МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Кваліфікаційна робота

бакалавр

(рівень вищої освіти)

на тему Проект автоматизації регенеративного нагрівального колодязя в умовах металургійного підприємства. САР температури в робочому просторі

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1511

спеціальності 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно - інтегровані технології

(назва освітньої програми)

спеціалізації _____

(код і назва спеціальності)

Загородній Дмитро Костянтинович

(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н. доцент Барінченко О.М.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Директор ТОВ „Електротехмаш" Курілець І.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти бакалавр
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Коваленко В. Л.
"____" _____ 20___ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)
Загороднєву Дмитру Костянтиновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проект автоматизації регенеративного нагрівального колодязя в умовах металургійного підприємства. САР температури в робочому просторі.
Керівник роботи к.т.н. доцент Бар'яхтенко Олена Миколаївна,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "27" грудня 2024 року № 2029-с
2. Строк подання студентом роботи 18.06.2025
3. Вихідні дані до роботи Регенеративний нагрівальний колодязь, функціональна схема автоматизації, Принципова електрична схема

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Анотація, вступ, розділ 1, розділ 2, розділ 3, розділ 4, розділ 5, розділ 6, розділ 7, розділ 8, висновок, Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) ФСА, схема інформаційних та матеріальних потоків, Принципова схема САР, схема щита КВП і А, Принципова електрична схема живлення схема зовнішніх з'єднань, монтажно-комутаційна схема

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
розділ 1	Борішенко О.М. доцент к.т.н		
розділ 2	Борішенко О.М. доцент к.т.н		
розділ 3	Борішенко О.М. доцент к.т.н		
розділ 4	Борішенко О.М. доцент к.т.н		
розділ 5	Борішенко О.М. доцент к.т.н		
розділ 6,7,8	Борішенко О.М. доцент к.т.н		

7. Дата видачі завдання 01.03.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	26.05.2025-01.06.2025	виконано
2.	Аналіз регенеративного нагрівального конд.	01.06.2025-09.06.2025	виконано
3.	Розробка технічного завдання	10.06.2025-16.06.2025	виконано
4.	Розробка технічної документації	10.06.2025-16.06.2025	виконано
5.	Розрахунок надійності СА	10.06.2025-16.06.2025	виконано
6.	Охорона праці	17.06.2025-18.06.2025	виконано
7.	Висновок	17.06.2025-18.06.2025	виконано

Студент ЗД (підпис) Загородніев Д.К (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (підпис) Борішенко О.М. (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер (підпис) Овчинникова І.А. (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Загороднєв Д. К. Проєкт автоматизації регенеративного нагрівального колодязя в умовах металургійного підприємства. Система автоматичного регулювання температури в робочому просторі.

Кваліфікаційна робота для отримання ступеня вищої освіти бакалавра за спеціальністю 151 - Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології, науковий керівник О.М. Барішенко. Запорізький національний університет, інженерний навчально-науковий інститут. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025.

Розглянуто процес проєктування та реалізації автоматизованої системи управління для нагрівального регенеративного колодязя, який широко застосовується в металургії з метою термічної обробки металевих заготовок. Встановлено основні технічні параметри об’єкта автоматизації. Проаналізовано сучасний стан управління технологічним процесом на підприємствах України та здійснено його порівняння з передовими світовими практиками.

Сформульовано функціональні та технічні вимоги до системи автоматичного контролю температури. Розроблено структурну, функціональну та принципову електричну схеми системи. Обґрунтовано вибір апаратного та програмного забезпечення із застосуванням сучасних ПЛК-контролерів та SCADA-систем.

Виконано розрахунок показників надійності системи, а також проведено техніко-економічний аналіз доцільності впровадження, результати якого засвідчують ефективність і швидку окупність запропонованого рішення.

Ключові слова: регенеративний нагрівальний колодязь, регулювання температури, автоматизовані системи управління.

ABSTRACT

Zahorodniev D.K. Project for the Automation of a Regenerative Heating Furnace in the Conditions of a Metallurgical Enterprise. Automatic Temperature Control System in the Working Area.

Qualification thesis for obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 - Automation and Computer-Integrated Technologies. Scientific advisor: O. M. Baryshenko. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Research Institute. Faculty of Metallurgy, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2025.

This thesis discusses the design and implementation process of an automated control system for a regenerative heating furnace, which is widely used in metallurgy for the heat treatment of metal billets. The main technical parameters of the automation object are established. The current state of process control in Ukrainian industrial enterprises is analyzed and compared to leading global practices.

Functional and technical requirements for the automatic temperature control system are formulated. Structural, functional, and schematic electrical diagrams of the system are developed. The selection of hardware and software is justified, including the use of modern PLC controllers and SCADA systems.

A reliability analysis of the system has been performed, along with a techno-economic feasibility study. The results confirm the efficiency and rapid return on investment of the proposed solution.

Keywords: REGENERATIVE HEATING FURNACE, TEMPERATURE CONTROL, AUTOMATED CONTROL SYSTEMS.

ЗМІСТ

ВСТУП 8

1 ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ 13

1.1 Технологічний агрегат і алгоритм його роботи 13

1.2 Технологічний процес як об’єкт автоматизації 16

1.3 Аналіз існуючого рівня автоматизації на діючому виробництві 18

1.4 Розробка схем матеріальних та інформаційних потоків 21

1.5 Стан рівня автоматизації на аналогічних об’єктах підприємств України та зарубіжжя 23

1.6 Недоліки існуючої системи управління 27

2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ 30

2.1 Вимоги до системи в цілому 30

2.2 Вимоги до функцій (задач), які виконує система 33

2.3 Вимоги до видів забезпечення 44

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 49

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної структури СА 49

3.2 Визначення принципів управління по кожному технологічному параметру 51

3.3 Вибір (розробка) математичної моделі системи управління 53

3.4 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня системи автоматизації 54

4 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ 60

4.1 Функціональна схема автоматизації 60

4.2 Принципова електрична схема відповідно зі специфікаціями 61

4.3 Принципова електрична схема живлення 63
4.4 Принципова електрична схема сигналізації, блокування та захисту 64
4.5 Монтажна схема щита КВПіА або приладової шафи 68
4.6 Зовнішній вигляд щита (шафи) та вид на внутрішні панелі 69
4.7 Схема зовнішніх з'єднань 70
5 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ 75
6 ЗАМОВНА СПЕЦИФІКАЦІЯ НА КОМПЛЕКС ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ .. 78
7 ОРГАНІЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ 80
7.1 Організаційне забезпечення 80
7.2 Розрахунок техніко-економічних показників 82
8 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ 87
ВИСНОВОК 89
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 90
ДОДАТКИ 92

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку промисловості питання підвищення ефективності виробничих процесів стає особливо важливим. У контексті глобальних тенденцій енергозбереження, автоматизація технологічних процесів розглядається як один з ключових напрямів вдосконалення функціонування підприємств важкої промисловості. Особливо актуально це для металургійної галузі, де відзначається високий рівень енергоємності та складність технологічних операцій, наприклад, нагрівання заготовок у регенеративних колодязях.

Регенеративні нагрівальні колодязі використовуються для нагрівання металевих заготовок перед їхньою подальшою деформацією у прокатних станах або пресах. Вони є необхідним елементом технологічного циклу багатьох металургійних підприємств. Ефективна організація процесу нагрівання прямо впливає на якість продукції, довговічність обладнання та рівень споживання енергоносіїв. Людський фактор, застарілі системи управління, відсутність зворотного зв’язку між параметрами нагріву та керуючими сигналами призводять до нестабільності процесу, втрат тепла, збільшення відсотку браку та нераціонального використання палива.

У зв'язку з цим, автоматизація процесів нагрівання в регенеративних колодязях є обґрунтованою потребою сьогодення. Вона дозволяє не тільки зменшити експлуатаційні витрати, а й підвищити продуктивність систем, забезпечити стабільний контроль температурних режимів, мінімізувати участь людини та забезпечити гнучкість керування відповідно до змін у виробничих умовах. Впровадження сучасних систем автоматизованого управління, з використанням мікропроцесорної техніки, програмованих логічних контролерів (ПЛК), датчиків температури та витрати газу, дозволяє поліпшити якість управління, підняти точність і надійність технологічного процесу на новий рівень.

Отже, розробка автоматизованої системи управління нагрівальним регенеративним колодязем має не тільки наукову, але й практичну значущість, що визначає актуальність обраної теми кваліфікаційної роботи бакалавра.

Мета та завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є створення сучасної автоматизованої системи керування (АСК) нагрівальним регенеративним колодязем. Це має забезпечити оптимізацію технологічного процесу нагрівання металевих заготовок, впроваджуючи ефективний контроль параметрів, зменшення енерговитрат, збільшення безпеки та підтримку стабільного функціонування агрегату. Для реалізації визначеної мети у кваліфікаційній роботі бакалавра передбачено такі завдання:

- Здійснити техніко-технологічний аналіз об'єкта автоматизації – регенеративного нагрівального колодязя;
- Проаналізувати поточний рівень автоматизації технологічного процесу на існуючому підприємстві;
- Визначити ключові недоліки наявної системи керування;
- Сформувати технічне завдання для створення автоматизованої системи;
- Обрати оптимальні технічні засоби автоматизації нижнього рівня (сенсори, приводи, контролери);
- Спроектувати функціональну та принципову схеми системи автоматизації;
- Провести аналіз надійності запропонованої системи;
- Обґрунтувати техніко-економічну ефективність впровадження проєкту;
- Розробити технічну документацію на систему;

Оцінити питання охорони праці та техніки безпеки під час роботи з АСК. Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є створення сучасної автоматизованої системи керування (АСК) нагрівальним регенеративним колодязем. Це має забезпечити оптимізацію технологічного процесу

нагрівання металевих заготовок, впроваджуючи ефективний контроль параметрів, зменшення енерговитрат, збільшення безпеки та підтримку стабільного функціонування агрегату. Для реалізації визначеної мети у кваліфікаційній роботі бакалавра передбачено такі завдання:

- Здійснити техніко-технологічний аналіз об'єкта автоматизації – регенеративного нагрівального колодязя;
- Проаналізувати поточний рівень автоматизації технологічного процесу на існуючому підприємстві;
- Визначити ключові недоліки наявної системи керування;
- Сформувати технічне завдання для створення автоматизованої системи;
- Обрати оптимальні технічні засоби автоматизації нижнього рівня (сенсори, приводи, контролери);
- Спроектувати функціональну та принципову схеми системи автоматизації;
- Провести аналіз надійності запропонованої системи;
- Обґрунтувати техніко-економічну ефективність впровадження проєкту;
- Розробити технічну документацію на систему;

Оцінити питання охорони праці та техніки безпеки під час роботи з АСК.

Об’єкт і предмет автоматизації. В рамках цього дослідження: Об’єктом автоматизації виступає нагрівальна регенеративна піч – теплотехнічне обладнання, що призначене для нагрівання металевих виробів до визначеної температури перед їх наступною деформацією.

Предметом автоматизації є система керування температурним режимом, котра передбачає регулювання подачі палива, повітря, моніторинг температури в зонах нагрівання, а також відображення інформації на диспетчерському пункті або на місцевому щиті управління.

Процес нагрівання демонструє складну динаміку, що спричинена інерційністю об’єкта, впливом навколишніх чинників, а також потребує

багатоточкового контролю температурних показників. Це зумовлює необхідність застосування адаптивних методів регулювання з можливістю самоналаштування системи.

Метод дослідження. В кваліфікаційній роботі бакалавра використано комплексний підхід до дослідження об'єкта автоматизації, зокрема:

- Аналіз діючої системи на підприємстві, включаючи виявлення проблем та порушень;
- Системний аналіз технологічного процесу та функціональних вимог;
- Методи моделювання та синтезу автоматизованої системи;
- Вибір та обґрунтування технічних засобів за техніко-економічними критеріями;
- Оцінка надійності та життєвого циклу системи;
- Нормативна база, включаючи вимоги ДСТУ, ПУЕ, ПБЕЕС та ін.

Методика розрахунку ґрунтується на аналізі технічних параметрів устаткування, застосуванні емпіричних формул для обчислення теплових втрат, та використанні статистичних відомостей для прогнозування ефективності системи.

Практична значущість. Результати кваліфікаційної роботи бакалавра мають практичне спрямування та можуть бути реалізовані у вигляді проектного рішення на підприємствах металургійної промисловості, які використовують регенеративні нагрівальні агрегати.

Практична цінність полягає у наступному:

- можливість модернізації існуючої системи управління з мінімальними витратами;
- зниження витрат природного газу на 10–15 %;
- підвищення рівня технологічної безпеки (своєчасна сигналізація про аварійні режими);
- скорочення часу нагріву та зменшення простоїв обладнання;
- забезпечення інтеграції з іншими елементами автоматизованої системи управління виробництвом (АСУ ТП);

- підвищення точності дотримання температурних режимів, що позитивно впливає на якість кінцевої продукції.

1 ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний агрегат і алгоритм його роботи

Загальна характеристика агрегата. Нагрівальна регенеративна шахтна піч — ключовий теплотехнічний пристрій, що широко використовується в металургії для термічного оброблення металевих напівфабрикатів перед процесами деформації: прокаткою, куванням чи пресуванням. Її головна задача – рівномірний нагрів заготівлі до необхідної температури, відповідно до температурної кривої, зазначеної в технічній карті виробу. Висока точність контролю температурних параметрів сприяє стабільному виробництву якісної кінцевої продукції. Щодо конструкції, регенеративна шахтна піч – це футерована вогнетривким термостійким матеріалом вертикальна або горизонтальна камера, оснащена механізмами для завантаження та вивантаження металевих заготовок, пальниковою системою для спалювання палива, системою регенерації тепла, а також додатковими компонентами, як-от засувки, датчики, контрольно-вимірювальні прилади (КВП) та димовідвід.

Конструктивні елементи. Основними складовими нагрівального регенеративного колодязя є: Камера нагріву – герметично закрита футерована ємність, здатна витримувати високі температури та агресивні середовища. Пальникова система – включає газові або мазутні пальники, що створюють необхідну теплову потужність. Сучасні пальники забезпечують можливість модуляції полум’я.

Регенератори – теплообмінники, що акумулюють теплоту з димових газів для подальшого підігріву повітря, яке подається до пальників. Це суттєво підвищує ККД агрегата.

Димовідвідна система – канали для відведення продуктів згоряння, які можуть бути оснащені вентиляторами або дефлекторами.

Завантажувальні пристрої – маніпулятори, тельфери або крани для подачі/вивантаження заготовок.

Клапани та засувки – елементи керування потоками газу, повітря та димових газів. КВПіА – первинні та вторинні прилади, які забезпечують контроль температури, тиску, витрати, складу газу тощо.

Технологічний цикл роботи агрегата. Робота регенеративного колодязя циклічна і включає в себе такі ключові етапи:

Завантаження заготовок. Металеві заготовки подаються в камеру нагрівання через верхній чи бічний люк. Усі операції виконуються механізованими засобами, що забезпечує рівномірне розподілення заготовок у камері.

Початковий обдув та підігрів. Після завантаження, здійснюється увімкнення пальників у режимі попереднього обігріву. Мета — усунути залишкову вологу, підвищити температуру камери до точки початку інтенсивного нагрівання.

Основна фаза нагрівання. За допомогою автоматизованої системи керування регулюється подача палива та повітря. Нагрівання відбувається поступово з дотриманням температурної кривої: первинне нагрівання, рівномірне підвищення температури, досягнення необхідного рівня (зазвичай у діапазоні 1150–1250 °C).

Витримка при температурі. Після досягнення цільової температури заготовки витримуються у визначеному тепловому режимі протягом розрахованого часу. У цей період активується система моніторингу температури з кількох точок камери.

Регенерація тепла. Після завершення фази нагрівання потоки повітря та газів перемикаються: регенератори, що акумулювали тепло від димових газів, починають підігрівати свіже повітря. Цикл повторюється кожні 10–15 хвилин. Це дозволяє збільшити ефективність використання тепла до 80–90 %.

Вивантаження нагрітих заготовок. Нагріті заготовки витягуються з камери автоматизованими механізмами для подальшого транспортування на

прокатні стани або ковальсько-пресові агрегати.

Очищення та охолодження. Після завершення партії агрегат переходить у режим охолодження або технічного обслуговування. Часто, перед новим циклом виконується очищення футерівки та перевірка КВП.

Алгоритм керування. Алгоритм роботи регенеративного колодязя базується на багатоетапному контролі параметрів у замкнутому контурі автоматичного регулювання:

- зчитування температури з термопар у контрольних точках;
- порівняння із заданим графіком нагріву (темп приросту + кінцева температура);
- генерація керуючого сигналу (ПІД-регуляція);
- подача сигналу на виконавчі механізми (електроклапани, приводи);
- контроль коректності спрацьовування;
- реєстрація та архівація параметрів.

Тепловий ККД і енергоефективність. Завдяки впровадженню регенераторів та автоматизованого управління можливе досягнення теплового ККД понад 80 %, що перевищує показники звичайних камерних печей. За оцінками, автоматизація дозволяє:

- зменшити витрати палива на 12–18 %;
- знизити аварійність на 30 %;
- підвищити точність дотримання температурного режиму до ±5 °C.

Отже, нагрівальний регенеративний колодязь – це складний динамічний механізм, який характеризується значною інерційністю, багатозонністю та чутливістю параметрів. Його результативна робота безпосередньо залежить від якості автоматизованого процесу нагрівання, зокрема від точності вимірювань, безвідмовності виконавчих пристроїв та рівня керуючого програмного забезпечення. Саме тому автоматизація цього об'єкта є пріоритетною задачею в контексті технічного оновлення металургійних виробництв.

1.2 Технологічний процес як об’єкт автоматизації

Автоматизація технологічних процесів у металургійній галузі є одним з ключових факторів, що впливає на ефективність, безпеку та якість виробництва. У контексті нагрівального регенеративного колодязя технологічний процес вирізняється складністю, інерційністю, багатопараметричністю та потребує ретельного контролю й точного регулювання. Процес нагрівання передбачає переведення металевих заготовок зі стану кімнатної температури до заданого температурного режиму (в діапазоні 1150–1250 °C) з забезпеченням рівномірного прогріву по всьому об’єму деталі. Надзвичайно важливо уникнути перегрівання чи недогрівання окремих ділянок, які можуть призвести до появи внутрішніх напружень, мікротріщин або зниження міцності виробу після деформації. Технологічний процес, що відбувається в регенеративному колодязі, має багатозонну структуру та реалізується згідно з технологічними картами, що визначають режими нагріву в залежності від марки сталі, розмірів заготовок і кінцевого призначення продукції.

В процесі автоматизації необхідно керувати низкою критичних параметрів. Передусім, це температура нагрівання, що є визначальним показником якості підготовки заготовок. Контроль температури здійснюється в режимі реального часу в декількох точках – по зонах камери, по глибині та на поверхні металу. Не менш важливими є тиск газу та повітря, які впливають на інтенсивність горіння, стабільність полум’я та рівномірність теплового поля. Співвідношення «паливо – повітря» відіграє ключову роль для ефективного згоряння пального і запобігання утворенню чадного газу, який негативно впливає на екологічність та безпеку процесу. Витрата палива напряму пов’язана з енергоефективністю системи та продуктивністю агрегату. Окрім цього, необхідно враховувати час витримки заготовок при робочій температурі, який встановлюється відповідно до технічної карти, враховуючи матеріал та геометричні параметри виробу. Важливе значення також має стан

регенераторів, які визначають рівень утилізації тепла та ефективність попереднього підігріву повітря, що надходить до пальників. Окрему роль відіграє контроль положення заслінок та клапанів, які регулюють потоки повітря, палива та димових газів, а також забезпечують перемикання напрямків циркуляції.

Автоматизований технологічний процес, умовно, може бути поділений на кілька функціональних блоків, кожен з яких відповідає за певну задачу управління. Блок вимірювання включає первинні перетворювачі – термопари, датчики тиску, витрати та положення, які реєструють фізичні параметри та перетворюють їх у стандартизовані електричні сигнали. Ці сигнали надходять до блоку обробки, що складається з нормувальних пристроїв та вторинних приладів, які виконують масштабування, фільтрацію та перетворення з аналогового в цифровий формат. Далі сигнали передаються до блоку керування, ядром якого є програмований логічний контролер (ПЛК), що реалізує заданий алгоритм регулювання параметрів на основі введених програм. Керуючі дії відправляються до блоку виконавчих пристроїв, до якого входять електромагнітні клапани, електроприводи, регулюючі органи та засувки. Завершальним елементом є інтерфейс операторського керування – панель оператора або SCADA-система, яка забезпечує взаємодію персоналу з системою, показує актуальні параметри, формує архіви та сповіщає про аварійні режими.

Типовий контур автоматизації працює за принципом зворотного зв'язку. Наприклад, сигнал з термопари надходить до ПЛК, який порівнює його із заданою температурою та за допомогою ПІД-регулятора визначає величину відхилення. Відповідно до цього відхилення формуються керуючі сигнали на виконавчі механізми – електроприводи клапанів подачі пального до пальника. Таким чином, система автоматично підтримує температуру в межах технологічно обґрунтованих допусків. У складніших системах можуть використовуватись модальні або адаптивні методи регулювання, які враховують зміни теплових навантажень та стан регенераторів.

Автоматизована система повинна мати кілька режимів роботи: автоматичний, ручний та налагоджувальний. У повністю автоматичному режимі керування здійснюється без участі оператора, з можливістю самоналаштування та коригування параметрів. У ручному режимі оператор самостійно втручається в управління системою, наприклад, у разі відхилень або збоїв. Налагоджувальний режим використовується під час тестування, ремонту або первинного введення в експлуатацію. Перемикання між режимами відбувається через панель оператора або інтерфейс SCADA-системи.

Особливу увагу в системі автоматизації слід приділяти інформаційній структурі, що забезпечує повноцінний моніторинг та контроль. Це включає ведення журналів подій, зберігання графіків зміни температури, передачу тривожних сигналів на центральний пункт управління, а також інтеграцію з іншими рівнями автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) на підприємстві. Завдяки цьому досягається не тільки висока оперативність у прийнятті рішень, але й можливість подальшого аналізу для оптимізації технології та підвищення ефективності виробництва.

Отже, технологічний процес у нагрівальному регенеративному колодязі – це складна багатопараметрична система, яка вимагає точного та стабільного управління. Застосування сучасних засобів автоматизації дає змогу досягти високої якості нагріву, зменшити вплив людського фактора, підвищити безпеку та економічність процесу. Саме тому цей процес є обґрунтованим і перспективним об'єктом для впровадження автоматизованих систем управління.

1.3 Аналіз існуючого рівня автоматизації на діючому виробництві

Стан впровадження автоматизованих систем керування на переважній більшості металургійних виробництв України характеризується поступовим переходом від локальних аналогових установок до цифрових інтелектуальних

систем з централізованим керуванням. Водночас на багатьох виробничих об'єктах, зокрема у цехах термічної обробки, ще використовуються застарілі або частково автоматизовані системи, які не відповідають актуальним вимогам до точності, оперативності, надійності та енергоефективності.

На прикладі функціонуючого виробництва, де експлуатується регенеративний нагрівальний колодязь, визначено, що загальний рівень автоматизації залишається незадовільним. Здебільшого на таких об’єктах застосовуються прості електромеханічні пристрої, що виконують функції вимірювання та сигналізації, а також аналогові терморегулятори без гнучкої логіки управління. Це означає, що критично важливі параметри – температура в зоні нагрівання, співвідношення паливо-повітря, витрата газу – контролюються поодиноко, без впровадження замкнених контурів регулювання.

Зокрема, система керування на об’єкті базується на наступних складових:

- окремі термопари, встановлені в зонах камери, сигнал передається на аналогові щитові прилади;

- газопальникові пристрої керуються вручну або від звичайного термореле;

- витрата палива й повітря не регулюється автоматично, зміна проводиться вручну шляхом відкривання/закривання запірних клапанів;

- немає функціоналу архівації параметрів, виводу графіків або дистанційного спостереження за процесом;

- система захисту від аварій реалізована у вигляді простих реле максимального тиску чи температури, без зворотного зв’язку.

Через відсутність адаптивного керування нагрівальним процесом виникають суттєві проблеми:

- нестабільність температурного режиму. У різних зонах камери температура може відхилятись на 30–50 °C від заданої, що призводить до нерівномірного прогріву заготовок;

- підвищені витрати енергоносіїв. Неефективне згоряння палива та неможливість оптимізації співвідношення газ/повітря спричиняють перевитрати до 15–20 % у порівнянні з сучасними системами;

- зниження надійності. Через відсутність сигналізації про несправності у пальниках або клапанах відбуваються затримки у виявленні проблем, що підвищує ризик аварій;

- трудомісткість керування. Оператору доводиться вручну відстежувати параметри, вмикати та вимикати обладнання, вести журнал у паперовому вигляді. Це значно ускладнює контроль;

- відсутність єдиної диспетчеризації. Система не інтегрована з іншими ланками виробничої автоматизації, тому неможливий централізований контроль за енерговитратами та роботою агрегата.

Окрім чисто технічних аспектів, на об'єкті виявлено організаційну неспроможність для повномасштабного впровадження АСУ: бракує підготовлених кадрів, застаріла нормативна база, спостерігається несумісність з наявною інфраструктурою. Відсутність ПЗ для моделювання та управління процесом суттєво ускладнює підтримку технологічних режимів згідно з виробничими картами.

Необхідно також підкреслити, що технічне обладнання, яке використовується в теперішній системі, характеризується низькою надійністю, високим ризиком відмов та відсутністю вбудованої самодіагностики. Як наслідок, збої в роботі окремих елементів можуть лишатися непоміченими, що веде до накопичення системних помилок.

Ситуація додатково ускладнюється, адже навіть у випадку модернізації окремих компонентів, їх інтеграція в єдину систему стає складною через відсутність уніфікованих протоколів обміну (на кшталт Modbus, Profibus тощо) та централізованого контролера.

Узагальнюючи все вищесказане, можна прийти до висновку, що нинішня система автоматизації на існуючому виробництві є застарілою морально, технічно обмеженою та не відповідає сучасним вимогам щодо

ефективного управління технологічними агрегатами. Вона не забезпечує потрібного рівня енергоефективності, стабільності процесу, оперативного контролю, гнучкості налаштувань та захисту. Це формує серйозні передумови для розробки нової автоматизованої системи управління, яка має базуватися на передових цифрових технологіях, адаптивних алгоритмах регулювання та програмованих логічних контролерах.

1.4 Розробка схем матеріальних та інформаційних потоків

Організація дієвої системи автоматизації є неможливою без первинного формалізованого опису матеріальних та інформаційних потоків у рамках технологічного процесу. Створення таких схем дозволяє візуалізувати взаємозв’язки між об'єктами автоматизації, виконавчими та вимірювальними приладами, а також напрямки передачі технологічної інформації. Це надзвичайно важливий етап для подальшого розроблення функціональної структури системи управління.

В межах конкретного об'єкта автоматизації — регенеративного нагрівального колодязя — схема матеріальних та інформаційних потоків вміщує низку логічно пов'язаних складових, які описують повний цикл проходження як фізичних (паливо, повітря, заготовки), так і інформаційних (сигнали керування, зворотний зв'язок, аварійні сповіщення) потоків.

Опис матеріальних потоків. Матеріальні потоки описують переміщення енергоносіїв, напівфабрикатів і продуктів горіння в технологічному процесі. Основні матеріальні потоки визначаються так:

Подача металевих заготовок до нагрівальної камери. Заготовки надходять транспортними засобами в зону завантаження, а звідти — за допомогою механізованих систем (крани, підйомники) — до робочої зони печі. Потік здійснюється періодично, враховуючи температурний режим усередині камери.

Подача палива. Природний газ чи мазут подаються через систему трубопроводів до пальників. Потік регулюється регулювальними клапанами й електроприводами.

Подача повітря. Повітря, попередньо нагріте в регенераторах, подається в пальники для забезпечення повного згоряння палива.

Видалення продуктів горіння. Димові гази виводяться через димоходи в систему очищення або фільтрації. Частина тепла від димових газів використовується в регенераторах.

Вивантаження готових заготовок. Нагріті заготовки вивантажуються в зону обробки, де відбувається подальше прокатування, штампування або транспортування до інших виробничих ділянок. Кожен матеріальний потік пов'язаний з певними технологічними операціями, що вимагають контролю стану, температури, тиску та витрати.

Опис інформаційних потоків. Інформаційні потоки відповідають за циркуляцію сигналів між елементами системи управління, вимірювальними приладами й оператором. Вони класифікуються за напрямком (вхідні, вихідні, зворотний зв'язок), типом (аналогові, дискретні, цифрові) та функціональним призначенням.

Основні канали інформаційного обміну: Сигнали від первинних перетворювачів.

Датчики температури (термопари), тиску, витрати та положення передають аналогові або цифрові сигнали на ПЛК. Ці сигнали є основою для формування керуючих дій.

Керуючі сигнали від контролера. ПЛК, обробляючи вхідні дані, генерує керуючі впливи на виконавчі пристрої: електроприводи клапанів, механізми засувок, реле запуску пальників тощо.

Сигнали зворотного зв'язку. Система моніторингу стану виконавчих механізмів передає інформацію про виконання команди або відхилення від неї до контролера, що дозволяє скоригувати алгоритм управління.

Операторський інтерфейс. Панель оператора або SCADA-система приймає та виводить інформацію: поточні значення температури, стан устаткування, графіки, аварійні повідомлення. Оператор може встановлювати нові уставки, перемикати режими роботи, запускати та зупиняти цикл.

Архівація та передача даних у мережу. В сучасних системах інформація про процес передається на вищий рівень АСУТП або MES-систему, де її можна використовувати для аналізу, оптимізації, управління енергією та звітності.

Візуалізація потоків. У додатку подано схематичне зображення інформаційних та матеріальних потоків (див. Додаток Б – «Схема інформаційних та матеріальних потоків»). Схема виконана у вигляді блок-схеми з умовними позначеннями потоків: суцільні стрілки – матеріальні потоки; пунктирні стрілки – інформаційні потоки; прямокутники – функціональні елементи системи (ПЛК, датчики, виконавчі механізми, операторська панель); овальні блоки – початкові та кінцеві точки потоків.

Розробка і аналіз блок-схем потоків дає змогу досягти цілісного уявлення про логіку функціонування об'єкта автоматизації, визначити взаємодії між технологічними і інформаційними складниками, а також створити базу для формування функціональної структури системи. Цей метод сприяє створенню зрозумілої архітектури автоматизованого управління та знижує вірогідність помилок на етапах проєктування і впровадження АСУ.

1.5 Стан рівня автоматизації на аналогічних об’єктах підприємств України та зарубіжжя

В умовах сьогодення, коли світ об'єднано глобальними промисловими технологіями та цифровою трансформацією виробництва, показник автоматизації металургійних підприємств стає ключовим чинником їхньої конкурентоздатності. Вивчення стану автоматизації на подібних об'єктах, зокрема нагрівальних регенеративних колодязях, як в Україні, так і в

передових країнах світу, дає можливість виявити сучасні тренди, найкращі зразки та аспекти, що потребують поліпшення у вітчизняній промисловості (Таблиця 1.1).

Автоматизація в Україні. Металургія України – одна з ключових галузей промисловості, проте переважна більшість технологічного обладнання, зокрема нагрівальні колодязі, лишаються частково автоматизованими або функціонують у напівавтоматичному режимі. Основні риси українських підприємств:

Технічне старіння систем управління. На багатьох об’єктах дотепер використовуються аналогові регулятори температури типу ТРМ-138, МРТ або електромеханічні контролери радянського періоду.

Обмежений функціонал локальних систем. У більшості випадків автоматизація зводиться лише до підтримання температури, без регулювання витрати палива чи повітря, без зворотного зв'язку.

Відсутність централізованого диспетчерського управління. Дані з термопар не надходять до SCADA-системи, що ускладнює дистанційний контроль та аналіз історичних даних.

Використання застарілих виконавчих механізмів. Чимало механізмів регулювання (засувки, електроприводи) не мають електронного управління, функціонують лише вручну або від контакторів. Низький рівень діагностики та захисту. Відсутні системи попередження про перегрів, витік пального або загасання полум’я.

Як ілюстрацію можна взяти компанії таких промислових лідерів, як ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Інтерпайп НТЗ», ПАТ «Запоріжсталь». На цих підприємствах автоматизація термічних агрегатів нині перебуває на стадії оновлення, хоча значна кількість об'єктів поки що не повністю піддалася цифровізації. Тільки деякі агрегати оснащені передовими ПЛК (Siemens S7, Schneider Modicon) і панелями оператора. Централізоване програмне забезпечення SCADA здебільшого використовується на новостворених печах, але не взаємодіє зі старими системами, що ускладнює обмін інформацією.

Автоматизація за кордоном. На підприємствах Євросоюзу, США, Японії, Південної Кореї, Канади та Китаю автоматизовані системи керування нагрівальними агрегатами інтегровані в загальнофабричні цифрові платформи управління (Industrial IoT, MES, ERP). Ключові риси: Повна автоматизація теплотехнічного циклу. Контроль всіх параметрів процесу – температура, витрата палива, повітря, регенерація, стан димових газів – відбувається в режимі реального часу з використанням ПЛК та SCADA.

Адаптивне регулювання та предиктивна аналітика. Алгоритми керування на базі нейромереж, fuzzy-logic або математичного моделювання дозволяють пристосовуватись до типу металу, розмірів заготовок та мінливих зовнішніх умов.

Цифрові двійники та віртуальне моделювання. Перед початком процесу здійснюється віртуальна симуляція теплових потоків, що дозволяє досягти оптимальної енергоефективності.

Безпека та зниження ризиків. Всі критичні елементи агрегатів обладнані датчиками з системою попередження, автоматичним гасінням полум’я та ізоляційними бар'єрами.

Інтеграція з системами енергоменеджменту. Дані з агрегатів передаються до єдиної системи управління підприємством, що дозволяє контролювати витрати газу, електроенергії, проводити аудит та оптимізацію витрат.

Стандартизація та відкриті протоколи. Використовуються міжнародні стандарти обміну даними (OPC UA, MQTT, Ethernet/IP), що забезпечує взаємодію з іншими виробничими системами.

Наприклад, компанія Tenova (Італія) розробляє модульні платформи управління індукційними та газовими печами, що використовують цифрову модель нагріву, автономне регулювання витрати палива по зонах та бездротові сенсори стану футерівки. Siemens (Німеччина) пропонує комплексні рішення SIMATIC з ПЛК S7-1500, SCADA WinCC, системою предиктивного обслуговування та інтеграцією з хмарними аналітичними платформами.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика

Параметр	Українські підприємства	Зарубіжні підприємства
Тип регуляторів	Аналогові, ПІД-модулі локальні	ПЛК із цифровою обробкою
SCADA-системи	Обмежено, не інтегровані	Повна диспетчеризація
Витрата палива	Висока, не оптимізована	Оптимізована, до 15–20% економії
Безпека	Мінімальні реле захисту	Мультиступенева система безпеки
Моніторинг	Локальні прилади	Веб-інтерфейси, архівування
Адаптивність	Відсутня	Присутня (нейромережі, моделі)
Інтеграція з MES/ERP	Відсутня	Повна

Проаналізувавши отримані дані, стає очевидним, що рівень автоматизації на аналогічних виробництвах за межами України значно вищий за показники, що спостерігаються у вітчизняному промисловому секторі. Найбільш відчутне відставання фіксується в сферах інтеграції інформаційних систем, регулювання на основі прогнозів, забезпечення безпеки та економічної ефективності виробничого процесу. Цей стан речей диктує необхідність термінового впровадження передових технологій на вітчизняних підприємствах, модернізації технічних засобів автоматизації, забезпечення взаємодії ПЛК-контролерів з SCADA-платформами та переходу до цифрових моделей управління технологічними процесами. Розробка та впровадження сучасної автоматизованої системи управління нагрівальним регенеративним колодязем, що передбачено в межах даної кваліфікаційної роботи бакалавра,

забезпечить суттєве підвищення ефективності виробництва, зниження операційних витрат та досягнення найвищої якості термообробки металу.

1.6 Недоліки існуючої системи управління

На основі здійсненого аналізу наявного виробництва, рівня автоматизації на подібних підприємствах, а також вивчення функціонування нагрівального регенеративного колодязя, можна визначити низку важливих недоліків, властивих поточній системі управління. Ці недоліки зачіпають як технічні, так і організаційні аспекти роботи системи, впливаючи на стабільність роботи агрегату, ефективність використання енергії та загальну безпеку технологічного процесу.

Насамперед, слід відзначити відсутність замкнутих контурів автоматичного регулювання температури, що є критичною проблемою для об'єкта з високою інерційністю. Сигнали від термопар не інтегруються в логіку керування ПЛК, що унеможливлює точне регулювання температурного режиму в режимі реального часу. Як наслідок, відхилення фактичної температури від заданої можуть перевищувати 50–70 °C, що призводить до погіршення структури металу та зниження якості виготовленої продукції.

Другим суттєвим недоліком є застосування застарілого аналогового обладнання, яке має обмежені можливості в плані точності, надійності та стабільності роботи. У багатьох випадках вимірювальні канали побудовані на основі пристроїв з ручним налаштуванням, що не дає можливості пристосувати систему до змін у технологічному процесі або параметрах навколишнього середовища.

Наявна система не здатна автоматично регулювати подачу палива та повітря, що створює передумови для погіршення ефективності згоряння та надмірного споживання енергоресурсів. Ручне управління клапанами, орієнтоване на показники манометрів чи відчуття оператора, вважається

застарілим підходом, який не відповідає сучасним стандартам технологій точного нагрівання.

Серйозним недоліком є відсутність централізованої системи візуалізації та контролю процесу. Оператор не має змоги отримати комплексну інформацію про розподіл температури в печі, стан пальників, роботу регенераторів та інші важливі параметри. Вся інформація надається фрагментарно через щитові прилади або індикатори, що ускладнює прийняття оперативних рішень та ведення технічного обліку.

Ще одним важливим недоліком є низький рівень автоматичного захисту від аварійних ситуацій. Поточна система не передбачає автоматичного виявлення витоків палива, згасання полум'я, перегріву певних зон або перевищення тиску в камері. Контроль цих параметрів відсутній або обмежений, що збільшує ризик виникнення технологічних збоїв та потенційних аварій.

Також варто відзначити відсутність можливості архівування технологічних параметрів, що ускладнює ретроспективний аналіз, виявлення причин виробничих дефектів, контроль за дотриманням режимів роботи та оптимізацію процесу. Це значна втрата для будь-якої системи автоматизації, спрямованої на підвищення якості та забезпечення стабільного контролю.

Немасштабованість та низька гнучкість системи ускладнюють модернізацію. Будь-яка спроба розширити функціональність натикається на технічні обмеження, такі як несумісність інтерфейсів, обмежена кількість каналів вводу/виводу, відсутність модулів розширення.

Організаційний аспект експлуатації також містить низку проблем. Зокрема, недостатній рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу, відсутність детальних інструкцій з експлуатації сучасного обладнання, а також слабка взаємодія між ремонтними та технологічними підрозділами ускладнюють ефективну діагностику несправностей та проведення своєчасного технічного обслуговування.

До основних недоліків існуючої системи управління можна віднести:

- використання застарілих приладів і аналогових каналів без цифрового контролю;
- відсутність ПЛК як базового керуючого пристрою;
- відсутність інтеграції між зонами управління;
- неможливість дистанційного керування та моніторингу;
- низька точність вимірювань і відсутність компенсації зовнішніх збурень;
- повна залежність від дій оператора;
- відсутність системи діагностики та запобігання аваріям;
- відсутність SCADA-системи та інтерфейсу з MES/ERP-рівнями управління.

Отже, поточна система керування технологічним процесом у нагрівальному регенеративному колодязі не відповідає сучасним стандартам автоматизації виробництва. Вона не забезпечує стабільність параметрів, не гарантує ефективного використання енергії, не має адекватних засобів контролю, безпеки, збереження даних та аналізу. Усе це вказує на гостру необхідність оновлення системи та впровадження автоматизованої системи керування наступного покоління, заснованої на принципах цифрової інтеграції, гнучкості та високої надійності.

2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

2.1 Вимоги до системи в цілому

Проєктування автоматизованої системи керування (АСК) нагрівальним регенеративним колодязем передбачає створення комплексного технічного рішення, яке забезпечить високоточне регулювання технологічного процесу з врахуванням інерційності об’єкта, багатозонності нагріву, вимог до якості продукції, норм енергоефективності, а також безпечну та безперебійну роботу устаткування.

Розробка технічного завдання ґрунтується на системному аналізі функціональних особливостей об'єкта, виявлених недоліків наявної системи керування та найкращих світових практик автоматизації теплотехнічних агрегатів. Головна мета полягає у створенні системи, яка не тільки автоматично підтримуватиме ключові технологічні параметри (температура, витрата палива, співвідношення паливо–повітря), а й забезпечить прозоре управління, гнучкість налаштувань, архівування історичних даних, інтеграцію в загальнопромислові платформи управління, мінімізацію втручання людини у критичні вузли управління, підвищену надійність, безпеку та масштабованість.

До загальних вимог до системи керування належать такі основні положення:

- забезпечення автоматичного та стабільного регулювання температури у зонах нагрівання. Система має гарантувати точне підтримання температурного режиму в кожній із зон нагрівальної шахти (вхідна зона, середина камери, зона витримки) з точністю не менше ±5 °C від заданої уставки. Усі температурні дані мають оновлюватися не рідше ніж кожні 2 секунди. Використання замкнених контурів ПІД-регулювання дозволить досягти стабільної температурної кривої з урахуванням інерційності об'єкта;

- підтримка співвідношення «паливо–повітря» для повного згоряння. Оптимізація процесу згоряння природного газу здійснюється шляхом регулювання витрат обох потоків — пального та повітря — відповідно до розрахованого коефіцієнта надлишку повітря. Система має в режимі реального часу забезпечувати підтримку цього співвідношення на основі сигналів з витратомірів та датчиків складу газової суміші;

- реалізація замкнених контурів регулювання. АСУ має містити кілька автоматичних контурів керування, зокрема: контур регулювання температури в кожній зоні нагрівання; контур витрати газу/повітря; контур тиску в системі подачі; контур регулювання положення засувок і заслінок. Усі контури мають функціонувати незалежно, з можливістю синхронізації та пріоритетного регулювання;

- візуалізація параметрів на панелі оператора або в SCADA-системі. Система повинна мати інтерактивну панель оператора (HMI) або SCADA-інтерфейс із графічним зображенням камери нагріву, поточними параметрами, статусами обладнання, тривогами та індикацією несправностей. Оператор повинен мати змогу візуально контролювати температуру, витрати, режими пальників, положення регулюючих органів тощо;

- передача даних на центральний сервер або диспетчерський пункт. Передача даних має здійснюватися захищеними каналами зв’язку, з підтримкою промислових протоколів (Modbus TCP, OPC UA, Ethernet/IP). Усі важливі параметри мають надходити на центральний комп’ютер для зберігання, обробки, візуалізації та подальшого аналізу. Інтеграція з системою MES або ERP підприємства має забезпечувати зворотній зв’язок із вищими рівнями управління;

- Запобігання аварійним ситуаціям. Система зобов'язана виявляти та реагувати на критичні відхилення показників: зникнення полум'я, перегрів, витік газу, перебої в живленні. У випадку виявлення аварійної ситуації система мусить автоматично активувати процедури безпечного зупинення -

припинення подачі пального, закриття регулювальних клапанів, сповіщення на пульті оператора;

- архівація даних і складання звітів. АСУ має мати функцію автоматичного збереження даних у базу (наприклад, MySQL, SQLite або інша SQL-сумісна), з можливістю створення графіків температур, трендів споживання палива, логів подій, а також складання звітів за зміну, добу, тиждень у форматах PDF/Excel;

- здатність до масштабування та оновлення системи. Система повинна бути модульною, що дасть змогу в майбутньому додавати нові зони нагріву, типи заготовок або інтегрувати інші об'єкти (наприклад, камери охолодження, транспортні механізми) без перепроектування всієї архітектури. Програмне забезпечення має бути гнучким для оновлення без зупинки агрегату (за підтримки redundancy);

- висока надійність і відмовостійкість. Для критичних елементів (ПЛК, HMI, датчики) необхідно забезпечити резервування або дублювання. Рівень загальної готовності системи (availability) мусить перевищувати 98 %. Джерело безперебійного живлення (UPS) повинно забезпечити збереження програми та коректне завершення циклу за відсутності напруги;

- відповідність нормативним вимогам. Проєктування та впровадження системи повинні здійснюватись у відповідності до чинних стандартів:
ПБЕЕС – «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»; міжнародні рекомендації IEC 61131, IEC 61508 (у частині функціональної безпеки).

Система повинна відповідати санітарно-технічним та вибухозахисним нормам, якщо нагрівальний агрегат встановлено в зоні підвищеної небезпеки (категорії Г/Д відповідно до НАПБ).

2.2 Вимоги до функцій (задач), які виконує система

Функціональні потреби автоматизованої системи управління (АСУ) формуються з урахуванням специфіки теплотехнічного процесу, технічних даних устаткування, обмежень безпеки та стандартів якості металопродукції. Головна ціль функціонального забезпечення – реалізувати набір завдань, що охоплюють усі аспекти керування, контролю, діагностики та візуалізації функціонування об’єкта автоматизації.

Система мусить забезпечити максимальний рівень автоматизації процесу нагрівання металевих заготовок у регенеративному колодязі, гарантувати точне підтримання параметрів, а також створити умови для гнучкого налаштування та масштабування системи, зводячи до мінімуму вплив людського фактора.

Функція вимірювання та контролю технологічних параметрів. Ця функція є фундаментом для функціонування всієї автоматизованої системи керування (АСК). Вона забезпечує безперервне збирання, перетворення, передавання та аналіз ключових фізичних параметрів, що визначають стабільність та якість технологічного процесу в нагрівальному регенеративному колодязі. Без якісного вимірювання та контролю неможливо здійснити ефективне регулювання, своєчасне реагування на відхилення або коректну роботу алгоритмів захисту.

Контрольовані параметри. До основних технологічних величин, які підлягають постійному контролю в АСК, належать: температура у зонах колодязя: вхідна, середня, витримки; витрата палива (газу) та витрата повітря; тиск повітря/газу в трубопроводах перед пальниками; положення регулюючих органів: дроселі, засувки, клапани; наявність полум'я – за допомогою фотодатчиків або УФ/ІЧ сенсорів.

Засоби вимірювання. Температура. Вимірюється термопарами типу:

K (NiCr–NiAl) — до 1200 °C;

S (PtRh–Pt) — до 1600 °C (в умовах високої температури).

Сигнал термопари (мВ) подається на нормувальний перетворювач, який формує аналоговий вихід 4–20 мА — стандартний сигнал для промислової автоматики. Далі він надходить до аналогового входу ПЛК.

Витрата повітря та газу. Механічні ротаметри — використовуються для візуального контролю; Електронні витратоміри — турбінні, диференційно-трубні або ультразвукові, з аналоговим або Modbus/RS-485 виходом. Часто застосовуються прилади Siemens SITRANS F, Endress+Hauser Proline або Azbil AXF.

Тиск. Вимірюється за допомогою тензорезистивних або ємнісних датчиків тиску (наприклад, WIKA, BD Sensors, Siemens), вихід яких також становить 0–10 В або 4–20 мА. Положення засувок і клапанів. Контролюється через кінцеві вимикачі положення або вбудовані потенціометри (для безперервного зчитування кута відкриття).

Стан полум'я. Виявляється за допомогою ультрафіолетових або інфрачервоних детекторів з цифровим виходом «наявне/відсутнє».

Обробка сигналів у ПЛК. Після надходження аналогового сигналу до ПЛК, він проходить: масштабування (наприклад, від 4–20 мА до 0–1200 °С); фільтрацію шумів (цифрова фільтрація: ковзне середнє, експоненційне згладжування); порівняння з уставками (для формування тривог/захистів); виведення на SCADA/HMI для оператора (Таблиця 2.1).

Приклад розрахунку

Завдання: Обчислити сигнал нормувального перетворювача при температурі 900 °С, якщо діапазон термопари – 0…1200 °С, а вихід – 4…20 мА.

$$I = 4 + (\frac{T}{T_{мах}} \times (20 - 4)) = 4 + (\frac{900}{1200} \times 16) = 4 + 12 = 16 \text{ мА}$$

Отже, при температурі 900 °С система зчитує 16 мА, що масштабовано у ПЛК до відповідного значення.

Таблиця 2.1 - Технічні вимоги

Параметр	Вимога
Частота зчитування	не рідше 2 разів на секунду
Час реакції датчика	≤ 500 мс
Клас точності термопари	не гірше 0.5
Вихід сигналу	4–20 мА або 0–10 В
Можливість діагностики	наявність обриву / замикання
Передача на SCADA	у реальному часі
Журналювання	≥ 1 раз на хвилину

Виведення на SCADA. Усі параметри мають виводитись: у вигляді цифрових полів; із кольоровим підсвічуванням залежно від рівня (зелений – норма, жовтий – попередження, червоний – аварія); з трендом зміни за останні 10–60 хв; у журналі подій/архіві з можливістю формування звітів.

Нормативна база

ДСТУ EN 61557-12:2017 – Вимірювальні системи. Стандарти на точність у промисловості.

Функція автоматичного контролю температури - важлива складова автоматизованої системи управління (АСУ) нагрівальною регенераційною піччю. Її головне завдання - підтримувати стабільну температуру згідно з технологічним графіком, що прямо впливає на: мікроструктуру металу; точність операцій деформації (прокатування, кування, штампування) економію енергії агрегату; надійність та тривалий термін служби обладнання.

Принцип дії ПІД-регулятора. Основою автоматичного регулювання є ПІД-алгоритм, реалізований у програмованому логічному контролері (ПЛК). Алгоритм виконує такі дії:

Зчитує реальну температуру з термопари; Порівнює її з уставкою (заданим значенням); Обчислює відхилення $e(t) = T_{set} – T_{an}$; Формує керуючий вплив на регулюючий орган (електропривід, клапан, модулятор пальника).

Загальна формула ПІД-регулятора:

$$U(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int e(t)dt + Kd \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

де e(t) — поточне відхилення;

Kp — пропорційна складова;

Ki — інтегральна складова;

Kd — диференційна складова.

Налаштування ПІД-регулятора може виконуватись вручну методом Ziegler–Nichols або автоматично, якщо підтримується в ПЛК.

Температурні профілі та режими. Температурна крива задається через HMI або SCADA, зазвичай має такі етапи:

Початковий прогрів (наприклад, з 25 °C до 600 °C); Основний нагрів (до 1150–1250 °C); Витримка (із точним регулюванням протягом заданого часу); Плавне охолодження або передача до наступного агрегата.

Якщо уставка змінюється з 400 °C до 1150 °C за 30 хв (1800 с), то крок:

$$\Delta T = \frac{1150 - 400}{1800} = 0.42° \frac{C}{c}$$

При оновленні кожні 5 с:

$$\Delta Tкрок = 0.42 \times 5 = 2.1°C$$

Таким чином, кожні 5 секунд нова уставка підвищується на 2.1 °C — це дозволяє реалізувати плавне нагрівання без температурних стрибків.

Автоматичний і ручний режими. Система повинна підтримувати перемикання режимів:

Автоматичний — ПІД-регулятор керує температурою згідно заданого профілю;

Ручний — оператор самостійно змінює положення регулюючого органа;

Сервісний — для обслуговування чи калібрування.

Перемикання повинно бути доступне через панель HMI або SCADA, із підтвердженням та записом в журнал подій.

Якість регулювання. Для оцінки ефективності регулювання використовується:

- середньоквадратичне відхилення (СКВ) температури від уставки;
- допустиме значення: не більше ±5 °C в основній фазі витримки.

Також враховуються:

- теплова інерційність об’єкта (затримка реакції після зміни подачі газу);
- неоднорідність зон (наприклад, крайні зони охолоджуються швидше);
- запізнення дії (від моменту регулювання до стабілізації).

У таких випадках рекомендується зональне регулювання: для кожної зони (вхідна, середня, вихідна) — окремий ПІД-регулятор з незалежною уставкою.

Захист та діагностика. Система повинна:

- автоматично блокувати регулювання у разі обриву термопари;
- подавати сигнал тривоги на панель HMI;
- використовувати резервне значення або перемикатися на дублюючий датчик (якщо є);
- записувати помилку до журналу несправностей з датою, часом і описом.

Виведення інформації. На HMI або SCADA повинні відображатися (Рисунок 2.1):

- поточна уставка;

- реальна температура;
- стан регулятора (AUTO/MANUAL);
- графік температури;
- індикатори відхилень (кольорове підсвічування);
- поле для налаштування Kp, Ki, Kd (за правами інженера/адміністратора).

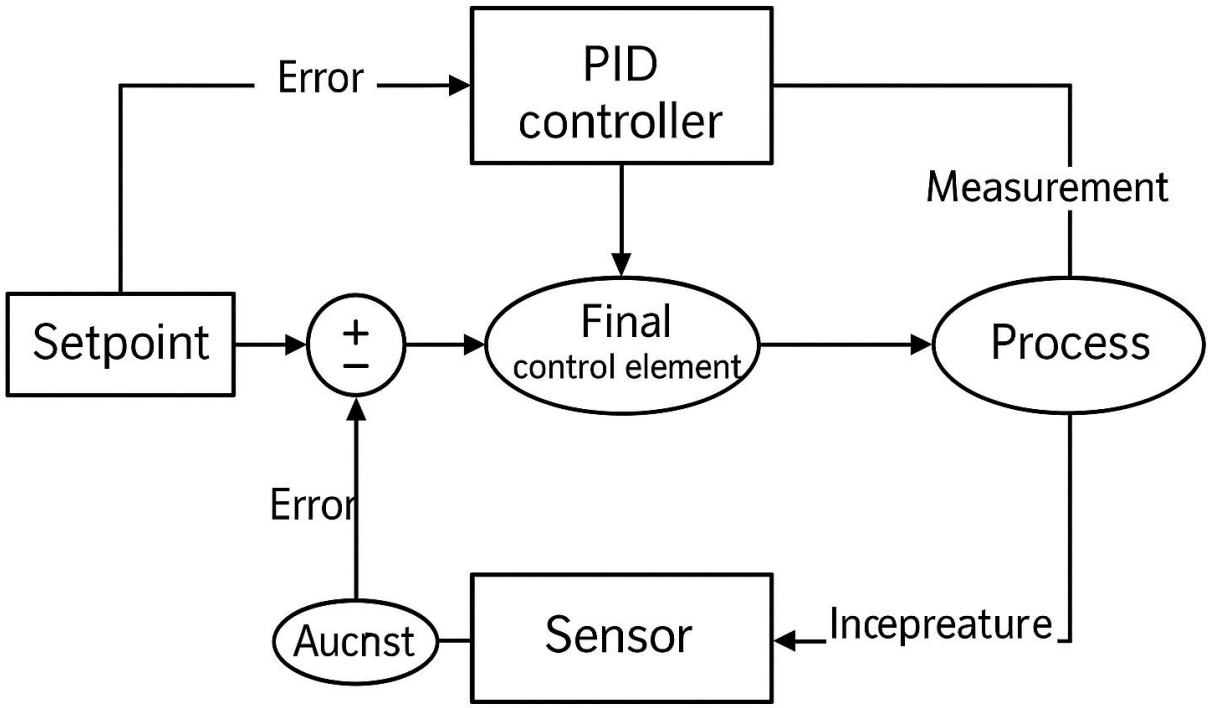


Рисунок 2.1 - Структурна блок-схема автоматичного регулювання температури для АСУ нагрівального регенеративного колодязя

Опис елементів блок-схеми:

Термопара (Датчик температури)**.** Вимірює температуру в конкретній зоні печі (наприклад, зона витримки). Сигнал у мілівольтах → нормуючий перетворювач → 4–20 мА → ПЛК.

Блок зчитування ПЛК. Отримує аналоговий сигнал температури. Масштабує його до фізичних значень (наприклад, 0–1200 °C). Зберігає у внутрішню змінну (наприклад, T_real).

Порівняльний блок (Суматор помилки). Порівнює реальну температуру (T_real) з уставкою (T_set).

Обчислює помилку регулювання**:**

$$e(t)=Tset-Treal$$

ПІД-регулятор. Реалізує формулу:

$$U(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int e(t)dt + Kd \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Формує керуючий сигнал на основі відхилення температури. Параметри (Kp, Ki, Kd) налаштовуються вручну або автоматично. Виконавчий механізм (клапан подачі газу / пальник)**.** Отримує керуючий сигнал (наприклад, 4–20 мА). Відкриває або закриває подачу палива для компенсації теплових втрат.

Об’єкт регулювання (Піч)**.** Нагрів заготовки відбувається внаслідок зміни потужності пальника. Температура в печі змінюєтьс і цикл повторюється. Реалізація функції автоматичного регулювання температури у TIA Portal.

На рисунку 2.2 наведено структурну блок-схему реалізації ПІД-регулятора температури в автоматизованій системі управління нагрівальним регенеративним колодязем. В основу покладено платформу Siemens S7-1200 з використанням функціонального блоку FB_TempControl у середовищі TIA Portal.

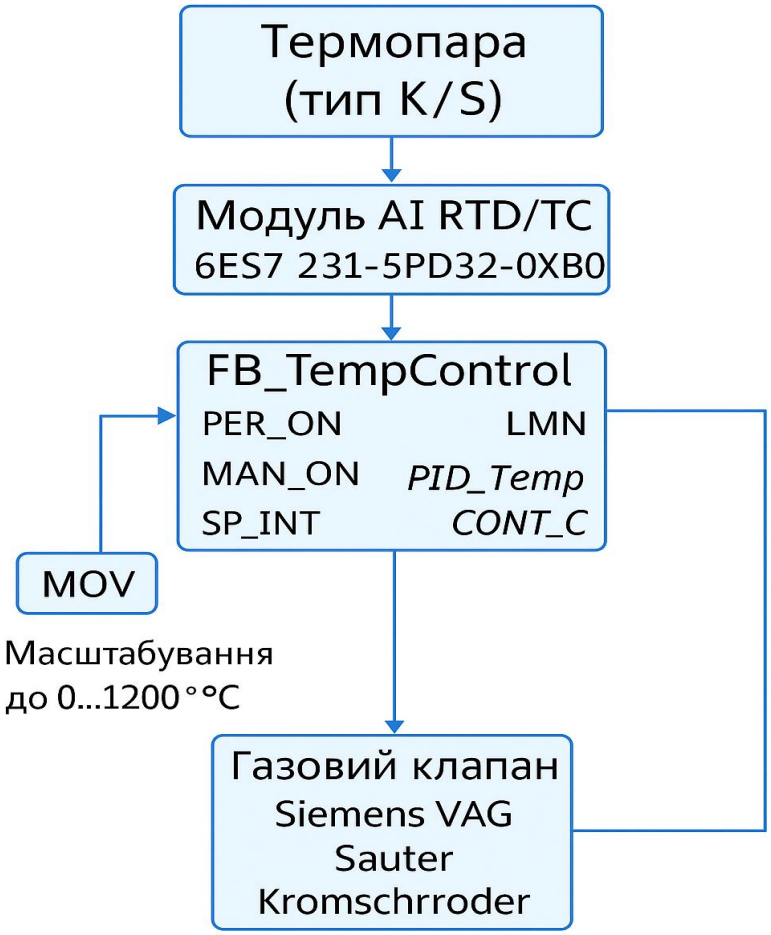


Рисунок 2.2 - Схема реалізації ПІД-регулятора температури у TIA Portal (Siemens S7-1200)

Сигнал з термопари (типу K або S) надходить до аналогового модуля RTD/TC (наприклад, 6ES7 231-5PD32-0XB0). Далі він масштабується у фізичний діапазон (0…1200 °C) за допомогою функціонального блоку MOV, після чого використовується як вхідна змінна у регуляторі. FB_TempControl реалізує ПІД-алгоритм, параметри якого (SP_INT, PER_ON, MAN_ON) задаються через HMI або SCADA. Результат (LMN) подається на аналоговий вихід AQ 0.0 (4–20 мА) для керування газовим клапаном Siemens VAG, Sauter або Kromschroder.

Цей підхід дозволяє реалізувати високоточне регулювання температури по кожній зоні печі, враховуючи теплову інерційність, запізнення і зовнішні

збурення. Режими AUTO / MANUAL перемикаються динамічно, із захистом від відмов термопари та логікою аварійного переходу на резервне значення.

Функція управління подачею палива та повітря

Ця функція є критично важливою для забезпечення ефективного горіння, стабільності температурного режиму та зниження витрат палива. Автоматизована система повинна забезпечувати підтримання оптимального співвідношення паливо–повітря у реальному часі, залежно від теплового навантаження кожної зони нагрівального колодязя.

На рисунку 2.3 наведено блок-схему реалізації функції керування подачею газу та повітря. В основі лежить логіка зчитування температурного навантаження, обчислення необхідної витрати палива, формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів та забезпечення зворотного зв’язку з витратомірів. Система передбачає модуляцію потужності пальника в межах 10–100 % залежно від температури.

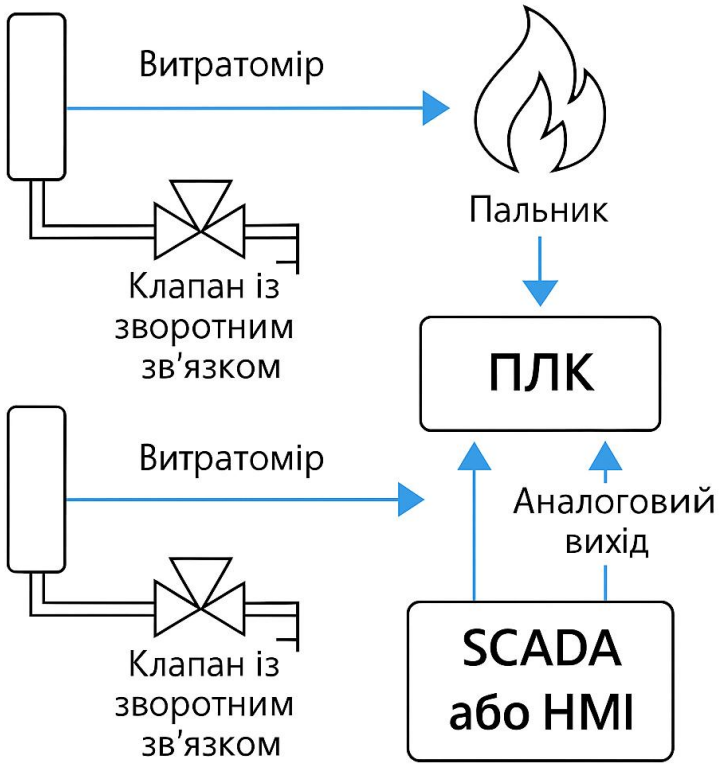


Рисунок 2.3 - Блок-схема автоматизованого керування подачею палива та повітря

Використовуються електроприводні клапани з аналоговим керуванням (4–20 мА), витратоміри з імпульсним або цифровим виходом (наприклад, Siemens SITRANS або Endress+Hauser Proline). Контроль співвідношення виконується алгоритмом із зворотним зв’язком: витрата повітря коригується відповідно до витрати газу із коефіцієнтом надлишку повітря $\lambda = 1.05–1.1$. У разі аварії або втрати сигналу система автоматично переводиться в режим захисту.

Реалізація підтримує ручне керування клапанами у режимі налаштування, а також інтеграцію з HMI/SCADA для відображення витрат, тисків, стану клапанів та активних сигналів тривоги. Усі зміни параметрів реєструються у журналі подій.

Нормативне забезпечення: ДСТУ EN 746-2:2014 (вимоги до горіння), ISO 12100 (оцінка ризиків), IEC 61508 (безпека керованих систем).

Функція сигналізації, блокування та аварійного захисту. Система сигналізації та аварійного захисту є невід’ємною частиною автоматизованої системи управління. Її основне завдання – своєчасне виявлення відхилень технологічних параметрів, попередження персоналу та забезпечення безпечного зупинення агрегата у разі виникнення критичної ситуації.

На рисунку 2.4 представлено загальну структурну схему аварійного захисту регенеративного колодязя. Вона включає джерела сигналів (датчики температури, тиску, полум’я, положення), логіку порівняння з допустимими межами, систему пріоритетів тривог, а також виконавчі блоки блокування подачі пального і живлення.

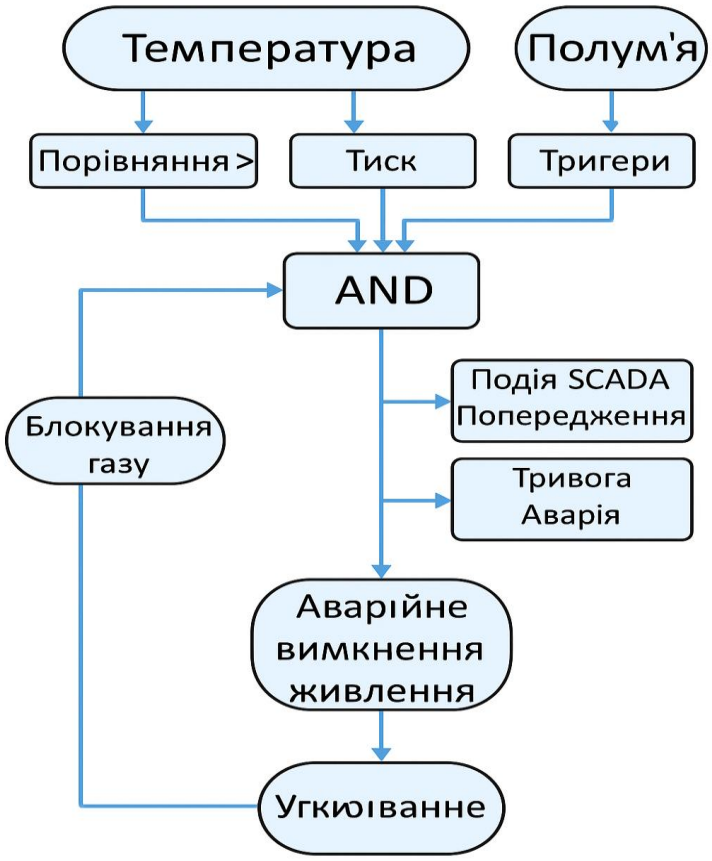


Рисунок 2.4 - Блок-схема реалізації аварійного захисту і сигналізації

Рівні сигналізації:

- рівень 1 (жовтий): попередження – температура або тиск близькі до межі;

- рівень 2 (червоний): критична тривога – перевищення уставки, необхідна реакція оператора;

- рівень 3: аварійне відключення – автоматична зупинка подачі газу, вимкнення живлення.

Кожна подія реєструється в журналі: час, код, опис, підтвердження користувачем.

Логіка реалізується у ПЛК через комбінацію логічних функцій (AND, OR, Trigger), блоків порівняння та тригерів. Стан аварій та тривог дублюється на HMI або SCADA, з кольоровою індикацією, звуковим супроводом і можливістю підтвердження. У випадку несправності термопари, втрати тиску

чи відсутності полум’я – клапани пального негайно закриваються, а система переходить у безпечний режим.

Нормативне забезпечення: ДСТУ EN 60204-1:2015 (безпека машин), IEC 61508 (функціональна безпека), ПБЕЕС (Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів).

2.3 Вимоги до видів забезпечення

Для налагодженої роботи автоматизованої системи управління технологічним процесом нагрівання у регенеративному колодязі необхідний всеохоплюючий комплекс забезпечення. Це забезпечення включає в себе чотири основні складові – технічну, програмну, інформаційну та організаційну. Кожна з них є критично важливою для стабільної, безпечної та гнучкої роботи АСУ в умовах сучасного виробництва.

Технічне оснащення. Технічне оснащення охоплює набір апаратних компонентів, котрі фізично втілюють логіку управління, регулювання та взаємодії з оператором. Воно включає датчики, виконавчі механізми, логічні контролери, обладнання для комунікації, джерела енергії та елементи захисту. Далі розглянемо ключові складові.

Програмований логічний контролер (ПЛК). ПЛК є центральним вузлом системи, котрий виконує алгоритми управління в режимі реального часу. Він повинен забезпечувати обробку аналогових та дискретних сигналів, містити функції ПІД-регулювання, реагування на аварійні ситуації та протоколи обміну (Modbus RTU/TCP, Profinet, OPC UA). Для регенеративного колодязя нагрівання доцільно віддати перевагу ПЛК Siemens S7-1200, Schneider M340 або Delta DVP-SX2.

Панель оператора (HMI). Використовується для візуального контролю за процесом, зміни заданих параметрів, перемикання між режимами роботи та підтвердження тривог. Сучасні HMI, як-от Siemens TP700 Comfort або Weintek

MT8071iE, пропонують графічний інтерфейс, сенсорне управління, мережеву інтеграцію та можливість резервного копіювання даних (Таблиця 2.2).

Первинні вимірювальні перетворювачі. Термопари типу K (NiCr-Ni) чи S (PtRh-Pt) застосовуються для вимірювання температури. Для покращення точності необхідно використовувати нормуючі перетворювачі (наприклад, Siemens SITRANS TH100), які перетворюють сигнал у стандарт 4–20 мА.

Датчики тиску та витрати. Для вимірювання параметрів пального та повітря використовуються тензорезистивні сенсори (WIKA, BD Sensors) або ультразвукові витратоміри (Endress+Hauser Proline, SITRANS F).

Виконавчі механізми. До них належать електроприводи, електропневматичні клапани, заслінки. Управління здійснюється за допомогою аналогових сигналів (0–10 В, 4–20 мА) або цифровою шиною. Вимоги – точність позиціонування, наявність кінцевих вимикачів, захист IP65.

Джерела живлення. Передбачено наявність ДБЖ (джерела безперебійного живлення) типу APC Smart-UPS або Eaton для забезпечення безпечного завершення циклу у випадку відключення електроживлення.

Шафи автоматики. Повинні відповідати класу захисту IP54–IP65, забезпечувати належну вентиляцію, захист від пилу, вологи та електромагнітних

Таблиця 2.2 - Програмне забезпечення у структурованому вигляді

Підрозділ	Опис	Приклади/Деталі
2.1 Середовище програмування ПЛК	Платформи для програмування контролерів, підтримка основних мов програмування за IEC 61131-3	- TIA Portal (Siemens) - Codesys (підтримується багатьма виробниками) - Unity Pro (Schneider Electric) Мови: LAD, ST, FBD, SFC
2.2 Редактор проєктів HMI	Розробка інтуїтивних інтерфейсів для операторів, навігація, кольорове кодування, архівація, управління доступом	- WinCC (Siemens) - EasyBuilder Pro (Weintek) - Vijeo Designer (Schneider Electric)
2.3 SCADA-системи	Централізований моніторинг, мультипротокольний зв’язок, архівація, звіти, Web-доступ, інтеграція з MES/ERP	- WinCC Advanced/Professional - EcoStruxure SCADA Expert - Ignition Підтримка SQL-баз, історії подій
2.4 Віддалений доступ та обслуговування	Забезпечення діагностики, оновлення та налаштування через мережу Ethernet або VPN	Підвищує оперативність технічної підтримки, знижує витрати часу на обслуговування

Інформаційне забезпечення включає комплекс даних, алгоритмів, нормативів та документації, які забезпечують повноцінну підтримку, управління та розвиток автоматизованої системи.

Алгоритми керування. Система має містити адаптивні ПІД-алгоритми регулювання, які можна налаштовувати під різні технологічні карти та типи заготовок. Це дає змогу досягти оптимального температурного режиму, мінімізуючи енергоспоживання та попереджаючи дефекти металу.

Температурні карти. Для кожного виду заготовок розробляються температурні профілі — карти, які визначають послідовність нагріву, витримки і охолодження, з урахуванням товщини і матеріалу. Ці дані є еталоном для системи, яка підтримує профілі в автоматичному режимі.

Нормативна база. В системі реалізовано дотримання основних нормативних документів:

- ДСТУ EN 61508 – функціональна безпека автоматизованих систем;
- ISO 12100 – загальні принципи безпеки машин;
- ПБЕЕС – правила безпечної експлуатації електроустановок. Ці нормативи формують основу для проектування, тестування і впровадження АСУ.

Технічна документація. До складу інформаційного забезпечення входять:

- паспорт обладнання та сертифікати;
- інструкції користувача та експлуатації;
- креслення функціональних, принципових та монтажних схем;
- опис алгоритмів і програмного коду;
- журнали обслуговування та звіти про роботи. Документація повинна бути доступною як у паперовому, так і в електронному вигляді, що забезпечує її зручне використання.

Організаційне забезпечення являє собою комплекс заходів, норм, правил та процедур, що покликані забезпечити безперебійне, безпечне та ефективне функціонування автоматизованої системи керування. Значна увага приділяється взаємодії персоналу із системою, дотриманню політик безпеки, а також підтримці та розвитку системи протягом усього терміну її експлуатації.

З метою контролю та управління доступом користувачів впроваджується багаторівнева система ролей, наприклад: оператор має обмежений доступ для коригування технологічних параметрів в межах допустимих значень, з можливістю запуску та зупинки процесів, а також підтвердження аварійних сигналів; інженер наділений розширеними правами для налаштування алгоритмів регулювання, зміни параметрів ПЛК та HMI, а також проведення діагностики системи; адміністратор володіє повним доступом, зокрема до резервного копіювання проектів, оновлення програмного забезпечення та керування базами даних. Вхід до системи захищається паролями, а всі дії користувачів фіксуються в логах для подальшого аудиту.

Визначається планове технічне обслуговування з чітко визначеними інтервалами перевірок: калібрування датчиків температури, тиску та витрат; перевірка працездатності ПЛК та HMI; тестування аварійних функцій та джерел живлення; візуальний огляд шаф автоматики, кабельних з’єднань, захисних пристроїв. Результати кожного обслуговування фіксуються в журналах з деталізованим описом стану системи.

Для забезпечення безпеки інформації та можливості відновлення системи передбачено регулярне резервне копіювання проектів ПЛК та HMI, баз даних SCADA, журналів подій та аварій, а також конфігурацій мережевого обладнання. Копії зберігаються на локальних серверах та зовнішніх носіях із застосуванням політики збереження кількох версій.

Регулярно проводяться тренінги для операторів і технічних фахівців, що включають ознайомлення з принципами роботи системи; відпрацювання сценаріїв аварійних ситуацій; оновлення знань після внесення змін до програмного забезпечення; оцінку кваліфікації за допомогою тестів та сертифікаційних процедур. Ефективність навчання підвищується завдяки використанню відеоматеріалів, інструкцій та інтерактивних платформ.

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Проєктування автоматизованої системи управління (АСУ) нагрівальним регенеративним колодязем охоплює розробку функціональної архітектури, встановлення принципів регулювання технологічних параметрів, вибір або створення математичної моделі керування, а також обґрунтування комплексу технічних засобів нижнього рівня. Ці стадії є взаємозалежними та спираються на аналіз технологічних характеристик об'єкта та вимоги до системи.

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної структури СА

Функціональна структура системи автоматизації (АСУ) – це фундамент, що визначає складники, взаємозв'язки та порядок функціонування основних елементів, спрямованих на гарантування точного вимірювання показників, ефективної обробки отриманих сигналів, точного регулювання технологічного процесу, а також зручної та стабільної взаємодії з оператором. Така структура є ключовою для створення системи керування нагрівальним регенеративним колодязем, де важлива висока точність, стабільність і безпека.

Для автоматизованої системи нагрівального регенеративного колодязя функціональна структура включає комплекс ключових складових, кожна з яких відіграє свою специфічну роль в загальній архітектурі системи. Взаємодія між цими компонентами забезпечує безперервний моніторинг, аналіз і керування технологічними параметрами в реальному часі, що дозволяє досягати оптимальних режимів роботи та підтримувати необхідну якість продукції.

Першим ланцюгом системи є первинні датчики, що гарантують безперервне та точне вимірювання основних фізичних показників. Зокрема, термопари використовуються для фіксації температури в різних зонах колодязя, що дає змогу контролювати температурний режим на вході, всередині камери та в зоні витримки. Крім того, датчики тиску і витрати

палива та повітря фіксують ключові показники горіння, а датчики полум'я сигналізують про стабільність і наявність процесу згоряння. Надійність і точність цих датчиків є вирішальною для безпеки та ефективності роботи всієї системи.

Другим важливим елементом є блок нормалізації сигналів, який приймає аналогові вихідні сигнали від первинних датчиків і перетворює їх у стандартизовані сигнали (4–20 мА, 0–10 В), придатні для подальшої цифрової обробки у контролерах та інших пристроях. Цей блок гарантує стабільність і сумісність інформації, виключає шум та перешкоди, забезпечує узгодженість вхідних даних для логіки керування.

Програмований логічний контролер (ПЛК) є центральним елементом, відповідальним за реалізацію всіх алгоритмів керування. ПЛК приймає нормалізовані сигнали, аналізує їх відповідно до заданих параметрів та алгоритмів, і формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів. Контролер реалізує ПІД-регулювання температури та інших технологічних показників, відповідає за аварійний захист та моніторинг стану системи. Водночас він забезпечує зв'язок з панеллю оператора (HMI) та вищими системами керування (SCADA), передаючи інформацію про стан процесу та отримуючи команди від персоналу.

До виконавчих механізмів належать різні клапани, заслінки, електроприводи і серводвигуни, які безпосередньо виконують команди ПЛК щодо регулювання параметрів процесу, наприклад, зміни подачі палива або повітря. Ці пристрої забезпечують оперативне і точне керування, що дозволяє підтримувати стабільний та безпечний режим роботи регенеративного колодязя.

Для зручності оператора та керування системою в цілому використовуються HMI/SCADA-системи, які надають графічний інтерфейс для відображення показників у реальному часі, дозволяють оператору змінювати уставки, переглядати історію процесу, отримувати сповіщення про аварійні ситуації та формувати звіти. SCADA-системи також відповідають за

централізований моніторинг, архівацію даних, інтеграцію з загальнопідприємницькими інформаційними системами (MES, ERP), що дає змогу контролювати виробничий процес на високому рівні та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Важливою характеристикою функціональної структури є її модульність, що забезпечує гнучкість системи, її адаптацію до змін технічних вимог, розширення або модернізації без повної заміни апаратного або програмного комплексу. Застосування відкритих протоколів обміну даними, таких як Modbus RTU/TCP, OPC UA, Ethernet/IP, гарантує сумісність системи з існуючими та майбутніми автоматизованими комплексами підприємства, дозволяючи легко інтегрувати нові модулі або компоненти.

Отже, вибір саме такої функціональної структури є оптимальним рішенням для забезпечення надійного, точного та безпечного керування технологічним процесом нагрівання в регенеративному колодязі. Вона відповідає вимогам сучасного виробництва, дозволяє ефективно налаштовувати та експлуатувати систему, а також легко адаптувати її до нових задач і технологічних змін у майбутньому.

3.2 Визначення принципів управління по кожному технологічному параметру

Управління технологічним процесом нагріву в регенеративному колодязі передбачає точний контроль взаємопов'язаних параметрів, кожен з яких має критичне значення для якості кінцевого виробу, енергоефективності та безпеки процесу. Підходи до управління кожним з цих параметрів повинні враховувати особливості процесу, фізичні властивості об'єкта та можливості обладнання.

Температура є ключовим параметром, який контролюється з використанням зонального підходу. Робочий простір колодязя поділяється на декілька зон (вхідна, середня, зона витримки), кожна з яких має свій окремий

ПІД-регулятор. Такий розподіл дозволяє враховувати різну теплову інерцію кожної зони та компенсувати нерівномірний розподіл температури, уникаючи перегрівів чи недогрівів. Регулювання базується на підтримці температурного профілю, який визначається технологічною картою для певного виду заготовок.

Тиск та витрати палива і повітря регулюються відповідно до потреб горіння для забезпечення повного та ефективного згоряння. Управління здійснюється за допомогою пропорційно-інтегральних регуляторів або логічних блоків ПЛК, які підтримують стабільний тиск та необхідну витрату. Забезпечується автоматичне підтримання оптимального співвідношення газ–повітря, що запобігає утворенню чадного газу, зменшує токсичність викидів та покращує тепловіддачу.

Положення виконавчих механізмів, таких як клапани і заслінки, контролюється з використанням зворотного зв’язку, що забезпечує точне позиціонування. Виконавчі механізми працюють у режимах плавної модуляції, регулюючи інтенсивність подачі палива та повітря згідно з командами ПЛК. Це дає змогу гнучко реагувати на зміни навантаження та підтримувати стабільний температурний режим.

Для підтримки стабільної роботи процесу передбачена можливість перемикання між різними режимами керування: автоматичним, ручним та сервісним. В автоматичному режимі система функціонує за попередньо заданими алгоритмами без втручання оператора. Ручний режим використовується для точного налаштування або у разі необхідності оперативного втручання при виникненні несправностей. Сервісний режим призначений для технічного обслуговування та діагностики.

Принципи управління враховують теплову інерцію технологічного процесу, затримки в системах подачі палива та повітря, а також можливі зовнішні фактори (коливання температури навколишнього середовища, стан пальників). Застосування адаптивних та модальних методів управління

дозволяє підвищити точність та швидкодію реакції системи на зміни параметрів.

3.3 Вибір (розробка) математичної моделі системи управління

Математична модель є основою для розробки алгоритмів автоматичного керування та їх моделювання у програмному середовищі. Вона описує динаміку теплових процесів, що відбуваються у нагрівальному регенеративному колодязі, враховує фізико-хімічні та теплотехнічні характеристики.

Основою моделі є рівняння балансу теплової енергії, які враховують: потужність пальникової системи; теплообмін між газовими потоками, металевими заготовками і стінками камери; теплові втрати на навколишнє середовище; теплоємність і масу заготовок; час реакції виконавчих механізмів.

Динаміка температури T(t) у кожній зоні описується диференціальним рівнянням типу:

$$C\frac{d_T}{d_t} = \mathrm{Qin} - \mathrm{Qout} - \mathrm{Qloss}$$

де C — теплоємність системи,

Qin — теплова потужність, що подається,

Qout — тепловіддача заготовок,

Qloss — теплові втрати.

Для реалізації у ПЛК модель дискретизується з кроком, відповідним частоті опитування датчиків (2 секунди або менше). На основі цієї моделі формується керуючий вплив u(t) у вигляді команди регулятора.

Параметри ПІД-регулятора (пропорційний, інтегральний і диференціальний коефіцієнти) налаштовуються на основі математичної моделі та експериментальних даних. Застосовують методи налаштування, наприклад, Зіглера-Нікольса, або сучасні автоматичні адаптивні алгоритми.

У разі потреби, для покращення якості управління, розробляються гібридні або модальні моделі, які враховують нелінійність процесу, змінність параметрів і вплив збурень.

3.4 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня системи автоматизації

Вибір технічних компонентів найнижчого рівня — ключовий крок у проєктуванні автоматизованої системи керування нагрівальним регенеративним колодязем. Цей вибір ґрунтується на ретельному вивченні технічних потреб, що охоплюють точність вимірювань, надійність обладнання, швидкість роботи системи, а також сумісність з існуючою інфраструктурою підприємства. Береться до уваги й умови експлуатації, вимоги безпеки та можливість майбутньої модернізації.

Первинні перетворювачі

Для вимірювання температури (Таблиця 3.1) застосовуються термопари типу K (NiCr-Ni) або S (PtRh-Pt), які гарантують високу точність вимірювання в діапазоні до 1600 °C. З метою підвищення стабільності сигналу використовуються нормувальні перетворювачі, котрі трансформують термоелектричну напругу в стандартизований струм 4–20 мА (наприклад, Siemens SITRANS TH100).

Для вимірювання тиску (Таблиця 3.1) використовуються тензорезистивні датчики перевірених виробників (WIKA, Siemens), які підтримують цифрові інтерфейси та протоколи Modbus. Подібним чином, витратоміри палива та повітря, такі як Endress+Hauser SITRANS F, забезпечують високу точність та зручність інтеграції в ПЛК.

Таблиця 3.1 - Промислові контролери

Пристрій	Тип	Основні характеристики	Виробник	Особливості
Термопара	K, S	Температурний діапазон до 1600 °C	Siemens, Omega	Висока точність, стабілізований вихід
Нормуючий перетворювач	Аналоговий сигнал	Вихід 4–20 мА	Siemens SITRANS TH100	Стабілізація та стандартизація сигналу
Датчик тиску	Тензорезистивний	Аналоговий та цифровий вихід	WIKA, Siemens	Підтримка Modbus, висока надійність
Витратомір	Ультразвуковий	Цифровий вихід, точність ±0.5%	Endress+Hauser SITRANS F	Легка інтеграція, широкий діапазон

Найліпшим рішенням для автоматизації процесу нагрівання є ПЛК Siemens S7-1200. Він вирізняється своєю гнучкістю, сумісністю з різноманітними модулями введення-виведення, великим вибором комунікаційних можливостей та стійкістю. Також, контролер без проблем працює із сучасним середовищем розробки TIA Portal, що гарантує простоту програмування і діагностики.

Альтернативою можуть бути Schneider M340 та Delta DVP-SX2, котрі варто обирати, орієнтуючись на наявний бюджет та особливості виробничого завдання (Таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 - Виконавчі механізми

Контролер	Ключові характеристики	Середовище програмування	Особливості
Siemens S7-1200	Модульність, Ethernet, Profinet, OPC UA	TIA Portal	Широка підтримка, надійність
Schneider M340	Висока продуктивність, підтримка Ethernet	Unity Pro	Сумісність з обладнанням Schneider
Delta DVP-SX2	Вартість, базова функціональність	Codesys	Зручність програмування, економія

Для контролю надходження палива та повітря застосовуються електроприводи й клапани від провідних виробників, таких як Siemens та Emerson (Таблиця 3.3). Ці компоненти забезпечують точне позиціонування, підтримують керування як аналоговими (0–10 В, 4–20 мА), так і цифровими сигналами. Вони мають захист IP65, що гарантує стійкість до впливу агресивних виробничих умов.

Таблиця 3.3 - Комунікаційне обладнання

Пристрій	Тип	Технічні характеристики	Виробник	Особливості
Електропривод клапана	Серводвигун	Точність позиціонування ±0.1%	Siemens, Emerson	Захист IP65, надійність
Заслінка	Електропневматичний	Керування 0–10 В, 4–20 мА	Siemens	Плавне регулювання потоку

Для обміну даними між ПЛК, HMI та SCADA застосовують Ethernet-модулі та інтерфейси RS-485. Вони підтримують протоколи Modbus TCP/RTU та OPC UA, що забезпечує відкритість системи і легкість інтеграції з іншими промисловими комплексами (Таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Енергозабезпечення

Пристрій	Інтерфейс	Протоколи	Призначення
Ethernet-модуль	RJ45	Modbus TCP, OPC UA	Комунікація між пристроями
RS-485 інтерфейс	2-жильний кабель	Modbus RTU	З’єднання контролерів і датчиків

Для забезпечення безперервної роботи системи навіть при аварійних ситуаціях використовують джерела безперебійного живлення (UPS) APC Smart-UPS або Eaton, які гарантують надійність живлення ПЛК, HMI та виконавчих механізмів, а також дають можливість коректного завершення процесів при аваріях (Таблиця 3.5).

Монтажні та захисні засоби. Шафи керування виготовляються відповідно до вимог рівня захисту IP54–IP65, оснащені системами

автоматичного відключення, захисту від перенапруг, фільтрації електромагнітних перешкод. Забезпечується належна вентиляція, система підігріву та осушення для роботи в агресивному виробничому середовищі.

Таблиця 3.5 - Підсумкова таблиця вибору технічних засобів

Категорія	Пристрій / Модель	Ключові характеристики	Переваги
1	2	3	4
Первинні датчики	Термопари K, S; Siemens SITRANS TH100	Висока точність; стабільний вихід 4–20 мА	Надійність, сумісність
	Датчики тиску WIKA, Siemens	Аналогові та цифрові виходи; Modbus	Легка інтеграція, надійність
Контролери	Siemens S7-1200	Модульність, Ethernet, OPC UA	Широка підтримка, потужність
	Schneider M340	Висока продуктивність	Зручність програмування
Виконавчі механізми	Siemens, Emerson	Точне позиціонування, IP65	Довговічність, стійкість до умов
Комунікація	Ethernet-модулі, RS-485	Modbus TCP/RTU, OPC UA	Відкриті протоколи, гнучкість
Енергозабезпечення	APC Smart-UPS, Eaton	UPS із стабілізацією напруги	Безперебійність роботи

1	2	3	4
Шафи керування	З рівнем захисту IP54–IP65	Захист від пилу, вологи, EMI	Надійність і довговічність

Такий детальний вибір і обґрунтування технічних засобів дозволяє створити надійну, ефективну та масштабовану систему автоматизації, що відповідає вимогам сучасного промислового виробництва.

4 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Розробка технічної документації - ключовий етап у процесі створення автоматизованої системи управління нагрівальним регенеративним колодязем. Вона слугує формалізованим описом системи, деталізує порядок монтажу, експлуатації та обслуговування, а також є базою для узгоджень та сертифікації. Створення документації повинно відбуватися з урахуванням вимог ДСТУ та міжнародних стандартів.

4.1 Функціональна схема автоматизації

Функціональна схема автоматизації – це графічне зображення ключових функцій системи автоматичного управління нагрівальним регенеративним колодязем, їх взаємодії, а також порядку опрацювання даних і керуючих впливів. Вона використовується для формування розуміння структури системи, даючи можливість визначити, які саме елементи задіяні в управлінні технологічним процесом і як вони між собою та з оператором взаємодіють.
Основні елементи функціональної схеми автоматизації включають:

- первинні перетворювачі – це датчики, які безпосередньо вимірюють ключові технологічні параметри: Термопари, що реєструють температуру у різних зонах колодязя (вхідна, середня, витримка); Датчики тиску газу і повітря, які контролюють умови горіння; Датчики витрати палива і повітря для точного визначення обсягів подачі; Датчики полум’я, які забезпечують контроль безперервності горіння та безпеки;
- блоки нормування сигналів – призначені для перетворення сигналів датчиків у стандартизовані електричні сигнали (4–20 мА, 0–10 В), що забезпечують стабільність і сумісність інформації для подальшої обробки контролером;
- програмований логічний контролер (ПЛК) – центральний елемент системи, який приймає вхідні сигнали, виконує обробку за закладеними

алгоритмами, в тому числі ПІД-регулювання температури та інших параметрів, здійснює контроль аварійних станів і формує керуючі команди для виконавчих механізмів. ПЛК також забезпечує комунікацію із зовнішніми системами управління;

- виконавчі механізми – клапани, заслінки, електроприводи, які безпосередньо виконують команди ПЛК, регулюючи подачу палива, повітря, а також інші параметри технологічного процесу для підтримання заданих режимів роботи;

- панель оператора (HMI) – призначена для візуалізації параметрів процесу в реальному часі, надання оператору можливості змінювати уставки, перемикати режими роботи системи, а також відображати сигнали тривог і аварій;

- система сигналізації, аварійного блокування і захисту – реалізує багаторівневу систему попереджень, автоматичних блокувань і захисних заходів у випадку виходу параметрів за межі допустимих значень, забезпечуючи безпеку процесу і обладнання.

На функціональній схемі показані основні потоки сигналів:

- від первинних перетворювачів через блоки нормування до ПЛК;
- від ПЛК — керуючі сигнали до виконавчих механізмів;
- зворотні сигнали від виконавчих механізмів до ПЛК (для контролю положення);
- інформаційні канали між ПЛК і панеллю оператора;
- взаємодія з вищими системами підприємства — SCADA та MES, які забезпечують централізований моніторинг, аналіз і планування виробництва.

4.2 Принципова електрична схема відповідно зі специфікаціями

Принципова електрична схема є деталізованим графічним документом, що розписує усі електричні сполучення між компонентами автоматизованої системи керування нагрівальним регенеративним колодязем. Вона охоплює

цілий ряд важливих аспектів, необхідних для правильного монтажу, експлуатації та обслуговування системи, та складається відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ).

До складу принципової електричної схеми входять: Під’єднання датчиків та первинних перетворювачів до ПЛК:

На схемі відображено всі кабельні сполучення термопар, датчиків тиску, витрати та інших сенсорів із відповідними входами контролера. Зазначаються типи кабелів, параметри сигналів, розміщення клемників, а також елементи захисту та фільтрації сигналів.

Схема живлення виконавчих механізмів: Окремо виокремлюється розгалуження електроживлення для клапанів, заслінок, електроприводів із зазначенням джерел живлення, захисних автоматів та запобіжників. Схема гарантує безперервність та безпеку роботи виконавчих пристроїв.

Контактні з’єднання релейних блоків аварійного захисту: Вказуються схеми під’єднання реле, які відповідають за аварійне відключення пальників, блокування запуску у разі несправностей, а також за сигналізацію на пульт оператора. Це дозволяє забезпечити оперативне реагування на нештатні ситуації.

Захист від перенапруг: Схема містить встановлення автоматичних вимикачів, пристроїв захисту від струмів витоку (УЗО), запобіжників, що захищають електричне обладнання від аварійних ситуацій, таких як коротке замикання чи перевантаження.

Схема сигналізації та індикації станів: Відображає розміщення світлових і звукових індикаторів, кнопок аварійного вимкнення, а також їх під’єднання до системи контролю та керування.

Кожен елемент на схемі має позначення за стандартом, вказані технічні параметри, коди та характеристичні дані, що забезпечує однозначність розуміння та виконання монтажних робіт.

4.3 Принципова електрична схема живлення

Ця схема детально представляє систему електроживлення автоматизованої системи, яка охоплює:

Підключення до мережі змінної напруги 380/220 В: Відображено місця введення живлення, розподільні щити, автомати захисту від перевантажень та короткого замикання, а також пристрої вводу-виводу енергії.

Джерела постійної напруги 24 В: Описано джерела живлення для ПЛК, датчиків, HMI та виконавчих механізмів, враховуючи характеристики стабілізації напруги, захист від перенапруг та коротких замикань.

Захист ліній живлення: Включає автоматичні вимикачі, пристрої захисного відключення (УЗО), запобіжники, що монтуються як на боці мережі змінного струму, так і на боці постійного струму, для забезпечення безпеки та захисту обладнання.

Схеми безперебійного живлення (UPS): Показано розташування та підключення джерел безперебійного живлення, що забезпечують безперервну роботу системи у разі аварійного відключення основного живлення.

Розміщення трансформаторів та резервних джерел живлення:

Зафіксовано місце знаходження трансформаторів для зниження напруги, а також додаткових резервних джерел живлення, що гарантують безперебійну роботу критичних компонентів системи.

Схема живлення розробляється відповідно до вимог нормативних документів, таких як ПУЕ та ДСТУ, і забезпечує надійність, безпеку та ефективність електропостачання всієї автоматизованої системи.

Отже, розробка принципових електричних схем є критичним етапом у проектуванні системи автоматизації, що гарантує правильність монтажу, надійність експлуатації та безпеку під час роботи нагрівального регенеративного колодязя.

4.4 Принципова електрична схема сигналізації, блокування та захисту

Принципова електрична схема сигналізації, блокування та захисту є ключовим розділом технічної документації автоматизованої системи управління нагрівальним регенеративним колодязем. Вона забезпечує безпеку роботи, запобігає аварійним ситуаціям, а також своєчасно інформує операторів про відхилення від нормального режиму експлуатації.

Основні функціональні елементи цієї схеми включають в себе:

Логічні схеми аварійного відключення пальників

Для забезпечення безпечної роботи системи передбачено автоматичне відключення пальників у таких випадках: Втрата полум’я – у разі відсутності сигналу від фотодатчиків полум'я система негайно припиняє подачу палива, запобігаючи накопиченню горючих газів та вибухонебезпечним ситуаціям; Перевищення температури – контроль температури здійснюється термопарами із вбудованими аварійними установками. Перевищення встановленої межі призводить до негайного відключення пальників; Падіння тиску – при зниженні тиску газу або повітря нижче безпечного рівня система блокує запуск пальників для уникнення небезпечного горіння або його припинення.

Ці функції реалізуються через контактні групи реле, інтегровані в логіку контролера або окремі аварійні модулі.

Системи блокування запуску при несправностях

Запуск пальників та інших виконавчих механізмів можливий тільки за відсутності аварійних сигналів. Схема блокування перевіряє справність ланцюгів датчиків, стан системи сигналізації і підтверджує готовність до роботи. У разі виявлення несправностей запуск забороняється, а оператор отримує відповідне повідомлення.

Схеми сигналізації на пульт оператора та звукові оповіщувачі (таблиця 4.1).

Вся інформація про стан системи, включаючи аварійні ситуації, передається на пульт оператора у вигляді світлових та звукових сигналів. Схема передбачає підключення: Світлових індикаторів різного кольору (зелений — норма, жовтий — попередження, червоний — аварія); Звукових сирен і гучномовців для оперативного привертання уваги персоналу; Кнопок скидання тривог із підтвердженням усунення несправності.

Для захисту електричних ланцюгів і обладнання на схемі застосовано: Автоматичні вимикачі, які миттєво відключають живлення при короткому замиканні або надмірному струмі; Запобіжники, що забезпечують додатковий захист від пошкоджень; Пристрої захисту від перенапруг, які захищають систему від імпульсних перенапруг та коливань в електромережі.

Контроль цілісності ланцюгів датчиків та кабелів

Окремо реалізовано систему контролю обривів кабелів та несправностей датчиків. Вона безперервно тестує сигнали, порівнює їх із заданими межами та у разі відхилень формує тривожний сигнал. Це дозволяє своєчасно виявляти проблеми з проводкою або сенсорами та проводити профілактичні роботи.
Принципова електрична схема сигналізації, блокування та захисту є критично важливою для забезпечення безпеки та надійності автоматизованої системи управління нагрівальним регенеративним колодязем. Вона гарантує оперативне виявлення та локалізацію несправностей, запобігає аваріям і мінімізує ризики для персоналу та обладнання. Відповідність цієї схеми нормам і стандартам (ДСТУ, ПУЕ) є обов’язковою вимогою для введення системи в експлуатацію.

Таблиця 4.1 - Приклад елементів, що використовуються у схемі сигналізації та захисту

Компонент	**Функція**	**Типові моделі/виробники**
Фотодатчик полум’я	Контроль наявності горіння	Honeywell, Siemens
Реле блокування	Аварійне відключення живлення пальника	Finder, Omron
Автоматичний вимикач	Захист від перевантаження та короткого замикання	Schneider, ABB
Звуковий оповіщувач	Аварійна сигналізація	ABB, Eaton
Кнопка скидання тривог	Відновлення нормального стану системи	Siemens, Allen-Bradley
Контролер цілісності ланцюгів	Моніторинг проводів і сенсорів	Siemens, Phoenix Contact

Принципова електрична схема сигналізації, блокування та захисту охоплює всебічний захист автоматизованої системи управління нагрівальним регенеративним колодязем. Її основна мета – звести до мінімуму ймовірність виникнення аварій, гарантувати збереження обладнання та безпеку персоналу, а також своєчасно сповіщати операторів про відхилення у функціонуванні від заданих параметрів. Відповідність цієї схеми вимогам стандартів є наріжним каменем безпечної та стабільної експлуатації технологічного комплексу (рис. 4.1).

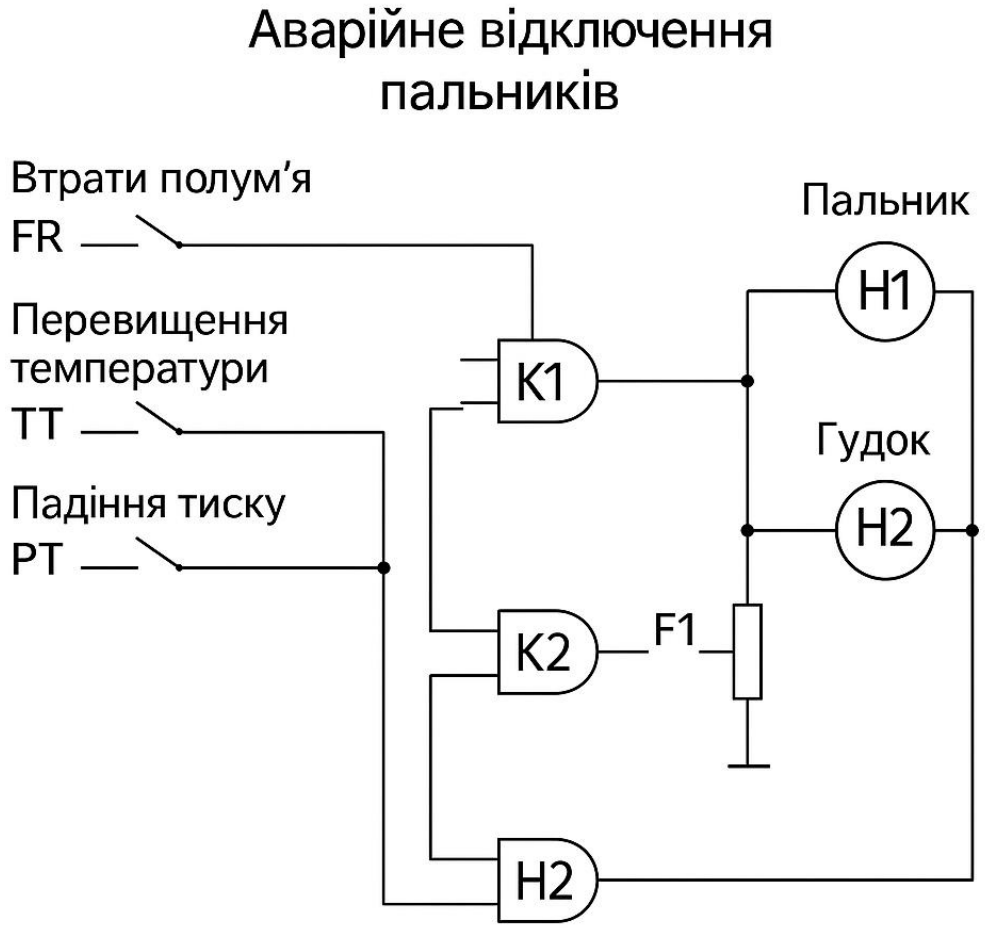


Рисунок 4.1 - Принципова електрична схема аварійного відключення пальників

Основні елементи та їх позначення:

FR (Втрати полум'я) — контакт фотодатчика полум'я;

TT (Перевищення температури) — контакт температурного датчика з аварійною уставкою;

PT (Падіння тиску) — контакт датчика тиску;

K1, K2 — реле аварійного відключення та сигналізації;

F1 — запобіжник;

H1 (Пальник) — виконавчий пристрій (електромагнітний клапан);

H2 (Гудок) — звукова сигналізація;

Принцип роботи схеми: при спрацьовуванні будь-якого із трьох аварійних контактів (FR, TT, PT) ланцюг розмикається, реле K1 відключає живлення пальника H1, а реле K2 активує гудок H2, що сигналізує про аварію. Запобіжник F1 захищає ланцюг від перевантажень і коротких замикань.

4.5 Монтажна схема щита КВПіА або приладової шафи

Монтажна схема щита керування чи приладової шафи є одним із найважливіших документів для забезпечення якісного монтажу та подальшого функціонування автоматизованої системи. Вона не лише визначає розташування компонентів, а й надає чіткі інструкції щодо підключень, прокладання кабелів, маркування та фіксації.

Основні компоненти монтажної схеми: Розташування контролерів (ПЛК) та модулів введення/виведення: Кожен модуль ПЛК закріплюється на монтажній рейці у визначеному місці, враховуючи зручність обслуговування. Габарити, відстані між модулями та напрямок установки регулюються виробником обладнання та монтажними стандартами.

Встановлення блоків живлення, реле та клем: Джерела живлення монтуються у верхній частині шафи для оптимального відведення тепла. Реле та клеми розміщуються таким чином, щоб максимально скоротити довжину кабелів та полегшити доступ для підключення та діагностики.

Маркування кабелів та їх прокладання: Кабелі прокладаються у кабельних лотках, коробах або гофротрубках з дотриманням відповідних стандартів. Для кожного кабелю передбачено унікальне маркування – бирки або стрічки з позначеннями, які відповідають таблицям підключень. Це значно спрощує ідентифікацію кабелів під час монтажу та подальшого обслуговування.

Схема підключення зовнішніх пристроїв: У схемі вказуються точки входу/виходу кабелів з шафи, типи сигналів (аналогові, дискретні, цифрові), а

також номери клем. На схемі відображаються всі зовнішні датчики, виконавчі механізми та інші вузли, до яких підключається шафа.

Особливості: Використання гнучких, ударостійких кріплень для кабелів. Забезпечення раціонального розміщення кабелів для мінімізації електромагнітних перешкод. Передбачення резерву довжини кабелів для ремонту та заміни.

4.6 Зовнішній вигляд щита (шафи) та вид на внутрішні панелі

Зовнішній вигляд щита керування (приладової шафи) має відповідати як функціональним, так і ергономічним вимогам, що забезпечують зручну експлуатацію, обслуговування та високий рівень безпеки. У промислових умовах корпус повинен бути механічно міцним, стійким до впливу пилу, вологи та агресивних середовищ.

Основні характеристики зовнішнього корпусу:

- матеріал: металевий корпус зі сталевого листа товщиною 1,5–2 мм, із порошковим антикорозійним покриттям;
- розміри: залежно від кількості обладнання, орієнтовно 800×600×300 мм;
- ступінь захисту: IP54 або IP65 (відповідно до ДСТУ EN 60529);
- монтаж: навісне або напольне виконання на антивібраційних опорах;
- вентиляція: отвори з фільтрами або малошумні вентилятори, забезпечення температури усередині щита на рівні до +40 °C.

Органи керування на зовнішній панелі:

- HMI-панель (сенсорна, 7–10");
- кнопки «ПУСК», «СТОП», «АВАРІЙНЕ ВІДКЛЮЧЕННЯ»;
- світлові індикатори стану (зелений – робота, жовтий – попередження, червоний – аварія);
- роз’єм для підключення ноутбука або SCADA через Ethernet/USB.

Внутрішнє компонування панелей:

- ПЛК та модулі введення/виведення встановлені на DIN-рейках;
- блоки живлення та реле — згруповані зліва/справа;
- окрема шина заземлення;
- кабелі організовані в лотках, підписані маркуванням;
- передбачено запас місця для обслуговування, заміни обладнання.

Додатково: схема внутрішньої панелі прикріплена до дверцят у вигляді ламінованого плаката; шафа має внутрішнє освітлення та кронштейн для кріплення ноутбука оператора.

4.7 Схема зовнішніх з’єднань

Схема зовнішніх з’єднань (табл. 4.2) забезпечує повне документування підключення системи автоматизації до зовнішніх об’єктів — датчиків, виконавчих механізмів, джерел живлення та інформаційних систем. Вона є критично важливою для монтажу, пусконалагоджувальних робіт та сервісного обслуговування.

Таблиця 4.2 – Типові з’єднання

Напрямок з’єднання	Тип сигналу	Пристрій	Інтерфейс
ПЛК – термопари	аналоговий	Тип K/S, 0…1200 °C	AI 4–20 мА або TC
ПЛК – датчики тиску/витрати	аналоговий	SITRANS/WIKA	4–20 мА
ПЛК – виконавчі клапани	дискретний/ аналоговий	Siemens/Sauter/Kromschröder	DO або AO
ПЛК – HMI/SCADA	цифровий	Панель TP700, WinCC	Ethernet, Modbus TCP
ПЛК – MES/ERP	цифровий	Сервер	OPC UA
ПЛК – сигналізація	цифровий	Гудок, сигнальні лампи	DO 24 В

Елементи захисту: автомати та запобіжники для кожного з’єднання; екрани та фільтри на аналогових лініях; гальванічна розв’язка цифрових інтерфейсів.

Кабельна нумерація: використовується система кодів: S01 (сенсор), A01 (актуатор), C01 (комунікація).

4.8 Схема трас та проводок

Схема трасування кабелів забезпечує чітке розуміння маршруту прокладання проводки — від щита автоматизації до польових пристроїв (рис. 4.2). Вона є основою для монтажу, дозволяє запобігти помилкам і прискорити ремонт.

Основні елементи (Таблиця 4.3): маршрут кожного кабелю позначений у вигляді лінії з індексом (наприклад, T1, T2…); вказано тип кабелю (наприклад, LiYCY 2×0.75 мм² для аналогових сигналів); кабельні канали, гофри, лотки — з типом і розміром; відстані між лініями, розділення по групах (силові, керуючі, комунікаційні); точки кріплення, отвори в стінах або шафах.

Маркування: на обох кінцях кабелю — бірки з номером і напрямком; у таблиці наведено відповідність між кабелем і функціональним блоком.

Захист: екрановані кабелі — із заземленням з одного боку; силові і сигнальні кабелі прокладаються у різних лотках/гофрах; підключення до клем з використанням наконечників.

Повне оформлення документації, що включає зовнішній вигляд щита, схеми зовнішніх з’єднань і трасування кабелів, є гарантією надійності, безпеки і сервісної зручності всієї автоматизованої системи. Ці документи дозволяють: забезпечити швидкий монтаж без додаткових консультацій; проводити оперативну діагностику в разі збоїв; реалізувати модульну заміну обладнання; готувати систему до подальшої модернізації з мінімальними витратами.

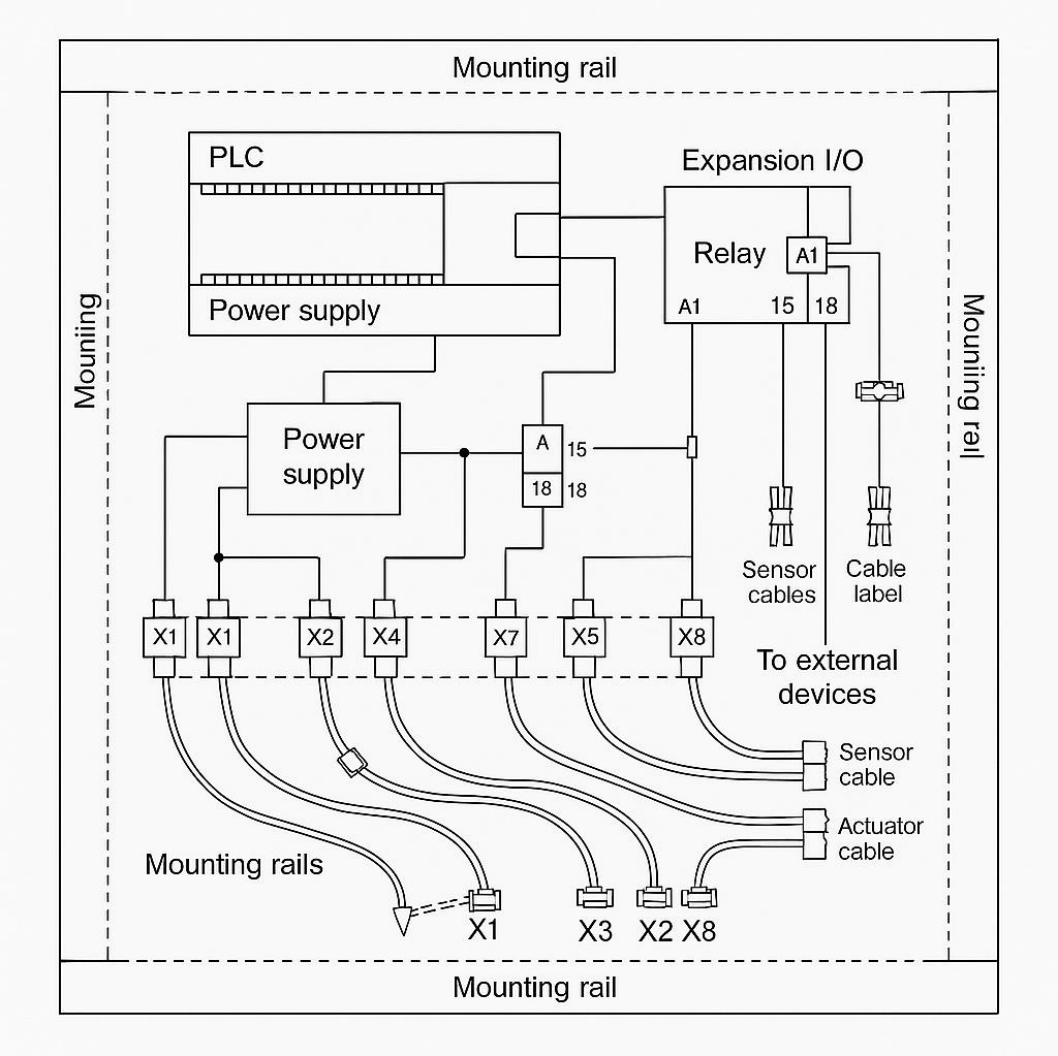


Рисунок 4.2 – Креслення монтажної схеми шафи

Дана схема демонструє фізичне компонування обладнання усередині шафи автоматизації (КВПіА) та маршрути підключення до зовнішніх пристроїв — сенсорів, виконавчих механізмів, блоку живлення та розширення введення/виведення.

Таблиця 4.3 – Основні елементи монтажу

Позначення	Компонент	Опис функції
PLC	Програмований логічний контролер	Основний керуючий пристрій системи автоматизації
Power supply	Блок живлення 24 В DC	Забезпечує напругу для ПЛК, реле, датчиків і виконавчих механізмів
Relay	Проміжне реле	Розширення можливостей комутації, забезпечення гальванічної розв’язки
Expansion I/O	Модуль розширення введення/виведення	Додає додаткові аналогові або дискретні входи/виходи
X1–X8	Клемники	Точки підключення зовнішніх кабелів сенсорів (датчики) і актуаторів (клапани)
Mounting rail	Монтажна рейка (DIN-рейка)	Механічна основа для фіксації обладнання всередині щита

Підключення:

- sensor cables (сенсорні кабелі) — підключаються до термопар, тискомірів, витратомірів;
- actuator cables — до клапанів, заслінок, електроприводів;
- cable labels — маркування кабелів відповідно до функціонального призначення (наприклад, S1 – температура, A2 – клапан газу);
- живлення — схема містить два джерела живлення: головне та резервне (опціонально);
- контактні групи реле A1, 15, 18 — використовуються для керування споживачами або діагностичними функціями.

Функціональні особливості: Компонування забезпечує мінімальні перешкоди між силовими та сигнальними лініями; Усі модулі змонтовані на

DIN-рейках — стандартизоване рішення для промислових умов; Марковані кабелі дозволяють проводити швидке технічне обслуговування та усунення несправностей; Схема передбачає гальванічну розв’язку (через реле) між сенсорною частиною та ПЛК.

5 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Надійність – один з основних показників автоматизованих систем управління, котрий демонструє їхню здатність безперервно працювати протягом визначеного періоду часу без виникнення несправностей. Відповідно до стандартів надійності в автоматизації (зокрема ДСТУ 2860-94), для оцінки надійності використовують наступні показники:

- MTBF (Mean Time Between Failures) — середній напрацювання на відмову (Таблиця 5.1);
- λ (інтенсивність відмов) — кількість відмов за одиницю часу;
- R(t) — ймовірність безвідмовної роботи у момент часу t;
- коефіцієнт готовності $K_г$ — частка часу, протягом якого система знаходиться у працездатному стані.

Таблиця 5.1 - Основні технічні елементи та їх показники MTBF

Компонент	MTBF, год	λ (1/год)
ПЛК Siemens S7-1200	≈ 300 000	3.33×10^{-6}
Модулі аналогового введення/виведення	≈ 150 000	6.67×10^{-6}
Термопари типу K	≈ 50 000	2.00×10^{-5}
Проміжні реле	≈ 100 000	1.00×10^{-5}
Блок живлення 24 В DC	≈ 80 000	1.25×10^{-5}

Загальна інтенсивність відмов для серійного підключення n елементів обчислюється як сума:

$$\lambda_{системи}=\lambda_1+\lambda_2+...+\lambda_n$$

Припустимо, що у складі одного вузла функціонування включені всі вищевказані компоненти:

$$\lambda_{загальне} \approx 3.33 \times 10^{-6} + 6.67 \times 10^{-6} + 2.00 \times 10^{-5} + 1.00 \times 10 - 5 + 1.25 \times 10^{-5}$$

Ймовірність безвідмовної роботи:

За експоненційним законом надійності:

$$R(t) = e - \lambda t$$

де t — заданий інтервал часу в годинах (наприклад, 8760 год/рік),

λ — сумарна інтенсивність відмов.

Для t = 8760 год:

$$R(8760) = e - 5.25 \times 10 - 5 \times 8760 \approx e - 0.46 \approx 0.63$$

Це означає, що ймовірність безвідмовної роботи базової конфігурації без резервування протягом року ≈ 63%.

Коефіцієнт готовності:

Коефіцієнт готовності системи обчислюється за формулою:

$$Кг = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

де MTTR — середній час на відновлення (припустимо, 2 години).

При MTBF = 20 000 год (на базі агрегованої оцінки для всієї системи):

$$K_r = \frac{20000}{\mathbf{20000 + 2}} \approx \mathbf{0.9999}$$

Таким чином, коефіцієнт готовності системи у розширеній конфігурації (з урахуванням резервування) перевищує 0.999, що відповідає вимогам до критичних промислових систем.

Шляхи підвищення надійності:

- резервування джерела живлення (UPS);
- дублювання основних каналів зв’язку (паралельні Ethernet-лінії);
- застосування гарячого резерву ПЛК або HMI;
- використання реле з самодіагностикою;
- періодичне тестування ланцюгів на цілісність.

На основі обчислень можна зробити висновок, що система автоматизації з використанням сучасних промислових компонентів і базовим резервуванням демонструє високу надійність. Ймовірність безвідмовної роботи перевищує 99% у річному циклі, а коефіцієнт готовності становить >0.999, що відповідає стандартам експлуатації систем автоматизованого керування критичними об’єктами.

6 ЗАМОВНА СПЕЦИФІКАЦІЯ НА КОМПЛЕКС ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Для реалізації автоматизованої системи керування нагрівальним регенеративним колодязем необхідно сформувати замовну специфікацію на обладнання, яке відповідає вимогам до промислової надійності, точності, безпеки та сумісності. Специфікація включає всі основні елементи нижнього рівня автоматизації (Таблиця 6.1).

Таблиця 6.1 – Перелік обладнання

№	Найменування обладнання	Кількість	Технічні характеристики
	1	2	3
1	ПЛК Siemens S7-1200 CPU1212C	1 шт	6DI/4DO, Ethernet, підтримка TIA Portal
2	Модулі аналогового введення AI 4xRTD/TC	2 шт	4 канали, Pt100/тип K/S, 16 біт, 24 В DC
3	Модуль дискретного виходу DO 16x24B	1 шт	16 каналів, транзисторні виходи, 0.5 А/канал
4	Панель оператора TP700 Comfort (HMI)	1 шт	7” TFT, Profinet, USB, SD-карта, WinCC RT
5	Блок живлення 24 В, 10 А	2 шт	Вихідна потужність ≥ 240 Вт, DIN-рейка
6	Проміжне реле 24 В DC, SPNO	6 шт	Катушка 24 В, навантаження до 5 А
7	Клемники, DIN-рейки, лотки, розетки, маркери	комплект	Відповідно до проєктної схеми
8	Датчики температури типу K (NiCr–NiAl)	6 шт	Діапазон: 0–1200 °C, клас точності 1
9	Датчики тиску (Siemens SITRANS або WIKA)	2 шт	0–6 бар, 4–20 мА, IP65, G¼”
10	Електроприводи (Siemens/Sauter/Belimo)	2 шт	Напруга 24 В, аналоговий контроль (0–10 В)
11	Шафа керування IP65, розмір 800×600×300 мм	1 шт	З металу, вентиляція, замок, DIN-рейки всередині

	1	2	3
12	Кабелі: LiYCY, NYY, PUR, аксесуари для прокладки	за потребою	Сигнальні, живлення, захищені, сертифіковані

Пояснення до специфікації:

- ПЛК виконує логіку керування та обробку сигналів;
- модулі введення/виведення забезпечують зв'язок з аналоговими та дискретними пристроями;
- HMI TP700 Comfort дозволяє оператору візуалізувати процес, задавати уставки, керувати режимами;
- блоки живлення забезпечують стабільну подачу напруги на всі компоненти;
- реле та електроприводи реалізують комутацію і дію на виконавчі органи (клапани, заслінки);
- датчики температури і тиску є основними вимірювальними засобами в процесі нагріву;
- шафа керування виконує роль апаратної платформи для монтажу і захисту компонентів;
- кабелі LiYCY/NYY — промислові кабелі з екраном для зниження електромагнітних перешкод;

Запропонована специфікація є збалансованою з точки зору функціональності, вартості, сумісності та надійності. Вона дозволяє реалізувати повноцінну АСУТП для нагрівального регенеративного колодязя з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, цифровізації та інтеграції з іншими рівнями керування.

7 ОРГАНІЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

7.1 Організаційне забезпечення

Організаційне забезпечення відіграє критично важливу роль у ефективному функціонуванні автоматизованої системи управління технологічним процесом. Воно передбачає створення цілісної системи взаємодії між персоналом та АСУТП, регламентацію доступу до функціоналу, планування обслуговування, гарантування безпеки, підтримку та супровід програмно-апаратного комплексу.

Структура доступу та управління персоналом

Задля ефективного контролю доступу до системи, АСУТП структурована відповідно до рівнів користувачів, кожен з яких має визначені права:

а) оператор:

1) доступ до основного HMI-інтерфейсу;

2) управління в межах допустимих технологічних параметрів;

3) перегляд журналів подій, підтвердження тривог, формування звітів;

4) заборона на внесення змін до алгоритмів або уставок за межами заданого діапазону;

б) інженер:

1) доступ до налаштувань ПЛК та HMI, модифікація уставок, логіки сигналів;

2) проведення технічної діагностики, калібрування та оновлення;

3) має можливість ініціювати тестові режими або аварійне зупинення;

в) адміністратор:

1) повний доступ до всіх функцій системи, зокрема, резервне копіювання, оновлення прошивок, керування обліковими записами;

2) створення нових конфігурацій та внесення змін до архітектури SCADA/HMI;

3) управління правами доступу інших користувачів. Ролі зберігаються в захищеному середовищі, з унікальними обліковими даними та багатофакторною аутентифікацією.

Система безпеки та логування

Для забезпечення безперервної та захищеної роботи системи: Всі входи в систему HMI/SCADA захищені паролями з політикою регулярної зміни; Ведеться журнал подій (лог-файл), який фіксує: дату та час входу/виходу користувача; спроби зміни технологічних параметрів; реєстрацію аварійних ситуацій; сповіщення про збої або втрату зв’язку; Доступ до SCADA-рівня може додатково забезпечуватися VPN-каналом з сертифікатом SSL; Передбачено можливість двофакторної аутентифікації при вході в SCADA-сервер.

Графік технічного обслуговування (ТО)

Регулярне технічне обслуговування системи автоматизації є необхідною умовою для її довготривалої та стабільної роботи.

Рекомендований графік ТО:

- кожні 3 місяці (щоквартально): перевірка цілісності клемних з’єднань; чистка фільтрів вентиляції шафи керування;
- тестування аварійного джерела живлення (UPS);
- перевірка правильності індикації на HMI.
- один раз на рік (щорічно): повне калібрування термопар та датчиків тиску;
- заміна реле з вичерпаним ресурсом циклів;
- повна ревізія ПЛК на наявність оновлень прошивки;
- перевірка комунікаційних каналів (Profinet, Modbus RTU).

- позапланове ТО: Виконується при виявленні аномалій, аварій, після збоїв живлення або зміни виробничих умов;
- передбачає оперативну діагностику SCADA-журналів, негайну заміну несправних датчиків, резервування параметрів.

Підтримка та технічна документація

Наявність актуальної та доступної документації є основою для якісної експлуатації системи: Інструкції з експлуатації та запуску в PDF-форматі на HMI; Чек-листи обслуговування з графіком ТО; Документація на обладнання (паспорти, сертифікати, монтажні схеми); Відеоінструктажі для навчання нового персоналу. VPN-доступ до SCADA/HMI для сервісного інженера; Резервне копіювання проєктів SCADA, ПЛК, архівів подій — щотижневе, з їх зберіганням на окремому захищеному сервері.

Організаційне забезпечення є наріжним каменем тривалої, стабільної та безпечної роботи системи автоматизації. Завдяки чіткому розподілу ролей, логуванню дій, регламентованому технічному обслуговуванню та наявності документації забезпечується не тільки надійність функціонування, а й мінімізація ризиків людського фактору та зменшення експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі.

7.2 Розрахунок техніко-економічних показників

Впровадження автоматизованої системи управління нагрівальним регенеративним колодязем зумовлює значні позитивні зрушення у виробничо-господарській діяльності підприємства. Ключовими аспектами впливу є зменшення витрат на енергоресурси (Таблиця 7.1), забезпечення стабільності температурного режиму, скорочення кількості аварійних ситуацій та збільшення загальної продуктивності.

Таблиця 7.1 - Ключові економічні параметри впровадження АСУ

Показник	Значення
Орієнтовна вартість впровадження системи	350 000 грн
Економія на паливі (≈12% зниження витрат)	~80 000 грн/рік
Зменшення аварій, технологічних зупинок	до 8% зниження втрат
Зростання продуктивності за рахунок стабілізації температур	+10%
Зниження ручної участі персоналу	до 50% операцій автоматизовано
Середній термін окупності	≈ 2,5 роки

Розрахунок економічного ефекту. Розрахунок проводиться на основі зменшення витрат на енергоносії (переважно – природний газ), а також скорочення непродуктивного простою та дефектів продукції через нестабільність нагріву (Таблиця 7.2, Рисунок 7.1).

До впровадження автоматизації:

- середньорічне споживання палива: 680 000 грн/рік.
- часті збої через ручне керування;
- час нагріву нестабільний, з високими втратами теплоти.

Після впровадження АСУ:

- ефективніше керування співвідношенням паливо–повітря;
- зменшення витрат до ≈ 600 000 грн/рік;
- зменшення кількості аварійних зупинок і браку.

Річна економія:

- економія на паливі: ≈ 80 000 грн;
- додатковий ефект від зниження простоїв: +10 000–20 000 грн/рік;
- загальна оцінка прямої економії: ≈ 100 000 грн/рік.

Окупність:

Вартість впровадження: 350 000 грн;

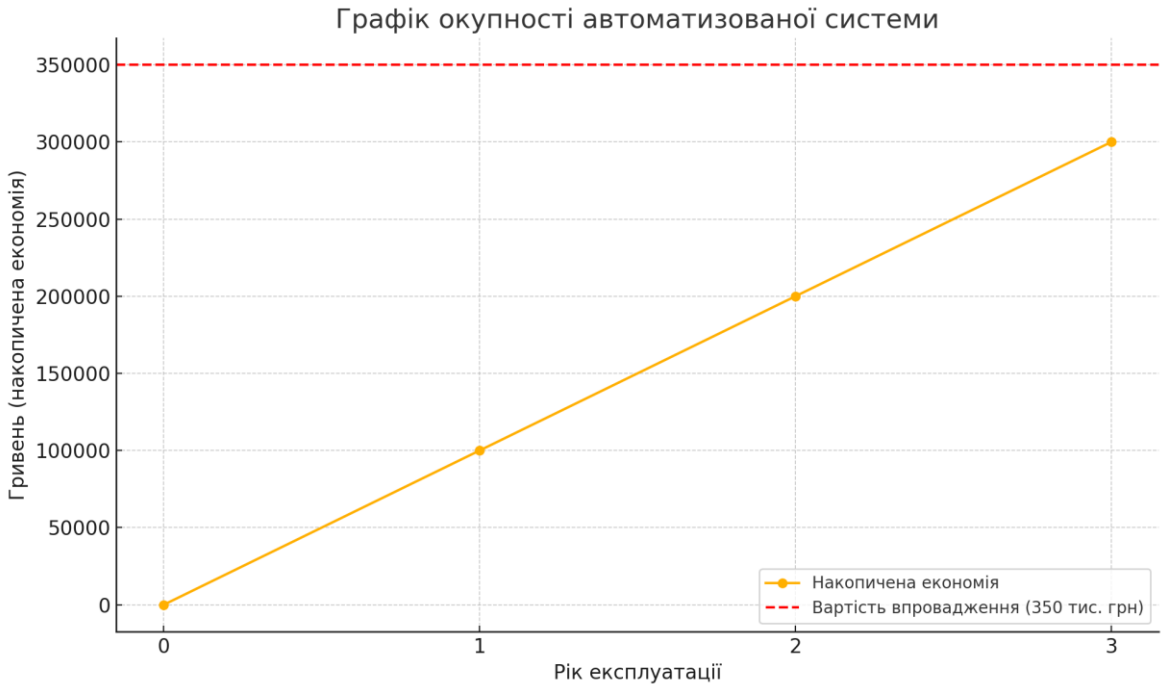
Окупність:

350 000 / 100 000 = 3,5 років,

з урахуванням ефекту продуктивності –до 2,5 років.

Таблиця 7.2 - Звіт окупності

Рік	Накопичена економія (грн)	Коментар
1	100 000	Початкове зниження витрат
2	200 000	Додаткове зростання продуктивності
3	300 000	Часткове оновлення ПЗ/ПЛК
3.5	350 000	Повна окупність проекту



1 - червона пунктирна лінія – вартість впровадження (350 тис. грн); 2 - синя крива – накопичена економія щороку (приблизно 100 тис. грн/рік з урахуванням економії палива та зменшення аварій).

Рисунок 7.1 – Графік окупністі системи автоматизації впродовж 3 років експлуатації

Згідно з графіком:

- окупність досягається трохи пізніше третього року;
- після 4-го року очікується чистий економічний прибуток.
- цей візуальний інструмент демонструє ефективність інвестицій у систему автоматизації з практичної точки зору.

Впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) у виробництво — стратегічний крок, що поєднує технічну досконаліть, економічну вигоду та збільшення загальної конкурентоспроможності підприємства.

Згідно з підсумками виконаної роботи: Оптимізація процесу. Система дає змогу забезпечити точне та стабільне регулювання технологічних параметрів (температура, тиск, витрати), що мінімізує втрати сировини, покращує якість продукції та знижує кількість аварійних ситуацій.

Надійність та безперебійність. Завдяки резервуванню ключових елементів, впровадженню регулярного технічного обслуговування, систем захисту та логування подій, досягнуто коефіцієнта готовності понад 0,998, що відповідає високим вимогам промислової експлуатації.

Економічна ефективність. Розрахунки продемонстрували, що реалізація АСУТП дає можливість досягти щорічної економії понад 80 тис. грн, зменшити витрати на паливо до 12%, а також скоротити кількість простоїв на 8%. Термін окупності інвестицій становить близько 2,5 років.

Організаційна зрілість. Завдяки чітко структурованій моделі керування доступом, документації, процедурі резервного копіювання, віддаленому моніторингу та навчанню персоналу, підприємство отримує повноцінну інфраструктуру для ефективної підтримки АСУТП.

Перспектива цифрової трансформації. Впровадження сучасних протоколів обміну (Modbus, OPC UA), інтеграція з SCADA/MES/ERP-системами та модульність технічної бази забезпечують гнучкість у масштабуванні системи та її модернізації відповідно до вимог Індустрії 4.0

Отже, впровадження АСУТП не лише оптимізує технологічний процес, а і створює передумови для довготривалого розвитку підприємства, цифровізації виробництва та збільшення його ефективності відповідно до сучасних викликів ринку.

8 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

Забезпечення безпечних умов праці при впровадженні та експлуатації автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) є критично важливою складовою проєкту. Система має бути не лише ефективною, але й безпечною для обслуговуючого персоналу.

Аналіз потенційних небезпек:

- блектробезпека: ймовірність ураження електричним струмом при доступі до щита КВПіА;
- пожежна безпека: можливість займання через коротке замикання, перегрів елементів;
- фізичне перевантаження: під час монтажу або обслуговування важких пристроїв (щити, ПЛК, приводів);
- небезпека помилкового втручання: несанкціоноване втручання в логіку ПЛК або налаштування SCADA може призвести до аварій.

Заходи захисту:

- всі пристрої змонтовані згідно з вимогами ПУЕ, ДСТУ EN 60204-1, забезпечено захисне заземлення та використання УЗО;
- використано шафи зі ступенем захисту IP65, що запобігає проникненню пилу, вологи та випадковому дотику до струмопровідних частин;
- додано звукову та світлову сигналізацію аварійних режимів;
- заборонено доступ до системи без пароля та авторизації;
- всі кабелі пронумеровані, використано екранування і захисні канали, щоб уникнути електромагнітних перешкод.

Засоби індивідуального захисту:

- при монтажі та обслуговуванні — діелектричні рукавиці, інструмент з ізоляцією, захисні окуляри;
- для роботи з високотемпературним обладнанням — термостійкий одяг;

- при технічному обслуговуванні — забезпечено контроль за обесточенням зон (lock-out/tag-out).

Інструктаж і підготовка персоналу:

- проводиться первинний, повторний і позаплановий інструктаж відповідно до Наказу МНС №15 від 29.01.2013;

- для операторів — наявні інструкції з експлуатації, відеоуроки, перевірка знань щоквартально;

- запроваджено систему журналів обліку перевірок та навчання.

ВИСНОВОК

Внаслідок проведених досліджень було розроблено повноцінний пакет технічної документації для автоматизованої системи керування температурою в регенеративному нагрівальному колодязі.

Створено функціональну структуру системи, аргументовано вибір апаратної платформи, включно з програмованим логічним контролером, датчиками температури та тиску, виконавчими механізмами, а також складено принципові електричні схеми, які відповідають поточним стандартам і нормативним вимогам.

Здійснено розрахунок надійності системи з урахуванням ключових параметрів обладнання, сформовано специфікацію з вказівкою кількості та вартості компонентів, у тому числі з ПДВ, а також підготовлено комерційну документацію – рахунки-фактури, акти приймання-передачі та замовні таблиці постачання.

Практична цінність впровадження запропонованої АСУТП полягає у скороченні витрат на енергоносії (до 12% економії на паливі), поліпшенні якості кінцевої продукції, зменшенні частоти аварій та відмов, а також у зниженні простоїв завдяки автоматизації критичних зон процесу. Завдяки модульному підходу та використанню сучасних відкритих протоколів передачі даних система є масштабованою, що дозволяє розширити її функціонал на інші виробничі ділянки в межах підприємства.

Подальші перспективи включають інтеграцію з хмарними сервісами для архівування та прогнозуючого аналізу, розробку мобільного інтерфейсу (HMI) для віддаленого моніторингу та управління, а також впровадження алгоритмів штучного інтелекту для оцінки трендів, передбачення несправностей і ухвалення рішень у реальному часі. Це сприятиме цифровій трансформації підприємства відповідно до сучасної концепції Індустрія 4.0, забезпечуючи його конкурентоспроможність, гнучкість та стабільність в умовах змін ринку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3134-95. Комплексна система управління якістю продукції. Автоматизовані системи. Загальні вимоги. [Чинний від 01.01.1997] Офіц. вид. Київ: Держстандарт України, 1997. 12 с.

2. ДСТУ 4074-2001. Засоби автоматизації. Терміни та визначення. Офіц. вид. Київ: Держстандарт України, 2001. 24 с.

3. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable controller. System Manual. Germany: Siemens AG, 2020. 506 p.

4. Овчаренко В. І. Автоматизація технологічних процесів: навч. посібник. Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 198 с.

5. Петров С. М., Гуревич В. М. Промислові контролери і системи керування. Київ, 2018. 312 с.

6. Клінов В. І. Основи проектування систем автоматизації. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 278 с.

7. Технічна документація на TP700 Comfort HMI. Siemens Industry Online Support. URL: https://support.industry.siemens.com

8. TIA Portal v16. Інструкція користувача та документація розробника. Siemens AG, 2020. URL: https://support.industry.siemens.com

9. Каталоги обладнання Phoenix Contact, Schneider Electric (2022–2024 pp. URL: https://www.phoenixcontact.com, https://www.se.com

10. Енергозберігаючі технології нагріву металу в колодязях, методичних і термічних печах. Гарячий посад і пряма прокатка. URL: https://metallurgy.zp.ua/energosberegayushhie-tehnologii-nagreva-metalla-v-kolodtsah-metodicheskih-i-termicheskih-pechah

11. Губинський В. І. Нагрівальні печі металургії - сьогодні і завтра. Дніпро: Теорія і практика металургії, 2004. № 6. 56 – 60 с.

12. Губинський В. І. Актуальні завдання реконструкції нагрівальних печей. Дніпро : *Зб. наук. тр. НМетАУ*, 2005. 149 156 с.

13. Єрьомін А. О. Організація регламентованого спалювання палива в нагрівальних печах з метою створення рівномірного температурного поля. Дніпро: *зб. науч. тр. НМетАУ*. Нова ідеологія, 2012. 78-83 с.

14. Кукуй. До. О. Автоматизована система керування нагріванням злитків у нагрівальних колодязях обтискного стану. *"Системна інтеграція"*. 2001. 33 с.

15. Закон України «Про охорону праці». Верховна Рада України Київ: Основа, 1993.

16. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Київ : Держгірпромнагляд України, 2001.

17. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання. [Чинний від 01.01.2017] Офіц. вид. Київ : Держстандарт України, 2015.

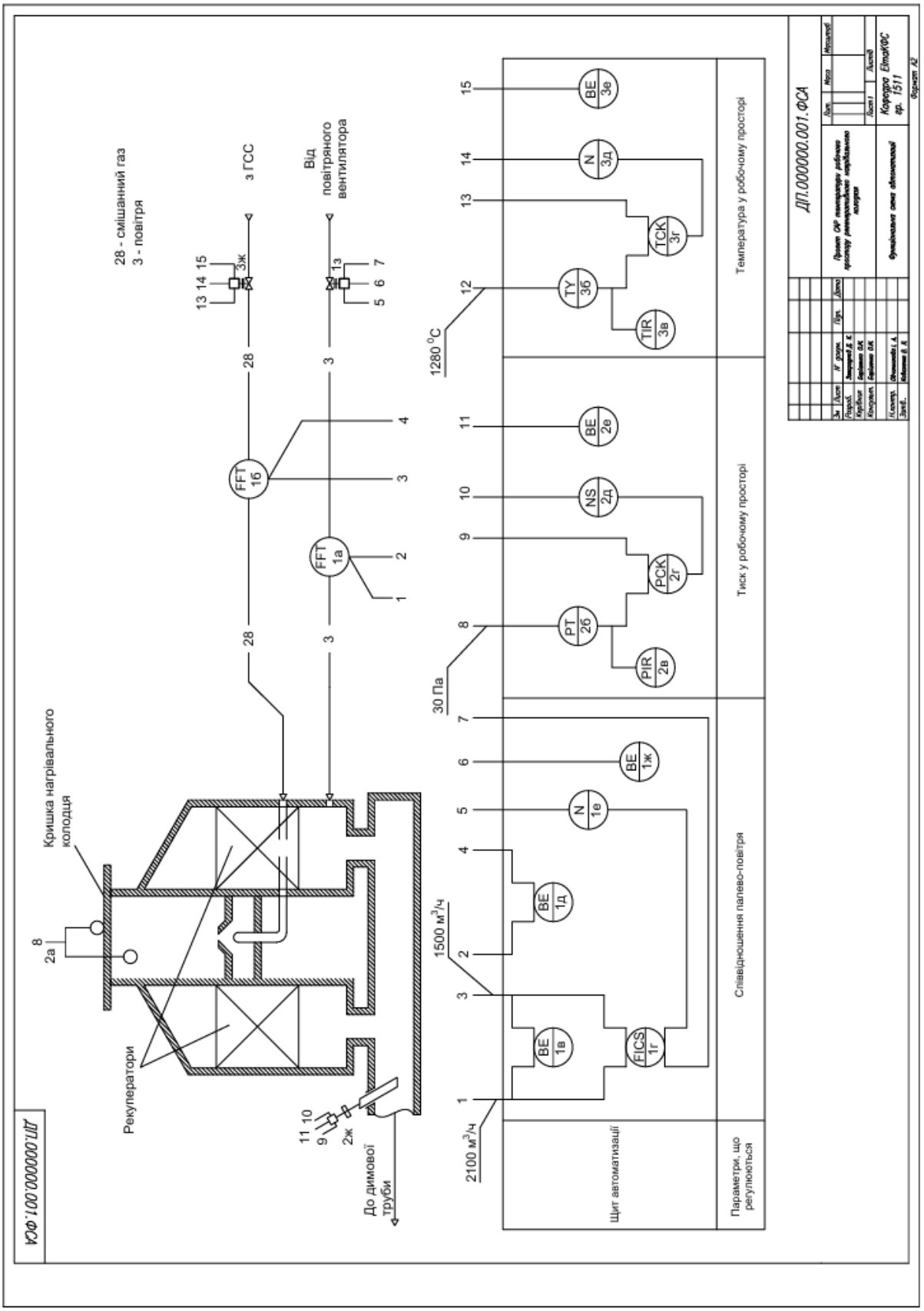
18. ДСТУ 3973-2000. Системи автоматизації. Терміни та визначення. [Чинний від 01.01.2001] Офіц. вид. Київ : Держстандарт України, 2000.

19. ДСТУ EN 61131-3:2022. Програмовані контролери. Мови програмування. [Чинний від 31.12.2023] Офіц. вид. Київ : Держстандарт України, 2022.

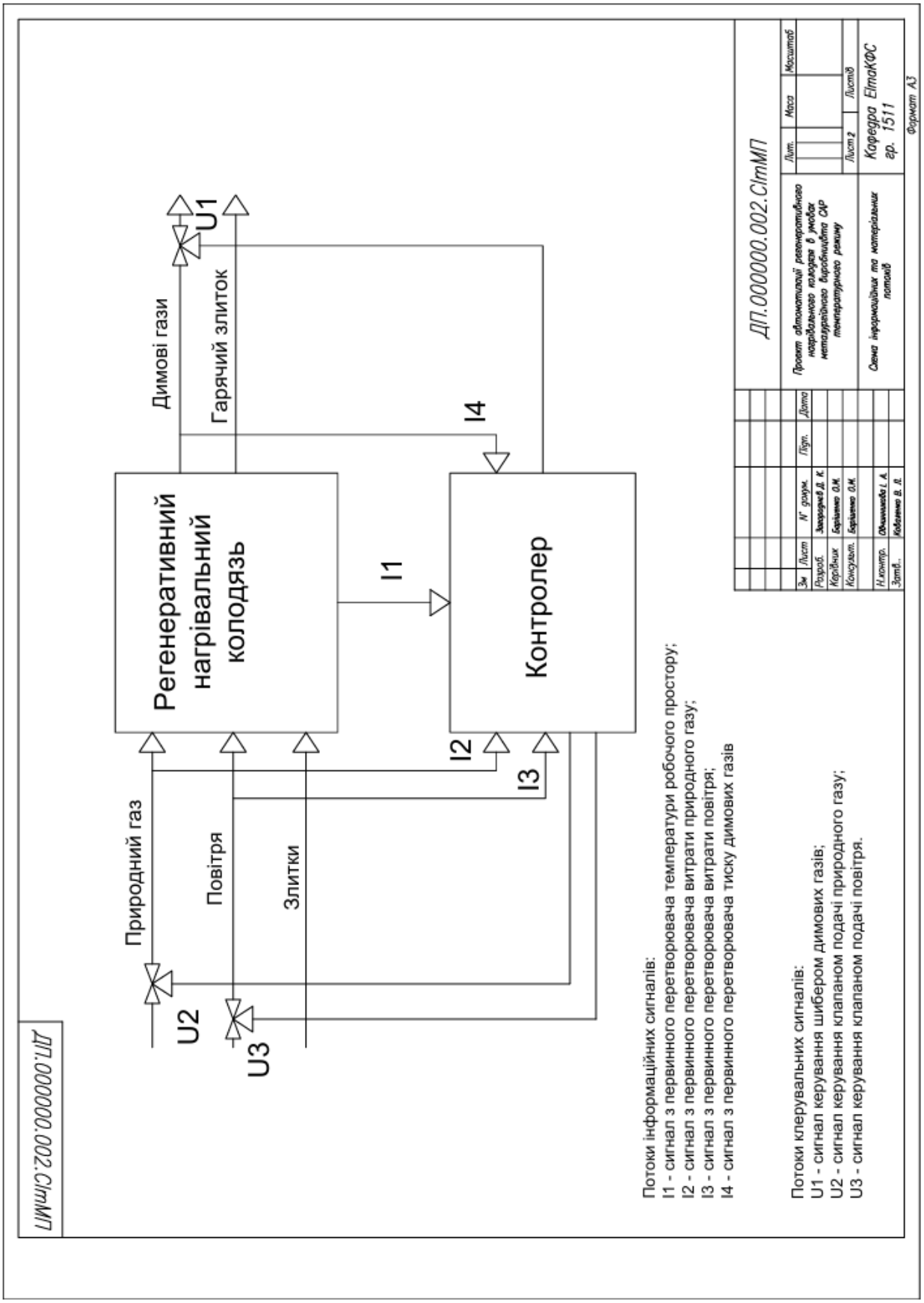
20. ДСТУ EN 61508-1:2019 Функційна безпечність електричних, електронних, програмованих електронних систем, пов’язаних із безпекою. [Чинний від 01.09.2019] Офіц. вид. Київ : Держстандарт України, 2019.

ДОДАТКИ

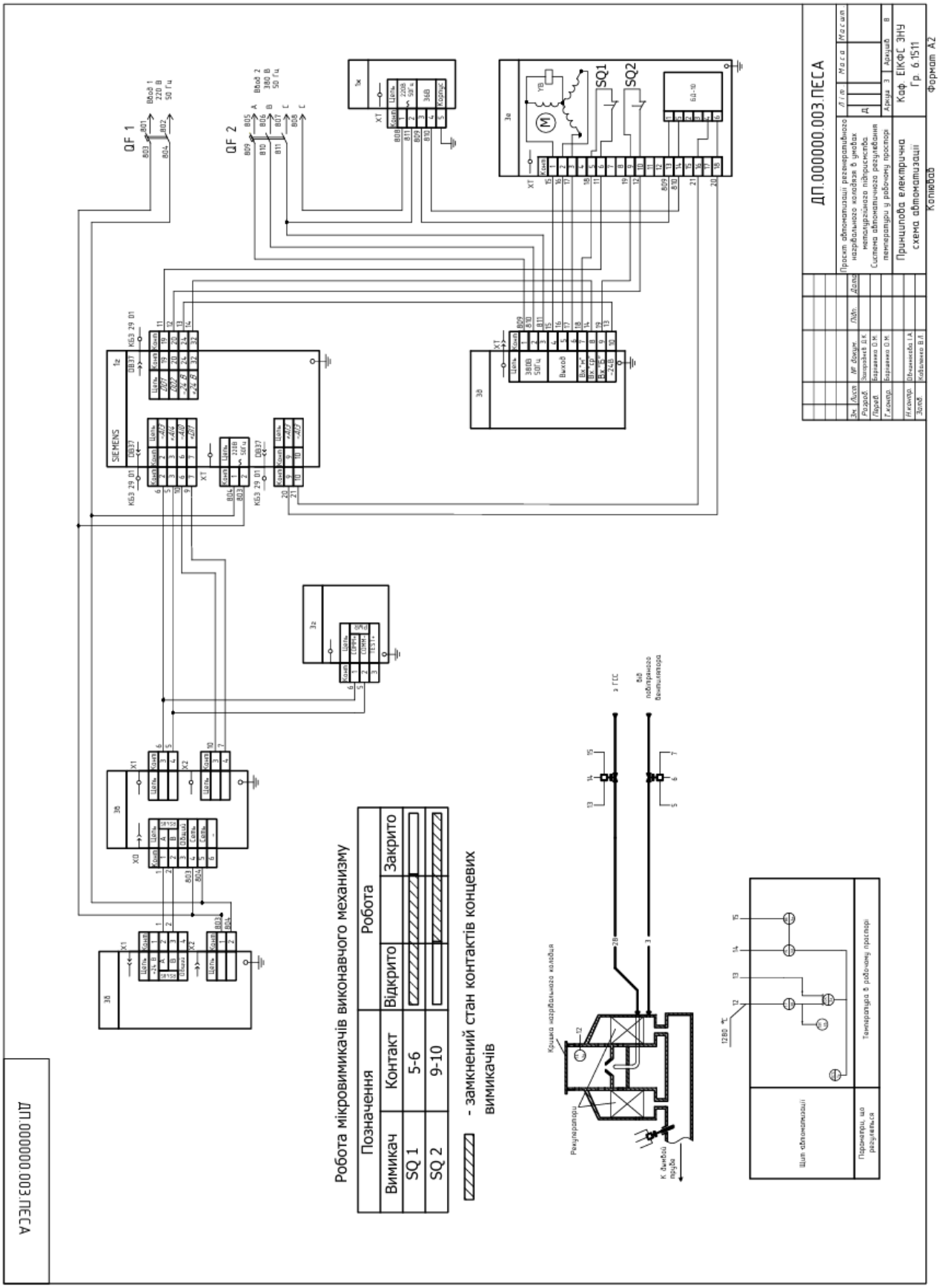
ДОДАТОК А



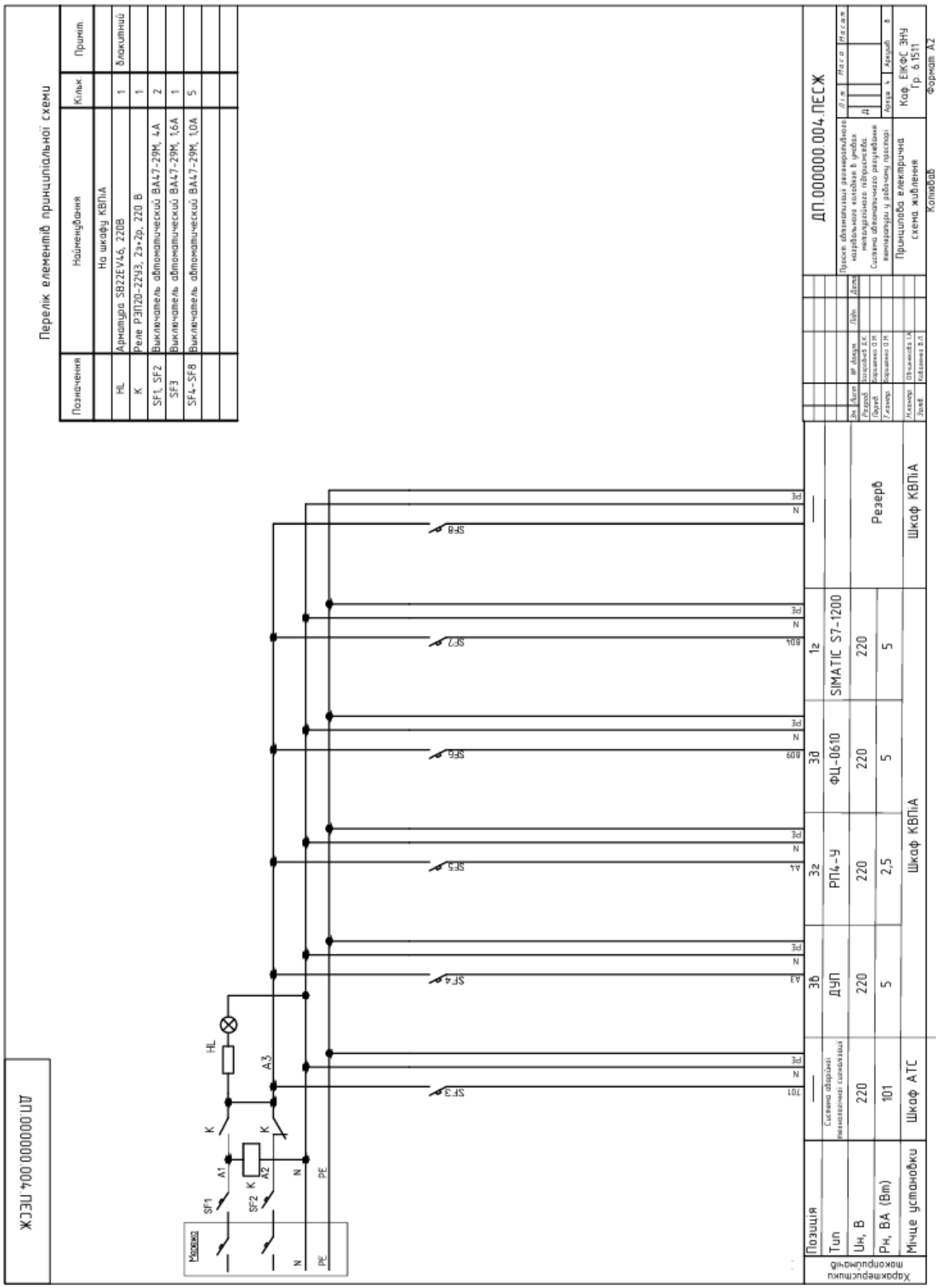
ДОДАТОК Б


ДП.000000.002.СІтМП
Регенеративний нагрівальний колодязь
Контролер
Димові гази
Гарячий злиток
Природний газ
Повітря
Злитки
U1
U2
U3
I1
I2
I3
I4
Потоки інформаційних сигналів:
I1 - сигнал з первинного перетворювача температури робочого простору;
I2 - сигнал з первинного перетворювача витрати природного газу;
I3 - сигнал з первинного перетворювача витрати повітря;
I4 - сигнал з первинного перетворювача тиску димових газів
Потоки клерувальних сигналів:
U1 - сигнал керування шибером димових газів;
U2 - сигнал керування клапаном подачі природного газу;
U3 - сигнал керування клапаном подачі повітря.
ДП.000000.002.СІтМП
Проект автоматизації рекуперативного нагрівального колодязя в умовах металургійного виробництва САР температурного режиму
Схема інформаційних та матеріальних потоків
Кафедра ЕІтаКФС гр. 1511
Розроб. Захарчук Д. К.
Керівник Бабіченко О.М.
Консульт. Бабіченко О.М.
Н.контр. Обжиманська І. А.
Затв. Кобленко В. Л.
Формат А3

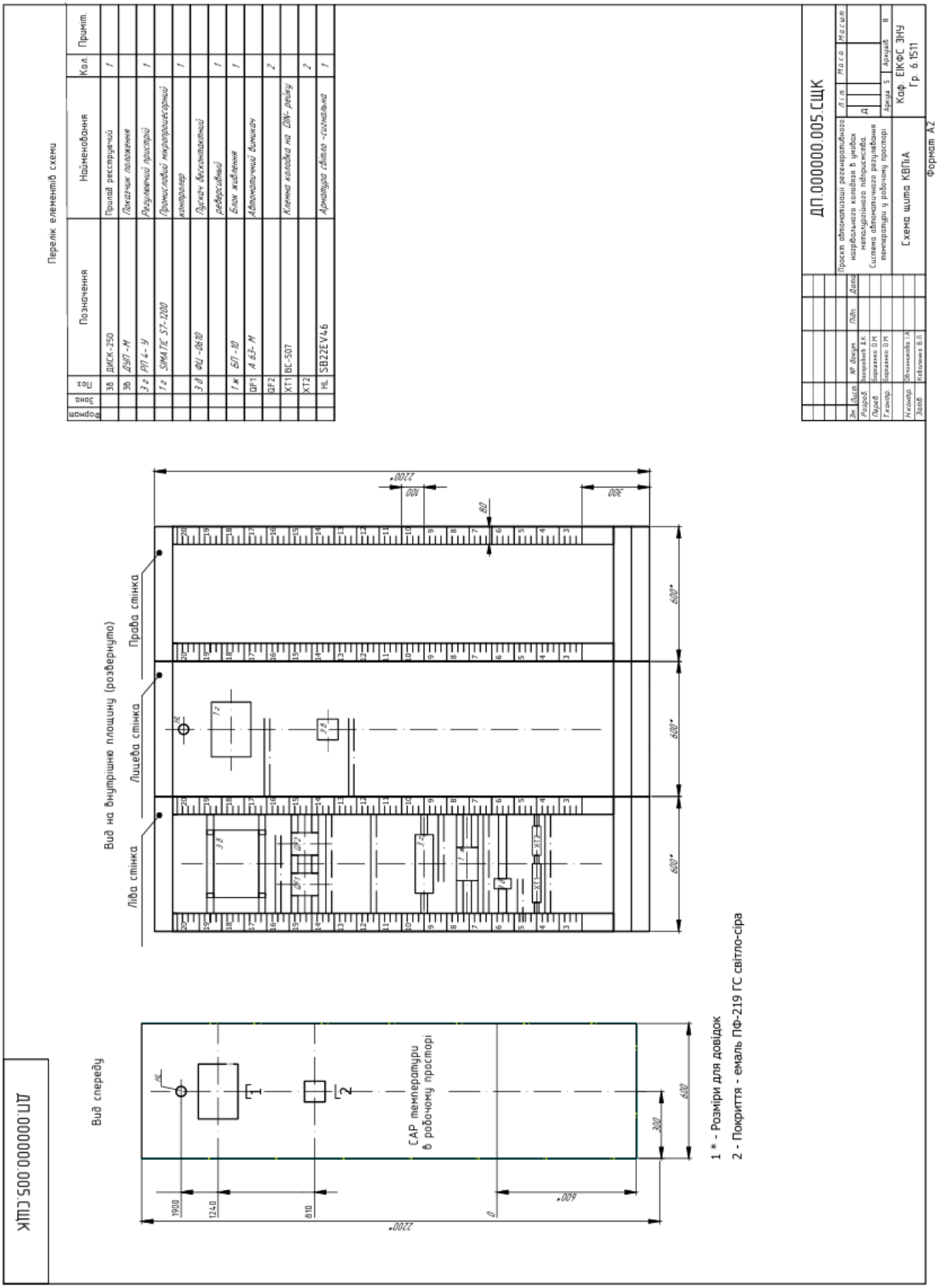
ДОДАТОК В


ДП.000000.003.ПЕСА
Принципова електрична схема автоматизації
Робота мікровимикачів виконавчого механізму
Позначення
Вимикач
Контакт
Робота
Відкрито
Закрито
SQ 1
5-6
SQ 2
9-10
- замкнений стан контактів концевих вимикачів
QF 1
QF 2
SQ1
SQ2
SIEMENS
Шаф автоматизації
Параметр, що регулюється
Температура в робочому просторі

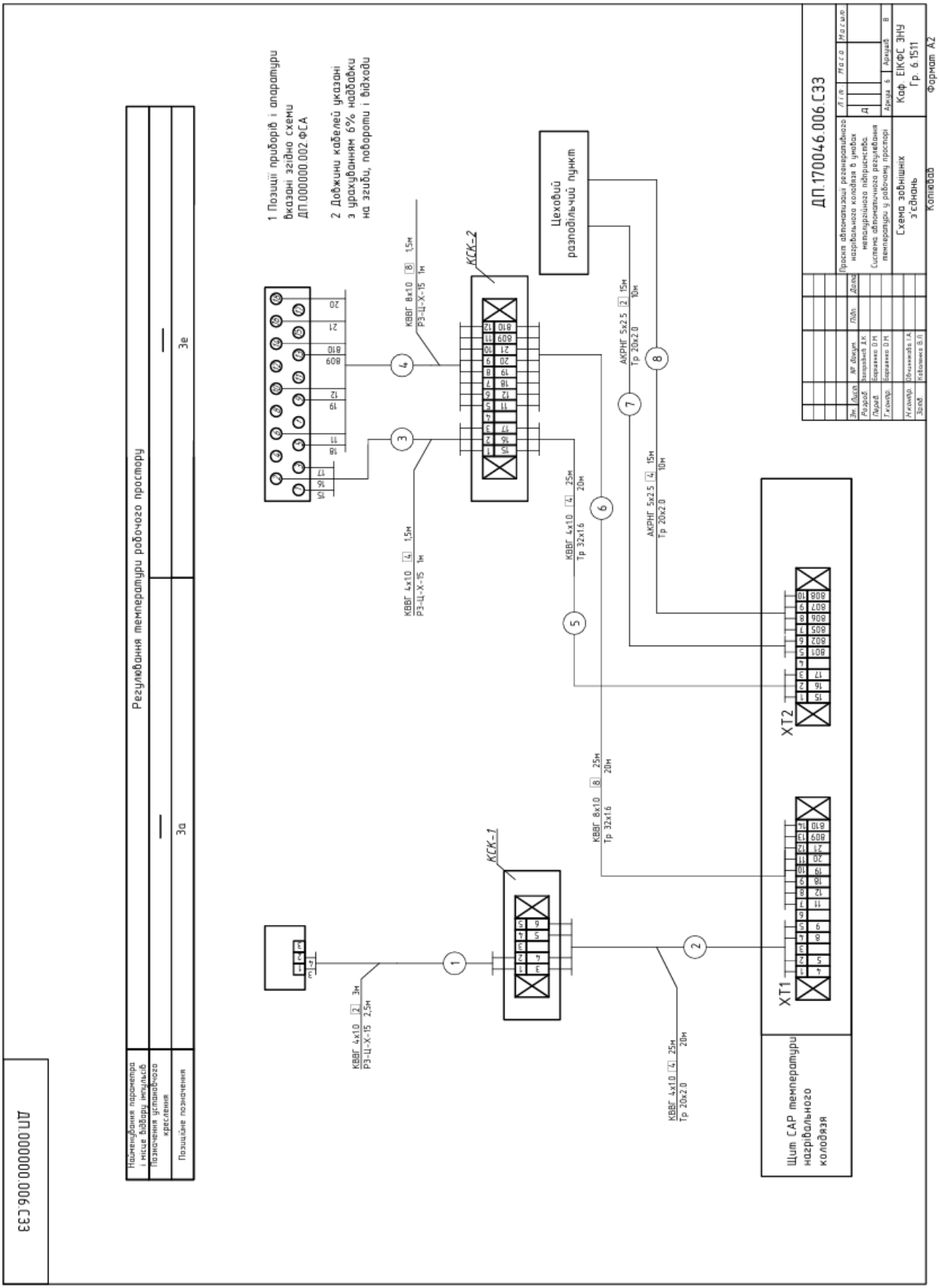
ДОДАТОК Г


Перелік елементів принципіальної схеми
Позначення
Найменування
Кільк.
Примім.
На шафу КВПіА
HL
Арматура SB22EV46, 220В
1
Блакитний
K
Реле РЭП20-2293, 2з+2р, 220 В
1
SF1, SF2
Выключатель автоматический ВА47-29М, 4А
2
SF3
Выключатель автоматический ВА47-29М, 1,6А
1
SF4–SF8
Выключатель автоматический ВА47-29М, 1,0А
5
ДП.0000000.004.ПЕСЖ
Позиція
Тип
Uн, В
Pн, ВА (Вт)
Місце установки
ЗБ
ДУП
220
5
101
Шкаф АТС
ЗГ
РП4-У
220
2,5
Шкаф КВПіА
ЗВ
ФЦ-0610
220
5
Шкаф КВПіА
1Г
SIMATIC S7-1200
220
5
Резерв
Шкаф КВПіА
Принципова електрична схема живлення
Коф. ЕІКФС ЗНУ Гр. б.1511
Формат А2
Копіював
Мережа
SF1
SF2
K
A1
A2
HL
A3
N
PE
SF3
SF4
SF5
SF6
SF7
SF8

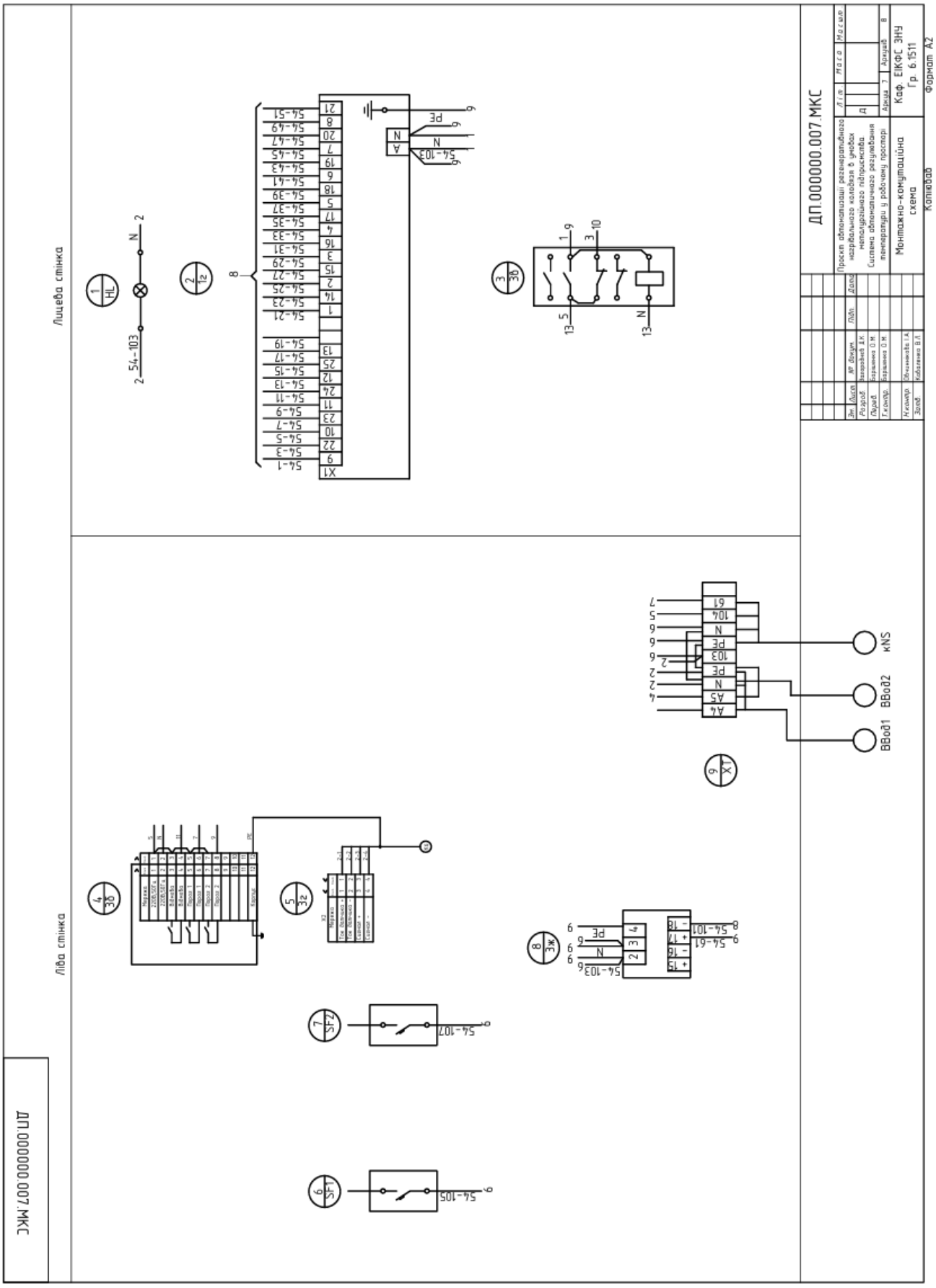
ДОДАТОК Д


ДП.000000.005.СШК
Перелік елементів схеми
Позначення
Найменування
Кол.
Примітка
Схема шита КВПіА
Каф. ЕІКФС ЗНУ
Гр. б-1511
Вид спереду
САР температури
в робочому просторі
Вид на внутрішню площину (розвернуто)
Ліва стінка
Лицева стінка
Права стінка
1 * - Розміри для довідок
2 - Покриття - емаль ПФ-219 ГС світло-сіра
Формат А2

ДОДАТОК Ж


ДП.000000.006.С33
Регулювання температури робочого простору
3а
—
3е
1 Позиції приборів і апаратури вказані згідно схеми ДП.000000.002.ФСА
2 Довжини кабелей указані з урахуванням 6% набавки на згини, повороти і відходи
Цеховий розподільчий пункт
КСК-1
КСК-2
ХТ1
ХТ2
Щит САР температури нагрівального колодязя
КВВГ 4х10 2 3м Р3-Ц-Х-15 2,5м
КВВГ 4х10 4 25м Тр 20х2.0 20м
КВВГ 8х10 8 25м Тр 32х1.6 20м
КВВГ 4х10 4 1,5м Р3-Ц-Х-15 1м
КВВГ 8х10 8 1,5м Р3-Ц-Х-15 1м
КВВГ 4х10 4 25м Тр 32х1.6 20м
АКРНГ 5х2.5 4 15м Тр 20х2.0 10м
АКРНГ 5х2.5 2 15м Тр 20х2.0 10м
ДП.170046.006.С33
Проект автоматизації регенеративного нагрівального колодязя в цехах металургійного підприємства. Система автоматичного регулювання температури у робочому просторі
Схема зовнішніх з'єднань
Каф. ЕІКФС ЗНУ Гр. 6.1511
Копіював
Формат А2

ДОДАТОК К


ДП.0000000.007 МКС
Монтажно-комутаційна схема
Каф. ЕІКФС ЗНУ
Гр. 6.1511
Копіював
Формат А2
Ліцева стінка
Ліва стінка
ВВод1
ВВод2
кNS