями цифрової та графічної індикації, а також засобами архівування ключових показників поточного технологічного процесу. Центральним елементом диспетчерського інтерфейсу є головне вікно загальної мнемосхеми котлоагрегату. Цей базовий екран містить комплексну схематичну візуалізацію всього технологічного об'єкта управління в цілому, виводить зведену інформацію про поточні значення основних величин та забезпечує миттєве відстеження спрацювання будь-яких аварійних блокувань. З цього вікна оператор має можливість за допомогою інтерактивних елементів швидкого доступу переходити до деталізованих екранів управління кожним з локальних контурів окремо. Наступним важливим інтерфейсним компонентом є вікно мнемосхеми контуру регулювання загального теплового навантаження котельної установки. Цей розділ обов'язково включає область відображення динамічних графіків (трендів) розвитку процесу в часі, панель для ручного або автоматичного введення значень технологічних уставок, а також елементи для тонкого налаштування коефіцієнтів регулятора та візуалізації сформованого керуючого впливу на виконавчі механізми. Абсолютно аналогічну логічну структуру має вікно мнемосхеми системи автоматичного регулювання вмісту вільного кисню у відхідних газах, де оперативний персонал отримує повний доступ до інструментарію моніторингу кисневих трендів, коригування параметрів регулювання процесу подачі дуття та контролю за процесом. Завершує архітектуру операторського інтерфейсу спеціалізоване вікно мнемосхеми підтримання розрідження в топковому просторі, яке подібно до інших керованих контурів забезпечує диспетчера необхідним функціоналом для спостереження за графіками зміни тиску, налаштування ПІ-регулятора тяги та безпосереднього контролю за роботою димососа.

2.3 Опис програмного забезпечення локального рівня ПТКЗА

Розробка та комплексне налаштування прикладного програмного

забезпечення для нижнього (локального) рівня системи автоматизації здійснювалися у спеціалізованому високотехнологічному середовищі TIA Portal V15. Цей сучасний інструментарій дозволяє в рамках єдиного проекту інтегрувати як керуючу логіку для програмованого контролера, так і графічний інтерфейс для операторської HMI-панелі. Загальна архітектура створеної програми складається з ієрархічно впорядкованої сукупності програмних блоків, повний перелік яких наочно відображено на відповідному рисунку нижче.

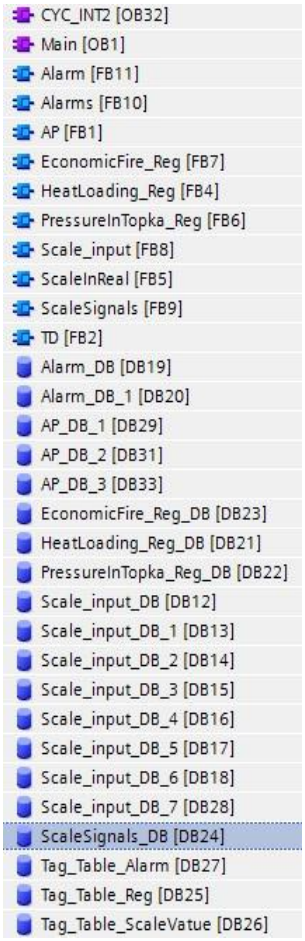


Рис. 2.1 – Структурна організація програмних блоків у середовищі розробки

Основою для циклічного виконання алгоритмів є спеціалізований організаційний блок (який у просторі імен проекту фігурує як CYC_INT2 або CYC_INT5). Його головне функціональне призначення полягає у своєчасній ініціалізації та послідовному циклічному запуску всіх ключових підпрограм, до яких належать модулі обробки тривог (Alarms), масштабування сигналів (ScaleSignals), а також складні контури технологічного регулювання

(EconomicFire_Reg, HeatLoading_Reg, PressureInTopka_Reg). Внутрішня алгоритмічна будова цього організаційного блоку детально проілюстрована на наступних схемах.

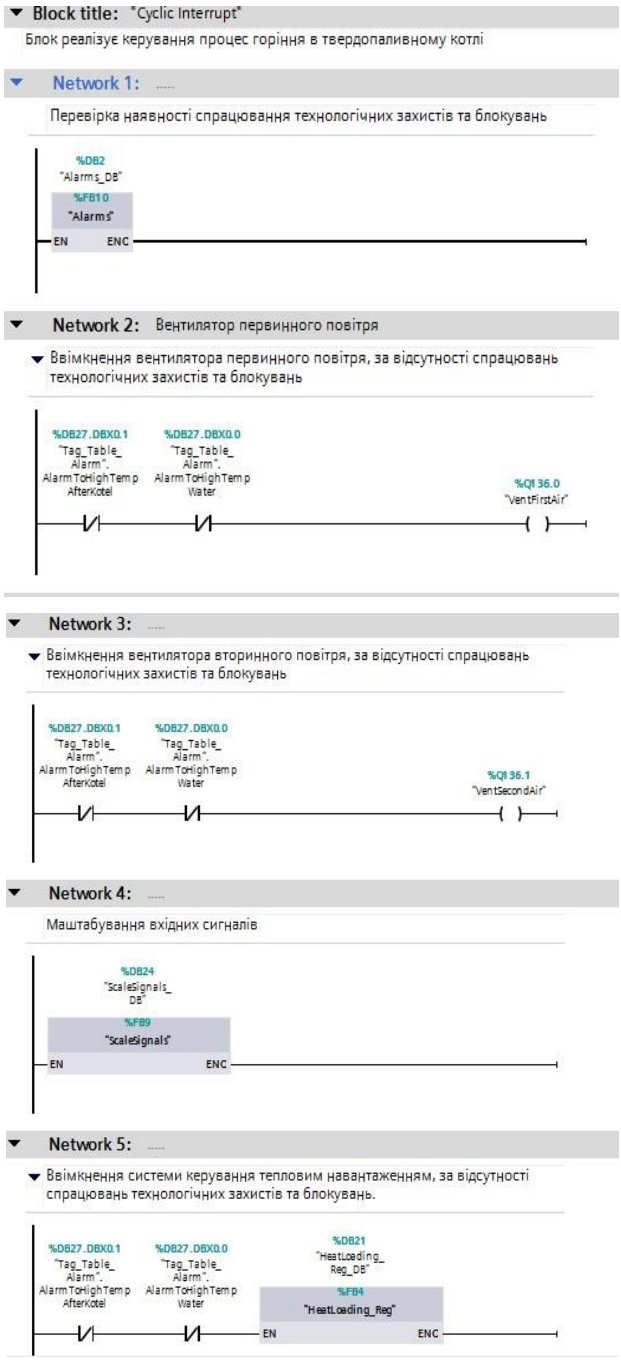


Рис. 2.2 – Алгоритмічна структура організаційного блоку циклічного переривання

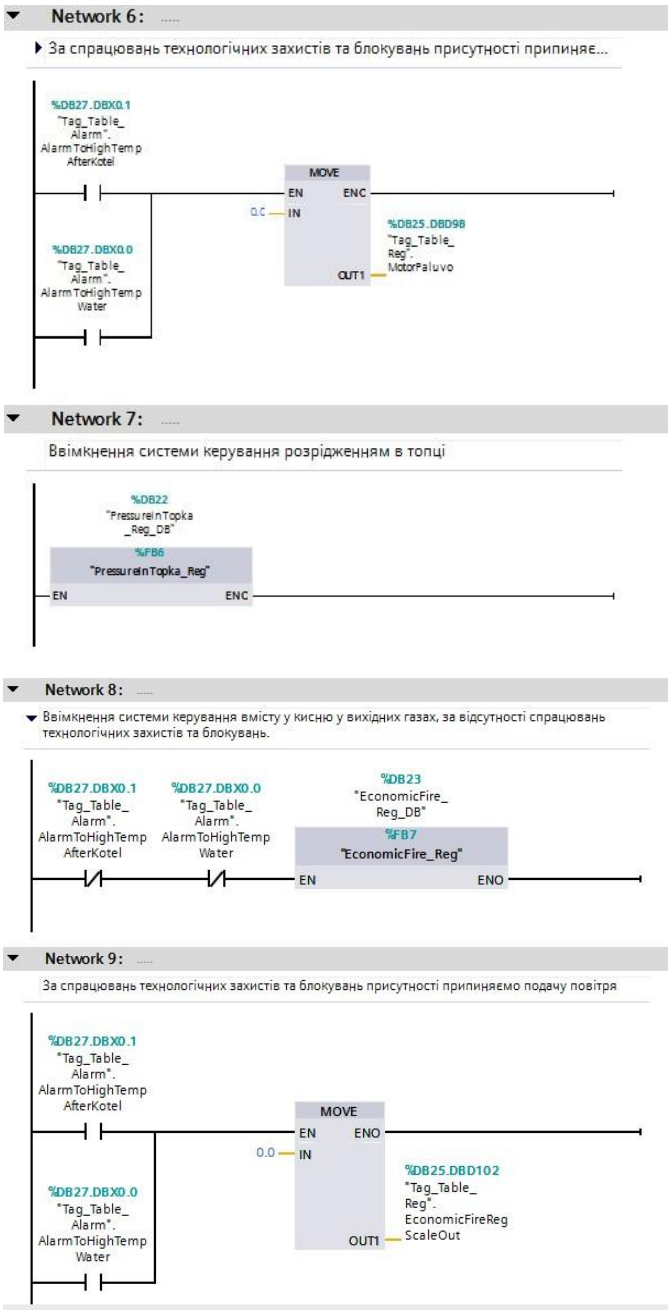


Рис. 2.3 – Завершення структури організаційного блоку

Безпосередня математична та логічна реалізація контурів автоматичного керування зосереджена у функціональних блоках EconomicFire_Reg, HeatLoading_Reg та PressureInTopka_Reg. Вони відповідають за стабілізацію концентрації залишкового кисню у відхідних газах, підтримання заданого теплового навантаження агрегату та точне регулювання аеродинамічного розрідження в топковому просторі відповідно. Для забезпечення коректного обміну даними між цими незалежними контурами застосовується спеціально виділена база глобальних змінних, що жорстко задекларована в таблиці

Tag_Table_Reg. Критично важливою умовою, що закладена в загальну логіку безпеки, є те, що модулі EconomicFire_Reg та HeatLoading_Reg отримують програмний дозвіл на виконання своїх обчислень виключно за умови повної відсутності активних технологічних блокувань чи спрацьованих систем захисту.

Tag_Table_Reg

	Name	Data ...	Offset	Start value	Reta..	Visi...	...	Comment
1	Static							
2	SetPointHeatLoding	Real	0.0	0.0				Уставка температури в контурі керування теплового навантаження
3	ManualValueHeatLoding	Real	4.0	0.0				Вплив ручного керування в контурі керування теплового навантаження
4	ManualModeHeatLoding	Bool	8.0	false				Ввімкнення ручного режиму в контурі керування теплового навантаження
5	TemperatureHotWaterReg	Real	10.0	0.0				температура гарячої води в контурі керування теплового навантаження
6	SetPointPressureInTopka	Real	14.0	0.0				Уставка тиску в контурі керування розрідження в топці
7	ManualValuePressureInTopka	Real	18.0	0.0				Вплив ручного керування в контурі керування розрідження в топці
8	ManualModePressureInTopka	Bool	22.0	false				Ввімкнення ручного режиму в контурі керування розрідження в топці
9	PressureInTopkaReg	Real	24.0	0.0				Розрідження в топці в контурі керування розрідження в топці
10	KpHeatLoading	Real	28.0	1.34				Налаштування регулятора Kp в контурі керування розрідження в топці
11	KpPressureInTopka	Real	32.0	4.79				Налаштування регулятора Kp в контурі керування розрідження в топці
12	TIKpPressureInTopka	Time	36.0	T#15s				Налаштування регулятора Ti в контурі керування розрідження в топці
13	TdKpPressureInTopka	Time	40.0	T#0ms				Налаштування регулятора Td в контурі керування розрідження в топці
14	TiHeatLoading	Time	44.0	T#120s				Налаштування регулятора Ti в контурі теплового навантаження
15	TdHeatLoading	Time	48.0	T#0ms				Налаштування регулятора Td в контурі теплового навантаження
16	SetPointEconomicFire	Real	52.0	0.0				Уставка вмісту O2 в контурі керування вмісту кисню у вихідних газах
17	ManualValueEconomicFire	Real	56.0	0.0				Вплив ручного керування в контурі керуванняvмісту кисню у вихідних газах
18	O2InFuelGases	Real	60.0	0.0				Розрідження в топці
19	KpEconomicFire	Real	64.0	3.48				Налаштування регулятора Kp в контурі керування вмісту кисню у вихідних га...
20	ManualModeEconomicFire	Bool	68.0	false				Ввімкнення ручного режиму в контурі керуванняvмісту кисню у вихідних газ...
21	TiEconomicFire	Time	70.0	T#27s				Налаштування регулятора Ti в контурі керування вмісту кисню у вихідних газ...
22	TdEconomicFire	Time	74.0	T#0ms				Налаштування регулятора Td в контурі керування вмісту кисню у вихідних га...
23	MotorDutev	Real	78.0	0.0				Сигнал на частотний перетворювач дутєвого вентилятора
24	Zaslink2	Real	82.0	0.0				Заслінка вторинного повітря 2
25	Zaslink3	Real	86.0	0.0				Заслінка вторинного повітря 3
26	ZaslinkaFirst	Real	90.0	0.0				Заслінка первинного повітря
27	Zaslink1	Real	94.0	0.0				Заслінка вторинного повітря 1
28	MotorPaluvo	Real	98.0	0.0				Сигнал на частотний перетворювач подачі палива
29	EconomicFireRegScaleOut	Real	102.0	0.0				Вихід регулятора в контурі керування економічності горіння

Рис. 2.4 – Таблиця глобальних змінних підсистеми автоматичного регулювання



Рис. 2.5 – Логіка функціонування керуючого блоку EconomicFire_Reg

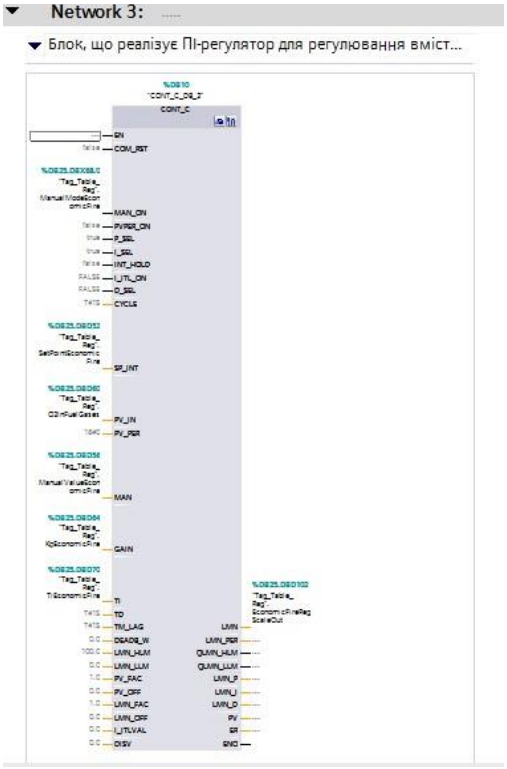


Рис. 2.6 – Продовження алгоритму роботи блоку EconomicFire_Reg

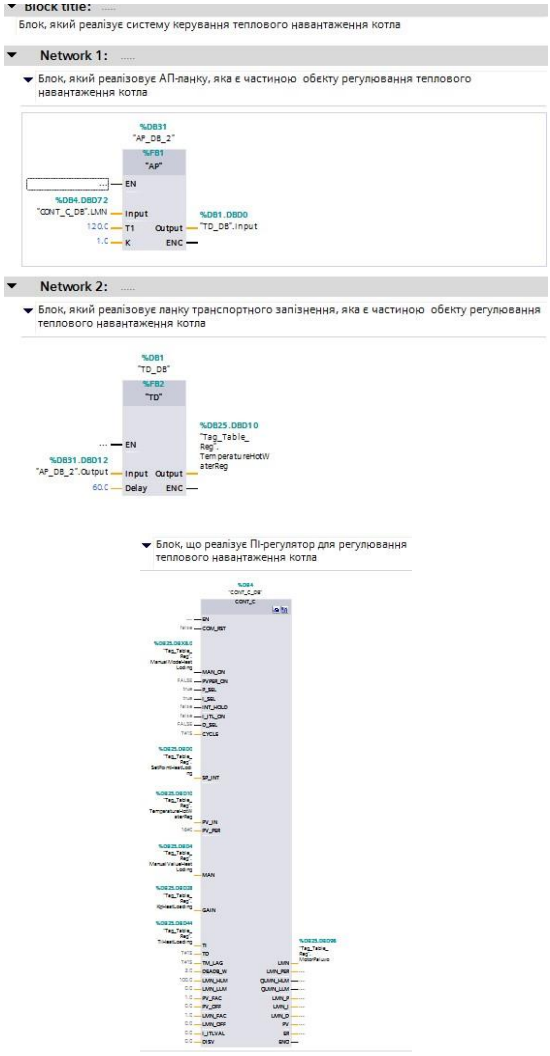


Рис. 2.7 – Програмна реалізація контуру керування HeatLoading_Reg



Рис. 2.8 – Завершення структури блоку HeatLoading_Reg

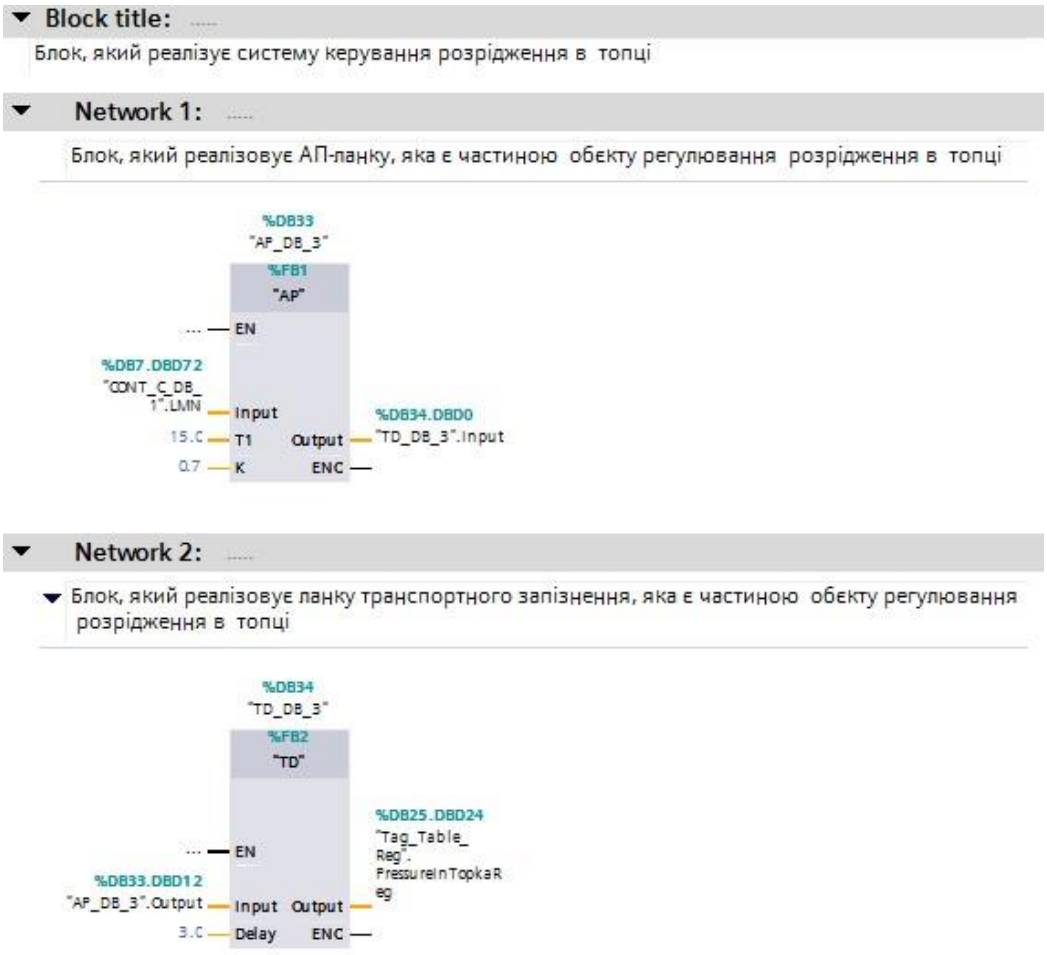


Рис. 2.9 – Алгоритмічна побудова модуля PressureInTopka_Reg

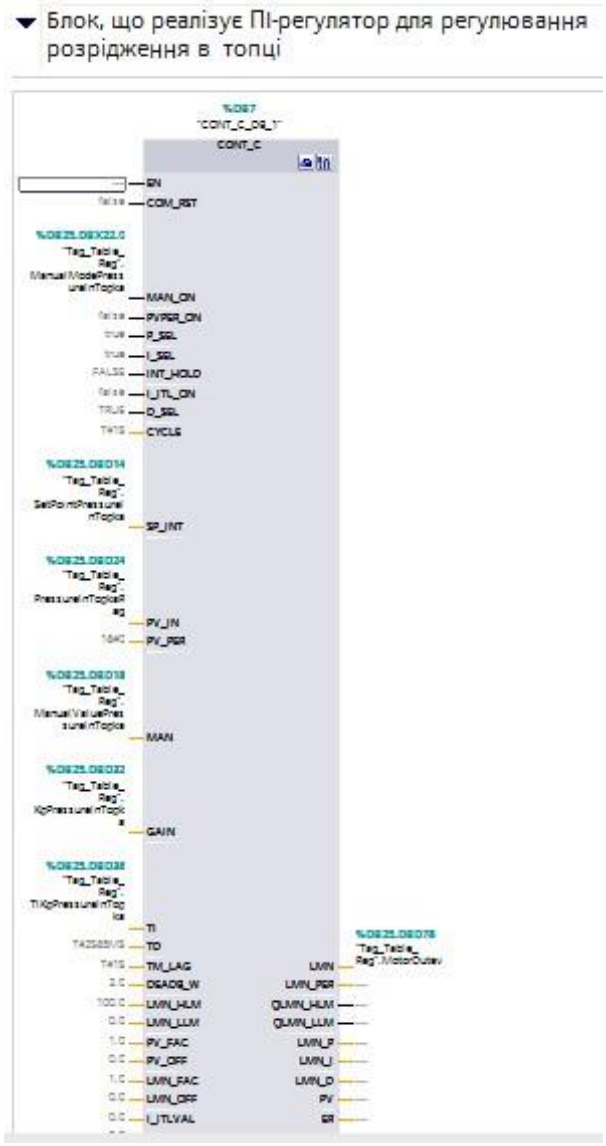


Рис. 2.10 – Продовження структури підпрограми PressureInTopka_Reg

Перед тим як алгоритми ПІ-регулювання зможуть використати дані з об'єкта управління, сирі машинні коди від аналогових модулів ПЛК повинні пройти процедуру попередньої обробки. За це відповідає спеціальний функціональний блок Signal_input, який перетворює базові електричні сигнали контролера у попередньо підготовлений формат для їх подальшого точного масштабування.

	Input						
	Input	Int	0.0	0	☑	☐	Вхідний сигнал
	Low_In	Real	2.0	0.0	☑	☐	Нижня межа
	Hihg_In	Real	6.0	0.0	☑	☐	Верхня межа
	K	Real	10.0	0.0	☑	☐	Коефіцієнт підсилення
	Output				☐	☐	
	Output	Real	14.0	0.0	☑	☐	Вихідний сигнал
	err	Word	18.0	16#0	☑	☐	Помилка

Рис. 2.11 – Організація пам'яті та локальні змінні блоку Signal_input



Рис. 2.12 – Внутрішня структура перетворювального блоку Signal_input

Наступним кроком є робота програмного блоку ScaleSignals, всередині якого відбувається безпосереднє математичне масштабування нормалізованих фізичних входів. Саме тут уніфіковані сигнали струму чи напруги пропорційно перераховуються у реальні інженерні одиниці вимірювання відповідно до паспортних робочих шкал встановлених первинних перетворювачів (датчиків).

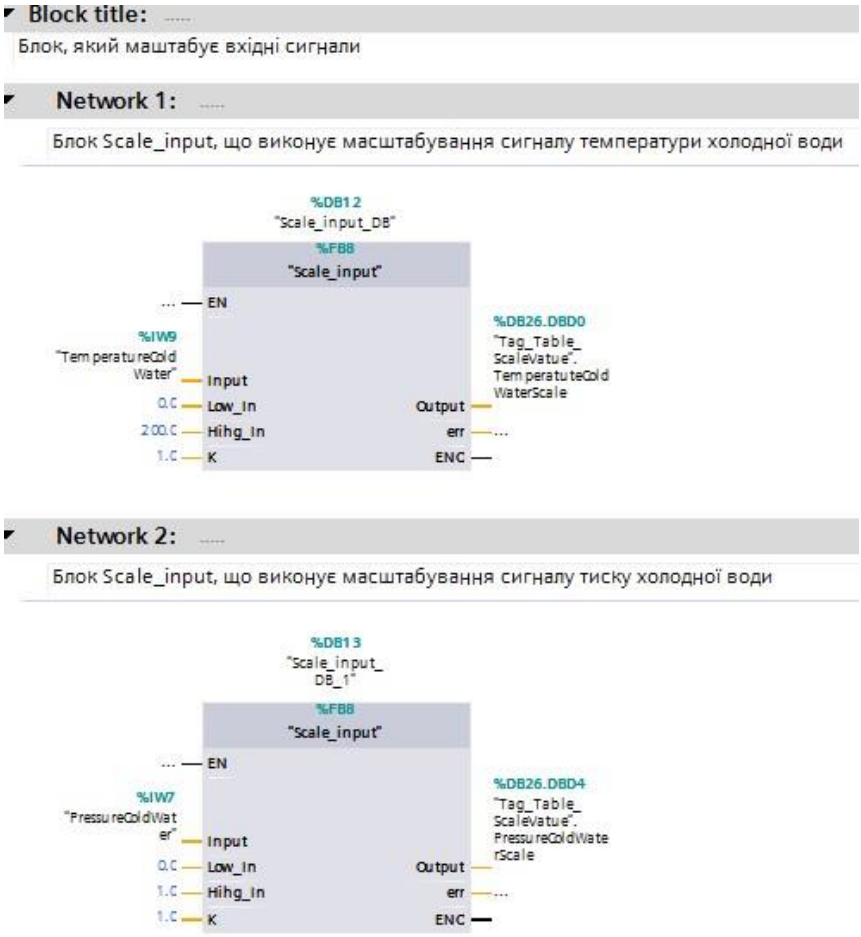


Рис. 2.13 – Програмна логіка модуля масштабування ScaleSignals

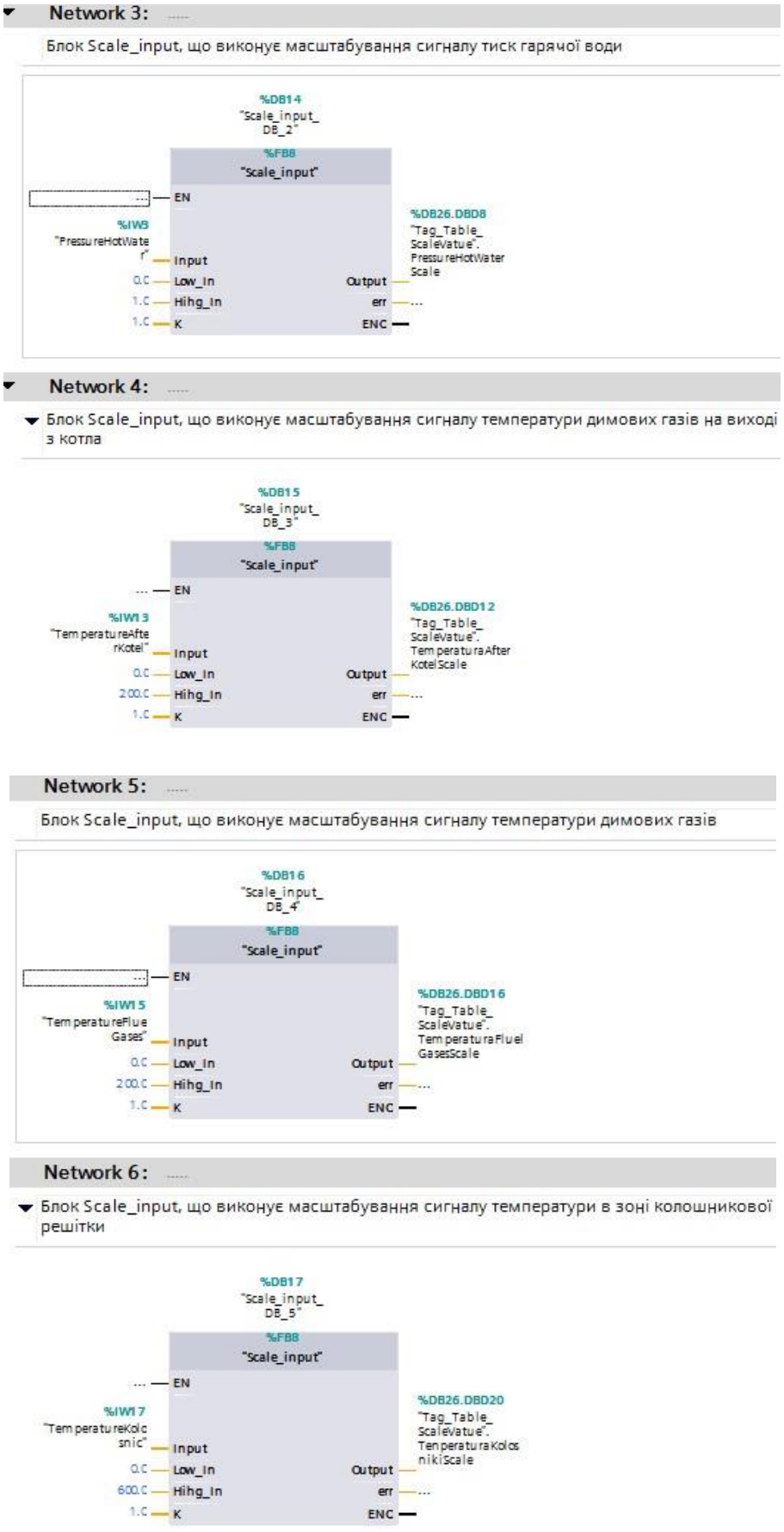


Рис. 2.14 – Продовження алгоритмічної структури ScaleSignals

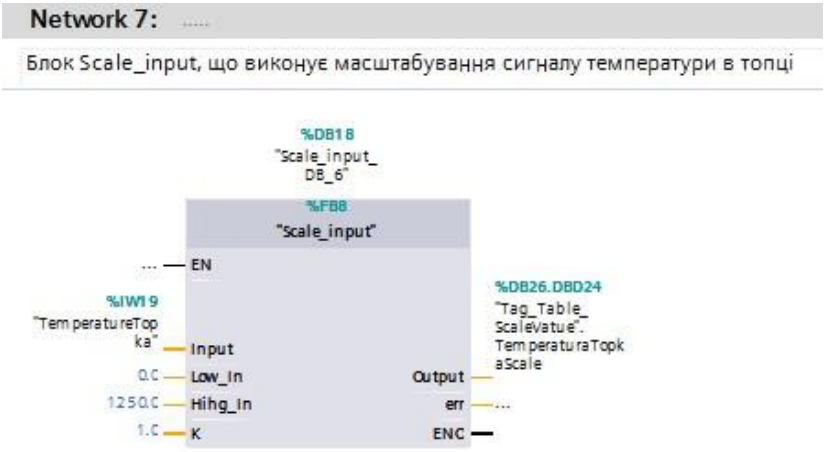


Рис. 2.15 – Завершальна частина алгоритму блоку ScaleSignals

Завдання забезпечення високої експлуатаційної безпеки обладнання покладено на алгоритми технологічного захисту та блокування, які апаратно реалізовані в межах програмних підсистем Alarm та Alarms. Всередині цих модулів відбувається безперервне циклічне порівняння поточних відмасштабованих значень технологічних параметрів з їхніми гранично допустимими (критичними) межами. У разі фіксації виходу будь-якого параметра за дозволені межі, програма миттєво генерує команду на активацію відповідного аварійного захисту та переводить систему у стан блокування.

	Input						
	Input	Real	0.0	0.0	☑	☐	Вхідний сигнал, який порівнюється з...
	Limit	Real	4.0	0.0	☑	☐	Значення обмеження
	Output				☐	☐	
	Status	Bool	8.0	false	☑	☐	Змінна відображає статус аварії

Рис. 2.16 – Локальні змінні блоку контролю аварійних ситуацій Alarm

```
1  (*Перевірка умови ввімкнення сигналізації і її задання*)
2 IF (#Input >= #Limit) THEN
3     #Status := TRUE;
4 ELSE
5     #Status := FALSE;
6 END_IF;
```

Рис. 2.17 – Внутрішня алгоритмічна структура підпрограми Alarm

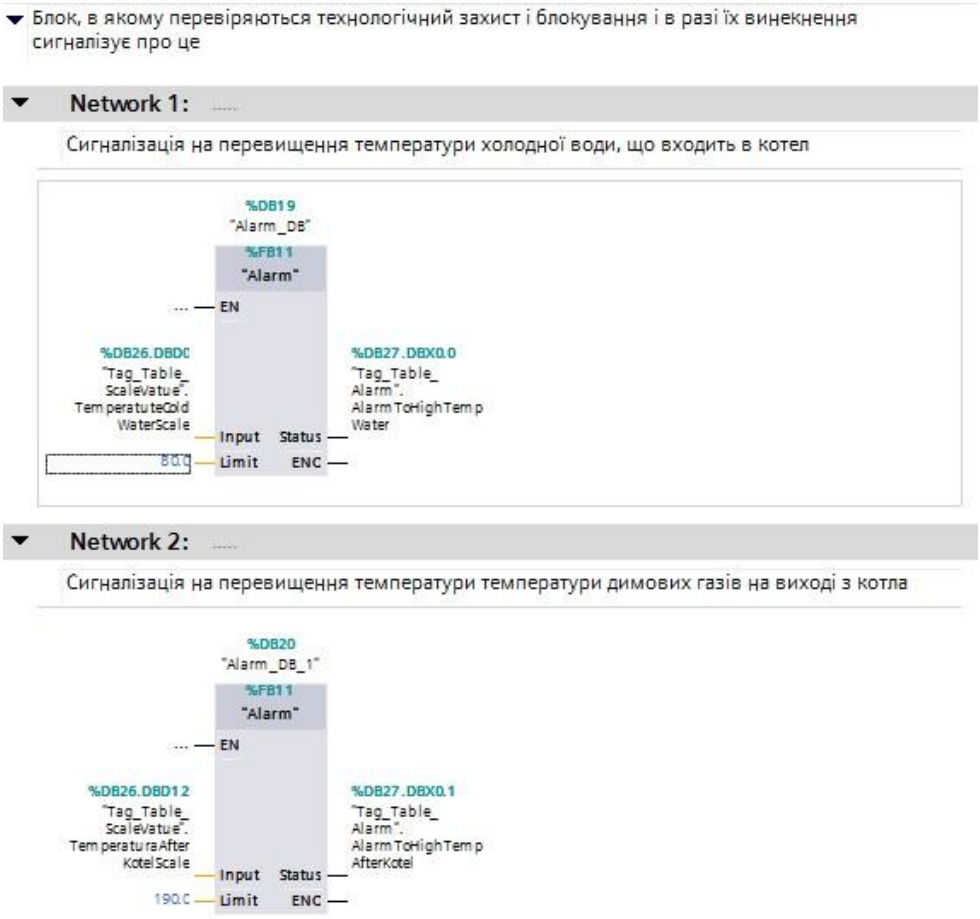


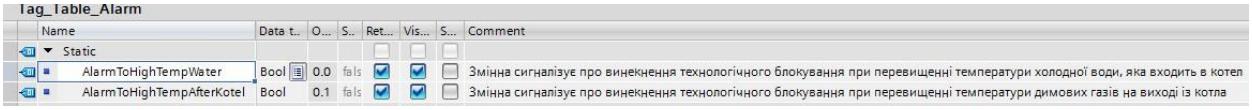
Рис. 2.18 – Організація захисного блоку Alarms

Для впорядкованого зберігання інформації в пам'яті контролера використовуються спеціалізовані таблиці даних. Так, блок даних Tag_Table_Scale акумулює в собі масив глобальних змінних, які активно задіюються як модулем математичного масштабування ScaleSignals, так і комунікаційними інтерфейсами робочої станції оператора. Інший інформаційний масив містить глобальні теги, необхідні для повноцінного функціонування системи обробки тривог Alarms та відображення статусу аварій на диспетчерському моніторі.

Tag_Table_ScaleVatue

	Name	Dat...	Of...	St...	Ret...	Vi...	Se...	Comment
	Static							
	TemperatuteColdWate...	...	0.0	0.0	☑	☑	☐	Відмаштабований сигнал від датчика температури холодної води
	PressureColdWaterScale	Real	4.0	0.0	☑	☑	☐	Відмаштабований сигнал від датчика тиску холодної води
	PressureHotWaterScale	Real	8.0	0.0	☑	☑	☐	Відмаштабований сигнал від датчика температури гарячої води
	TemperaturaAfterKote...	Real	12.0	0.0	☑	☑	☐	Відмаштабований сигнал від датчика температури димових газів на виході з котла
	TemperaturaFluelGase...	Real	16.0	0.0	☑	☑	☐	Відмаштабований сигнал від датчика температури димових газів
	TenperaturaKolosnikiS...	Real	20.0	0.0	☑	☑	☐	Відмаштабований сигнал від датчика температури в зоні колосникової решітки
	TemperaturaTopkaScale	Real	24.0	0.0	☑	☑	☐	Відмаштабований сигнал від датчика температури в топці котла

Рис. 2.19 – База глобальних змінних Tag_Table_Scale для підсистеми масштабування


Tag_Table_Alarm

	Name	Data t...	O...	S...	Ret...	Vis...	S...	Comment
	Static							
	AlarmToHighTempWater	Bool	0.0	fals	☑	☑	☐	Змінна сигналізує про виникнення технологічного блокування при перевищенні температури холодної води, яка входить в котел
	AlarmToHighTempAfterKotel	Bool	0.1	fals	☑	☑	☐	Змінна сигналізує про виникнення технологічного блокування при перевищенні температури димових газів на виході із котла

Рис. 2.20 – Таблиця глобальних змінних для координації роботи аварійної сигналізації

Високонадійне інформаційне та керуюче узгодження режимів роботи локального контролера із супервізорним (верхнім) рівнем системи автоматизації організовано за суворим регламентом. Згідно з розробленою логікою, за умови переходу в ручний режим, оперативний персонал отримує повне право дистанційно змінювати просторове положення всіх виконавчих і регулюючих органів агрегату безпосередньо з екрана. Під час роботи в повністю автоматичному режимі оператору надається можливість оперативно коригувати технологічні завдання (уставки) для кожної з незалежних систем автоматичного регулювання. Паралельно з цим, мережевий алгоритм ПЛК забезпечує безперервну, гарантовану передачу всіх необхідних діагностичних даних та значень поточних технологічних змінних на рівень SCADA-системи для їх постійного контролю та архівації.

2.4 Опис програмного забезпечення супервізорного рівня ПТКЗА

Програмна реалізація верхнього (супервізорного) рівня програмно-технічного комплексу засобів автоматизації базується на застосуванні сучасної SCADA-системи, яка виконує роль головного диспетчерського інструменту. Архітектура цього людино-машинного інтерфейсу розроблена з урахуванням вимог ергономіки та поділена на декілька логічно пов'язаних функціональних екранів. Основна структура графічного середовища охоплює базове вікно загальної мнемосхеми котлоагрегата, а також спеціалізовані діалогові вікна, призначені для детального контролю окремих технологічних контурів. До них належать панелі управління загальним тепловим навантаженням установки, коригування вмісту залишкового кисню у відхідних димових газах та стабілізації аеродинамічного розрідження всередині топкового простору.

Безпосередньо після ініціалізації та запуску диспетчерського додатка на

екрані оператора відображається стартове вікно, що містить комплексну мнемосхему теплогенеруючого об'єкта. Ця графічна панель слугує центральним вузлом моніторингу, на якому в режимі реального часу ведеться безперервна цифрова та візуальна індикація всіх ключових контрольованих параметрів роботи котла. Для забезпечення швидкої навігації на екрані розміщено інтерактивні клавіші, що дозволяють миттєво переходити до розширених налаштувань конкретних систем регулювання. Окрім візуалізації поточного стану технологічного процесу, на головній мнемосхемі інтегровано спеціальне інформаційне поле для виведення системних тривог. Тут також передбачена чітка індикація статусів активації апаратних чи програмних технологічних захистів та спрацювання механізмів блокування, що дозволяє оперативному персоналу негайно реагувати на будь-які позаштатні ситуації.

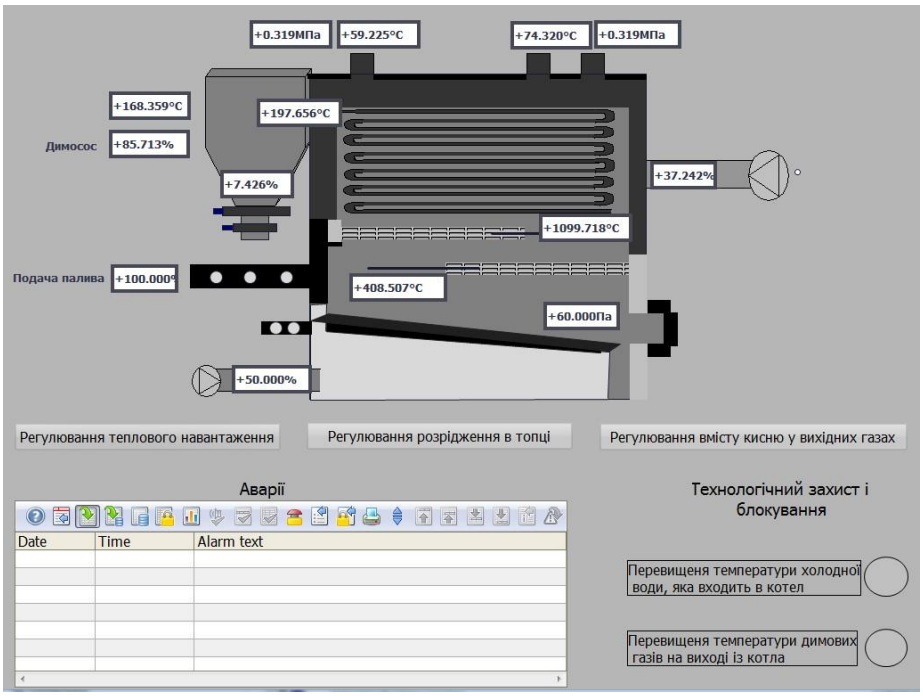


Рис. 2.21 – Головне диспетчерське вікно загальної мнемосхеми котельної установки

Детальне управління температурними режимами здійснюється через окреме діалогове вікно контуру стабілізації теплового навантаження агрегату. Інтерфейс цього екрану надає диспетчеру вичерпну інформацію про поточне значення регульованого параметра, а також відображає величину вихідного керуючого сигналу, який фізично транслюється на відповідний виконавчий механізм (ВМ).

Функціонал вікна дозволяє користувачеві безперешкодно вводити нові значення технологічних уставок, безпосередньо коригувати внутрішні коефіцієнти (налаштування) регулятора та здійснювати генерацію керуючого впливу. Програмно реалізовано алгоритм плавного переходу між автоматичним та ручним режимами роботи. З метою підвищення рівня візуального контролю та запобігання помилкам з боку персоналу, перехід системи в ручний режим роботи супроводжується зміною кольорової індикації клавіші-перемикача «Авт/Руч» на яскраво-жовтий колір. Додатково в цьому вікні вбудовано модуль графічного тренду, який у вигляді безперервної кривої демонструє динаміку зміни регульованого теплового показника в часі.

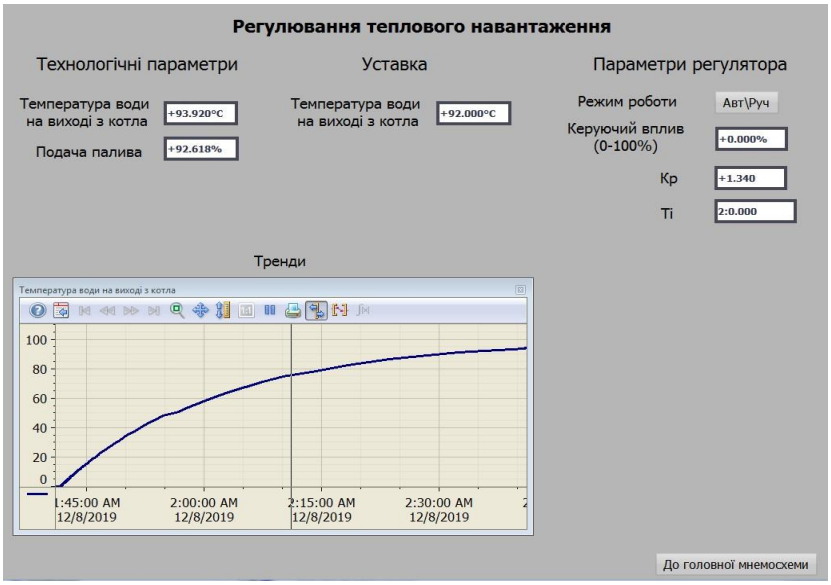


Рис. 2.22 – Інтерфейс оператора для контуру керування тепловим навантаженням

Для забезпечення високого теплового коефіцієнта корисної дії та дотримання жорстких екологічних нормативів розроблено спеціалізоване вікно налаштування контуру регулювання вмісту кисню у відпрацьованих димових газах. Графічне та логічне компонування цього екрану є максимально уніфікованим і містить набір інструментів, ідентичний до попереднього контуру. Оператор має змогу відстежувати фактичну концентрацію O_2 на виході з котла, спостерігати за рівнем керуючого впливу, що спрямовується на виконавчі органи повітряних заслінок, та встановлювати оптимальні межі (уставки) для ведення процесу горіння. Також реалізована можливість тонкого переналаштування параметрів регулятора і

візуального перегляду історичного графіка (тренду) зміни концентрації кисню. Управління станом контуру підтримує повноцінну функцію ручного втручання: при її активації відповідна кнопка «Авт/Руч» так само підсвічується жовтим кольором, що сигналізує про перехід управління під безпосередній контроль людини.

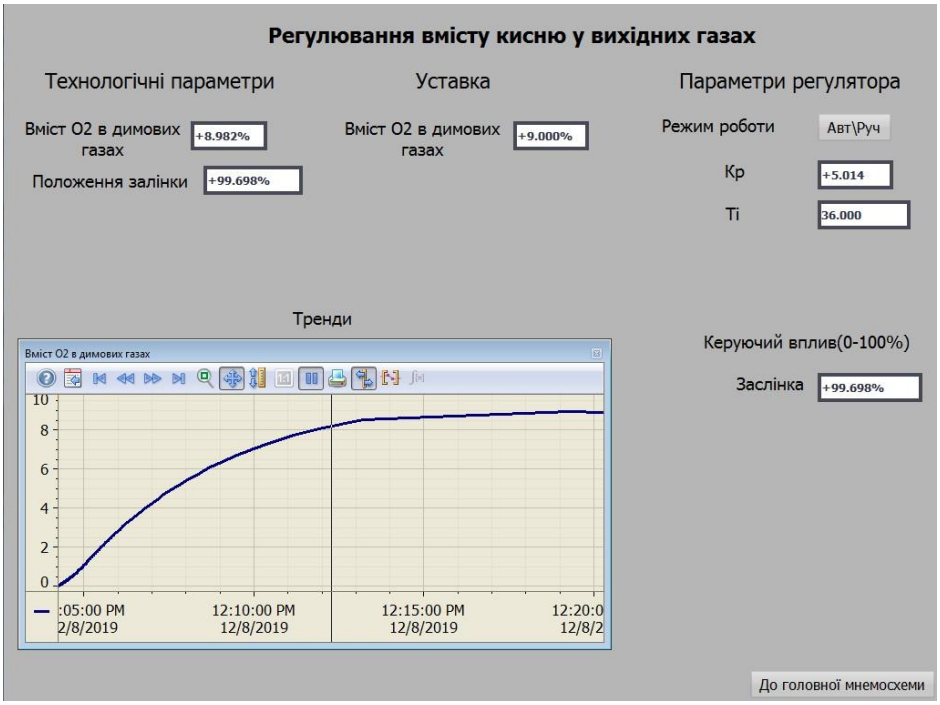


Рис. 2.23 – Графічна панель автоматичного контролю концентрації кисню в димових газах

Аеродинамічна безпека та стабільність тяги безперервно контролюються через відповідне вікно системи регулювання розрідження в топковому просторі котлоагрегату. Цей функціональний елемент SCADA-програми надає користувачеві вичерпні інструменти для моніторингу динаміки тиску всередині камери згоряння. Структура інтерфейсу дозволяє в реальному часі спостерігати за поточним показником розрідження, задавати необхідне значення технологічної уставки та контролювати вихідний сигнал керування, що передається на привід димососа. Для оптимізації перехідних процесів оператор може безпосередньо з цього вікна вносити корективи в налаштування регулюючого алгоритму. Спостереження за перебігом технологічного процесу полегшується завдяки інтеграції вікна динамічних трендів, що фіксує всі коливання розрідження. Як і в інших програмних модулях комплексу, тут передбачено можливість оперативного перемикання алгоритмів з автоматичного на ручне керування із подачею

керуючого впливу, що супроводжується чіткою жовтою колірною індикацією стану клавіші «Авт/Руч», гарантуючи єдність ергономічних рішень у всьому диспетчерському додатку.

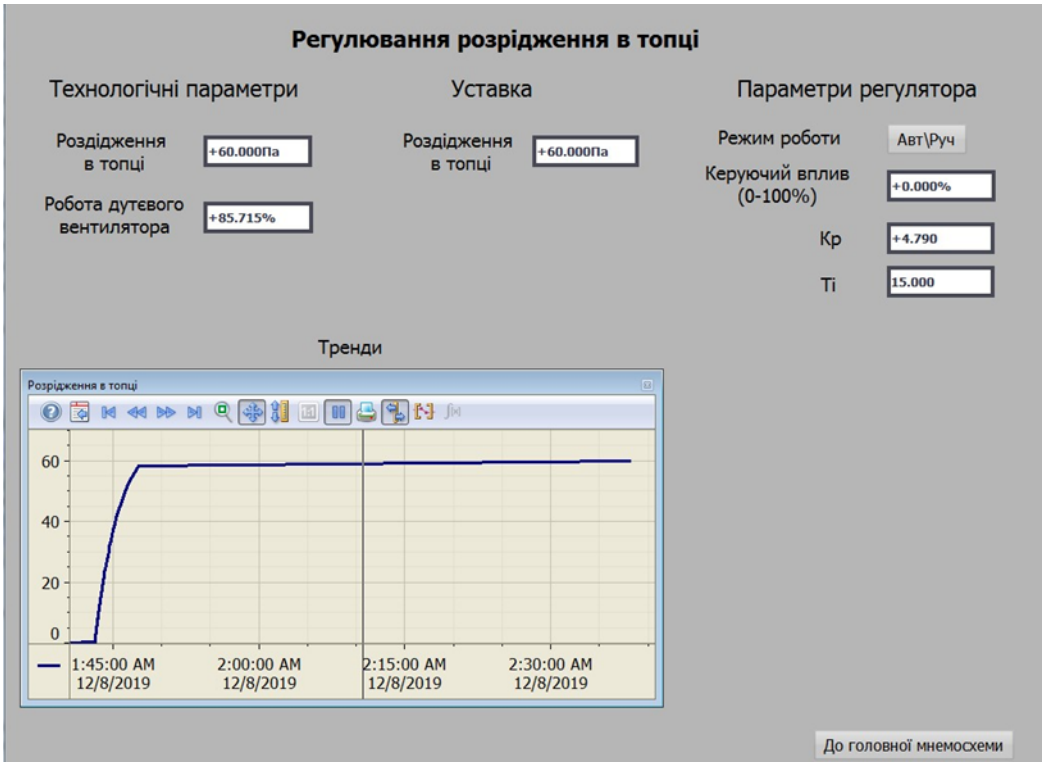


Рис. 2.24 – Діалогове вікно керування аеродинамічним розрідженням у топці

Висновок до розділу 2

У другому розділі було детально розроблено та обґрунтовано апаратні й програмні рішення для локального та супервізорного рівнів програмно-технічного комплексу засобів автоматизації (ПТКЗА). Фундаментом нижнього (польового) рівня керування обрано сучасний програмований логічний контролер серії Siemens S7-300, оснащений необхідними модулями аналогового та дискретного вводу-виводу сигналів. На базі цього апаратного забезпечення успішно імплементовано алгоритми для трьох ключових контурів автоматичного ПІ-регулювання: стабілізації теплового навантаження котла, підтримання оптимального розрідження в топковому просторі та еколого-економічної оптимізації процесу горіння шляхом контролю вмісту вільного кисню у відхідних газах.

Розробка прикладного програмного забезпечення для ПЛК здійснювалася в інтегрованому інженерному середовищі TIA Portal V15 з використанням інструментарію SIMATIC STEP 7. Програмна архітектура побудована за чітким модульним принципом і включає набір організаційних та функціональних блоків. Ця структура забезпечує безперервне циклічне виконання алгоритмів керування, точне математичне масштабування сигналів від первинних перетворювачів до інженерних одиниць, а також гарантує високий рівень безпеки завдяки інтегрованим підсистемам технологічного захисту та аварійного блокування.

Для забезпечення ефективної взаємодії оперативного персоналу з технологічним процесом було спроектовано надійний багаторівневий людино-машинний інтерфейс. Організація локального ручного керування безпосередньо біля агрегату реалізована за допомогою сенсорної операторської панелі Siemens TP900 Comfort. Водночас, супервізорний (верхній) рівень управління представлений повнофункціональною SCADA-системою, розробленою на базі потужного програмного комплексу SIMATIC WinCC. Створений комплекс графічних мнемосхем та діалогових вікон дозволяє диспетчеру здійснювати глибокий моніторинг параметрів котлоагрегату в реальному часі, гнучко перемикати режими керування між автоматичним і ручним, аналізувати динамічні тренди зміни технологічних величин та миттєво реагувати на будь-які системні тривоги чи блокування.

РОЗДІЛ 3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ КІБЕРБЕЗПЕКИ ТА ЗАХИСТУ МЕРЕЖЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Сегментація та розшарування мережі

На сучасному етапі функціонування промислового підприємства, де безпосередньо впроваджена та експлуатується досліджувана автоматизована система керування (АСК), наразі повністю відсутня практика застосування методів розшарування та сегментації інформаційного мережевого трафіку. Така архітектурна недосконалість формує вкрай серйозну та потенційно критичну загрозу здійснення успішних кібератак на автоматизовану систему керування технологічними процесами (АСК ТП). Виходячи з цього, головною метою даного підрозділу є проведення ґрунтовного аналізу та пошук найбільш ефективних технічних шляхів, спрямованих на максимальну мінімізацію ризиків несанкціонованого доступу до конфіденційної та критично важливої технологічної інформації.

Насамперед, першочерговим завданням забезпечення інформаційної безпеки є чітке фізичне або логічне відокремлення загальнокорпоративної мережі від спеціалізованої промислової. Це обґрунтовується тим, що базова природа та характеристики мережевого трафіку в цих двох сегментах кардинально відрізняються одна від одної. Наприклад, для нормальної роботи офісної корпоративної мережі абсолютно необхідним і навіть критично важливим фактором є забезпечення вільного доступу до глобальної мережі Інтернет, активне використання сервісів електронної пошти та надання можливості віддаленого доступу для співробітників. Натомість, для ізольованого середовища промислової мережі будь-який подібний зовнішній трафік становить пряму та безпосередню кіберзагрозу. Крім того, в індустріальному сегменті діють надзвичайно суворі регламенти та жорсткі процедури щодо заміни апаратного мережевого обладнання, оновлення програмних конфігурацій та модифікації базового програмного забезпечення, тоді як у корпоративному середовищі такі процеси відбуваються значно вільніше і не вимагають подібного рівня контролю.

У класичній практиці побудови захищених інфраструктур процеси

розшарування та сегментації мережі переважно реалізуються на рівні маршрутизаторів та шлюзів, які встановлюються між різними зонами або доменами безпеки. Масштабні та розгалужені АСК ТП, як правило, включають у себе одразу декілька таких ізольованих доменів. Це пояснюється тим, що у великих виробничих комплексах функціонують різноманітні технологічні операції, частина з яких є набагато більш критичними за інші, а отже, об'єктивно потребують значно вищого ступеня інформаційного та апаратного захисту. Саме в таких випадках доцільно застосовувати глибоку сегментацію загальної мережі АСК ТП на окремі ізольовані підмережі. Проте, в рамках виконання даної кваліфікаційної роботи детально розглядається відносно компактна локальна система, яка централізовано керується лише одним обчислювальним пристроєм — програмованим логічним контролером марки Siemens S7-300. З огляду на таку апаратну конфігурацію, подальше складне сегментування промислової мережі АСК ТП на дрібніші підмережі визнано недоцільним і в даному проекті не застосовується.

Замість фізичного дроблення мережі, для надійного логічного розділення інформаційних потоків на досліджуваному об’єкті управління пропонується застосування технології віртуальних приватних мереж (VPN) із потужним криптографічним захистом. Зокрема, оптимальним рішенням є впровадження програмного комплексу OpenVPN. Ця технологія, використовуючи передові алгоритми та надійні механізми шифрування даних, ефективно розділяє мережевий трафік на логічному рівні. Крім того, застосування OpenVPN дозволяє гарантовано блокувати будь-які спроби несанкціонованого доступу до конфіденційної технологічної інформації з боку неавторизованих користувачів, а наявність обов'язкової функції двофакторної аутентифікації зводить до мінімуму ризики компрометації облікових записів оперативного персоналу.

3.2 Пристрої захисту меж доменів та архітектура розшарування мережі

До комплексу спеціалізованих апаратних і програмних засобів, що забезпечують надійний захист меж інформаційних доменів, традиційно відносять промислові брандмауери, мережеві маршрутизатори, шлюзові станції, системи

виявлення та запобігання вторгненням (IDS/IPS), а також різноманітні керовані мережеві інтерфейси. Головним і єдиним функціональним призначенням цього обладнання є жорсткий контроль, фільтрація та безпечне керування процесами передачі даних між різними сегментами інфраструктури підприємства.

З метою забезпечення максимально повного обмеження прямого обміну мережевим трафіком між вразливою промисловою автоматизованою системою та загальною корпоративною мережею, у даному проекті передбачено впровадження демілітаризованої зони (DMZ). Цей буферний сегмент логічно та фізично розташовується безпосередньо між двома доменами безпеки. Завдяки такому архітектурному рішенню, будь-який мережевий трафік, що прямує з промислового сегмента до корпоративного (або в зворотному напрямку), обов'язково проходитиме виключно через демілітаризовану зону, яка, у свою чергу, надійно захищена і підключена до промислового міжмережевого екрана (брандмауера).

На рисунку 3.1 детально проілюстровано розроблену топологію розшарування мережі для безпечного керування промисловим котлоагрегатом. Інтеграція демілітаризованої зони у тісному поєднанні з сучасним брандмауером дозволяє багаторазово посилити загальний рівень кібернетичної безпеки всього виробничого об'єкта. Фактично, демілітаризована зона виконує роль надійної проміжної підмережі. Саме в цьому ізольованому середовищі розгортається сервіс глобального архівування баз даних, безпечний доступ до якого є критично необхідним як для контролерів з промислової мережі, так і для аналітиків чи менеджерів з корпоративного сегмента.

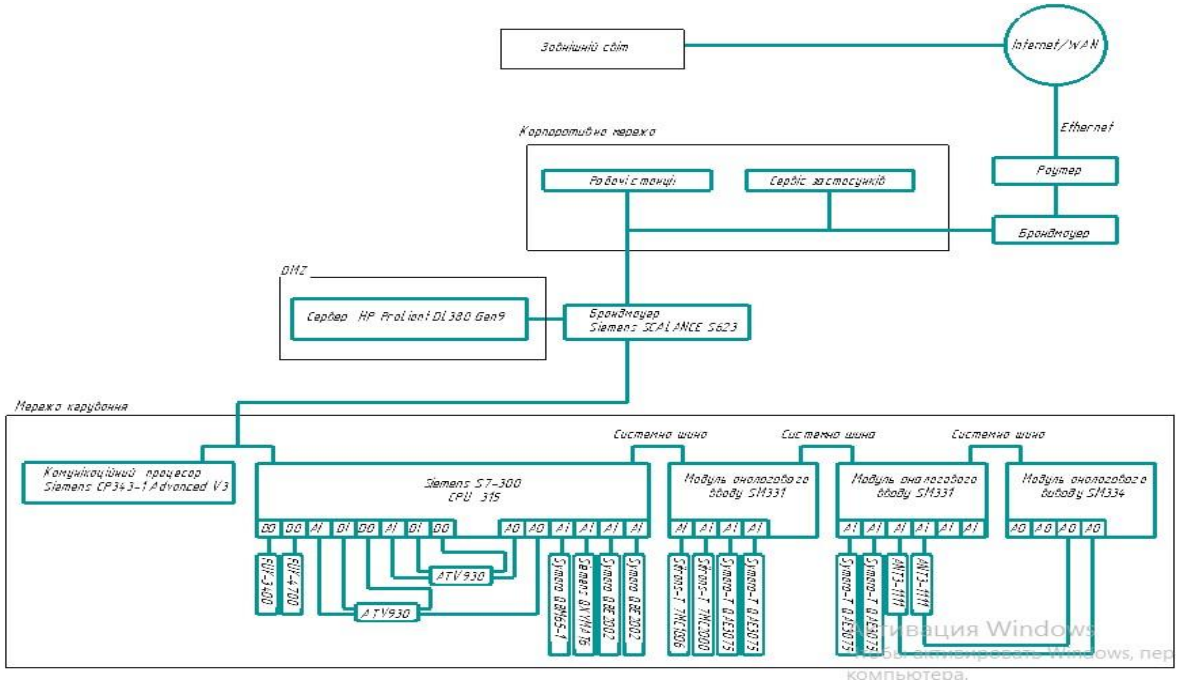


Рис. 3.1 – Структурна схема забезпечення інформаційної безпеки водогрійного агрегату КВм-1.75 шляхом інтеграції брандмауера та демілітаризованої зони між IT- та OT-мережами

Як основний вузол безпеки було обрано промисловий брандмауер високої надійності – Siemens SCALANCE S623. Його ключовою апаратною перевагою є наявність трьох незалежних мережевих портів, що дозволяє ідеально реалізувати концепцію нашої демілітаризованої зони, тобто здійснити чітке фізичне та логічне розділення інфраструктури на DMZ, загальнокорпоративну та ізольовану промислову мережі. У свою чергу, необхідні мережеві вузли, зокрема потужний сервер зберігання даних та архівування (реалізований на базі апаратної платформи HP ProLiant DL380 Gen9), до якого потрібно забезпечити безпечний двосторонній доступ, безпосередньо інтегрується у захищений простір DMZ.

Внаслідок впровадження такої архітектури, процедура інформаційного обміну між усіма компонентами системи набуває чітко регламентованого вигляду, що схематично відображено на рисунку 3.2. Основні правила маршрутизації зводяться до наступних алгоритмів: по-перше, пристрої корпоративної мережі мають право ініціювати сеанси зв'язку виключно з серверами, що знаходяться в DMZ; по-друге, обладнання промислової мережі також ініціює передачу даних лише до вузлів усередині демілітаризованої зони. Будь-який прямий транзитний

зв'язок між крайніми мережами повністю блокується.

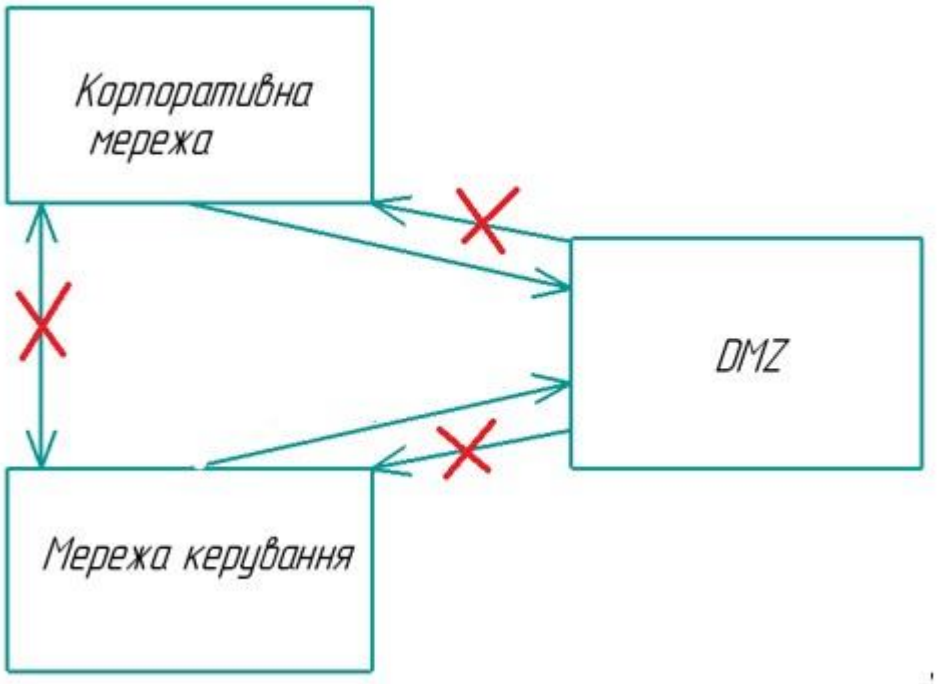


Рис. 3.2 – Схема маршрутизації та обміну інформаційними потоками між розділеними мережевими доменами

Запропонована архітектурна модель характеризується низкою вагомих переваг. До них належать: висока гнучкість системи та її повна незалежність від використовуваних мережевих протоколів, інтуїтивно зрозуміла конфігурація та зручність подальшого адміністрування, а також суворо контрольоване розділення інформаційних середовищ. Це гарантовано захищає чутливу корпоративну та технологічну (конфіденційну) інформацію від будь-яких спроб несанкціонованого доступу. Крім того, розроблена система забезпечує масштабованість функцій кібербезпеки та надає безпечну можливість для виконання процедур дистанційної діагностики обладнання.

Для практичної та безвідмовної реалізації описаної інфраструктури висуваються чіткі технічні вимоги. Перш за все, проект потребує використання брандмауера, що апаратно підтримує щонайменше три незалежні інтерфейси: один призначається для підключення до закритої промислової мережі, другий – для виходу в корпоративний сегмент, а третій – для формування DMZ. Також є абсолютно необхідним налаштування безперервного, глибокого моніторингу та контролю всього вхідного і вихідного мережевого трафіку, що циркулює через

демілітаризовану зону. Фундаментальним правилом безпеки залишається вимога, згідно з якою будь-які з'єднання з внутрішньою мережею керування технологічним процесом можуть бути ініційовані виключно самими пристроями, що безпосередньо входять до складу цієї ж мережі керування.

3.3 Налаштування брандмауера

У сучасних автоматизованих системах міжмережевий екран (брандмауер) відіграє роль фундаментального апаратного або програмно-апаратного рубежу кібербезпеки. Цей спеціалізований мережевий пристрій здійснює безперервний глибокий моніторинг та аналіз як вхідного, так і вихідного інформаційного трафіку. Головне завдання брандмауера полягає у прийнятті рішень щодо дозволу, обмеження або повного блокування проходження певних пакетів даних, керуючись заздалегідь запрограмованою політикою та суворими правилами безпеки [10]. В якості основного вузла захисту для даного проекту було обрано промисловий міжмережевий екран моделі Siemens SCALANCE S623, який володіє широким спектром інтегрованих безпекових функцій. Зокрема, цей пристрій забезпечує комплексний захист окремих промислових контролерів або цілих доменів автоматизації. Його функціонал дозволяє здійснювати ретельну перевірку IP-пакетів з урахуванням адрес джерела та призначення, підтримує специфічні промислові протоколи сімейства Ethernet, що не базуються на IP-маршрутизації (non-IP), а також надає адміністратору інструменти для гнучкого обмеження пропускної здатності каналів.

Керування мережевим трафіком відбувається через багаторівневу систему загальних, локальних та індивідуально визначених користувачем правил фільтрації, що супроводжується обов'язковим веденням електронного журналу подій. Окрім функції фільтрації, SCALANCE S623 повноцінно працює в режимі маршрутизатора, надійно логічно відокремлюючи захищену внутрішню мережу керування від зовнішніх інформаційних потоків, та підтримує створення зашифрованих VPN-тунелів для безпечної комунікації через незахищені канали зв'язку. Фізично даний апаратний екран розташовується на межі між загальнокорпоративною та промисловою мережами. Процес конфігурування

захисного екрана розпочинається з правильної фізичної комутації мережевих кабелів, для чого виробником передбачена зручна кольорова індикація: червоний порт призначений для підключення корпоративної IT-мережі, зелений інтерфейс використовується для локальної мережі керування, а жовтий порт виділено спеціально для демілітаризованої зони (DMZ).

Розробка та впровадження політики безпеки базується на фундаментальному принципі заборони всього трафіку за замовчуванням із подальшим наданням дозволів виключно для необхідних з'єднань, що формує так званий «білий список» безпечних маршрутів. Для уникнення створення додаткових векторів атак та закриття потенційних вразливостей для зловмисників, усі фізичні та логічні порти, що не задіяні в технологічному процесі, підлягають безумовному відключенню [1]. Будь-яка інформаційна взаємодія між корпоративним сегментом та серверами у демілітаризованій зоні має відбуватися виключно через захищений криптографічний протокол HTTPS, який, на відміну від стандартного HTTP, забезпечує надійне шифрування даних та двосторонню аутентифікацію сторін [6]. Для інформування персоналу допускається вихідний трафік у вигляді електронних листів (SMTP-повідомлень), згенерованих безпосередньо в мережі керування. Водночас, циркуляція специфічних промислових протоколів обміну даними жорстко обмежується внутрішнім простором промислової мережі і не випускається за її межі.

Усі мережеві комунікації дозволяються виключно між заздалегідь зареєстрованими та авторизованими пристроями. Відповідно до стандартів кібербезпеки АСК ТП, ініціатором будь-якого зовнішнього з'єднання з системою управління, за можливості, має виступати обладнання самої системи керування, а не зовнішні клієнти. Увесь масив даних про комунікацію з промисловим сегментом обов'язково підлягає безперервному логуванню для подальшого системного аудиту. Перед початком програмного налаштування SCALANCE S623 необхідно чітко визначити всі мережеві модулі та закріпити за ними статичні IP-адреси. Отримані параметри адресації систематизовано у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Специфікація IP-адрес мережевого обладнання та портів

Мережевий сегмент	Апаратний модуль	IP-адреса пристрою	IP-адреса порту S623
Корпоративна мережа	Персональний комп'ютер (ПК)	172.158.2.6	172.158.2.2
Мережа керування	Комунікаційний процесор CP343-1Adv	192.168.0.2	192.168.0.1
Мережа керування	Персональний комп'ютер (ПК)	192.168.0.3	-
Демілітаризована зона (DMZ)	Серверна станція	140.80.0.100	140.80.0.1

Практичний етап конфігурації розпочинається у спеціалізованому програмному забезпеченні зі створення нового проекту та реєстрації облікового запису головного адміністратора системи.

На наступному етапі здійснюється вибір апаратного модуля. Для нашого проекту це модель S623 з обов'язковою вимогою до версії прошивки (реліз V3), оскільки саме ця генерація програмного забезпечення повноцінно підтримує роботу з демілітаризованою зоною. Новоствореному пристрою присвоюється системне ім'я «DMZ». Для його апаратної ідентифікації зчитується унікальна MAC-адреса із заводської наліпки, розміщеної на задній панелі приладу. Далі відбувається налаштування маршрутизації: IP-адреса корпоративної мережі прив'язується до зовнішнього інтерфейсу брандмауера, а IP-адреса локальної мережі керування закріплюється за внутрішнім інтерфейсом, після чого мережевий екран переводиться в режим активного роутера. Цей блок конфігураційних налаштувань детально відображено на рисунку 3.3.



Рис. 3.3 – Базова програмна конфігурація промислового екрана Siemens SCALANCE S623

Після встановлення базових параметрів маршрутизатора, для кожної з трьох виділених підмереж вручну прописуються конкретні IP-адреси фізичних портів, що показано на рисунку 3.4.

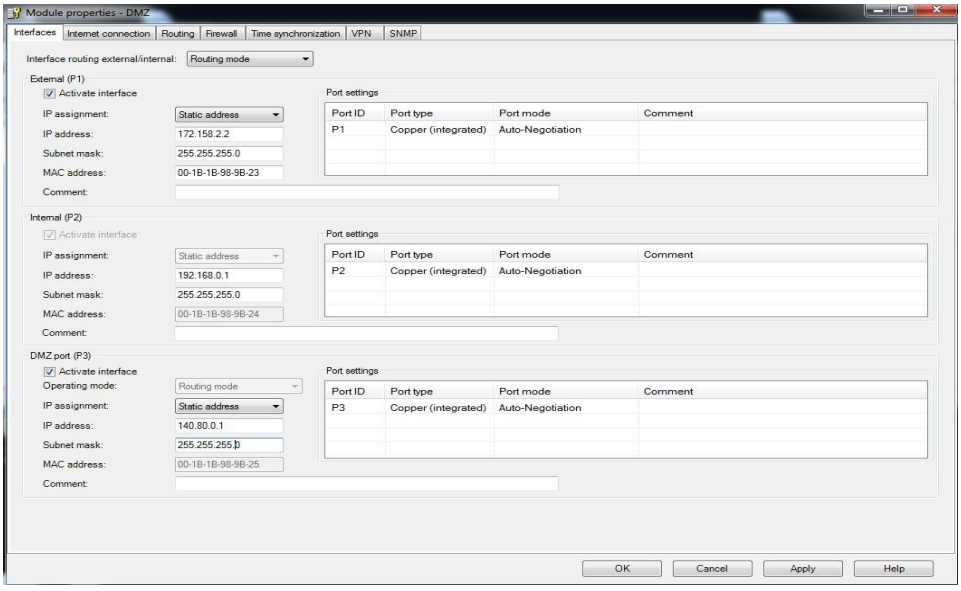


Рис. 3.4 – Розподіл та налаштування IP-адрес для інтерфейсних портів S623

З метою спрощення подальшого адміністрування та створення читабельних правил фільтрації, в систему вводяться символьні змінні (теги). Кожна така змінна містить лаконічний опис підключеного мережевого вузла та його фіксовану IP-адресу (Рис. 3.5).

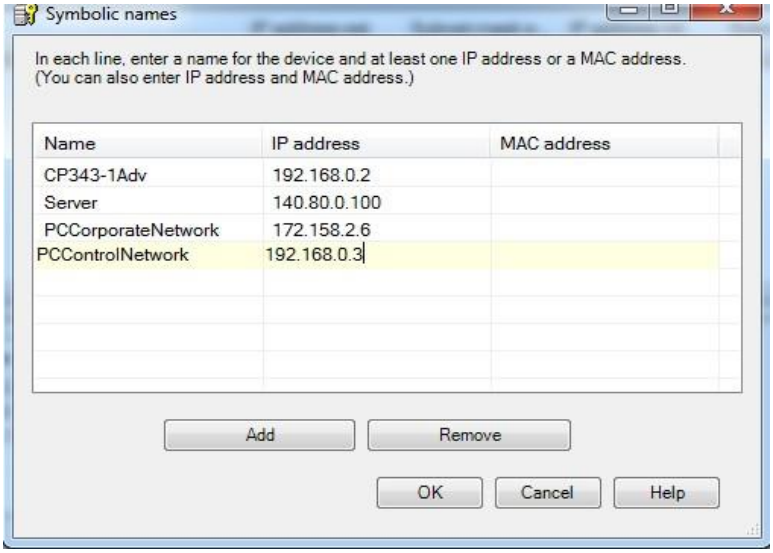


Рис. 3.5 – Таблиця символьних змінних для ідентифікації мережевих пристроїв

Для забезпечення безперебійної роботи комунікаційного сервера та можливості централізованого збору діагностичних повідомлень, у параметрах брандмауера активується спеціалізований мережевий сервіс Syslog (Рис. 3.6).

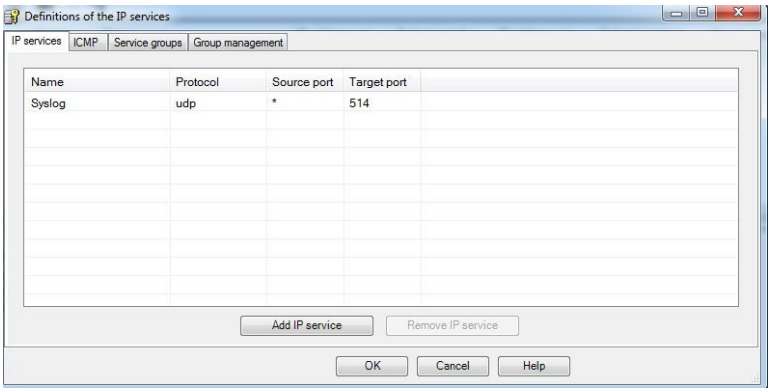


Рис. 3.6 – Активація системних сервісів брандмауера

На фінальному етапі конфігурації, суворо дотримуючись раніше затверджених правил безпеки та розробленої матриці обміну даними між сегментами, адміністратор прописує конкретні IP-правила (списки контролю доступу), що наведено на рисунку 3.7.

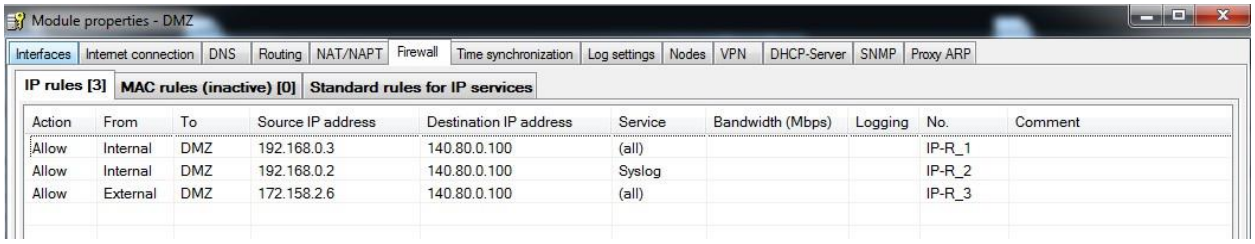


Рис. 3.7 – Формування політики доступу та IP-правил міжмережевого екрана

Завершується процес налаштування точковим вибором дозволених транспортних і прикладних протоколів (Рис. 3.8) та примусовим увімкненням функції детального логування всіх пропущених або заблокованих мережевих пакетів, що забезпечує базу для аудиту інформаційної безпеки (Рис. 3.9).

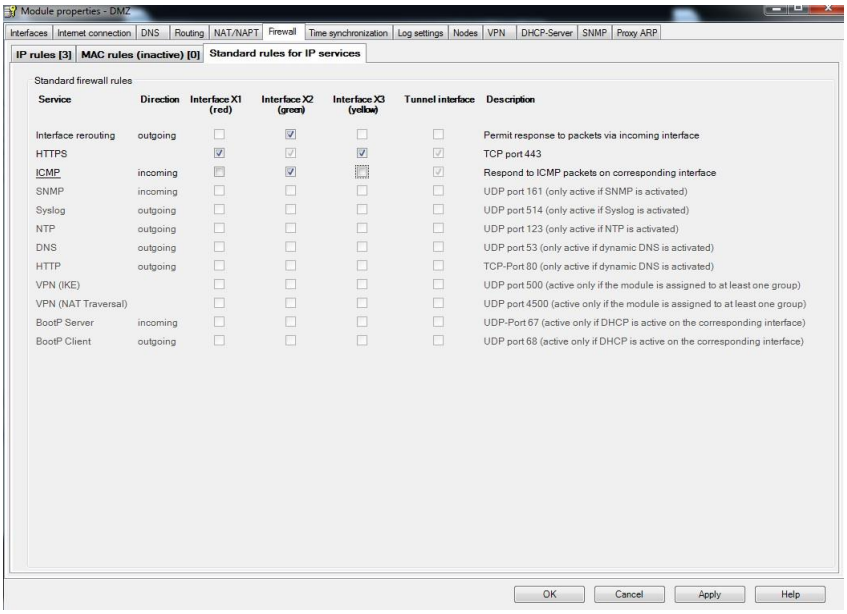


Рис. 3.8 – Визначення стандартних правил для дозволених IP-сервісів та протоколів

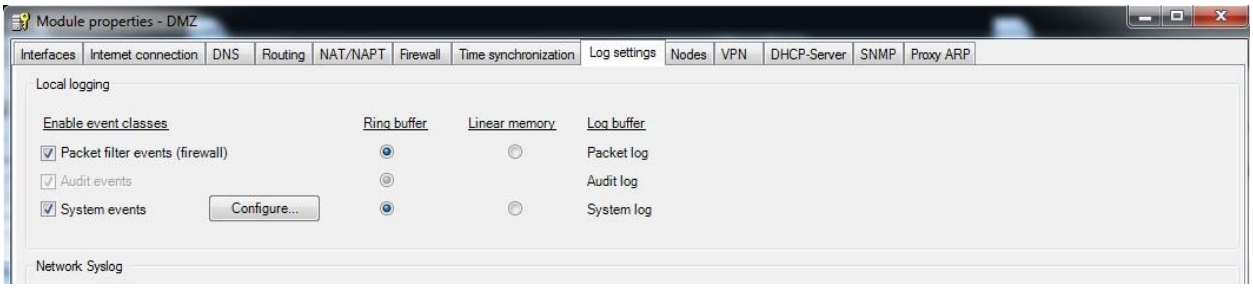


Рис. 3.9 – Активація підсистеми журналювання та логування мережевих пакетів

3.4 Керування віддаленим доступом, процеси аутентифікації та авторизації

Одним із найбільш критичних та відповідальних етапів під час конфігурування промислового міжмережевого екрана (брандмауера) є сувора організація та адміністрування віддаленого доступу до технологічного обладнання. У рамках розробленої автоматизованої системи керування було прийнято рішення про впровадження прогресивної моделі керування доступом, що базується на основі розподілу ролей (Role-Based Access Control, RBAC). Цей архітектурний підхід демонструє значно вищий рівень гнучкості, масштабованості та безпеки у порівнянні з традиційним використанням статичних списків контролю доступу (ACL). Фундаментальний принцип даної моделі полягає у тому, що конкретні експлуатаційні ролі призначаються безпосередньо активним суб’єктам (операторам, адміністраторам або системним процесам), і саме через належність до певної ролі ці суб'єкти отримують необхідний набір дозволів та привілеїв.

Завдяки такому логічному розмежуванню в системі повністю унеможливлюється виникнення заплутаних і складно контрольованих прямих зв'язків між окремими користувачами та специфічними правами доступу. Крім того, архітектура управління на базі ролей підтримує ієрархічне успадкування: вища або комплексна роль може містити не лише ті дозволи, що надані їй безпосередньо, але й автоматично переймати права, делеговані підпорядкованим ролям. Така ієрархічна структура радикально спрощує загальний процес адміністрування доступом, робить його прозорим та суттєво знижує ймовірність виникнення помилок через людський фактор під час налаштування політик безпеки [8].

Невід'ємними складовими комплексної політики захисту є також процедури аутентифікації та авторизації. У контексті кібербезпеки промислових систем, автентифікація користувача або програмного вузла являє собою строгий процес перевірки та підтвердження справжності заявленої особи (наприклад, шляхом перевірки відповідності логіна та пароля). Своєю чергою, авторизація — це наступний етап, який полягає у наданні вже автентифікованому користувачеві

легітимного права доступу до конкретних ресурсів системи, що визначається на основі заздалегідь встановлених правил ідентифікації та інших супутніх безпекових атрибутів [1].

Для забезпечення максимального захисту доступу до супервізорного рівня (SCADA-системи) застосовується спеціалізований програмний модуль SIMATIC Logon, який глибоко інтегрований у середовище WinCC. Цей інструментарій забезпечує виконання ряду критично важливих захисних функцій. До них належить алгоритм автоматичного завершення сеансу (виходу з системи) після закінчення визначеного тайм-ауту у разі відсутності активності оператора, а також механізм негайного та жорсткого блокування облікового запису після фіксації багаторазових спроб введення неправильного пароля. На додаток до цього, з метою забезпечення повного аудиту, абсолютно всі події входу в систему (як успішні, так і заблоковані) підлягають обов'язковому логуванню. Ці дані автоматично записуються та зберігаються у спеціальному захищеному від модифікацій електронному журналі WinCC-Audit, що гарантує неможливість підробки історії дій персоналу та дозволяє проводити точне розслідування будь-яких інцидентів безпеки.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі було вирішено завдання організації інформаційної та кібернетичної безпеки розробленої системи автоматичного керування котлоагрегатом. Для мінімізації ризиків несанкціонованого доступу та кібератак обґрунтовано необхідність чіткого логічного розділення корпоративної та промислової мереж. Запропоновано архітектуру розшарування мережі з використанням буферної демілітаризованої зони (DMZ) та застосуванням технології віртуальних приватних мереж (VPN) на базі OpenVPN із двофакторною аутентифікацією.

Головним апаратним вузлом захисту меж доменів обрано надійний промисловий брандмауер Siemens SCALANCE S623. Визначено сувору політику його налаштування, базовим принципом якої є використання «білого списку» — заборона всього мережевого трафіку за замовчуванням із подальшим наданням

дозволів виключно для необхідних і безпечних з'єднань. Встановлено, що комунікація між корпоративним сегментом та сервером архівування (HP ProLiant DL380 Gen9), розміщеним у DMZ, має здійснюватися виключно через захищений криптографічний протокол HTTPS.

Для безпечного адміністрування та керування віддаленим доступом до технологічного обладнання впроваджено гнучку модель контролю доступу на основі розподілу ролей (RBAC). Процеси надійної аутентифікації та авторизації оперативного персоналу в SCADA-системі реалізовано за допомогою спеціалізованого модуля SIMATIC Logon, інтегрованого у середовище WinCC. Цей інструментарій забезпечує автоматичне завершення сеансів при бездіяльності, блокування облікових записів при спробах підбору пароля та обов'язкове логування всіх подій входу до захищеного журналу аудиту WinCC-Audit.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Правильна організація роботи з охорони праці має першорядне значення для підвищення продуктивності праці, ліквідації причин нещасних випадків, попередження травматизму, загальних і професійних захворювань на виробництві.

Система автоматизації котла призначена для автоматичного відключення подачі палива до пальника при аварійних режимах роботи /система автоматики безпеки/, світлозвукової сигналізації про параметри роботи котла, автоматичного регулювання температури води на виході з котла і процесу горіння - підтримка оптимального співвідношення "газ- повітря" /система автоматичного регулювання.

На димарях є можливість для виміру температури і складу димових газів переносним газоаналізаторам. Димарі прийняті двостінні фірми «Версія- Люкс». Перед вузлом введення проектується швидкодіючий клапан - відсікач з електроприводом, що спрацьовує при загазованості котельної і відключенні електроенергії.

Припливне повітря для горіння газу а також 3-х кратного повітрообміну подається через існуючі жалюзійні грати в стіні котельного залу природним чином, витяг через існуючі дефлектори: Ду400 - 2 шт.

Монтаж газопроводів, здачу їх в експлуатацію виробляти відповідно до ДБН В.2.5-20- 2001 "Газопостачання" і ДБН А.3.2-2-2009. Охорона праці і промислова безпека в будівництві.

Живлення електроенергією котельної виробляється від існуючих ввідних кабелів;

водопостачання - від існуючого введення водопроводу.

Устаткування розміщено усередині приміщення котельні.

Основними споживачами електричної енергії є засоби автоматики, асинхронні двигуни, панелі керування котлами, пальники та панелі їх керування, освітлення котельні.

Проект виробничо-опалювальної котельні виконаний згідно з системою стандартів безпеки праці (ССБП) і іншими нормативними документами, які вирішують питання дотримання вимог безпеки та виробничої санітарії.

При експлуатації котельні мають місце потенційно шкідливі та небезпечні виробничі фактори, які за певних умов можуть негативно впливати на здоров'я і безпеку праці персоналу котельні. В даному розділі запропоновані технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації котелень, а також основні заходи з гігієни праці та виробничої санітарії і пожежної безпеки котельні.

4.1 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації котельні

4.1.1 Вимоги безпеки до приміщення та розташування в ньому основного і допоміжного устаткування.

Площа віконних конструкцій, розглянутих як легко скидні конструкції при можливих вибухах, встановлених за котлами з боку відходячих димових газів становить 30 м^2.

Проектне розташування котлів задовольняє нормам приміщень для котлів та вимогам з проектування фірми-виробника. Відстань від виступаючих частин пальникових пристроїв до стіни, фронтальної для котлів 3,5 м, що задовольняє вимогам для котлів, що працюють на газоподібному паливі. Відстань від фронту котлів до протилежної стіни котельні 4,5 м, що не перевищує мінімально допустиму відстань згідно вимог з проектування фірми-виробника 4,6 м. Вільний прохід уздовж фронту котлів більше 1,5 м і встановлене устаткування не заважає їх обслуговуванню. Відстань від задньої стінки котла до стіни приміщення більше 1 м. Проходи в котельні мають вільну висоту більше 2м.

Допоміжне устаткування розташовується таким чином, щоб забезпечити максимальну доступність і зручність обслуговування. Забезпечено необхідну ширину проходів у світлі:

- між насосами, електродвигунами і стінкою – 1м;
- між допоміжними частинами устаткування і стінкою - 0,5м.
- навколо устаткування - 0,7м.

Для відводу димових газів служить димова труба, розташована поза приміщенням котельні висотою 30м. Труба призначена для створення штучної тяги для часткового подолання аеродинамічного опору відходячими димовими газами, та розсіювання останніх на висоті, для досягнення допустимої приземної концентрації шкідливих речовин.

4.1.2 Арматура, прилади та запобіжні пристрої по забезпеченню безпечної експлуатації котельні

Для керування роботою котлів і забезпечення безпечних режимів їхньої експлуатації вони обладнані:

- приладами, що запобігають підвищення тиску (запобіжні пристрої);
- манометрами;
- приладами для виміру температур середовищ;
- показниками рівня води;
- живильними пристроями.

Кожний елемент котла, внутрішній обсяг якого обмежений запірними органами, захищений запобіжними пристроями, які автоматично запобігають підвищення тиску вище, ніж на 10% розрахункового шляхом випускання робочого середовища в трубопроводи напірної каналізації (дренаж). Для цього в котлах використовуються запобіжні клапани пружинно-мембранного типу прямого дії. На кожний котел установлено по одному запобіжному клапану без проміжних запірних пристроїв. Запобіжні пристрої обладнані зливами в дренаж води при їхньому спрацьовуванні.

Для спостереження за тиском у теплогенераторі на нього встановлені манометри. На теплогенераторі манометри встановленні на вході води в теплогенераторі на виході нагрітої води з теплогенератора до запірного пристрою. Класс точності манометрів 2,5 (оскільки робочий тиск до 2,5 МПа), робочий діапазон середня третина шкали. На шкалу нанесена червона мітка номінального робочого тиску. Діаметр манометрів, установлених на висоті 2м

– 1000мм, а на висоті 2-5м 160мм. Манометрами контролюється тиск до і після циркуляційних насосів. Для забезпечення безпечної експлуатації

устаткування адміністрацією підприємства робиться перевірка манометрів за допомогою контрольного манометра кожні 6 місяців із записом у журнал контрольних перевірок і кожні 12 місяців робиться перевірка у контрольно-вимірювальних лабораторіях.

Для контролю температури використовуються біметалічні термометри. Розмір шкал термометрів дозволяє візуально контролювати температури теплоносія. Контроль температури ведеться на трубопроводах, що подають і зворотних трубопроводах, на трубопроводах до споживача та котлових трубопроводах. Припустима різниця температур між прямим і зворотним трубопроводами вказується на термометрі червоною рискою.

На газопроводі, що подає, у котельню встановлюється клапан - відсічник, що автоматично закривається при умовах загазованості котельні, спрацьовуванні системи пожежної сигналізації та при зникненні електроживлення котельні. Відкриття клапана відбувається одночасно з подачею електричної енергії на блок живлення клапана (за умови відсутності загазованості котельні). Блок керування та сигналізації встановлені в приміщенні котельні

Проектом передбачається встановлення необхідної запірної та регулюючої апаратури, зворотніх клапанів та повітрявідвідників у місцях, передбачених відповідними нормами.

4.1.3 Рекомендації по безпечній експлуатації газопроводів і трубопроводів котельні

Для безпечної експлуатації газообладнання передбачені продувні газопроводи та газопроводи безпеки з виводом вище даху будинку на 1 м. Продувка здійснюється за рахунок власного тиску газу. Продувні свічі загнуті на 180° щоб уникнути влучення атмосферних опадів. Для запобігання опіків обслуговуючого персоналу та зменшення теплових втрат трубопроводи, по яких рухається середовище з температурою вище 50°С разом із фланцевими з'єднаннями та арматурою вкриті тепловою ізоляцією. Трубопроводи пофарбовані по всій довжині у відповідні кольори. У приміщенні котельні вивішена схема трубопроводів в умовних кольорах і нумерацією вентилів і засувок. На

магістральних лініях трубопроводів зроблені наступні написи: номер магістралі римською цифрою та стрілка, що вказує напрямок руху.

Для газоходів і колекторів прийнята теплова ізоляція із прошивних мінераловатних матів в обкладках з металевої сітки товщиною 60-90мм ГОСТ 21880-94. Для трубопроводів прийняті циліндри теплоізоляційні з мінеральної вати на синтетичному сполучнику М-100 ГОСТ 23208-83. Зовні теплоізоляція покривається сталевим листом із оцинкованої талі товщиною 0,3-0,5 мм за ГОСТ 216131-76.

Для антикорозійного захисту поверхня трубопроводів покривається наступними захисними засобами:

- газоходи: зовнішня поверхня жаростійка емаль ПФ-837 ТУ 10-1309- 81 у два шари;
- трубопроводи ізольовані: зовнішня поверхня - фарба БТ-177 ОСТ 10-426-79 у два шари по ґрунтовці ГФ-121 за ГОСТ 25129-82;
- трубопроводи неізольовані: зовнішня поверхня олійною фарбою ГОСТ 8292-85 у два шари.

Прокладка трубопроводів здійснюється з врахуванням їх температурних розширень і напруг які з ними пов'язані. Трубопроводи кріпляться на рухомі та нерухомі опори. Теплові подовження компенсуються установкою компенсаторів, в якості яких також виступають повороти трубопроводів.

4.1.4 Заходи електробезпеки по безпечній експлуатації електроустаткування котельні

Тип електричної мережі, від якої живиться устаткування котельні (електродвигуни насосів, пальників; світильники робочого, аварійного, штучного та зовнішнього освітлення, повітряний опалювальний агрегат) - трифазна, четирьохпровідна електрична мережа напругою 380х220 V с глухозаземленою нейтраллю. По категорії умов небезпечності електротравматизма приміщення котельні відноситься до 3 категорії (згідно ОНТП 24-86 та ПУЕ) («Особливо небезпечне приміщення»), тому що є 2 фактора підвищеної небезпеки. До таких

факторів відносяться:

- можливістю контакту обслуговуючого персоналу з корпусом споживача електричної енергії та з металоконструкціями, що мають контакт із землею;
- наявність струмопровідної підлоги.

Основними споживачами електричної енергії є асинхронні двигуни, повітряні опалювальні агрегати, панелі керування котлами, пальники, освітлення котельні. По ступені надійності електропостачання (згідно ПУЕ) електроприймачі котельні відносяться до II категорії. Блоки загазованості та контролю наявності угарного газу відносяться до I категорії.

Силове електроустаткування (пристрої живлення, розподілу, тощо) розміщається в приміщенні котельні. Апаратами захисту в системі живлення є автоматичні вимикачі з максимально-струмовими або комбінованими роз'єднувачами. Пускова апаратура - магнітні пускачі. Силове устаткування, а так само пускова апаратура розміщені в щиті електроживлення. Апаратура сигналізації розташована в щиті реєстрації.

4.1.5 Технічні рішення по запобіганню електротравм від дотику до нормально струмоведучих частин

1) Ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно до вимог нормативів (відповідно до вимог опір ізоляції нового обладнання не менше 1 кОм на 1 V напруги).

2) Мережа, як силова, так і контрольна, прокладається по стінах, стелі та за допомогою опускних трубних чохлів. Силові магістралі та розподільчі мережі виконуються кабелями з мідними жилами та проводами в трубах і металевих рукавах. Зовнішні електропроводки виконані ізольованим проводом і розміщені на висоті 2,5 м над робочими місцями.

3) Передбачено використання захисних блоків електроустаткування, що забезпечує вимикання напруги час ремонту, техогляду, при потраплянні персоналу в небезпечну зону.

4) На електроустаткуванні присутні попереджуючі засоби помилкових дії при обслуговуванні та експлуатації - написи, таблички, що попереджають знаки,

сигналізація.

5) Стаціонарні мережі розеток 12 V для переносного освітлення, у системах місцевого освітлення та для ручного електроінструмента напруга 42 V;

4.1.6 Технічні рішення по запобіганню електротравм при переході напруги на нормально неструмоведучі частини

У зв’язку з тим що вся мережа трифазна, четирьохпровідна із глухозаземленою нетйраллю, то для усунення небезпеки поразки людини струмом, у випадку його дотику до неструмоведучих металевих частин електроустановок, що оказалися під напругою, згідно проектом передбачено використання занулення металевих корпусів електроустаткування, каркасів, щитів і шаф.

Метою занулення є усунення небезпеки поразкою електричним струмом персоналу при пробої на корпус устаткування однієї із фаз мережі.

Занулення устаткування організоване з'єднанням всіх металевих неструмоведучих частин устаткування з нулем мереж, тобто з нульовими провідниками по всьому колу. Спрацьовує захист від короткого замикання (автоматичний вимикач) - і ушкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно ПУЕ провідники занулення обрані таким чином, щоб забезпечити кратність струму, рівну трьом. Забезпечується цілісність нульового провідника та достатня його провідність - за рахунок вибору достатнього перерізу нульового провідника. Всі з'єднання нульового проводу виконані звареними. Нульовий провід приєднаний до корпусів електроприймачів зварюванням.

4.1.7 Засоби індивідуального захисту при обслуговуванні електроустаткування котельні, що проектується

При роботі з електроустаткуванням обслуговуючий персонал забезпечується діелектричними рукавичками, гумовими ботами, токовимірювальними кліщами, інструментами з ізольованими ручками; також використовують гумові килими та діелектричні підставки.

4.2 Технічні рішення та організаційні заходи з гігієни праці і виробничіої санітарії

4.2.1 Вибір, обґрунтування та забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату у приміщеннях котельні, що проектується

Основними факторами, які визначають мікроклімат на виробництві є:

1) температура повітря t,°C;
2) вологість повітря W,%;
3) швидкість руху повітря V, м/с;
4) інтенсивність теплових випромінювань, Вт/м^2.

Відхилення основних параметрів мікроклімату котельні можуть призвести до негативних наслідків, зокрема до погіршення самопочуття та захворювань які зменшують або унеможливлюють працездатність персоналу котельні. Тому основні параметри мікроклімату нормуються [6].

Нормовані параметри наведені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1

Допустимі та оптимальні параметри температури повітря, відносній вологості та рухливості повітря

Період року	Оптимальний (для щитового приміщення)			Допустимий (для приміщення котельні)		
	t, ^{o}C	W, %	V, м/с	t, ^{o}C	W, %	V, м/с
Теплий	22-24	40-60	0,2	21-28	60	0,1-0,3
Холодний	21-23	40-60	0,1	20-24	75	0,1-0,2

Для забезпечення необхідних нормативних параметрів мікроклімату проектом передбачено:

- теплова ізоляція теплотехнічного устаткування та трубопроводів в приміщенні котельні,
- що мають температуру поверхні - 45 °*C* ;
- використання природної та загальнообмінної механічної припливно-витяжної вентиляції: у холодний період року приплив повітря, що надходить на горіння - природній, витяжка - з дефлекторним спонуканням; у теплий період

року для асиміляції теплопритоків приплив повітря природний через фрамуги, що відкриваються, вікна, а витяжка механічна осьовими вентиляторами та природна через дефлектори.

- для підтримки необхідної температури в приміщеннях запроектована двотрубна тупикова система опалення. Як опалювальні прилади прийняті: у котельному залі повітряно-опалювальні агрегати, в прибудованих приміщеннях - радіатори . Теплоносієм для потреб опалення та вентиляції служить вода з параметрами 95-70 °С, одержувана від трубопроводів котельні. Магістральні трубопроводи опалення та теплопостачання повітронагрівачів необхідно ізолювати трубною ізоляцією із пінополіуретану.

4.2.2 Контроль складу повітря робочої зони приміщення котельні

Повітря робочої зони нормується по [6], де регламентується гранично припустима концентрація різних шкідливих речовин у повітрі котельні.

Процеси, що відбуваються в котельні, характеризуються наявністю шкідливих речовин, а саме можливі витоки природного газу.

Кількість газу в приміщенні не повинна перевищувати 1% об’єму всього приміщення (при 16% утворюється вибухонебезпечна суміш).

У приміщенні котельні передбачена установка газоаналізатора з датчиками контролю загазованості, які налаштовані на гранично допустиму концентрацію природного газу. Газоаналізатор має світлову та звукову сигналізації а також вихід на аварійне відключення подачі природного газу.

Для запобігання витоків газоподібних речовин фланцеві з'єднання газопроводів, по яких рухаються ці речовини ущільнюються паронітом.

Передбачений контроль за змістом шкідливих речовин у повітрі робочої зони, що здійснюється не рідше одного разу на місяць;

4.3 Забезпечення пожежної безпеки котельні, що проектується

4.3.1 Оцінка рівня пожежної небезпеки котельні, що проектується

У котельних небезпека виникнення пожеж пов'язана з наявністю: великих кількостей палива (природного газу), різних масел у системах змащення

технологічного устаткування та в електротехнічних установках; споживачів електроенергії власних потреб різної потужності та напруги; високих температур теплоносія, відхідних газів, поверхонь технологічного устаткування і трубопроводів.

Таким чином, джерела пожежі в котельні:

1) іскри, що утворяться при коротких замиканнях;

2) нагрівання електроустаткування при його перевантаженні;

3) вибух газу в топці котла.

Причиною пожежі в котельному відділенні може служити:

- утворення вибухонебезпечної суміші при змішанні природного газу та повітря;

- загоряння внаслідок нагрівання електроустаткування або електрокабелів

Категорія пожежної та вибухопожежної небезпеки приміщень котельні при використанні природного газу - "Г".

Відповідно до регламентації по ПУЕ, залежно від умов, у яких може утворитися вибухонебезпечна суміш, робочі зони котельні відносяться до класу В-1а, як приміщення, у якому вибухонебезпечна суміш не утворюється при нормальних умовах експлуатації устаткування, але може утворитися при аваріях і несправностях.

Показники пожежонебезпеки для газоподібного палива - природного газу згідно [11]:

- температура самозапалювання $I_{СВ}$= 550-750 °С;

- нижня концентраційна межа запалення $К_Н$= 3%;

- верхня концентраційна межа запалення $К_В$= 15%.

Суміш природного газу з повітрям відноситься до категорії ПА і групи ТІ.

4.3.2 Технічні рішення системи запобігання пожежі в котельні, що проектується

Технічні рішення системи запобігання пожежі спрямовані на запобігання утворення горючого середовища та недопущення виникнення в горючому

середовищі джерел запалювання:

1) У приміщенні котельні передбачена установка газоаналізатора з датчиками контролю загазованості по приміщеннях. Газоаналізатор має світлову та звукову сигналізації, а також вихід на аварійне відключення подачі природного газу.

2) Для продувки газопроводів передбачені продувні свічі і штуцери із запірними органами та заглушками для підведення продувного агента гнучким шлангом. Обмін забезпечується п'ятикратний не більше ніж за 20 хвилин. Трубопроводи для продувки газопроводів виводяться назовні в місце, що забезпечує умови розсіювання газу на 1 м вище верхньої точки будівлі. Проектом передбачені продувні свічі.

3) Застосування для горючих речовин герметичного устаткування; для цього газопроводи виконуються тільки з безшовних або електрозварних труб.

4) Арматура застосовується сталева класу герметичності за ТОСТ 9544-75.

5) На газопроводах установлюються: засувка з електроприводом, штуцер для продувки, швидкодіючий запірний орган з дистанційним електричним і ручним керуванням.

6) Всі газопроводи заземлені.

7) Електродвигуни приводів насосів і вентиляції виконанні у вибухозахищеному виконанні.

8) У якості блискавкоприймача згідно [12] служать металеві конструкції споруджень, металоконструкції на димовій трубі на відм. 30 м. Захист від прямих ударів блискавки у димову трубу здійснюється шляхом приєднання її до штучного заземлення.

4.4 Охорона та безпека в надзвичайних ситуаціях

Водогрійний котел, що працює на твердому паливі, класифікується як об’єкт підвищеної небезпеки, експлуатація якого вимагає суворого дотримання заходів безпеки та повної готовності до оперативного реагування на будь-які надзвичайні ситуації. У разі раптової відмови систем автоматики, що може бути об'єктивно

спричинена як випадковим апаратним збоєм, так і спланованою кібератакою, здатні миттєво виникнути критичні аварійні ситуації. До спектра таких небезпечних інцидентів належать недопустимий перегрів трубної системи, неконтрольоване загоряння залишків палива та накопиченої сажі в димоході, що в кінцевому підсумку здатне призвести до руйнівного теплового вибуху всієї котельної установки.

З метою надійного запобігання розвитку надзвичайних ситуацій та гарантованого захисту робочого персоналу, котельня обладнана комплексною багаторівневою системою протиаварійного захисту. Кожен відповідальний елемент котла захищений спеціальними запобіжними пристроями, зокрема пружинно-мембранними клапанами, які автоматично запобігають небезпечному підвищенню тиску вище ніж на 10% від розрахункового номіналу шляхом безпечного скидання робочого середовища в дренажну систему. Водночас, у разі виникнення загазованості приміщення, спрацювання датчиків пожежної сигналізації або раптового зникнення електроживлення, система автоматики миттєво ініціює спрацювання швидкодіючого клапана-відсікача з електроприводом, який повністю припиняє подачу палива, зокрема природного газу, що використовується для підтримання режимів горіння.

У випадку безпосереднього виникнення надзвичайної ситуації, такої як пожежа, загроза вибуху або критичний витік газу, оперативний персонал зобов'язаний діяти за чітко регламентованим алгоритмом. Насамперед, при спрацюванні світлозвукової сигналізації газоаналізатора або загальної системи пожежної безпеки, черговий оператор повинен негайно ідентифікувати та оцінити реальний масштаб загрози. Якщо автоматична система управління не виконала повне захисне блокування обладнання через можливе кібервтручання або апаратну відмову, оператор має негайно задіяти механізми ручного або дистанційного керування для екстреної зупинки агрегату, примусового закриття повітряних заслінок, а також повного відключення дуттьових вентиляторів і механізмів паливоподачі. Крім того, для прискореного безпечного охолодження топки та ефективного погашення вогню може бути додатково використаний димосос, примусово переведений у ручний режим керування.

У разі неможливості швидко та безпечно локалізувати аварію первинними засобами пожежогасіння, весь присутній персонал повинен негайно покинути небезпечну зону виробничого приміщення. Для забезпечення швидкої та безперешкодної евакуації людей, архітектурним проектом передбачено вільний прохід уздовж фронту котлів шириною понад 1,5 метра, а всі евакуаційні проходи в котельні мають вільну висоту більше 2 метрів. Після успішного виходу в безпечну зону працівники зобов'язані викликати підрозділи Державної служби з надзвичайних ситуацій та оперативно повідомити керівництво підприємства про інцидент. Враховуючи той факт, що сучасні промислові системи управління успадкували всі вразливості класичних IT-інфраструктур, надзвичайна ситуація на об'єкті може мати складний кіберфізичний характер. Тому, при найменшій підозрі або виявленні несанкціонованого втручання в роботу SCADA-системи чи перехоплення керуючого мережевого трафіку, оперативний персонал повинен негайно фізично відключити контролер локального рівня від зовнішньої корпоративної мережі та перевести котельну установку на повністю автономне локальне ручне керування за допомогою HMI-панелі до моменту повного усунення кіберзагрози.

Висновок до розділу 4

У четвертому розділі було проаналізовано та розроблено комплекс заходів з охорони праці, виробничої санітарії, пожежної безпеки та алгоритмів дій у надзвичайних ситуаціях при експлуатації промислового котлоагрегата. Для забезпечення безпеки експлуатації обладнання запропоновано просторові та організаційні рішення щодо безпечного розташування котлів і допоміжного устаткування. Вони гарантують необхідну ширину проходів, зокрема наявність вільного проходу більше 1,5 м уздовж фронту котлів. З метою надійного контролю та безаварійної роботи передбачено обов'язкове оснащення теплогенераторів пружинно-мембранними запобіжними клапанами, манометрами та біметалічними термометрами.

Окрему увагу приділено питанням електробезпеки. Оскільки приміщення котельні відноситься до особливо небезпечних (3 категорія небезпеки),

розроблено комплекс технічних заходів для захисту персоналу від ураження електричним струмом. Ці заходи включають надійну ізоляцію струмоведучих частин, використання механізмів захисного вимикання, занулення металевих корпусів устаткування, а також суворе забезпечення працівників діелектричними засобами індивідуального захисту, такими як рукавиці, боти та килимки.

У контексті гігієни праці та створення безпечних умов для персоналу визначено вимоги до мікроклімату в робочій зоні. Для підтримання нормативних параметрів застосовується теплова ізоляція трубопроводів, двотрубна тупикова система опалення та комбінована припливно-витяжна вентиляція. Крім того, встановлення промислових газоаналізаторів гарантує постійний контроль за вмістом природного газу в повітрі, надійно запобігаючи перевищенню його гранично допустимої концентрації.

Значну частину розділу присвячено пожежній безпеці, адже приміщення котельні віднесене до категорії "Г" з пожежної та вибухопожежної небезпеки, а робочі зони — до класу В-1а. Запобігання виникненню пожеж забезпечується низкою технічних рішень, серед яких ключовими є автоматичне відключення подачі газу за допомогою клапана-відсікача при виявленні загазованості, застосування герметичних безшовних газопроводів, використання електродвигунів виключно у вибухозахищеному виконанні та встановлення надійних блискавкоприймачів.

Наостанок було опрацьовано чіткий регламент дій оперативного персоналу на випадок виникнення надзвичайних ситуацій та критичних інцидентів, таких як перегрів трубної системи, загоряння чи цілеспрямовані кібератаки на автоматизовані системи управління. У роботі детально визначено порядок аварійної ручної зупинки обладнання, швидкої евакуації працівників з небезпечної зони, а також процедуру фізичного відключення локальних контролерів від зовнішньої корпоративної мережі для безпечного переходу на автономне керування у разі виявлення кіберзагроз.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі успішно вирішено актуальне науково-практичне завдання, яке полягає у розробці комплексної системи автоматичного керування промисловим водогрійним котлоагрегатом на прикладі твердопаливного агрегату КВм-1,75 із застосуванням алгоритмів протиаварійного захисту та сучасних засобів кібербезпеки. У ході дослідження було детально проаналізовано технологічний процес роботи котлоагрегату, що базується на ефективній технології «ступеневого спалювання» деревини. Цей метод дозволяє максимізувати тепловий коефіцієнт корисної дії та суттєво знизити обсяги токсичних викидів в атмосферу. Водночас виявлено, що глибока інтеграція автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) із глобальними корпоративними мережами (ERP) неминуче створює серйозні інформаційні та кібернетичні загрози. Це, у свою чергу, обумовлює нагальну необхідність розробки надійної системи керування, фундаментом якої є стійкі алгоритми протиаварійного захисту.

Практична цінність роботи полягає у здійсненні комплексної розробки як локального, так і супервізорного рівнів програмно-технічного комплексу засобів автоматизації (ПТКЗА). Локальний (польовий) рівень управління побудовано на базі сучасного програмованого логічного контролера Siemens S7-300. Використовуючи інженерне середовище TIA Portal V15, для нього було реалізовано алгоритми автоматичного ПІ-регулювання трьох ключових контурів: стабілізації загального теплового навантаження, підтримання оптимального розрідження в топковому просторі та екологічної оптимізації вмісту вільного кисню у відхідних газах. Супервізорний (верхній) рівень представлено повнофункціональною SCADA-системою, розробленою в програмному комплексі SIMATIC WinCC. У ній створено інтуїтивно зрозумілий людино-машинний інтерфейс (HMI) із детальними графічними мнемосхемами, який надійно забезпечує дистанційне управління агрегатом, безперервний контроль динамічних трендів, ведення історичних архівів та миттєвий моніторинг усіх аварійних сигналів.

Особливу увагу в дослідженні приділено організації кібербезпеки. Для надійного захисту промислової мережі від несанкціонованих зовнішніх втручань запропоновано та обґрунтовано архітектуру сегментації з використанням ізольованої демілітаризованої зони (DMZ) та технології віртуальних приватних мереж (OpenVPN). Основним вузлом безпеки на межі інформаційних доменів обрано промисловий міжмережевий екран Siemens SCALANCE S623, який жорстко налаштовано за принципом «білого списку». Крім того, застосовано гнучку модель керування віддаленим доступом на основі розподілу ролей (RBAC), а всі процеси аутентифікації та реєстрації дій оперативного персоналу надійно реалізовані через інтегрований модуль SIMATIC Logon та спеціалізований захищений журнал аудиту WinCC-Audit.

Невід'ємною складовою проекту стала розробка комплексу заходів з охорони праці, виробничої санітарії, електро- та пожежної безпеки для приміщення котельні, яка класифікується як об'єкт підвищеної небезпеки (категорія "Г", клас зони В-1а). У роботі передбачено надійні апаратні рішення протиаварійного захисту, зокрема встановлення запобіжних пружинно-мембранних клапанів та швидкодіючих клапанів-відсікачів подачі палива при виявленні загазованості. Також сформовано чіткий регламент дій оперативного персоналу у випадках критичних інцидентів, таких як перегрів системи, пожежа або виявлення цілеспрямованої кіберфізичної атаки на SCADA-систему. У підсумку, спроектована система автоматичного керування повністю відповідає найсуворішим сучасним вимогам до промислової автоматизації. Вона не лише безперебійно гарантує підтримку оптимальних та енергоефективних режимів горіння котлоагрегату, але й забезпечує комплексний, багаторівневий захист усього об'єкта як від внутрішніх технологічних аварій, так і від зовнішніх кіберзагроз.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація технологічних процесів і виробництв / [Жученко А. І., Пупена О. М., Ельперін І. В.]: Підручник. — Київ: 2015. — 410 с.
2. Комп'ютерні системи управління технологічними процесами / [Денисенко В. В.]: Навчальний посібник. — Львів: 2011. — 450 с.
3. Проектування систем автоматизації / [Трегуб В. Г.]: Підручник. — Київ: 2014. — 343 с.
4. Основи автоматизації теплоенергетичних процесів / [Рожков В. А., Бойко Є. А.]: Навчальний посібник. — Харків: 2013. — 290 с.
5. Автоматизовані системи управління теплоенергетичними процесами / [Кулаков Г. Т.]: Підручник. — Київ: 2008. — 315 с.
6. Теплотехніка та теплоенергетичні установки / [Племянніков М. М.]: Навчальний посібник. — Одеса: 2014. — 280 с.
7. Експлуатація котельних установок / [Іванов В. А., Ковальчук О. П.]: Підручник. — Львів: 2011. — 350 с.
8. Системи автоматичного керування / [Кондратенко Ю. П.]: Навчальний посібник. — Миколаїв: 2012. — 380 с.
9. Теорія автоматичного керування / [Попович М. Г., Ковальчук О. В.]: Підручник. — Київ: 2007. — 656 с.
10. Основи автоматизації технологічних процесів / [Ладанюк А. П.]: Підручник. — Вінниця: 2010. — 224 с.
11. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах / [Пупена О. М., Лут М. Т.]: Навчальний посібник. — Київ: 2011. — 500 с.
12. Automating with SIMATIC S7-300 inside TIA Portal: Configuring, Programming and Testing / [Berger H.]: Монографія. — Erlangen: 2014. — 739 p.
13. Програмування контролерів SIMATIC S7 / [Канцедал В. М.]: Навчальний посібник. — Харків: 2015. — 210 с.
14. SIMATIC WinCC V15: System Manual / [Siemens AG]: Технічний посібник. — Nuremberg: 2018. — 850 p.
15. SIMATIC S7-300 CPU 31xC and CPU 31x: Hardware and Installation / [Siemens

AG]: Технічний посібник. — Nuremberg: 2014. — 320 p.
16. Технології SCADA-систем / [Гнатушенко В. В.]: Навчальний посібник. — Дніпро: 2017. — 230 с.
17. SCADA системи: архітектура та проектування / [Бойко В. І.]: Навчальний посібник. — Київ: 2018. — 250 с.
18. Промислові контролери та мережі / [Кліменко О. В.]: Навчальний посібник. — Запоріжжя: 2016. — 180 с.
19. Програмовані логічні контролери / [Степанець В. В.]: Підручник. — Київ: 2019. — 275 с.
20. Людино-машинний інтерфейс в автоматизованих системах / [Мірошник О. М.]: Навчальний посібник. — Харків: 2016. — 195 с.
21. Advanced PLC Hardware & Programming / [Erickson K. T.]: Підручник. — Research Triangle Park: 2014. — 380 p.
22. Programmable Logic Controllers / [Petruzella F. D.]: Підручник. — New York: 2016. — 416 p.
23. Системи диспетчерського управління та збору даних / [Томашевський О. М.]: Навчальний посібник. — Вінниця: 2015. — 210 с.
24. Автоматизація на базі платформи TIA Portal / [Коваленко О. І.]: Підручник. — Львів: 2020. — 340 с.
25. Інтеграція АСК ТП та корпоративних інформаційних систем / [Марченко В. В.]: Монографія. — Київ: 2018. — 220 с.
26. Кібербезпека автоматизованих систем управління технологічними процесами / [Бойченко О. В., Громов В. В.]: Навчальний посібник. — Київ: 2020. — 195 с.
27. Industrial Network Security: Securing Critical Infrastructure / [Knapp E. D., Langill J. T.]: Монографія. — Syngress: 2014. — 480 p.
28. Захист інформації в SCADA-системах / [Коваленко А. А.]: Навчальний посібник. — Львів: 2018. — 180 с.
29. Інформаційна безпека в промислових мережах / [Лук'яненко А. В.]: Підручник. — Харків: 2019. — 215 с.
30. Cybersecurity for Industrial Control Systems / [Macaulay T., Singer B.]: Монографія. — Boca Raton: 2012. — 220 p.

31. Industrial Security: SCALANCE S623 Configuration Manual / [Siemens AG]: Технічний посібник. — Nuremberg: 2017. — 150 p.
32. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security / [Stouffer K., Pillitteri V., Lightman S.]: Спеціальна публікація NIST. — Gaithersburg: 2015. — 247 p.
33. Handbook of SCADA/Control Systems Security / [Radvanovsky R., Brodsky J.]: Довідник. — Boca Raton: 2013. — 380 p.
34. Кібербезпека критичної інфраструктури / [Рубан І. В.]: Навчальний посібник. — Харків: 2021. — 270 с.
35. Віртуальні приватні мережі (VPN) та їх налаштування / [Петров А. А.]: Навчальний посібник. — Київ: 2018. — 190 с.
36. Налаштування та експлуатація промислових брандмауерів / [Кузнецов В. В.]: Навчальний посібник. — Дніпро: 2019. — 145 с.
37. Cryptography and Network Security: Principles and Practice / [Stallings W.]: Підручник. — Pearson: 2016. — 750 p.
38. Cisco CCNA Routing and Switching: Official Cert Guide / [Odom W.]: Практичний посібник. — Indianapolis: 2013. — 800 p.
39. Захист інформації в комп'ютерних системах та мережах / [Гнатюк С. О.]: Підручник. — Харків: 2017. — 310 с.
40. Демілітаризовані зони в індустріальних мережах / [Литвин В. О.]: Монографія. — Одеса: 2019. — 175 с.
41. Протиаварійний захист систем автоматизації / [Грувер С. М.]: Навчальний посібник. — Одеса: 2016. — 160 с.
42. Надійність та безпека функціонування АСК ТП / [Мельник В. І.]: Підручник. — Львів: 2015. — 210 с.
43. Safety Instrumented Systems: Design, Analysis, and Justification / [Gruhn P., Cheddie H.]: Практичний посібник. — Research Triangle Park: 2006. — 330 p.
44. ДСТУ EN 61131-3:2015. Програмовані контролери. Частина 3. Мови програмування / [ДП «УкрНДНЦ»]: Стандарт. — Київ: 2016. — 250 с.
45. ДСТУ IEC 62443-1-1:2019. Мережі комунікаційні промислові. Захищеність мережі та системи / [ДП «УкрНДНЦ»]: Стандарт. — Київ: 2020. — 80 с.
46. ДСТУ EN 61508-1:2018. Функціональна безпечність програмованих

електронних систем / [ДП «УкрНДНЦ»]: Стандарт. — Київ: 2019. — 120 с.
47. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском / [Держпраці]: Нормативний документ— Київ: 2018— 90 с.
48. Газоаналітичні системи контролю відхідних газів / [Рябенький В. М.]: Навчальний посібник. — Вінниця: 2014. — 160 с.
49. Instrument Engineers' Handbook: Process Control and Optimization / [Liptak B. G.]: Довідник. — Boca Raton: 2005. — 2464 p.
50. ДСТУ ISO/IEC 27001:2015. Інформаційні технології. Методи захисту. Системи управління інформаційною безпекою / [ДП «УкрНДНЦ»]: Стандарт. — Київ: 2016. — 50 с.