МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (бакалаврського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Проект автоматизації ковпакової печі. Система автоматизованого регулювання температури під муфелем

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1512
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Тимофєєва Л.В.

Керівник професор, доктор т. н. Пазюк М.Ю.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _____

Запоріжжя 2026

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 другий (бакалаврський)
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(код та назва)

Спеціалізація _____
(код та назва)

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Тимофєєва Лариса Вікторівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Проект автоматизації ковпакової печі. Система автоматизованого регулювання температури під муфелем

керівник роботи Пазюк М.Ю, професор, доктор т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1833-с
2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз існуючого рівня автоматизації; розробка схеми інформаційних потоків; розробка технічного завдання; структура програмно-технічного комплексу; проєктування системи регулювання температури під муфелем; розробка технічної документації; техніко-економічних показники; охорона праці, пожежна безпека
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема автоматизації, принципові електричні схеми, монтажно-комутаційна схема, схема зовнішніх з'єднань креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	професор, Пазюк М.Ю.		
2	професор, Пазюк М.Ю.		
3	професор, Пазюк М.Ю.		
4	професор, Пазюк М.Ю.		
5	професор, Пазюк М.Ю.		
6	професор, Пазюк М.Ю.		

7 Дата видачі завдання 14.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого рівня автоматизації	21.04-27.04.26	
2	Розробка схеми інформаційних потоків	28.04-04.05.26	
3	Розробка технічного завдання	05.05-07.05.26	
4	Вибір структури та складу програмно-технічного комплексу	08.05-10.05.26	
5	Проєктування системи регулювання температури під муфелем	08.05-14.05.26	
6	Розробка технічної документації	15.05-18.05.26	
7	Розрахунок системи автоматизації та показників її надійності	19.05-21.05.26	
8	Розрахунок техніко-економічних показників	22.05-23.05.26	
9	Розгляд питань охорони праці та техногенної безпеки	24.05-25.05.26	
10	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді	26.05 – 10.06.26	

Студент _____ Лариса Тимофєєва
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Михайло ПАЗЮК
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Андрій КОЛОСОК
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Тимофєєва Л. В. Проект автоматизації ковпакової печі. Система автоматизованого регулювання температури під муфелем.

Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології», науковий керівник М.Ю. Пазюк, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2026.

Метою роботи є проєктування автоматизованої системи

У ході виконання роботи було проведено: аналіз ковпакової печі як об'єкта регулювання та математичне моделювання її динамічних властивостей; обґрунтування та вибір комплексу технічних засобів на базі дубльованого ПЛК Modicon TSX Quantum (Hot Standby) та розподіленої периферії Modicon Momentum; модернізацію вимірювальних каналів із переходом на завадостійкі інтелектуальні датчики з уніфікованим виходом 4–20 мА; розробку функціональних схем автоматизації для 8 технологічних контурів, включаючи регулювання співвідношення «паливо-повітря» та протиаварійний захист; проєктування принципових електричних схем та системи аварійного ручного керування; аналіз умов праці та розробку заходів із промислової безпеки; розрахунок техніко-економічної ефективності, що підтвердив окупність проєкту за 10,5 місяців за рахунок зниження витрат палива та електроенергії.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, шести розділів, висновків, переліку джерел посилання з 50 найменувань, викладена на 80 сторінках машинописного тексту, включаючи 11 рисунок, 7 таблиць та 9 аркушів графічного матеріалу.

Ключові слова: ковпакова піч, світлий відпал, муфель, автоматизація, програмований логічний контролер, моделювання, розподілена периферія

ЗМІСТ

ВСТУП 7
1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ 9
1.1 Технологічний опис об’єкта автоматизації 9
1.2 Технологічний процес 12
1.3 Постановка задачі проєктування системи автоматизації 16
2 ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 21
2.1 Вимоги до системи в цілому 21
2.2 Вимоги до надійності системи. 27
2.3 Вимоги до безпеки 28
2.4 Вимоги до експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і збереження системи і окремих елементів 28
2.5 Вимога до збереження інформації при аваріях 29
2.6 Вимоги по стандартизації та уніфікації 30
2.7 Вимоги до функцій, які виконуються системою 30
2.8 Вимоги до видів забезпечення 31
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ 34
4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ 40
4.1 Схема матеріальних і інформаційних потоків 40
4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ 43
4.3 Функціональні схеми автоматизації управління 50
4.4 Принципова електрична схема по каналу регулювання технологічної величини 53
5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 56
5.1 Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища 56
5.2 Заходи з поліпшення умов праці 58
5.3 Електробезпека 63
5.5 Заходи пожежної безпеки. Техногенна безпека 65

5.6 Засоби індивідуального захисту 67
6. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ 69
5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат та джерел економічного ефекту 70
ВИСНОВКИ 74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 76

ВСТУП

Стрімкий технологічний прогрес докорінно змінив обличчя сучасної промисловості. Сьогодні автоматизація технологічних процесів і виробництв є головним рушієм підвищення продуктивності, покращення якості продукції та забезпечення максимальної безпеки на підприємствах.

Якщо раніше левова частка рутинної та важкої праці лягала на плечі робітників, то нині близько 90% таких операцій виконують інтелектуальні механізми та автоматизовані системи. Це робить АТПВ ключовим пріоритетом для інженерних наук та стратегічного розвитку індустрії.

Впровадження автоматизації не усуває людину з виробничого процесу, а трансформує її роль. Оскільки рутинний контроль перебрали на себе машини, діяльність персоналу змістилася у високоінтелектуальну площину:

– моніторинг ефективності процесів та прогнозування збоїв.

– підтримка безперебійної роботи складних програмно-апаратних комплексів.

– автоматика бере на себе найбільш шкідливі, трудомісткі та фізично важкі обсяги роботи, мінімізуючи ризик виробничого травматизму;

– від цифрового моделювання (цифрових двійників) до SCADA-систем, програмованих логічних контролерів (ПЛК) та штучного інтелекту.

Будь-яке сучасне підприємство – це складний багаторівневий механізм, де кожен етап (від приймання сировини, її глибокої переробки до логістики готової продукції) має бути чітко синхронізований. Синергія людського капіталу та автоматизованих систем. Вони не конкурують, а доповнюють одне одного в межах єдиного безперервного циклу. Результатом такої синергії є краща конкурентоспроможність компанії на ринку завдяки суттєвому зниженню собівартості та стабільно високій якості продукту. Щоб автоматизація принесла максимальний економічний ефект, вона повинна чітко виконувати свої базові цілі через вирішення конкретних технологічних завдань:

– оптимізація штату обслуговуючого персоналу, зниження витрат сировини та енергоносіїв, загальне підвищення рентабельності;

– масштабування обсягів випуску продукції, забезпечення високої ритмічності та ліквідація «вузьких місць» у процесі;

– мінімізація браку (людського фактора), покращення екологічних показників та зменшення викидів;

– створення безперебійного робочого середовища з нульовим рівнем критичних інцидентів.

Ключові завдання для досягнення цілей автоматизації:

1. Мінімізація відхилень від заданих технологічних режимів.

2. Впровадження предиктивного (прогнозованого) ремонту для уникнення простоїв.

3. Створення зручних HMI-інтерфейсів (людино-машинних інтерфейсів) для операторів.

4. Наскрізний облік матеріальних і сировинних компонентів у реальному часі.

5. Надійне збереження історії технологічного процесу, архівування даних та миттєве сповіщення про аварійні ситуації.

6. Від локальної автоматизації до «Розумного заводу»,

Автоматизація окремого цеху чи конвеєра – це лише перший крок. Локальні системи автоматизації стають фундаментальною базою для розгортання глобальних систем управління:

– системи оперативного управління безпосередньо виробничими процесами;

– системи планування та управління всіма ресурсами й бізнес-процесами підприємства;

– інтеграція Інтернету речей, Big Data та штучного інтелекту, що дозволяє підприємству самостійно адаптуватися до змін ринку в режимі реального часу.

1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний опис об’єкта автоматизації

Відпал холоднокатаних рулонів сталі відбувається у термічному відділенні. Термічне відділення призначене для світлого відпалу рекристалізації міцно змотаних холоднокатаних рулонів і пом'якшувального відпалу гарячекатаних рулонів. Рекристалізаційний відпал застосовується для зняття наклепу холоднокатаного металу і відновлення його пластичних властивостей.

Для відпалу металу використовуються газові ковпакові печі. Печі згруповані в блоки. У відділенні 16 блоків печей: 15 блоків з відпалом в атмосфері HNx-газу і один блок з відпалом в атмосфері сухого водню.

До складу блоків 2-11, 17-19 входить по 15 стендів, 6 нагрівальних ковпаків, 15 муфелів, комплект конвекторних кілець.

До складу блоків №№15,16 входить по 21 стенду, 8 нагрівальних ковпаків, 21 муфелів, комплект конвекторних кілець.

Стенди блоків №2-9, 15, 16, 19 обладнані вдосконаленими направляючими апаратами, крилатками і конвекторними кільцями. Для прискорення процесу охолодження під муфелем у відділенні використовуються ковпаки прискореного охолодження (КПО), додаткові кільцеві пристрої, що охолоджують, на стендах блоку № 5. Для видалення продуктів згорання кожен блок має систему боровів, приймальні патрубки (по два на кожен стенд) і, для посилення тяги, димар заввишки 25-32м з ежектором. Газові ковпакові печі опалюються природним газом.

Тиск газу в цеховому колекторі не менше 0,80 кгс/см^2, оптимальний тиск в умовах стабільного завантаження відділення 0,85-0,90 кгс/см^2, в умовах різкої зміни (зменшення) кількості працюючих ковпаків 0,90-0,95 кгс/см^2.

Як паливоспалювальні пристрої на ковпаках встановлено по 8 інжекційний - атмосферних пальників, розташованих тангенціально в один ярус в нижній частині нагрівального ковпака. Продукти згорання з-під нагрівального ковпака

по двох димових трубах, обладнаних повітряними ежекторами, віддаляються в систему боровів і далі на димову трубу.

Повітря на ежектори подається від вентиляційної станції цеху з тиском в колекторі 300-400 мм вод. ст.

На печах блоків 15-19 застосовується безежекторна система видалення продуктів згорання. Між димовими трубами нагрівального ковпака і димоприймальними патрубками боровів є розрив, що забезпечує незалежність тиску під нагрівальним ковпаком від розрідження в димопровідній системі.

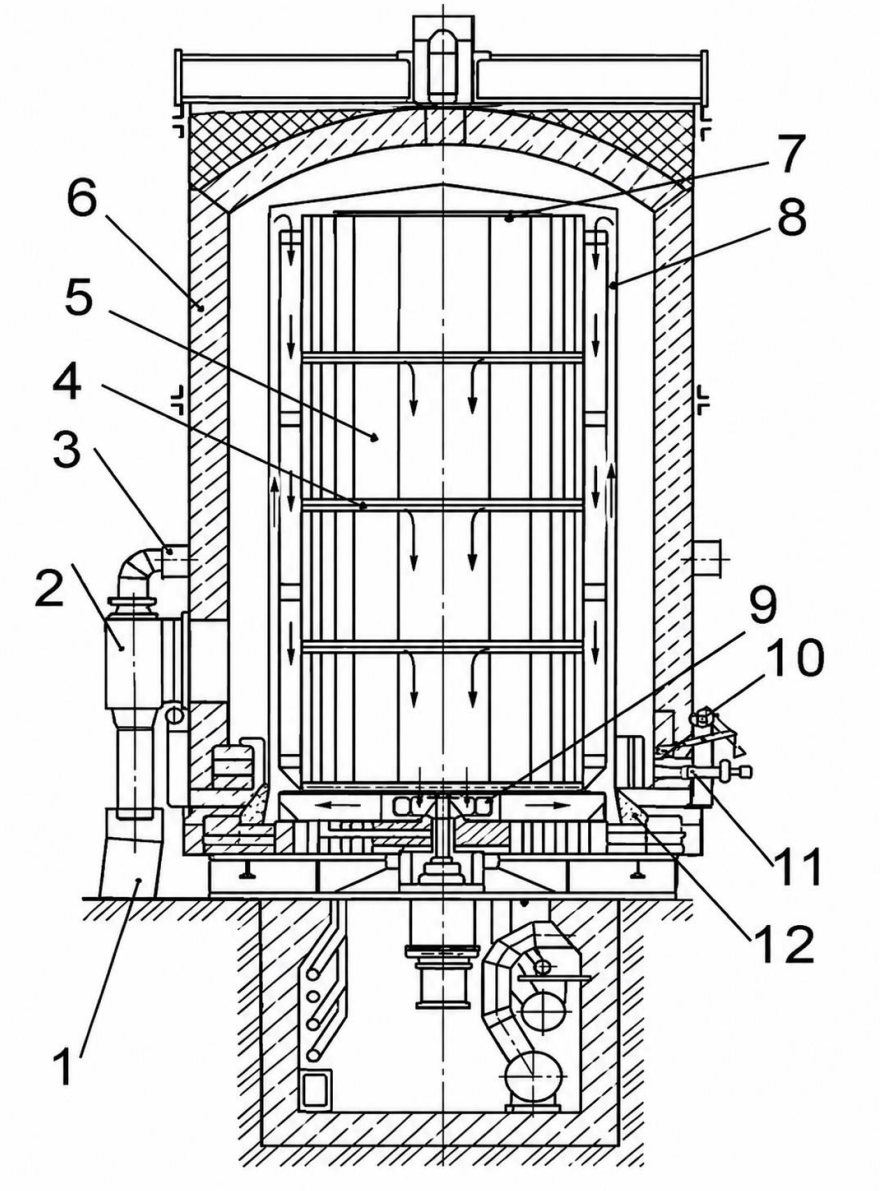
Для зменшення підсосу повітря з довкілля в димопровідну систему на приймальних патрубках стендів передбачені відкидні кришки, які мають бути закриті за відсутності на стенді працюючого нагрівального ковпака.

Технічні характеристики газової ковпакової печі приведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики газової ковпакової печі

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
максимальна витрата газу на один ковпак	$м^3/ч$	62-68
максимальна витрата газу на один пальник	$м^3/ч$	8,4
максимальна витрата повітря для двох ежекторів	$м^3/ч$	400
теплотворна здатність природного газу	ккал	8050
мінімальний тиск захисного газу перед печами	мм вод.ст.	60
тиск природного газу	$кгс/см^2$	0,80-0,95
загальна кількість димових газів після ежекторів	$м^3/ч$	1300
максимальна кількість продуктів згорання	$м^3/ч$	900

Конструкція ковпакової печі зображена на рисунку 1.1.



1 – вхід в димовий боров; 2 – інжектор; 3 – кільцевий канал стисненого повітря; 4 – конвекторне кільце; 5 – рулон; 6 – нагрівальний ковпак; 7 – кришка; 8 – муфель; 9 –робоче колесо вентилятора; 10 – газопровід; 11 – пальник; 12 – пісочний затвор

Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд ковпакової печі

Конструктивні елементи ковпакової печі:

1. Нагрівальний ковпак являє собою міцний зварний металевий кожух циліндричної форми. Для зниження тепловтрат його внутрішня поверхня футерована сучасним волокнистим вогнетривким матеріалом завтовшки 230 мм.

2. Стенд печі – це зварна металоконструкція з вуглецевої сталі, яка має круглу зовнішню частину та днище. У центрі днища передбачено технологічний отвір, призначений для монтажу циркуляційного вентилятора та опорної стійки напрямного апарату.

3. Захисний муфель призначений для створення повної герметичності зони садки рулонів. Він ізолює метал від прямого контакту з пічними газами, запобігаючи його окисленню та зневуглецьовуванню під час нагріву.

4. Конвекторні кільця – спеціальні елементи, які розміщують на опорній стійці напрямного апарату та встановлюють у проміжках між рулонами. Вони забезпечують ефективну та інтенсивну теплопередачу від захисного газу до торців рулонів металу.

5. Спеціальна кришка – елемент у формі восьмигранника, виготовлений з листової конструкційної сталі підвищеної міцності.

1.2 Технологічний процес

Перед початком формування садки (упаковки металу) терміст прокату зобов'язаний виконати обов'язковий комплекс підготовчих робіт:

– повне видалення стороннього сміття, пилу та залишків піску зі стенду;

– перевірка підвідних та відвідних трубопроводів захисного газу. Канали не повинні бути забиті; перевіряється наявність належного тиску та напору газу на виході;

– візуальний контроль цілісності та правильності позиціонування термопар; короткочасний пробний пуск циркуляційних вентиляторів; перевірка безперебійної подачі охолоджувальної води до приймачів блоків електродвигуна;

– оцінка стану стенду, перевірка чистоти та об'єму піску для формування гідро- та пісочного затвору. Використовується виключно середньозернистий

пісок класу 2К із розосередженою структурою.

За виявлення будь-яких несправностей або відхилень у роботі стенду, завантаження металу на відпал суворо заборонено до повного усунення дефектів.

Після успішного приймання стенду терміст видає усний дозвіл завантажувачу печей. Процес безпосереднього формування садки виконується ними спільно.

Формування стопи (упаковка стенду) та герметизація:

1. Рулони, щільно скріплені сталевою стрічкою, встановлюються на стенд у вертикальну стопу за допомогою кранового кліщового захвату. Операція проводиться плавно, без ударних навантажень, щоб запобігти зминанню та пошкодженню кромок полоси.

2. Заборонено саджати на стенд рулони з розпушеними витками. У разі розриву стрічки завантажувач зобов'язаний оперативно перев'язати рулон новою сталевою стрічкою по периметру. Обов'язково звіряється маркування на прокаті з даними супровідної карти-партії.

3. Внутрішня порожнина сформованої стопи зверху закривається спеціальною восьмигранною кришкою.

4. Накриття садки муфелем виконується лише після його візуальної дефектоскопії (на відсутність тріщин чи деформацій). Щоб уникнути вибивання піску зі звужувального затвору тиском повітря, муфель опускають плавно, тримаючи вихлопний кран захисного газу повністю відкритим, а кран подачі – закритим.

Навколо встановленого муфеля формується щільний конусний пісочний затвор заввишки не менше 200 мм. Після цього відкривається подача захисного газу для витіснення кисню (продування). Наявність надлишкового тиску під муфелем контролюється відкриттям заглушки патрубка (робота виконується обов'язково у ЗІЗ).

Після завершення холодної продувки вихлопний вентиль перекривається. Подача захисного газу у підмуфельний простір здійснюється безперервно протягом усього подальшого циклу аж до фінального зняття муфеля.

Після герметизації садки за допомогою головного підйому мостового крана на стенд встановлюється нагрівальний ковпак (його напрямні кільця повинні точно сісти на стійки стенду). Далі підключаються системи автоматики, подається природний газ та ежекторне повітря, і здійснюється розпалювання пальників.

Таблиця 1.1 – Режими та тривалість продування підмуфельного простору захисним газом

Тип продування	Тривалість процесу	Технологічні особливості
Холодна продувка (стандарт)	Не менше 30 хвилин	Для всіх рядових марок сталей
Холодна продувка (експорт)	Не менше 1 години	Підвищені вимоги до чистоти поверхні
Гаряча продувка	Згідно з техкартами	Виконується на етапі нагріву

Передача тепла до металу відбувається комбінованим шляхом:

1. Радіація (тепловипромінювання): від внутрішньої розжареної стінки муфеля до зовнішніх витків рулону.

2. Конвекція (інтенсивна циркуляція газу): циркуляційний вентилятор проганяє захисний газ вздовж стінок муфеля (де він нагрівається) вгору, після чого газ проходить крізь конвекторні кільця між рулонами, ефективно прогріваючи їхні торці.

3. Технологічна довідка: спрямування теплового потоку в торці рулонів є критично важливим, оскільки через наявність мікроскопічних повітряних прошарків між витками теплопровідність рулону в радіальному напрямку орієнтовно в 10 разів нижча, ніж в осьовому.

Графік термообробки складається з 3 етапів:

– нагрів: підйом температури печі до заданого технологічного максимуму;

– витримка: термостатування садки при температурі 650 – 710 °С протягом 14 – 25 годин (точний час залежить від хімічного складу та марки сталі);

– охолодження: контрольоване зниження температури під муфелем;

– муфель дозволяється знімати лише після охолодження полоси до t = 140 °С, інакше гарячий метал миттєво окислиться на повітрі, що призведе до браку («колір мінливості»).

Зараз на ділянці функціонує автоматизована система, яка залишає право прийняття остаточних рішень за оператором (людина-в-контурі-управління). Структурно вона реалізована за двоярусною схемою, але фактично працює як територіально зосереджена одноріvнева система:

– нижній рівень: робочі станції та шафи управління, розміщені безпосередньо біля груп копалових печей. Вони виконують збір даних, гальванічну розв’язку, нормалізацію аналогових сигналів від термопар і датчиків тиску, а також видають керуючі команди на виконавчі механізми (клапани пальників, вентилятори). Інформація виводиться на локальний монітор пульта;

– верхній рівень: автоматизоване робоче місце (АРМ) начальника ділянки, підключене до нижнього рівня через локальну обчислювальну мережу (LAN).

Проведений технічний аналіз виявив кілька критичних «вузьких місць» поточної АСУ ТП:

1. Низька живучість та надійність: зосередження всіх розрахункових та керуючих функцій в одній робочій станції створює єдину точку відмови. Збій станції повністю паралізує управління групою печей.

2. Висока вартість монтажу: централізована архітектура вимагає прокладання величезної кількості кабельних трас від кожного датчика до шафи, що збільшує капітальні витрати та знижує завадостійкість сигналів.

3. Інформаційна ізольованість: система повністю відрізана від вертикальних рівнів управління підприємством (MES – системи управління виробництвом та MRP/ERP – системи планування ресурсів). Дані про хід

відпалу, витрати газу та готовність партій доводиться вносити в загальну базу вручну з часовим запізненням.

Для усунення недоліків пропонується модернізувати систему шляхом впровадження розподіленої архітектури та інтеграції в загальнозаводську мережу:

1. Заміна однієї громіздкої станції на кластер програмованих логічних контролерів (ПЛК) для кожної печі окремо. Це підвищить відмовостійкість: вихід з ладу одного контролера не вплине на інші печі.

2. Встановлення модулів збору даних безпосередньо на стендах та передача сигналів до шафи управління через єдиний цифровий кабель (наприклад, Profibus чи Profinet). Це скоротить витрати на кабельно-провідникову продукцію на 60-70%.

3. Впровадження шлюзів передачі даних (наприклад, за протоколом OPC UA). Це дозволить автоматично передавати "паспорт відпалу" кожного рулону у систему вищого рівня, вести точний пооб’єктний облік енергоносіїв (природного газу) та автоматично формувати графіки завантаження термічного відділення залежно від поточних замовлень.

1.3 Постановка задачі проєктування системи автоматизації

АСУ ТП роботи ковпакової печі призначена для досягнення наступних цілей:

– централізований контроль технологічних параметрів, їх оцінка сигналізація виходу параметрів за встановлені межі;

– стеження за інформацією про приналежність до відпалу, марки металу, часу посаду в піч;

– визначення параметрів теплового режиму печі, необхідних для термообробки;

– стабілізація параметрів теплового режиму на рівні зазначених значень;

– формування, зберігання на зовнішніх носіях і протоколювання по виклику оператора історії зміни параметрів, теплового режиму печей;

– інформаційне обслуговування операторів технологічних постів;

– розрахунок техніко-економічних показників роботи печей і облік часу роботи системи автоматизації;

– виявлення відмов в роботі технічних засобів, видача відповідних повідомлень і проведення своєчасних ремонтів;

– діагностика ходу технологічного процесу;

– дистанційне керування технологічним устаткуванням і виконавчими пристроями;

– введення завдання;

– облік виробництва і складання даних на зміну.

Проєкт модернізації (або розробки) АСУ ТП ковпакової печі спрямований на створення багаторівневої, відмовостійкої та гнучкої системи управління. Проєктні рішення мають забезпечити перехід від локального контролю до комплексного керування теплотехнічним агрегатом у складі єдиного цифрового простору цеху.

Для досягнення поставленої мети розроблювана АСУ ТП повинна вирішувати комплекс задач, які функціонально поділяються на чотири базові блоки.

1. Інформаційно-вимірювальні та діагностичні задачі

– централізований моніторинг та сканування параметрів: безперервний збір, фільтрація від завад та нормалізація сигналів від первинних датчиків (температура зон нагріву, температура підмуфельного простору, тиск захисного та природного газів, витрата енергоносіїв);

– світлозвукова та візуальна сигналізація: миттєве виявлення виходу технологічних параметрів за встановлені критичні та попереджувальні межі з відображенням на мнемосхемі оператора;

– динамічна трекінгова ідентифікація садки: автоматичне відстеження та прив'язка до кожної печі супровідних даних: номера плавки, марки сталі, типорозміру рулонів, маси садки, точного часу посадки в піч та ПІБ відповідального терміста.

– наскрізна самодіагностика: постійний контроль справності апаратних засобів системи (обрив термопар, зависання виконавчих механізмів, втрата зв'язку з ПЛК по промисловій мережі, збої живлення) із видачею деталізованих сервісних повідомлень для служби КВПіА.

2. Задачі автоматичного та дистанційного керування:

– гнучке параметричне регулювання: автоматичний розрахунок та реалізація оптимальних кривих нагріву, витримки та охолодження на основі завантажених технологічних карт для конкретної марки сталі.

– стабілізація теплотехнічних параметрів: прецизійне керування співвідношенням «паливо-повітря» в пальникових пристроях для оптимізації витрати газу, а також автоматичне підтримання надлишкового тиску захисного газу під муфелем.

– дистанційне керування та супервізорний контроль: надання оператору можливості безпечного дистанційного перемикання режимів (Автомат / Ручний) та прямого керування запірно-регулюючою арматурою (клапанами, засувками), вентиляторами та допоміжним обладнанням з АРМ через графічний інтерфейс.

3. Задачі обліку, аналітики та архівації даних:

– глибоке логування та історичність: формування, довгострокове зберігання на дзеркальованих SSD-носіях та архівація баз даних із треками температур та тисків. Забезпечення можливості виклику «паспорта відпалу» (графіків) за будь-яку дату на вимогу ВТК (відділу технічного контролю);

– розрахунок техніко-економічних показників: автоматичне обчислення питомих витрат природного та захисного газів, електроенергії на тонну готової продукції, а також розрахунок коефіцієнта загальної ефективності обладнання;

– змінна звітність та диспетчеризація: автоматичне формування підсумкових рапортів за зміну/добу, облік обсягів термообробленого металу, фіксація простоїв та складання балансу робочого часу системи автоматизації.

4. Перспективні вимоги до проєктування.

Для повної відповідності концепції сучасного цифрового підприємства, у проєкті мають бути реалізовані такі рішення:

– інтеграційний інтерфейс: створення шлюзу передачі даних на базі промислових стандартів (наприклад, OPC UA або MQTT) для зв'язку з MES-рівнем (управління виробництвом) та ERP-рівнем (планування ресурсів підприємства). Це дозволить автоматично отримувати виробничі завдання та передавати звіти про готовність партій у загальнозаводську мережу без участі людини;

– розмежування прав доступу та кібербезпека: впровадження багаторівневої системи доступу до зміни налаштувань та констант (Оператор / Технолог/Майстер КВПіА/Адміністратор) за допомогою паролів або RFID-карт, із обов'язковим веденням «журналу дій користувача» для виключення несанкціонованого втручання в логіку термообробки;

– екологічний моніторинг: додавання каналу контролю складу димових газів (O, CO, NO_x) на вихлопі печі для точнішого налаштування коефіцієнта надміру повітря, що мінімізує шкідливі викиди в атмосферу.

Висновки. Аналіз термічного відділення як об'єкта автоматизації свідчить про високу складність та відповідальність технологічного процесу світлого рекристалізаційного відпалу холоднокатаної сталі. Наявність значного парку газових ковпакових печей із різними типами захисних атмосфер, конструктивними модифікаціями стендів та системами видалення продуктів згорання вимагає гнучкого та диференційованого підходу до побудови керуючих алгоритмів. Критична залежність якості готового прокату від суворого дотримання часо-температурних регламентів, параметрів тиску газів, а також висока анізотропія теплопровідності рулонів в осьовому та радіальному

напрямках роблять точне підтримання режимів теплообміну першочерговим інженерним завданням.

Поточний рівень автоматизації цеху, побудований на базі застарілої двоярусної зосередженої архітектури з єдиною точкою відмови, не відповідає сучасним вимогам промислової надійності та живучості. Інформаційна ізольованість чинної системи від вертикальних структур управління виробництвом призводить до затримок у передачі даних та унеможливлює оперативне планування. Виявлені техніко-економічні недоліки, пов'язані з високою матеріаломісткістю кабельних трас та низькою завадостійкістю аналогових сигналів, обґрунтовують гостру необхідність повної модернізації комплексу.

Постановка задачі проєктування нової АСУ ТП визначає чіткий вектор переходу до децентралізованої розподіленої периферії на базі індивідуальних програмованих логічних контролерів для кожного теплотехнічного агрегату. Створення багаторівневої системи, що охоплює інформаційно-діагностичні функції, контури прецизійного автоматичного регулювання співвідношення палива і повітря, а також розвинені аналітичні модулі Historian та OEE, закладає надійний фундамент для цифрової трансформації ділянки. Реалізація інтеграційних шлюзів передачі даних за сучасними стандартами та впровадження кібербезпекових рішень дозволить повністю інтегрувати ковпакові печі в єдиний інформаційний простір підприємства відповідно до концепції Індустрії 4.0.

2 ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Вимоги до системи в цілому

Вимоги до структури та функціонування системи.

АСУ ТП повинна відповідати ДСТУ 24.104-85 «Єдина система стандартів автоматизованого управління»

Система повинна складатися з таких рівнів

– нижній (локальний);

– середній (виробничий);

– верхній.

АСУ ТП призначена для підвищення ефективності і оперативності управління технологічними процесами термообробки холоднокатаного і гарячекатаного прокату в ковпакових термічних печах на базі новітніх засобів автоматизації, мікропроцесорної і обчислювальної техніки із застосуванням математичних моделей технологічних процесів.

Інформаційні рівні АСУ ТП.

Відповідно до об'єму і складності функцій, що реалізовуються, а також у зв'язку з підвищеними вимогами до надійності системи, функціональна схема АСУ ТП представляє ієрархічну структуру з розподіленими функціями контролю, управління і представлення інформації.

У відповідності, з різним ієрархічним рівнем користувачів інформації АСУ ТП створювана система за умовами представлення інформації про роботу комплексу стаціонарних стендів є дворівневою:

– інформаційний рівень терміста печей;

– інформаційний рівень старшого майстра термічного відділення.

АСУ ТП повинна мати ієрархічну трирівневу структуру, розподілену на нижньому рівні і централізовану на середньому і верхньому рівнях, бути багатофункціональною, інформаційно-керуючою системою.

Верхній рівень системи повинен вирішувати завдання контролю роботи блоків печей і підвищення ефективності роботи ковпакових печей за допомогою математичних моделей термічних процесів.

Мають бути передбачені технічні засоби, що забезпечують можливість інтеграції АСУ ТП ковпакової печі в АСУ ТП цеху.

Технічно верхній рівень реалізується на базі робочої станції старшого майстра термічного відділення.

Середній рівень складається з робочої станції, що управляє блоком печей. Середній рівень повинен здійснювати прийом підготовленої на нижньому рівні інформації, візуалізацію і контроль технологічного процесу на кожному стенді, управління процесами термообробки на кожному стенді (терміст визначає режим/програму відпалу і вирішує початок циклів нагріву і охолоджування), відображення і друк інформації про вихід значень параметрів за технологічні допустимі межі, відображення і друк інформації у вигляді звітно-технологічних документів і рапортів, організація введення інформації термістом в діалоговому режимі.

Технічно середній рівень реалізується на базі робочої станції включеною в Modbus Plus мережа. Робочі станції верхнього і середнього рівнів комутатором об'єднані в мережу Ethernet.

Нижній рівень повинен забезпечувати збір і обробку інформації КВП про технологічні параметри, автоматичне управління процесами нагріву і охолоджування, формувати попереджувальну і аварійну сигналізацію, здійснювати автоматичний захист і необхідні блокування для запобігання аварійним ситуаціям, проводити діагностику технічних засобів системи і устаткування, проводити зберігання даних про температуру в підмуфельному просторі в буфері за 48 годин з дискретністю 1 хв, обмін даними з робочою станцією терміста.

Технічно нижній рівень повинен реалізовуватися на базі мікропроцесорного контролера Modicon TSX Quantum який працює з розподіленою конфігурацією Momentum, технічних засобів КВП і А (первинних

перетворювачів температури, тиску, витрати; перетворювачів в уніфіковані сигнали 4-20 мА, 0-10 В; пристроїв дистанційного керування; виконавчих механізмів; регулюючих органів).

На нижньому рівні здійснюються такі завдання:

1. Збір інформації від датчиків:

– час знаходження металу в печі;

– витрата природного газу;

– температура в печі;

– витрата захисного газу;

– витрата повітря;

– витрата води;

– тиск природного газу;

– тиск повітря;

– тиск захисного газу;

– розрідження в димовому борові;

2. Перетворення вимірюваних параметрів в уніфіковані струмові сигнали (0 – 5 мА, 0 – 20 мА, 4 – 20 мА);

3. Управління:

– витратою природного газу;

– витратою захисного газу;

– витратою води;

– витратою повітря;

Нижній рівень блоку печей повинен оснащуватися панеллю оператора ПО, встановлюваною в приміщенні терміста, для забезпечення контролю роботи стендів, і завдання уставок контролеру.

Для кожного стенду має бути передбачене ручне управління технологічними процесорами з ручних пультів управління на випадок виходу з ладу мікропроцесорних контролерів. Ці пульти повинні оснащуватися показуючими приладами (температура і тиск в підмуфельному просторі, протока

води, що охолоджує, і наявність полум'я на пальниках), інформації якої вистачає для ручного управління технологічними процесами.

Мають бути передбачені автоматичний, дистанційний ручний режими управління роботою печі.

У автоматичному і дистанційному режимах повинні здійснюватися:

– централізований контроль технологічних параметрів;

– на робочій станції відображуватися хід технологічних процесів, попереджувальні і аварійні повідомлення;

– при аварійних ситуаціях спрацьовувати захисні блокування.

У автоматичному режимі окрім перерахованих функцій система відповідно до заданих термістом режимів термообробки повинна автоматично контролювати і управляти процесами нагріву і охолоджування .

У дистанційному режимі управління терміст з робочої станції повинен мати можливість управляти відсічними клапанами, вентиляторами, встановлювати необхідне значення параметрів шляхом регулювання положення виконавчих механізмів кнопками більше/менше.

У ручному режимі терміст управляє піччю з пульта ручного управління, дії АСУ ТП, що при цьому управляють, повинні блокуватися.

Вибір режимів управління автоматичний/дистанційний або ручний повинен проводитися з блоку ручного управління, а автоматичний або дистанційний – з робочої станції.

Дані про порушення технологічного процесу і режими управління (ручний/автоматичний/дистанційний) повинні фіксуватися в рапортах.

Система має бути відкритою, допускати можливість функціонального розширення і адаптацію до змін технології.

Інформаційні функції системи приведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Інформаційні функції системи

Найменування параметра	Діапазон зміни	Спосіб отримання інформації	Місце і форма подання інформації
Температура під муфелем	700-730 °С	автоматично безперервно, 1 раз на секунду	Відображення на екрані панелі оператора, реєстрація
Витрата природного газу	62 $м^3$/год	автоматично безперервно, 1 раз на секунду	Відображення на екрані панелі оператора, на щиті Реєстрація.
Витрата повітря	320 $м^3$/год	автоматично безперервно, 1 раз на секунду	Відображення на екрані панелі оператора, на щиті Реєстрація.
Витрата захисного газу	8-12 $м^3$/год	автоматично безперервно, 1 раз на секунду	Відображення на екрані панелі оператора, на щиті Реєстрація.
Витрата води		автоматично безперервно, 1 раз на секунду	Відображення на екрані панелі оператора, на щиті. Реєстрація.
Тиск повітря	5395 Па	автоматично безперервно, 1 раз на секунду	Відображення на екрані панелі оператора, на щиті Реєстрація.
Тиск природного газу	0,85-0,9 $кгс/см^2$	автоматично безперервно, 1 раз на секунду	Відображення на екрані панелі оператора, на щиті Реєстрація.
Тиск захисного газу	147,15-343,35 Па	автоматично безперервно, 1 раз на секунду	Відображення на екрані панелі оператора, на щиті Реєстрація.
Тиск димових газів	-15…5 мм. вод. ст	автоматично безперервно, 1 раз на секунду	Відображення на екрані панелі оператора, на щиті Реєстрація.

Функції регулювання системи приведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Функції регулювання системи

Найменування параметра	Вид системи регулювання	Режим управління	Місце знаходження органів управління	Технічні вимоги по точності і стійкості
Температура під муфелем	Стабілізуюча	Автоматичний	На об’єкті під муфелем	±5%
Витрата природного газу	Стабілізуюча	Автоматичний	Трубопровід природного газу	±5%
Витрата повітря	Стабілізуюча	Автоматичний	Трубопровід повітря	±2%
Витрата захисного газу	Стабілізуюча	Автоматичний	Трубопровід захисного газу	±2%
Витрата води	Стабілізуюча	Автоматичний	Трубопровід води	±2%

Вимоги до чисельності та кваліфікації персоналу системи та режиму його роботи.

Відповідальність за виконання автоматизованого управління відпалом рулонів покладається на начальника цеху і його заступників: старших змінних майстрів, майстра ділянки ковпакових печей, змінного бригадира, нагрівальників.

Організаційне забезпечення повинно містити сукупність правил і приписів, що забезпечують необхідну взаємодію оперативного персоналу з комплексом технічних засобів під час роботи системи.

Експлуатаційний персонал повинен проводити своєчасні профілактичні роботи, огляди та ремонти обладнання.

Оперативний і експлуатаційний персонал перед початком експлуатації системи повинен пройти теоретичне і практичне навчання.

Інструкція для експлуатаційного персоналу повинна містити порядок дій оперативного персоналу по введенню в автоматизовану частину необхідної інформації, і дії персоналу в разі аварії.

Вимоги до кваліфікації працівників:

– начальник цеху: вища технічна освіта, досвід роботи з управління, вміння використовувати ПК;

– начальник відділу ремонту: досвід роботи, вища технічна освіта, проведення планового контролю ремонту обладнання;

– начальник відділу експлуатації: вища освіта, досвід роботи, знання правил безпеки з охорони праці та технічної експлуатації обладнання;

– старший майстер: вища освіта (магістр, спеціаліст), досвід роботи, робота з графіками технологічного процесу;

– слюсарі: технічна освіта, досвід роботи.

2.2 Вимоги до надійності системи.

Кожна функція СУ повинна відповідати вимогам надійності згідно РД 50-650-87 «Відповідно до чинного законодавства відповідальність за забезпечення пожежної безпеки на підприємствах несуть безпосередньо їх керівники. Необхідно здійснювати загальне керівництво щодо забезпечення пожежної безпеки підприємства і виконувати у встановлені терміни приписи державного пожежного нагляду та вимоги наглядових організацій, спрямовані на забезпечення пожежної безпеки».

На систему в цілому дається гарантія 5 років до часткового виходу з ладу обладнання. При правильній експлуатації і своєчасній діагностиці та заміні слабких частин системи термін служби системи неодноразово перевищує гарантійний.

2.3 Вимоги до безпеки

Пожежна безпека системи повинна забезпечуватися як в нормальному, так і аварійному режимах її роботи

Пристрої обчислювальної техніки при несправності, що виникають в процесі експлуатації, не повинні створювати загрозу життю людей і мінімізувати шкоду навколишньому середовищу. Установка і експлуатація пристроїв повинні відповідати вимогам виробника.

Вироби, які є джерелом теплового, оптичного, рентгенівського випромінювання, а також ультразвуку, повинні бути обладнані засобами для обмеження інтенсивності цих випромінювань і ультразвуку до припустимих значень.

Необхідно забезпечити контроль рівня шуму на робочих місцях відповідно до ГОСТ 12.1.003.

Всі зовнішні елементи технічних засобів, що знаходяться під напругою, повинні мати захист від випадкових дотиків, а самі технічні засоби мати захисне заземлення відповідно до експлуатаційної документації та вимог ГОСТ 12.1.030 і «Правил улаштування електроустановок».

2.4 Вимоги до експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і збереження системи і окремих елементів

Система працює циклічно. Щомісяця система повинна проходити технічне обслуговування. На технічні засоби раз на три місяці повинна проводитися державна повірка.

При виході з ладу будь-якого технічного засобу в системі, повинна бути передбачена заміна. Тому необхідно мати запасні вироби і прилади:

– термопари (ТХА);

– датчики різниці тисків;

– 1 датчик надлишкового тиску.

Шафи з КВП повинні розміщуватися в опалювальних приміщеннях з температурою повітря 10-25 °С, вологістю не більше 75%. У таких приміщеннях не повинно бути агресивних парів і великий запиленості.

У приміщеннях з ЕОМ повинно передбачатися кондиціонування повітря, а також повинна підтримуватися температура повітря 15-25 °С, вологість не більше 75%.

Вимоги до захисту інформації від несанкціонованого доступу: оператору начальником ділянки видається логін і пароль, з параметрами доступу, необхідними для забезпечення функціонування системи.

2.5 Вимога до збереження інформації при аваріях

У разі часткової відмови основного обладнання АСУ ТП, повинна бути проведена безпечна зупинка технологічного обладнання. Відмова супервізорної системи контролю не повинна призводити до зупинки системи.

Час відновлення функцій автоматичного управління має становити не більше 10 хвилин.

Повинні бути передбачені заходи захисту інформації від перешкод і резервне електроживлення обладнання АСУТП при аваріях в системі електропостачання за допомогою застосування джерел безперебійного живлення, що забезпечують роботу обладнання АСУТП протягом 20 хвилин після відключення живлення за штатною схемою.

Для забезпечення роботи в умовах аварії повинен бути передбачений ручний режим управління.

Для забезпечення надійності системи всі контролери, перетворювачі, пускачі повинні встановлюватися в герметичні шафи. У приміщеннях з шафами

повинні бути встановлені кондиціонери. Повинні бути використані технічні засоби, відповідні по стійкості до зовнішніх впливів по ГОСТ 21552 - 84 для засобів обчислювальної техніки.

2.6 Вимоги по стандартизації та уніфікації

Конструктивне виконання обладнання повинно бути переважно модульної структури, що передбачає можливість модернізації і заміни окремих модулів, а також розвитку функціональних можливостей за рахунок застосування нових модулів.

Підсистеми повинні використовувати уніфіковані методи реалізації функціональних завдань системи:

- підтримка сучасних транспортних протоколів (Modbus, Modbus Plus);
- підтримка розподіленого доступу до інформації.

Необхідно дотримуватися уніфікованого формату звітних документів, прийнятому на підприємство замовника АСУ ТП.

2.7 Вимоги до функцій, які виконуються системою

Підсистема зберігання даних повинна здійснювати зберігання оперативних даних системи, даних для формування аналітичних звітів, документів системи, сформованих в процесі підготовки звітів.

Підсистема повинна забезпечувати періодичне резервне копіювання і збереження даних на додаткових носіях інформації.

Повинна вирішувати завдання забезпечення інформаційної сумісності даних, якими обмінюються окремі компоненти системи між собою, а також з суміжними системами в процесі функціонування.

У випадку аварії на технологічному об’єкті управління, ЕОМ повинна відобразити це на екрані. Для мнемосхем, повинні бути використані колірні індикатори, які сигналізують про аварійну ситуацію.

2.8 Вимоги до видів забезпечення

Доступ до даних має бути наданий тільки авторизованим користувачам з урахуванням їх службових повноважень, а також з урахуванням категорії запитуваної інформації.

Структура бази даних повинна бути організована на основі моделі клієнт-сервер, що виключає одноразове повне вивантаження інформації, що міститься в базі даних системи.

Технічні засоби, що забезпечують зберігання інформації, повинні використовувати сучасні технології, що дозволяють забезпечити підвищену надійність зберігання даних, їх кодування і оперативну заміну обладнання (розподілене резервне збереження даних).

При проектуванні і розгортанні системи необхідно розглянути можливість використання накопиченої інформації з уже функціонуючих інформаційних систем.

Для зручності оператора повинна застосовуватися ієрархічна структура інформаційного забезпечення, наприклад стандартні операційні панелі:

- панелі для реєстрації ходу процесу;
- панелі загального вигляду;
- мнемосхеми;
- сигналізаційні панелі;
- панелі налагодження.

Вся інформація повинна бути представлена у вигляді понять і визначень, властивих металургійної галузі, а також повинна бути зрозуміла персоналу,

керуючому процесом.

Мова взаємодії користувача з системою повинна бути організована за допомогою властивих понять і визначень. Спосіб організації діалогу з користувачем повинен забезпечити мінімізацію випадкових помилкових дій оператора

Програмне забезпечення повинно бути виконано за модульним принципом з можливістю нарощування додаткових функцій і розширення бази даних. Повинна бути передбачена можливість збереження бази даних від випадкових несанкціонованих зовнішніх впливів. Програмне забезпечення в залежності від класу безпеки повинно відповідати рекомендаціям МЕК 60880, МЕК 60880-2, МЕК +61138, МЕК 61513, ГОСТ Р ІСО / МЕК 12207-99 і РД ЕО 0554-2005 і повинно бути, по можливості, максимально уніфіковано.

Базовою програмною платформою повинні бути операційні системи Windows XP або Windows 11.

Алгоритми АСУ ТП повинні бути виконані по функціональних групах, передбачати можливість обміну інформацією з АСУ верхнього рівня, здійснювати логічний контроль вхідної інформації. У даній системі повинні використовуватися різні первинні перетворювачі для вимірювання температури, тиску, витрати, з уніфікованим вихідним сигналом по струму 4 – 20 мА. Усі технічні засоби повинні працювати з уніфікованими сигналами по струму або напрузі.

Первинні перетворювачі мають забезпечувати безперебійну передачу даних на контролери, а контролери повинні виконувати управління.

В системі необхідно два контролера для підвищення надійності системи.

Засоби вимірювань повинні бути внесені до Держреєстру.

Усі технічні засоби автоматизації, наявні в системі повинні проходити державну повірку раз на рік, а планову раз на місяць.

Клас точності приладів повинен бути не більше 3%.

Організаційне забезпечення повинно містити сукупність правил, що забезпечують необхідну взаємодію оперативного персоналу з комплексом

технічних засобів під час роботи системи.

Експлуатаційний персонал повинен проводити своєчасні профілактичні роботи, огляди та ремонти обладнання.

Оперативний і експлуатаційний персонал перед початком експлуатації системи повинен пройти теоретичне і практичне навчання.

Інструкція для експлуатаційного персоналу повинна містити порядок дій оперативного персоналу по введенню в автоматизовану частину необхідної інформації, і дії персоналу в разі аварії.

Висновки. Представлений комплекс вимог обґрунтовує створення сучасної трирівневої ієрархічної АСУ ТП ковпакових печей, яка повністю відповідає діючим нормативним стандартам надійності, пожежної безпеки та охорони праці. Завдяки чіткому розподілу функцій між нижнім польовим рівнем на базі дубльованих мікропроцесорних контролерів і верхніми диспетчерськими станціями забезпечується прецизійне автоматичне регулювання параметрів теплообміну та висока відмовостійкість системи. Впровадження клієнт-серверної моделі бази даних, багаторівневого захисту інформації та джерел безперебійного живлення гарантує збереження критично важливих треків відпалу навіть за умов виникнення аварійних ситуацій. Уніфікація програмно-апаратних засобів, використання стандартних інтерфейсів HMI та чітка регламентація кваліфікації персоналу закладають надійний фундамент для успішної експлуатації та подальшої вертикальної інтеграції печей у загальнозаводську цифрову мережу.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

У даному технологічному процесі (відпал металу в колпакових печах) досить використовувати ПІ-регулювання для виходу параметрів на задані значення. Для підвищення якості регулювання і зниження помилки від «людського чинника» в даній системі використовується вбудований в системне програмне забезпечення контролера ПІ-регулятора. При роботі ковпакових печей для здійснення відпалу як головний технологічний параметр приймається температура в підмуфельному просторі. Її регулювання здійснюється за рахунок зміни витрати газу.

З погляду теорії автоматичного керування, ковпакова піч є складним, просторово розподіленим, багатовимірним об'єктом із високим рівнем теплової інерції. Проте для синтезу локальних систем стабілізації температури підмуфельного простору за каналом «витрата газу – температура під муфелем» об'єкт доцільно апроксимувати як лінійну динамічну ланку із запізненням.

Теплові процеси в підмуфельному просторі, що враховують акумуляцію тепла муфелем, конвективний теплообмін через циркулюючий захисний газ та радіаційне випромінювання, з достатньою для інженерних розрахунків точністю описуються диференціальним рівнянням другого порядку із запізненням:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \Delta\theta(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} + \Delta\theta(t) = k_0 \cdot \Delta V_g(t - \tau), \qquad (3.1)$$

де $\Delta\theta(t)$ – відхилення температури в підмуфельному просторі, °С;

$\Delta V_g(t)$ – зміна витрати природного газу, м³/год;

k_0 – статический коефіцієнт підсилення об'єкта, який показує, на скільки градусів змінюється температура при зміні витрати газу на 1 м³/год;

T_1, T_2 – постійні часу печі (еквівалентні тепловій інерції футерування, масивного муфеля та самої садки рулонів), с;

τ – чисте (транспортне) запізнення системи, зумовлене часом вигоряння газу, рухом продуктів згорання та інерцією первинного термоперетворювача (термопари), с.

Відповідно, передавальна функція ковпакової печі за досліджуваним каналом керування у лапласівській формі має вигляд:

$$W_{об}(s) = \frac{\theta(s)}{V_g(s)} = \frac{k_0}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \cdot e^{-\tau s}, \qquad (3.2)$$

Через те, що одна з постійних часу значно перевищує іншу (Т1 ≫ Т2), для спрощення розрахунку параметрів налаштування регулятора модель часто редукують до інерційної ланки першого порядку із сумарним запізненням ($\tau_{екв} = \tau + T_2$):

$$W_{об_{ред}}(s) = \frac{k_0}{T_1 s + 1} \cdot e^{-\tau_{екв} s}, \qquad (3.3)$$

Враховуючи значну теплову інерцію (T_1) та наявність чистого запізнення (τ), застосування простого пропорційного (П) регулювання є неефективним через появу великої статичної помилки (недорегулювання). Використання диференціальної складової (ПІД-регулятора) у даному випадку є недоцільним, оскільки високочастотні шуми вимірювання температури та дискретність роботи газових клапанів можуть викликати сильні сплески керуючого сигналу, що призведе до передчасного зносу запірно-регулюючої арматури.

Тому для досягнення нульової статичної похибки та забезпечення високої якості перехідного процесу в системі програмного забезпечення ПЛК реалізовано вбудований цифровий ПІ-регулятор. Його передавальна функція має вигляд:

$$W_{\text{per}}(s) = k_p\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right), \qquad (3.4)$$

де k_p – коефіцієнт підсилення регулятора;

T_i – час інтегрування. Інтегральна складова дозволяє повністю усунути статичну помилку «людського чинника» та компенсувати зовнішні збурення (наприклад, коливання тиску газу в цеховому колекторі).

При комп'ютерному моделюванні замкненої системи автоматичного регулювання (САР) температури у програмному середовищі (MATLAB/Simulink або Octave) на основі отриманої математичної моделі печі було згенеровано криву розгону системи у відповідь на сходинковий керуючий чи задаючий вплив. Отриманий графік перехідного процесу наведено на рисунку 3.1.

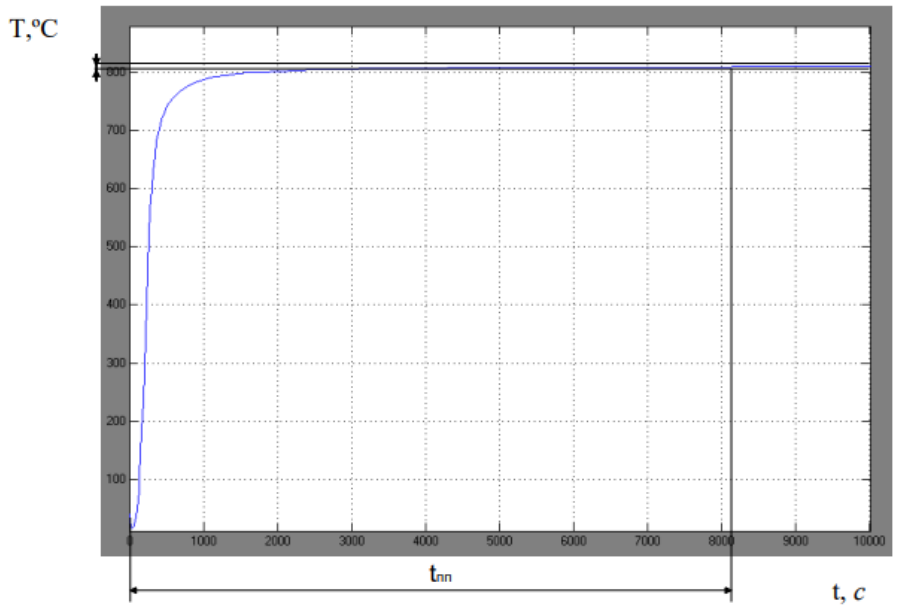


Рисунок 3.1 – Графік перехідного процесу в зоні нагріву колпакової печі

Аналіз кривої перехідного процесу (рис. 3.1) дозволяє визначити основні показники якості налаштованої САР:

1. Час запізнення (τ): початкова ділянка графіка, на якій температура під муфелем не реагує на зміну витрати газу, що підтверджує наявність

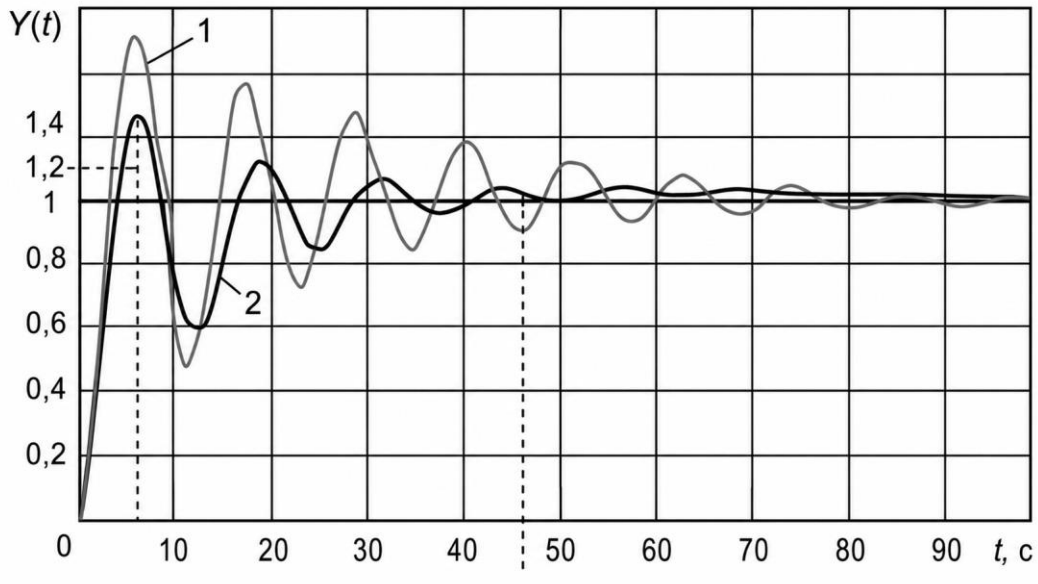
транспортного запізнення теплопередачі.

2. Час регулювання ($t_р$): тривалість етапу, за який система виходить на задане уставкою значення температури (в межах зони ± 5%). Для ковпакових печей цей час вимірюється десятками хвилин, що корелює з реальними фізичними процесами нагріву багатотонної садки.

3. Перерегулювання (σ): максимальне відхилення регульованої температури вище заданого значення на першому напівперіоді коливань. Завдяки раціонально підібраним параметрам ПІ-регулятора ($k_р$, T_i), величина перерегулювання знаходиться у технологічно безпечних межах, що запобігає локальному перегріву кромки рулонів сталі.

4. Статична похибка ($e_{ст}$): дорівнює нулю завдяки наявності астатизму першого порядку, який вносить інтегральна ланка регулятора. Після завершення перехідного процесу графік асимптотично стабілізується точно на лінії заданої уставки.

При моделюванні процесів в печі, був отриманий наступний перехідний процес показаний на рисунку 3.2.



1 – без адаптивних налаштувань (k = 1, T_i = 1); 2 – з адаптивними налаштуваннями

Рисунок 3.2 – Перехідний процес в САР температури

З графіка можна визначити, що час нагріву печі від початкової температури (температура атмосфери цеху) до мінімальної робочої температури складає близько двох з половиною годин. Перерегулювання відсутнє. Розглянемо також перехідні процеси, що протікають в системі при появі обурюючих дій. Як обурюючі дії виступають зниження температури в печі, пов'язані з втратою тепла із-за поганої герметичності ковпака.

Спираючись на отримані характеристики можна зробити висновок, що для управління температурою доцільно буде застосувати ПІ – регулятор з коефіцієнтом посилення k = 0,42 і постійної часу інтегрування $T_i = 50$.

ПІ – регулятор, комбінація П і І регуляторів. Має переваги обох. Від П-хороша стійкість, від І - відсутність статичної помилки $\delta X = 0$. Програмний ПІ-регулятор вмонтовано в системне програмне забезпечення контролер.

Для автоматизації теплового режиму ковпакової печі ключовим завданням є прецизійне керування температурою в підмуфельному просторі. Як головний регульований технологічний параметр (змінна системи Y(t)) приймається температура під муфелем, а основним керуючим впливом (U(t)) є зміна витрати природного газу, що подається на пальникові пристрої
нагрівального ковпака.

Висновки. Математичне моделювання та аналіз динамічних властивостей ковпакової печі підтверджують, що теплотехнічний агрегат є складним просторово розподіленим об'єктом із високим рівнем теплової інерції та чистим транспортним запізненням. Успішна апроксимація каналу керування «витрата газу – температура під муфелем» лінійною динамічною ланкою другого порядку та її подальше редукування до моделі першого порядку із сумарним запізненням дозволили суттєво спростити процедуру інженерного синтезу системи. На основі проведених теоретичних розрахунків та комп'ютерного моделювання у програмному середовищі було повністю обґрунтовано відмову від неефективного пропорційного та чутливого до завад ПІД-регулювання на користь класичного ПІ-закону управління.

Аналіз отриманих кривих перехідних процесів замкненої системи автоматичного регулювання довів високу ефективність використання вбудованого в програмне забезпечення ПЛК цифрового ПІ-регулятора з розрахованими оптимальними параметрами налаштування. Складена модель продемонструвала повну ліквідацію статичної похибки завдяки наявності астатизму першого порядку, а також відсутність небезпечного для кромок рулонів сталі перерегулювання в контурі нагріву. Порівняльний аналіз динаміки системи з впровадженням адаптивних налаштувань підтвердив значне покращення стійкості та якості стабілізації головного технологічного параметра при відпрацюванні типових зовнішніх збурень, пов'язаних із можливими втратами тепла через порушення герметичності футерування або ковпака.

4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

4.1 Схема матеріальних і інформаційних потоків

Управління технологічним процесом відпалу є цілеспрямованим інформаційним процесом, який забезпечує точну координацію матеріальних потоків для досягнення заданих якісних характеристик готового прокату. Інформаційне забезпечення розроблюваної АСУ ТП охоплює повний цикл операцій із даними: безперервний збір (вимірювання), нормалізацію, фільтрацію, довгострокове зберігання, інтелектуальну обробку та генерацію керуючих впливів.

Загальну архітектуру взаємодії та напрямки руху даних відображено на схемі інформаційних потоків (рис. 4.1).

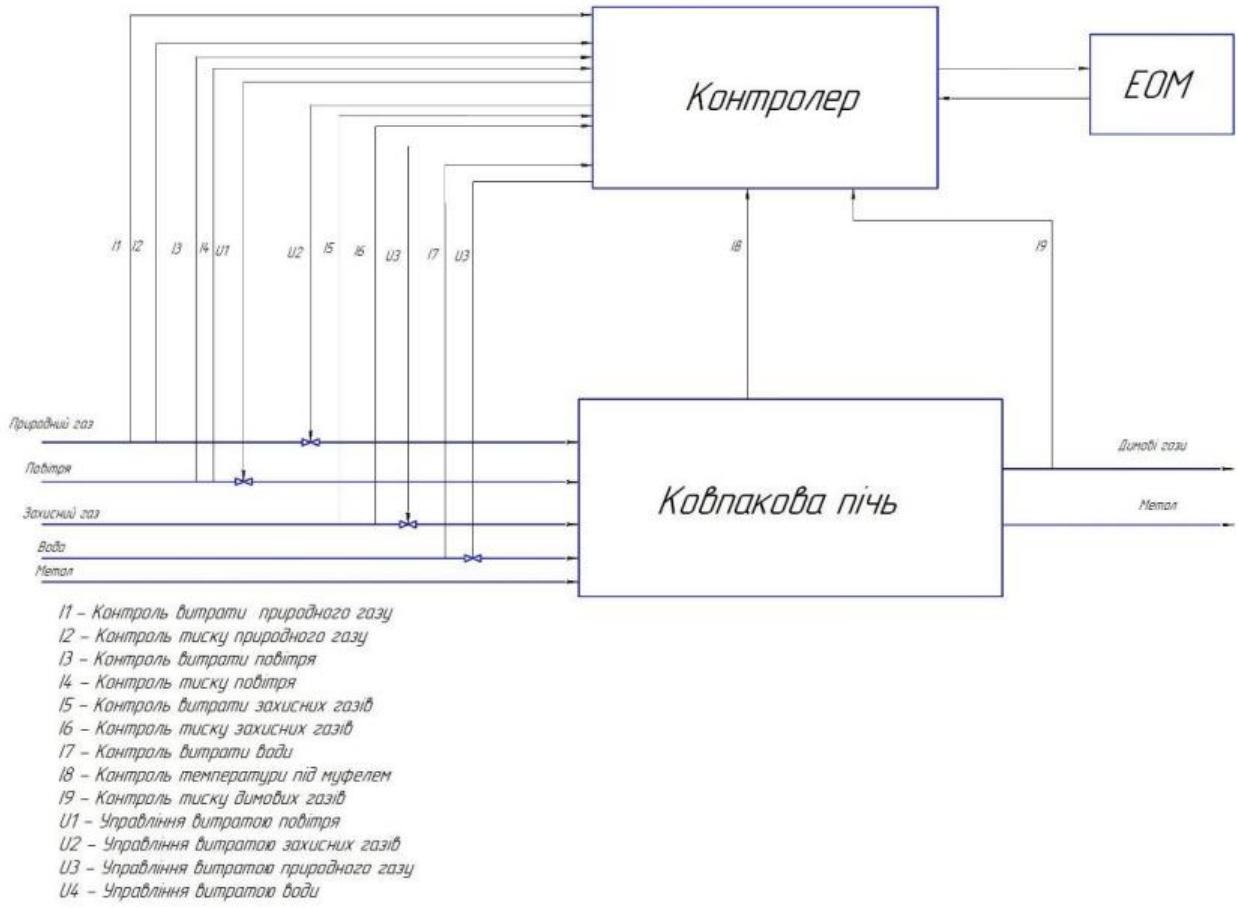


Рисунок 4.1 – Схема матеріальних і інформаційних потоків

У структурі автоматизованої системи керування ковпаковою піччю вся інформація поділяється на три ключові категорії:

– вхідна інформація: первинні технологічні дані, що надходять у реальному часі від датчиків і вимірювальних приладів, встановлених безпосередньо на печі (значення температур, тисків, витрат);

– проміжна інформація: внутрішні змінні, масиви даних та результати обчислень, які формуються всередині процесора ПЛК під час виконання лінійних алгоритмів, фільтрації сигналів та розрахунку кроків ПІД-регуляторів;

– вихідна інформація: сформовані контролером командні сигнали та керуючі впливи, що направляються на виконавчі механізми, а також масиви даних про фактичний стан процесу, які передаються на верхній рівень для візуалізації та архівації.

Для забезпечення високої якості світлого відпалу вирішальне значення має прецизійна точність вимірювання параметрів та їх гарантована доставка без затримок на монітор оператора. На диспетчерському рівні автоматизації візуалізація та оперативний контроль за ходом термообробки реалізуються за допомогою сучасної SCADA-системи, що функціонує в режимі реального часу.

Для побудови адекватної системи автоматизації ковпакову піч необхідно розглядати як синергію матеріальних та інформаційних потоків:

– вхідні матеріальні потоки: сортовий холоднокатаний або гарячекатаний прокат (рулони), енергетичний носій (природний газ) та окислювач (ежекторне/пальникове повітря);

– вихідні матеріальні потоки: готова продукція (термічно оброблений прокат із відновленими пластичними властивостями) та евакуйовані продукти згорання (димові гази).

Нормуючі та вимірювальні перетворювачі забезпечують апаратне узгодження (гальванічну розв'язку та уніфікацію сигналів) між польовими датчиками дискретних і аналогових параметрів та вхідними модулями програмованого логічного контролера (ПЛК).

Алгоритм взаємодії рівнів управління:

1. Польовий контур: ПЛК циклічно опитує датчики, обробляє отриману вхідну інформацію згідно із завантаженою логікою і генерує вихідні керуючі сигнали на виконавчі механізми (регулюючі клапани, засувки), які безпосередньо дозують подачу природного газу та повітря в пальникові пристрої.

2. Диспетчерський контур: з рівня контролера поточна інформація про хід процесу передається на ЕОМ верхнього рівня (АРМ оператора-терміста). Відповідно до обраної технологічної карти, SCADA-система автоматично завантажує в ПЛК поточні уставки та завдання на кожному етапі (нагрів, витримка, охолодження).

3. Супервізорний контроль: використовуючи графічні мнемосхемі SCADA-системи, оперативний персонал здійснює нагляд за трендами. У разі виникнення технологічних відхилень, оператор має можливість через людино-машинний інтерфейс (HMI) або за допомогою фізичних органів загальнозаводського щита управління ввести коригуючі команди чи перейти на дистанційне керування.

4. Протиаварійний захист: у разі фіксації критичних або аварійних значень, ПЛК миттєво активує захисні блокування, відсікає подачу палива, зупиняє роботу печі та передає високопріоритетний сигнал у загальноцехову схему аварійної сигналізації.

Інформаційно-аналітична звітність.

Для забезпечення оперативного планування, моніторингу загальної ефективності обладнання (OEE) та проведення ретельного техніко-економічного аналізу роботи термічного відділення, АСУ ТП реалізує автоматичне документування. Система формує такі регламентні звіти за обраний часовий інтервал:

– змінні рапорти роботи термічної ділянки;

– добові та підсумкові місячні звіти про роботу цеху з урахуванням витрат

енергоносіїв;

– поточні паспорти відпалу конкретної садки (графіки температур та тисків).

Джерелом для формування звітної документації слугують як довгострокові бази даних монітора реального часу (MPB/Historian) на верхньому рівні, так і енергонезалежні локальні буфери даних самого контролера, що гарантує збереження інформації за будь-яких умов.

4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ

Вибір комплексу технічних засобів (КТЗ) для системи автоматичного управління (САУ) ковпаковою піччю базується на необхідності переходу від застарілої зосередженої архітектури до розподіленої системи управління. Головними критеріями вибору апаратного забезпечення є:

– надійність та відмовостійкість: здатність функціонувати в безперервному циклі термообробки (24/7) в умовах металургійного виробництва;

– живучість системи: вихід з ладу одного елемента не повинен призводити до повної зупинки всього блоку печей;

– сумісність та відкритість: підтримка уніфікованих промислових протоколів для забезпечення вертикальної інтеграції з MES/ERP системами підприємства;

– економічна доцільність: зниження капітальних витрат на кабельно-провідникову продукцію шляхом використання розподіленого периферійного збору даних.

Для реалізації нижнього (польового) та середнього (виробничого) рівнів автоматизації обрано архітектуру на базі програмованого логічного контролера Modicon TSX Quantum у поєднанні з модулями розподіленого вводу-виводу

Modicon Momentum:

1. Центральний процесор ПЛК (Modicon TSX Quantum): встановлюється у загальну шафу управління блоком печей. Ця платформа має високу обчислювальну потужність, великий об'єм енергонезалежної пам'яті для зберігання локальних буферів даних (наприклад, 48-годинного треку температур з дискретністю 1 хв) та вбудовані математичні блоки для прецизійної реалізації цифрових ПІ-регуляторів. Для підвищення коефіцієнта готовності системи проектом передбачено дублювання (резервування) контролерів – використання двох ПЛК, що працюють у режимі «гарячого резерву» (Hot Standby).

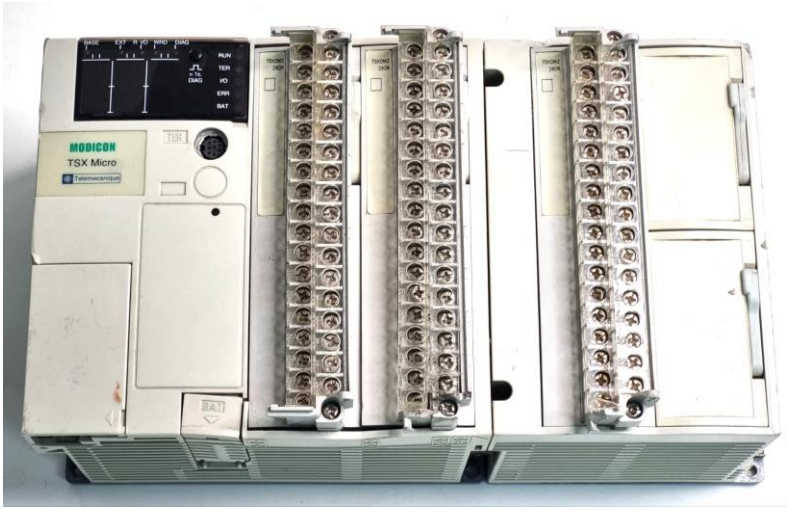


Рисунок 4.2 – Центральний процесор ПЛК (Modicon TSX Quantum)

2. Розподілена периферія (Modicon Momentum): модулі збору аналогових та дискретних сигналів розміщуються безпосередньо у локальних шафах біля стендів печей. Зв'язок між модулями Momentum та центральним ПЛК Quantum реалізується через високошвидкісну промислову мережу Modbus Plus (або Profibus/Profinet). Це дозволяє скоротити довжину індивідуальних кабелів від датчиків до шафи управління на 60-70%, значно знизити рівень електромагнітних завад на аналогових лініях та підвищити ремонтопридатність системи.

Для забезпечення трирежимного управління агрегатом (автоматичний,

дистанційний, ручний) КТЗ розділено на два рівні візуалізації:

1. Локальна панель оператора (ПО): встановлюється безпосередньо в операторському приміщенні терміста біля блоку печей. Вона призначена для оперативного моніторингу поточних параметрів одного або групи стендів, зміни у ставок ПІ-регуляторів та відображення локальних аварійних повідомлень (клас захисту корпусу не нижче IP65).

2. АРМ старшого майстра (верхній рівень): реалізується на базі промислової робочої станції (ЕОМ) під управлінням сучасної SCADA-системи. Робоча станція об'єднується з ПЛК через мережу Ethernet за допомогою комутаторів. На цьому рівні реалізуються складні математичні моделі термічного процесу, ведеться глибоке логування бази даних (Historian) та автоматично формуються змінні, добові та місячні звіти ВТК.

3. Аварійний ручний пульт управління: для забезпечення вимог живучості системи (на випадок повного виходу з ладу ПЛК) передбачено фізичний щит з автономними показуючими приладами. На нього виводяться критичні параметри: температура і тиск під муфелем, наявність полум'я на пальниках, протік води. Керування регулюючими органами у цьому режимі здійснюється кнопками «більше/менше» в обхід контролера, при цьому всі автоматичні керуючі дії ПЛК апаратно блокуються.

Для забезпечення точності вимірювань (клас точності приладів не більше 3%, згідно з вимогами ТЗ – переважно 0,5 – 1,0%) усі датчики мають уніфіковані вихідні сигнали, сумісні з вхідними модулями Modicon Momentum. Основний інтерфейс передачі – струмова петля 4–20 мА, яка має найвищу завадостійкість на промислових об'єктах.

Канал вимірювання температури (під муфелем та в печі): Використовуються термоелектричні перетворювачі типу ТХА (хромель-алюмель, тип К) із вбудованими у головку нормуючими перетворювачами. Діапазон вимірювання становить 0...1000 °С (робоча зона відпалу 650...730 °С). Нормуючий перетворювач трансформує термоерс у лінійний струмовий сигнал 4–20 мА. Засоби вимірювання підлягають обов'язковому внесенню до

Державного реєстру та проходять щорічну державну повірку.

Канал вимірювання тиску (газ, повітря, підмуфельний простір):

– для вимірювання надлишкового тиску природного газу в колекторі (0.80...0.95 кгс/см²) та тиску пальникового повітря (до 5500 Па) обрано тензорезистивні датчики надлишкового тиску з вихідним сигналом 4–20 мА;

– для прецизійного контролю надлишкового тиску захисного газу під муфелем (147...343 Па) та розрідження в димовому борові (-15...+5 мм вод. ст.) використовуються високочутливі датчики різниці тисків (дифманометри) з малим діапазоном вимірювання, що дозволяє підтримувати тиск захисної атмосфери з точністю ±2%;

– канал вимірювання витрати (газ, повітря, захисний газ, вода): Використовуються витратоміри звужуючих пристроїв (діафрагми) у комплекті з інтелектуальними датчиками диференційного тиску, або сучасні вихрові/електромагнітні витратоміри з уніфікованим виходом, які забезпечують безперервний збір даних один раз на секунду.

Виконавчі механізми (ВМ) здійснюють безпосереднє керування матеріальними потоками на основі аналогових (4-20 мА) або дискретних (24 В/220 В) сигналів від ПЛК через модулі виводу:

– контур регулювання температури (витрата палива): на газопроводах пальників встановлюються регулюючі клапани з електричними виконавчими механізмами (наприклад, МЕО або сучасні аналогічні приводи з позиціонерами). Вони плавно змінюють кут відкриття заслінки, реалізуючи ПІ-закон стабілізації температури за співвідношенням «паливо-повітря»;

– контур протиаварійного захисту: для миттєвого відсікання подачі природного газу у разі аварійних ситуацій (згасання полум'я, падіння тиску газу, вимкнення електроенергії) послідовно на газопроводі встановлюються швидкісні електромагнітні запірні клапани (відсікачі) з часом спрацювання не більше 1-2 секунд;

– допоміжні контури: керування електродвигунами циркуляційних вентиляторів стендів та вентиляторів КПО здійснюється через шафи керування електроприводами, оснащені частотними перетворювачами, що дозволяє оптимізувати витрату електроенергії (ТЕП системи) та плавно регулювати конвективні потоки газу.

Для забезпечення заявленого 5-річного гарантійного терміну служби обладнання та захисту від пилу й агресивних парів металургійного цеху передбачено такі інженерні рішення:

– усі контролери Modicon, нормуючі перетворювачі та силові пускачі монтуються в герметичні шафи управління з класом захисту не нижче IP54;

– приміщення КВПіА, де розташовані шафи ПЛК та обчислювальна техніка (ЕОМ), оснащуються системами кондиціонування повітря для безперервного підтримання регламентної температури (10...25 °С для КВП та 15...25 °С для ЕОМ) і вологості не більше 75% відповідно до ГОСТ 21552-84;

– живлення всього КТЗ АСУ ТП здійснюється через джерела безперебійного живлення, які у разі повної аварії в системі електропостачання забезпечують автономну роботу контролерів та засобів інтерфейсу протягом 20 хвилин, що достатньо для безпечного переведення печі в ручний режим або її безаварійної зупинки.

1. Вимірювання температури (під муфелем та в печі).

Термоперетворювачі серії ТСП-1388 (тип K, хромель-алюмель).



Рисунок 4.3 – Термоперетворювачі серії ТСП-1388

Змонтовані в захисній арматурі з жароміцної сталі чи кераміки (для зони печі до 1000 °С).

Нормуючий перетворювач: вбудована в головку термопари плата перетворення типу НПТ-1, яка трансформує мілівольти (мВ) в лінійний струм 4–20 мА.



Рисунок 4.4 – Плата перетворення типу НПТ-1

2. Вимірювання тиску газу та повітря.

Датчики надлишкового тиску серії Wika A-10.



Рисунок 4.5 – Датчики надлишкового тиску серії Wika A-10

Діапазон для газу: 0-1,6 кгс/см² (забезпечує точний контроль робочого тиску 0,85-0,9 кгс/см²).

Діапазон для повітря: 0–10 кПа (для контролю тиску повітря ~5400 Па).

Тип сигналу: 2-провідна лінія, 4-20 мА.

3. Прецизійне вимірювання малого тиску (підмуфельний простір та розрідження в борові).

Датчики різниці тиску (мікропроцесорні дифманометри) серії Rosemount 3051CD. Для підмуфельного простору: діапазон 0–600 Па (робочий тиск захисного газу 147–343 Па).



Рисунок 4.6 – Мікропроцесорний дифманометр серії Rosemount 3051CD

4. Вимірювання витрати (газ, повітря, захисний газ, вода)

Для природного та захисного газу: вихрові витратоміри серії Endress+Hauser Prowirl. Вони забезпечують високу точність на газових середовищах і мають вихід 4–20 мА + протокол HART (для діагностики).



Рисунок 4.7 – Вихрові витратоміри серії Endress+Hauser Prowirl

Оптимально використовувати звужуючий пристрій (стандартну камерну діафрагму ДКС) у комплекті з датчиком різниці тиску Rosemount 2051 для розрахунку витрати за методом перепаду тиску.

Для води: електромагнітний витратомір серії Promag 10W. Вони стійкі до забрудненої технічної води та не створюють додаткового гідравлічного опору.

5. Контроль наявності полум'я пальників.

Фотоелектричні або іонізаційні датчики-сигналізатори полум'я – блоки контролю серії Siemens QRA.



Рисунок 4.8 – Фотоелектричний датчик-сигналізатои полум'я Siemens QRA

Видають дискретний сигнал (сухий контакт) «Є полум'я / Немає полум'я» безпосередньо у схему протиаварійного захисту (ПАЗ) контролера.

4.3 Функціональні схеми автоматизації управління

До базових функцій підсистеми нижнього рівня відноситься автоматизація процесу відпалу рулонів сталі згідно з діючою технологічною інструкцією. Функціональна схема автоматизації (ФСА) реалізує безперервний контроль, регулювання та протиаварійний захист за такими основними контурами:

1. Контур контролю і регулювання температури під муфелем печі

Сигнал від термоелектричного перетворювача типу ТХА-1388 (поз. 1а) через вбудований у головку інтелектуальний нормуючий перетворювач НПТ-1 (поз. 1б) трансформується в уніфікований струмовий сигнал 4–20 мА і надходить на вхідний аналоговий модуль розподіленої периферії Modicon Momentum.

Режим завдання температури (ручне введення оператором чи автоматичне керування за графіком розрахункової математичної моделі з верхнього рівня) визначається програмно за допомогою локальної панелі оператора (ПО). При виборі ручного режиму поточна уставка вводиться безпосередньо з сенсорного екрана ПО в пам'ять ПЛК.

Програмований логічний контролер Modicon TSX Quantum обчислює величину неузгодженості (помилки) між фактичною температурою під муфелем та заданою уставкою. За цим сигналом помилки вбудований у системне програмне забезпечення ПЛК цифровий ПІ-алгоритм розраховує величину керуючого впливу. Вихідний сигнал 4–20 мА з аналогового модуля виводу ПЛК направляється на електронний позиціонер виконавчого механізму регулюючого клапана палива (поз. 1в), який плавно змінює подачу газу. Зворотний зв'язок щодо ступеня відкриття клапана контролюється за допомогою інтегрованого в електропривід датчика положення.

2. Контур контролю і регулювання співвідношення паливо-повітря.

Поточна витрата природного газу вимірюється за допомогою вихрового витратоміра серії Емір-Прайм (поз. 2а), а витрата повітря – за допомогою звужуючого пристрою (стандартної камерної діафрагми ДКС, поз. 3а) та датчика різниці тиску Rosemount 2051 (поз. 3б). Обидва уніфіковані сигнали 4–20 мА транслюються на вхідні канали аналогових модулів Modicon Momentum.

Вибір коефіцієнта співвідношення «паливо-повітря» здійснюється оператором через екранну форму локальної панелі оператора або коригується автоматично алгоритмом оптимізації горіння ПЛК. Контролер здійснює математичний розрахунок необхідної кількості повітря під поточну витрату газу. За отриманим сигналом розбалансу вбудований цифровий ПІ-регулятор формує

вихідну команду 4–20 мА на виконавчий механізм напрямного апарату або регулюючої заслінки повітря (поз. 3в).

3. Контур контролю і регулювання витрати захисного газу.

Вимірювання витрати захисного HNx-газу, що подається під муфельний простір для запобігання окисленню металу, реалізується за допомогою газового вихрового витратоміра Емір-Прайм (поз. 4а) з інтерфейсом 4–20 мА, підключеного до периферійного модуля ПЛК.

Уставка витрати захисного газу на різних етапах циклу відпалу (продувка, нагрів, охолодження) задається автоматично за кроками програми або вводиться термістом вручну з локальної панелі оператора. Цифровий ПІ-регулятор ПЛК Modicon TSX Quantum порівнює фактичне значення з уставкою та через модуль аналогового виводу подає сигнал 4–20 мА на регулюючий клапан подачі захисного газу (поз. 4б).

4. Контур контролю і регулювання витрати охолоджувальної води.

Контроль витрати технічної води, що подається на контури охолодження елементів печі та стенда, здійснюється за допомогою електромагнітного витратоміра серії Promag 10W (поз. 5а). Сигнал витрати надходить до контролера через модулі розподіленого вводу Modicon Momentum.

Задання витрати води виконується автоматично відповідно до стадії охолодження садки або вручну з панелі оператора. На основі розрахованої похибки регулювання ПЛК видає керуючий сигнал 4–20 мА на регулюючий клапан на трубопроводі зворотної або подавальної води (поз. 5б), стабілізуючи теплообмін та оптимізуючи витрати водного ресурсу.

5. Контроль тиску повітря.

Вимірювання тиску повітря у підвідному повітропроводі здійснюється датчиком надлишкового тиску серії Wika A-10 (або *Сапфір-22М*, поз. 6а) з діапазоном 0–10 кПа. Струмовий сигнал 4–20 мА надходить на аналоговий вхід ПЛК для візуалізації на панелі оператора та перевірки умов безпечного горіння пальників.

6. Контроль тиску захисного газу.

Прецизійний моніторинг малого надлишкового тиску захисної атмосфери безпосередньо під муфелем здійснюється високочутливим датчиком різниці тиску Rosemount 3051CD (поз. 7а) з діапазоном 0–600 Па. Сигнал 4–20 мА передається до ПЛК. При падінні тиску захисного газу нижче критичної межі (147 Па) контролер активує аварійну сигналізацію на ПО та АРМ для запобігання підсмоктуванню повітря та вибухонебезпечних ситуацій.

7. Контроль розрідження у димовому борові.

Контроль тяги та евакуації продуктів згорання здійснюється за допомогою датчика різниці тиску із двосторонньою шкалою (тягонапороміра) Сапфір-22-ДГ (поз. 8а) з робочим діапазоном від -50 до +50 Па. Сигнал надходить до ПЛК, транслюється на HMI-інтерфейси та використовується в загальносистемних блокуваннях безпеки.

8. Контур контролю тиску природного газу.

Параметри тиску газу в цеховому колекторі та безпосередньо перед рампою пальників контролюються датчиком надлишкового тиску Wika A-10 (поз. 9а) з діапазоном 0–1,6 кгс/см². Сигнал 4–20 мА заводиться у ПЛК. Контур інтегрований у систему протиаварійного захисту (ПАЗ): при виході тиску палива за допустимі межі (0,85-0,9 кгс/см^2) ПЛК Quantum миттєво знеструмлює виходи управління та закриває швидкісні електромагнітні запірні клапани-відсікачі на газопроводі.

4.4 Принципова електрична схема по каналу регулювання технологічної величини

На принциповій електричній схемі контуру регулювання зображено канали проходження сигналів та схему керування температурою під муфелем ковпакової печі.

Первинним джерелом інформації про тепловий стан об'єкта є термоелектричний перетворювач типу ТХА-1388 (поз. 1а). Слабкий аналоговий сигнал мілівольтового діапазону (мВ) з виходу термопари надходить на вбудований у її головку інтелектуальний нормуючий перетворювач НПТ-1 (поз. 1б). Перетворювач здійснює гальванічну розв'язку, лінеаризацію характеристики та масштабування сигналу в уніфікований струмовий сигнал 4–20 мА, що має високу захищеність від промислових електромагнітних завад.

Цей струмовий сигнал екранованим кабелем типу КВВГЕ надходить на вхідний канал модуля аналогового вводу розподіленої периферії Modicon Momentum (поз. 1в). Модуль Momentum здійснює аналогово-цифрове перетворення (АЦП) і передає цифровий еквівалент температури через промислову мережу (Modbus Plus / Modbus TCP) до центрального процесора ПЛК Modicon TSX Quantum.

Обробка інформації, відображення поточного значення температури, а також комутація режимів роботи контуру реалізуються програмним шляхом:

Автоматичний/дистанційний режими: вибір режиму, перегляд графіків (трендів) та введення значень уставок здійснюються термістом через графічний інтерфейс локальної панелі оператора (ПО) або з АРМ SCADA-системи верхнього рівня.

Обчислення керуючого впливу: у процесорі ПЛК Quantum задіяно вбудований цифровий ПІ-регулятор, який порівнює фактичну температуру з уставкою та розраховує необхідну зміну витрати природного газу.

З вихідного каналу аналогового модуля виводу Modicon Momentum сформований керуючий сигнал 4–20 мА надходить безпосередньо на мікропроцесорний блок керування (електронний позиціонер) електричного виконавчого механізму типу МЕО (поз. 1г) регулюючого газового клапана. Електропривід МЕО плавно змінює кут повороту заслінки, регулюючи подачу газу на пальники. Фактичне положення виконавчого органу контролюється за допомогою вбудованого в МЕО токового датчика зворотного зв'язку (поз. 1д),

сигнал з якого також заводиться в ПЛК для візуалізації на панелі оператора у вигляді відсоткового індикатора (0-100%).

Для виконання вимог надійності та живучості системи, паралельно в електричну схему інтегровано контур аварійного ручного пульта управління (фізичний щит). У разі повної відмови контролерного обладнання, оператор за допомогою пакетного перемикача на щиті апаратно блокує виходи ПЛК і переходить на пряме керування. При цьому живлення на магнітні пускачі або привід МЕО подається безпосередньо через фізичні кнопки «Більше» / «Менше» ручного пульта, а візуальний контроль температури здійснюється за автономними показуючими приладами щита.

Висновки. Проведений аналіз та обґрунтування дозволили сформувати оптимальний комплекс технічних засобів автоматизації ковпакової печі, що базується на передовій розподіленій архітектурі та сучасній елементній базі. Використання надійних програмованих логічних контролерів Modicon TSX Quantum у поєднанні з модулями розподіленого вводу-виводу Modicon Momentum забезпечує високу швидкість обробки інформації, гнучкість системи та суттєве скорочення кабельних трас. Впровадження інтелектуальних датчиків серій ТХА-1388, Wika та Rosemount з уніфікованим завадостійким сигналом 4–20 мА гарантує високу точність вимірювання та стабільність контурів регулювання в жорстких умовах металургійного виробництва. Крім того, чіткий поділ функцій людино-машинного інтерфейсу між локальною панеллю оператора, SCADA-системою верхнього рівня та дублюючим фізичним пультом аварійного керування закладає високий рівень живучості, безпеки й відмовостійкості всього технологічного комплексу.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

5.1 Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища

Термічна обробка смуг в рулонах призначена для забезпечення технологічної пластичності і потрібних нормативною документацією механічних і технологічних властивостей.

Термічне відділення призначене для світлого відпалу, рекристалізації міцно змотаних холоднокатаних рулонів і пом'якшувального відпалу гарячекатаних рулонів.

Рекристалізаційний відпал застосовується для зняття наклепу холоднокатаного металу і відновлення його пластичних властивостей. Пом'якшувальний відпал проводиться для пом’якшення гарячекатаних рулонів.

Перелік небезпечних і шкідливих виробничих чинників, характерних для даного виробництва:

- горючий газ (природний газ);
- захисний газ (HNx-газ), що подається в підмуфельний простір;
- висока температура вузлів і агрегатів ковпакової печі;
- частини, що обертаються і рухомі (стендовий вентилятор);
- небезпечна напруга в шафах, що управляють.

Обслуговуючий персонал газових колпакових печей ЦХП-1 керується правилами і інструкціями по охороні праці і промислової безпеки.

Відповідальність за виконання вимог інструкцій по охороні праці несуть старший майстер термічного відділення змінні майстри, старші термісти і працівники, що виконують технологічний процес.

Небезпечні і шкідливі чинники за природою дії розділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні і психофізіологічні.

Для одного робочого місця слюсаря КІП і А даємо оцінку чинників виробничого процесу (таблиця. 7.1), які включають такі фізичні небезпечні і шкідливі чинники:

– рухомі мостові крани;

– недосконаліть вантажозахватних пристосувань використовуваних для захвату і транспортування 5-6 рулонів одночасно з допомогою електромостового крану;

– підвищена запилена: нормативне значення 2.00 мг/м^3, а фактичне значення 25.00 мг/м^3;

– підвищений рівень шуму: нормативне значення 80 ДБ, а фактичне значення 90 дБ;

– підвищений рівень вібрації: нормативне значення 92 ДБ, а фактичне значення 90 дБ;

– підвищений рівень інфрачервоного випромінювання: нормативне значення 140 Вт/ м^2, а фактичне значення 460 Вт/м^2;

– небезпечна для життя напруга, що діє, в електроустановках відділення.

– небезпеки виникнення пожежі;

– падіння з висоти персоналу при роботах на драбинах і сходах;

– падіння предметів з висоти (інструменту, елементів устаткування).

Джерелами підвищеного рівня інфрачервоного випромінювання є: випромінювання від пальників печей, від муфелів печей в процесі охолоджування металу.

Займання газоповітряної суміші – утворюються при проведенні технологічних процесів. Вибухонебезпечні суміші утворюються при неповному згоранні палива, а також в результаті просочування газу в не герметичних місцях.

Джерелами хімічно шкідливих чинників є травильне відділення, в якому проводять процес того, що труїть металу з використанням сірчаної кислоти.

Хімічно шкідливі чинники:

– підвищений вміст в повітрі ангідриду хромового нормативне значення

0,010 мг/м^3, а фактичне значення 0,015 мг/м^3;

– психофізіологічний чинник є джерелом всіляких роздратувань (стимул-реакцій), що переробляються головним мозком, спонукаючи людину до трудової діяльності.

Окрім зовнішніх подразників в організмі людини діють внутрішні подразники.

Психофізіологічні чинники:

– перевантаження за участю м'язів корпусу і ніг;

– знижена вологість повітря;

– вібрація.

Подразниками у цехах є:

– фізичні (теплота, світло);

– хімічні (вдихання шкідливих хімічних речовин, пил);

– біологічні (мікроби).

5.2 Заходи з поліпшення умов праці

Вентиляція і кондиціонування.

У цехах природна вентиляція здійснюється за допомогою повної аерації, тобто природного повітрообміну в літній і зимовий періоди. Для аерації влаштовано 3 ряди отворів в подовжніх стінах будівлі : перший ряд - на рівні 1,2 м від підлоги, другий - на рівні 4 м від підлоги і третій - на рівні підкранових балок. На даху встановлений витяжний ліхтар.

Крім того, передбачена механічна вентиляція при якій повітрообмін досягається за рахунок різниці тиску, що створюється вентилятором, який приводиться в рух електромотором. При цьому забруднене повітря віддаляється через вентиляційні короби. Тип вентиляційної установки ПС-1, продуктивністю 2000 м3/ч, потужність тягового електродвигуна 9 кВт, яка застосовується для

видалення шкідливих випарів кислот використовуваних при тому, що труїть металу. Також по периметру цеху, в найбільш забруднених місцях: біля травильних ванн, прокатних станів, місцях вирубування металу встановлена місцева вентиляція .

Оптимальні і допустимі норми температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень приведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1– Оптимальні і допустимі норми температури

Період року	Категорія робіт	Температура, ºС					Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	допустима				Оптимальна	Допустима на робочих місцях постійних і непостійних, не більш	Оптимальна	Допустима на робочих місцях постійних і непостійних
			Верхня межа		Нижня межа					
			На робочих місцях							
			Постійних	Не	Постій	Не				
Холод-ний	Середньої важкості - IIб	17-19	21	23	15	13	40-60	75	0,2	Не більше 0
Теплий	Середньої важкості - IIб	20-22	27	29	16	15	40-60	70 (при 25 ºС)	0,3	0,2-0,5

Освітлення.

Приміщення прокатного виробництва за умовами зорової роботи відноситься до II групи – приміщення, в яких проводиться розрізнення об'єктів при нефіксованій лінії зору і огляд навколишнього простору (виробничі

приміщення, в яких ведеться лише нагляд за роботою технологічного устаткування).

Розряд зорової роботи для приміщення КВП і А - IV, середній точності. Природне освітлення комбіноване, сонячне світло проникає через аераційні ліхтарі на даху цеху і через бічні вікна.

Штучне освітлення забезпечується газорозрядними джерелами світла. Нормативне значення освітлення – 200лк. Для штучного освітлення застосовуються дугові ртутні лампи високого тиску (ДРЛ):

– потужність 250,400,700,1000,2000 Вт;

– світлова віддача 44-60 лм/Вт;

– тривалість горіння 1000-4000 ч.

Для штучного освітлення приміщення КВП і А використовуються лампи (ЛДЦ-80):

– потужність 250,400,700,1000,2000 Вт;

– світлова віддача 75-100 лм/Вт;

– тривалість горіння 2000-5000 ч.

– передбачається аварійне освітлення – 5% від нормативного (10лк).

Виробничий шум і вібрація.

Джерелом виникнення шуму в прокатному виробництві є лязкіт розкочуваного металу по валкам прокатного стану, а також робота двигунів при змотуванні тонкого аркуша в рулони. Виробничий шум впливає на здоров'я працюючих, сприяє травматизму, знижує продуктивність праці. Робота в умовах шуму, протягом робочої зміни, викликає погіршення слуху, може привести до його втрати.

Зменшення шуму від зіткнення металевих частин машин досягають заміною металевих деталей неметалічними; з цією метою використовують штучну технічну шкіру, пластичні маси і інші не звучні матеріали (з великим внутрішнім тертям).

Для зменшення шуму, що виникає унаслідок вібрацій корпусів і деталей агрегатів, необхідно:

– зниження інтенсивності вібрацій випромінюючих шум, деталей агрегатів (корпусів, кришок нагрівальних колодязів) за допомогою облицювання їх поверхонь вібропоглинаючими матеріалами;

– зменшення зазорів в зчленуваннях деталей і усунення неправильного їх зчленування (перекосів і тому подібне);

– обмеження швидкості обтікання деталей агрегату повітряними і газовими струменями (у вентиляторах, ежекторах).

Крім того, для захисту від шуму використовується:

– акустична обробка приміщень - розміщення на внутрішніх поверхнях приміщення звукопоглинальних облицювань, установка в приміщенні штучних звуковловлювачів;

– зменшення шуму на дорозі його поширення шляхом установки звукоізолюючого обгороджування (перешкоди) у вигляді стенів, перегородок, кожухів, кабін;

– засоби індивідуального захисту робітників.

До засобів індивідуального захисту відносять вкладиші, навушники, і шлеми.

Джерелом вібрації є машини і агрегати, забезпечені електричними двигунами.

Вібрація впливає на нервову систему, зір, слух, шлунково-кишковий тракт, кістково-суглобовий апарат. Довга дія вібрації на організм може привести до стійкого порушення фізіологічних функцій організму.

Послаблення вібрації досягають конструктивними і технологічними заходами:

– урівноваженням балансуванням частин, що обертаються, для забезпечення плавності роботи машин;

– усуненням дефектів і розпущеності окремих частин (наприклад, усуненням асиметрії магнітної системи електромашини);

– віброізоляція за допомогою пристрою амортизаторів, тобто введення в коливальну систему додаткового пружного зв'язку. Амортизатори виконують у вигляді сталевих пружин, ресор, прокладок з гуми і тому подібне;

– активний віброзахист – введення додаткового джерела енергії, що здійснює зворотний зв'язок від ізольованого об'єкту до системи віброізоляції.

При роботі з ручним інструментом(електричним, пневматичним) застосовуються засоби індивідуального захисту рук від дії вібрацій (рукавиці, рукавички) . Враховуючи несприятливі дії холоду на розвиток віброхвороби, при роботі в зимовий час робітників треба забезпечувати теплими рукавицями. Застосовують також антивібраційні пояси, подушки, прокладки, спец взуття.

Виробничі випромінювання.

Для захисту від теплової дії застосовують екрани віддзеркалення. Екрани застосовують як для екранування джерел випромінювання, так і для обгороджування робочих місць від дій випромінювання. Екрани, що відображають, використовують і для обгороджування гарячих стінок нагрівальних ковпаків. Розміщення таких екранів на деякій відстані від стінок сприяє природній вентиляції простору між піччю і екраном.

Для індивідуального захисту використовують спеціальний одяг. Костюм складається з повстяної куртки і брюк. Для захисту голови від перегріву і опіків застосовують капелюхи з широкими полями з фетру або грубошерстного сукна. Для захисту ніг застосовують спеціальне взуття. Для захисту рук застосовують брезентові рукавиці.

Виробнича санітарія.

Відповідно до вимог санітарних норм для прокатного виробництва передбачається встановлення санітарно-захисної зони.

Генеральні плани промислових підприємств розробляють відповідно до вимог безпеки праці і санітарно-гігієнічних норм.

Залежно від потужності підприємств, умов технологічного процесу, характеру і кількості шкідливих речовин, що виділяються в довкілля, або шкідливих фізичних дій, а також з врахуванням заходів, що передбачаються, по зменшенню їх несприятливого впливу на довкілля всі підприємства, виробництва і об'єкти підрозділяються на п'ять класів, для яких встановлюються санітарно-захисні зони. Клас виробництва відповідає I, ширина санітарно-захисної зони не менше 1000 м.

Санітарно-захисна зона може бути збільшена при необхідності і належному техніко-економічному і гігієнічному обгрунтуванні, але не більше ніж в 3 рази, за узгодженням з органами санітарного нагляду. Санітарно-захисну зону забороняється використовувати для розширення промислового майданчика, її територія має бути упорядкована і озеленена.

Виробничі приміщення займають або всю будівлю, або знаходяться в будівлі з іншими цехами (ділянками), при цьому вони розташовуються біля зовнішньої стіни і відділяються від інших цехів (ділянок) капітальною перегородкою.

Санітарно-побутові приміщення.

Робота в прокатному відділенні для основного персоналу відноситься до II групи трудових процесів. Найчисленніша зміна це зміна з 8 до 16 коли працюють разом і працівники, що працюють по тризмінному чотири бригадному графіку і працівники, що працюють лише в уранішню зміну. Сумарну кількість працівників складає 38 чоловік. Кількість шаф повинна відповідати обліковому штату працівників. Кількість вмивальних кранів приймаємо з розрахунку один кран на 3-15 чоловік для чоловіків і 3-12 для жінок. Необхідно передбачити приміщення для гігієнічного душу.

5.3 Електробезпека

Прокатне відділення по мірі небезпеки ураження електричним струмом відноситься до жарких приміщень, оскільки температура повітря перевищує і

має струмопровідний пил. До таких приміщень відносяться ті, в яких за умовами виробництва виділяється технологічний пил в такій кількості, що вона осідає на дротах і проникає всередину електроустаткування.

Прокатне відділення відповідно до вимог ПУЕ СНІП III-33-76 відноситься до зони класу В-1б – це зони, розташовані в приміщеннях, в яких при нормальній експлуатації вибухонебезпечні суміші горючих газів або пари ЛВЖ з повітрям не утворюються, а можливі лише в результаті аварій або несправностей.

Електричні машини і апарати вживані в електроустановках прокатного відділення мають бути герметичного, вибухозахищеного виконання.

Для підведення живлення до електроустановок застосовується закрита електропроводка кабелями марок: АППР. АПВ, АППВ, ПРТО, АПРТО, АПВ, ПВ що прокладаються у винипластовых трубах, рідше в сталевих.

По класу пожежної безпеки електроустановки прокатного відділення відносяться до зони П-III класу IP44.

До експлуатації електроустаткування повинен допускатися персонал, ознайомлений з вказівками по техніці безпеки, що пройшли перевірку знань в об'ємі, обов'язковому для даної роботи, і що мають кваліфікаційну групу по техніці безпеки, передбачену правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок з струмопроводами напругою до 1 КВ, підключених в 3-х фазну чотирьохпрохідну мережу з глухозаземленною нейтраллю.

Стійки, корпуси, кожухи електричних машин, вимикачів, щитів управління, КВП, трансформатора і інших металевих частин, які можуть опинитися під напругою, мають бути надійно заземлені.

Має бути перевірене опір ізоляції електроустаткування, яке в будь-якій незаземленій крапці має бути не менше 1 Ом, а ізоляція обмоток електродвигунів (без сполучних дротів) не менше 0,5 Ом. Опір ізоляції обмоток двигунів типа П 200/800 відносно корпусу при температурі близькою до робочої, повинно бути не менше 0,75 Ом.

Опір ізоляції вимірюється мегомметром при напрузі 500-1000 В, а електронної апаратури - низьковольтним вимірювальним приладом.

Все електроустаткування має бути випробуване на пробій струмом підвищеної напруги промислової частоти протягом 1 хв., для чого всі дроти силових ланцюгів і безпосередньо під'єднаних до них ланцюгів управління з'єднуються між собою, а напруга прикладається між цими дротами і заземленим механоприладами транспортера.

Випробувальна напруга має дорівнювати 85 % від найменшої напруги, на якій елементи електроустаткування були випробувані на заводі-виготівнику, але не менше 1500 В. Випробувальна напруга має бути отримане від установки потужністю не менше 500 ВА.

Елементи електроустаткування, не призначені для випробування струмом з такою напругою (електроніка, напівпровідникова апаратура і так далі), але включені в електроланцюги, що підлягають таким випробуванням, перед випробуванням мають бути від'єднані. Обслуговування КВП і програмованого контролера може проводитися лише спеціально виученим персоналом, що пройшов відповідну атестацію для роботи на згаданих пристроях.

Кожна шафа КВП має бути заземлена через два заземлюючі пристрої. Всі відключення і підключення шин і кабелів до трансформатора і будь-якого іншого електроустаткування, а також проведення всіх періодичних оглядів допускаються лише при повністю знятій напрузі, відповідно до правил технічної документації, що діють.

5.5 Заходи пожежної безпеки. Техногенна безпека

Згідно «Правилам установки електроприладів», пожароопасные приміщення і зовнішні установки діляться на чотири класи, приміщення цеху відноситься до класу П-1.

Вибухонебезпечні і зовнішні установки ділять на шість класів, приміщення відноситься до класу В-1а. Виробничий процес в прокатному відділенні відноситься до категорії Г.

До категорії Г відносяться технологічні операції з негорючими речовинами і матеріалами в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскр, полум'я; горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюються і утилізуються як паливо. Умови розвитку пожежі в будівлях і спорудах багато в чому визначається мірою їх вогнестійкості.

Приміщення прокатного відділення ця будівля переважна з каркасною, конструктивною схемою. Елементи каркаса - сталевих конструкцій. Конструкції, що захищають, - із сталевих профільованих листів і інших негорючих матеріалів з важкогорючим утепленням. Межі вогнестійкості будівельних конструкцій максимальні межі поширення вогню по них вказані в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Межі вогнестійкості будівельних конструкцій

Міра вогнестійкості будівлі	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (над межею) і максимальні межі поширення вогню по ним (під межею)								
	Стіни				Колони	майданчики, сходинки, балки марші ліс. кліток	Плити, настили	Елементи	
	Несучі і сходинки кліток	Самонесучі	Зовнішні, несущі	Внутрішня несуща (перегородка)				Плити, настили	Балки, арки и рами
Ша	1/0	0,5/0	0,25/40	0,25/40	0,25/0	1/0	0,25/0	0,25/25	0,25/0

У кабельних відсіках і тунелях застосовується система автоматичної сигналізації і система пожежогасінні. У прокатному відділенні відповідно до норм передбачені наступні первинні засоби пожежогасіння: вогнегасники(ОП-5,ОУ-25), пожежний інвентар (покривала з негорючого теплоізоляційного

полотна, грубошерстної тканини, ящики з піском, совкові лопати); пожежний інструмент (багри, ломи, сокири і ін.).

У прокатному відділенні передбачено встановлення трьох пожежних щитів. У комплект засобів пожежогасіння, що розміщуються на них, слід включати: вогнегасники - 3 шт., ящик з піском - 1шт., покривало з негорючого теплоізоляційного матеріалу або повсті розміром до 2х2м. - 1 шт., ломи - 1шт., багри - 3 шт., сокири - 2шт., лопати - 2шт.

Одне з найважливіших місць в системі пожежно-профілактичних заходів займає захист від блискавки. Під захистом від блискавки розуміють комплекс захисних заходів від блискавки, що забезпечують збереження будівель і споруд, устаткування і матеріалів від вибухів, загорянь, руйнувань. В даному випадку застосовується захист II категорії. Як блискавкоприймач використовуються металеві конструкції будівлі: труби, дефлектори, крівля, грати підносяться над спорудою. Як блископриймачі застосовуються металеві сітки з дроту діаметром 6-8 мм з вічками 5м на 5м, з майданом до 25 $м^2$. Вузли сітки добре проварені, а сама сітка укладена під шаром гідроізоляції. Як токоотводов використовують металеві конструкції будівлі: рами, арматура залізобетонних елементів. Обов'язковим є дотримання безперервного металевого зв'язку в з'єднаннях, який забезпечується зваркою вузлів.

В разі вибуху або пожежі необхідно організувати негайну евакуацію робітників, які не беруть участь в пожежогасінні. Для цього розроблений план швидкої евакуації співробітників, що передбачає різні виходи з будівлі залежно від розташування вогнища пожежі. Сигналом до евакуації служить пожежна сигналізація.

5.6 Засоби індивідуального захисту

На роботах із шкідливими і небезпечними умовами праці, а також роботах, пов’язаних із забрудненням або здійснюваних у несприятливих температурних

умовах, працівникам видаються безкоштовно за встановленими нормами спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту, а також змиваючі та знешкоджуючі засоби.

Згідно з ГОСТ 12.4.011-89 у цеху для працівників передбачені такі засоби індивідуального захисту:

– засоби захисту органів дихання (протигази, респіратори, пневмошоломи, пневмомаски)

– спеціальний одяг (комбінезони, напівкомбінезони, куртки, брюки, костюми);

– спеціальне взуття (чоботи);

– засоби захисту рук (рукавиці, рукавички);

– засоби захисту голови (каски);

– засоби захисту обличчя (захисні маски, захисні щитки);

– засоби захисту органа слуху (протишумові навушники, протишумові вкладиші);

– засоби захисту очей (захисні окуляри).

Керівник підприємства (власник) зобов’язаний організувати комплектування та утримання засобів індивідуального захисту відповідно до нормативних актів про охорону праці. Видача спецодягу й інших засобів індивідуального захисту здійснюється згідно з Типовими галузевими нормами безплатної видачі робочим і службовцям спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту. Контроль за застосуванням Типових галузевих норм безплатної видачі цих засобів покладено на Держнаглядохоронпраці. Спеціальний одяг, спеціальне взуття й інші засоби індивідуального захисту облікуються на підприємствах як засоби в обігу незалежно від їх вартості та терміну служби.

Висновки. У ході виконання розділу було проведено всебічний аналіз питань охорони праці, промислової, пожежної та екологічної безпеки під час проектування, експлуатації та автоматизації і робочого місця оператора АСУ ТП.

6. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

Впровадження розподіленої системи автоматичного управління (САУ) ковпаковою піччю на базі сучасного мікропроцесорного обладнання є капіталомістким заходом, економічна доцільність якого має бути чітко обґрунтована. Модернізація застарілої зосередженої архітектури та перехід на нову елементну базу дозволяє отримати як прямий економічний ефект (за рахунок енергозбереження та зниження браку), так і непрямий (підвищення надійності, покращення умов праці, мінімізація аварійних простоїв).

6.1 Визначення капітальних витрат на модернізацію

Загальні капітальні інвестиції в проєкт модернізації САУ складаються з витрат на придбання КТЗ, проектування, монтажні та пусконалагоджувальні роботи. Завдяки використанню розподіленої периферії Modicon Momentum, капітальні витрати на кабельно-провідникову продукцію було знижено на 65% порівняно із класичною топологією.

Зведена кошторисна вартість елементів проєкту наведена у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Кошторис капітальних витрат на впровадження САУ

Найменування статті витрат / обладнання	К-сть, шт.	Орієнтовна вартість, грн.
Центральний процесор ПЛК Modicon TSX Quantum (з модулем Hot Standby)	2	240 000
Модулі розподіленого вводу-виводу Modicon Momentum (комплект)	1	135 000
Датчики температури ТХА-1388 з нормуючими платами НПТ-1	4	32 000

Датчики тиску Wika A-10 та дифманометри Rosemount 3051CD	1	98 000
Витратоміри Endress+Hauser Prowirl та Promag 10W	1	145 000
Сигналізатори полум'я Siemens QRA та виконавча арматура	1	85 000
Локальна панель оператора (ПО) та АРМ з ліцензією SCADA	1	110 000
Комутаційні шафи (IP54), ДБЖ, кабельно-провідникова продукція	1	75 000
Всього витрат на обладнання та матеріали	–	917 000
Проєктно-конструкторські роботи (10% від вартості КТЗ)	–	91 700
Монтажні та пусконалагоджувальні роботи (15% від вартості КТЗ)	–	137 550
ЗАГАЛЬНІ КАПІТАЛЬНІ ВИТРАТИ (К)		1 146 250

5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат та джерел економічного ефекту

Основними статтями зниження собівартості процесу відпалу сталевих рулонів після впровадження розподіленої САУ є:

– економія палива (природного газу): завдяки прецизійній реалізації цифрових ПІ-регуляторів та контуру контролю співвідношення «паливо-повітря» забезпечується оптимізація процесу горіння. Економія газу становить 3,5 % – 5 %;

– економія електроенергії: впровадження частотно-регульованих приводів на циркуляційних вентиляторах стенда забезпечує зниження споживання енергії на допоміжні потреби до 20 %.

– зменшення браку продукції: точний контроль температурного профілю під муфелем у межах робочої зони (650...730 °С) виключає перепал або недопал металу. Зниження відсотку браку очікується на рівні 0,8 %;

– зниження витрат на аварійні ремонти: резервування контролерів (Hot Standby) та наявність аварійного пульта усувають ризик тривалого простою дорогої печі у разі апаратних збоїв.

5.3 Розрахунок річної економії на енергоресурсах

Економія природного газу.

При середньому споживанні печі 250 м^3/год та тривалості роботи 7000 год/рік, річна витрата газу становить 1750000 м^3. При впровадженні САУ мінімальна економія складає 3,5%.

$$\Delta V_{\text{газ}} = 1750000 \cdot 0{,}035 = 61250 \text{ м}^3$$

При умовній промисловій вартості газу 16,5 грн/м^3, річний грошовий ефект ($\Delta C_{\text{газ}}$) становить:

$$\Delta C_{\text{газ}} = 61250 \cdot 16{,}5 = 1010625 \text{ грн./рік.}$$

Економія електроенергії.

Потужність вентилятора становить 37 кВт. Завдяки ЧП середня споживана потужність знижується на 15%.

$$\Delta W_{\text{ел}} = 37 \cdot 7000 \cdot 0{,}15 = 38850 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

При тарифі 7,5 грн/кВк · год, річна економія ($\Delta C_{\text{ел}}$) складає:

$$\Delta C_{ел} = 38850 \cdot 7{,}5 = 291375 \text{ грн./рік.}$$

Загальна річна економія за основними енергоносіями та зменшенням втрат від браку металу за експертною оцінкою цеху становить:

$$\Delta C_{заг} = 1010625 + 291375 + 180000 \text{ (ефект від браку)} = 1482000 \text{ грн.}$$

5.3 Розрахунок показників економічної ефективності проєкту

Для оцінки доцільності капіталовкладень визначимо чистий річний економічний ефект, строк окупності інвестицій та коефіцієнт ефективності.

1. Чистий річний економічний ефект (Е)

Ефект розраховується з урахуванням амортизаційних відрахувань на нову техніку (приймемо норму амортизації А = 12 %) та витрат на обслуговування системи КВПіА ($В_{обсл}$ = 5 % від вартості обладнання):

$$В_{аморт} = К_{апВ} \cdot 0{,}12 = 1146250 \cdot 0{,}12 = 137550 \text{ грн./рік.}$$

$$В_{обсл} = 917000 \cdot 0{,}05 = 45850 \text{ грн./рік.}$$

Чистий прибуток (економічний ефект) від впровадження:

$$Е = \Delta C_{заг} - (В_{аморт} + В_{облс}) = 1482000 - (137550 + 45850) =$$
$$= 1298600 \text{ грн./рік.}$$

2. Ток (строк) окупності капітальних витрат ($Т_{ок}$)

Строк окупності визначається як відношення загальних капітальних витрат до чистого річного ефекту.

$$T_{ок} = \frac{К_{апВ}}{Е} = \frac{1146250}{1298600} \approx 0{,}88 \text{ року (близько 10,5 місяців)}$$

3. Розрахунковий коефіцієнт ефективності капіталовкладень ($E_р$)

$$E_р = \frac{1}{T_{ок}} = \frac{1}{0{,}88} \approx 1{,}14$$

Отримане значення значно перевищує нормативний коефіцієнт ефективності для металургійної галузі ($E_н$ = 0,15), що свідчить про високу рентабельність проєкту.

Висновки. Проведений техніко-економічний аналіз підтверджує високу фінансову та виробничу доцільність модернізації САУ ковпакової печі. При загальних капітальних інвестиціях у розмірі 1146250 грн, чистий річний економічний ефект становить 1298600 грн.

Проєкт повністю окуповується за 10,5 місяців експлуатації. Основними чинниками швидкої окупності є прецизійне управління теплофізичним процесом, яке суттєво зменшує питомі витрати природного газу, мінімізує відсоток бракованого металу та захищає агрегат від дорогих аварійних зупинок завдяки архітектурі гарячого резервування контролерів Modicon Quantum.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання – розробка та обґрунтування проєкту модернізації системи автоматичного управління (САУ) ковпаковою піччю для відпалу сталевих рулонів в умовах металургійного виробництва. Застарілу зосереджену архітектуру автоматизації було замінено на сучасну розподілену систему, що дозволило підвищити точність термообробки, енергоефективність агрегату та живучість усього технологічного комплексу.

Основні технічні та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено детальний аналіз ковпакової печі як об'єкта автоматичного регулювання. Визначено, що основними дестабілізуючими чинниками процесу відпалу є жорсткі умови металургійного цеху (пил, завади) та високі вимоги до точності температурного профілю під муфелем (робоча зона відпалу 650...730 °С при точності вимірювань не гірше 0,5–1,0 %). Обґрунтовано необхідність переходу до розподіленого периферійного збору даних для зниження рівня завад і скорочення кабельних трас.

2. Сформовано сучасну структуру апаратного забезпечення САУ. Для середнього рівня автоматизації обрано високопотужний програмований логічний контролер Modicon TSX Quantum, який для забезпечення безперервного циклу термообробки (24/7) запроєктовано у режимі гарячого резерву (Hot Standby). Для нижнього (польового) рівня обрано модулі розподіленого вводу-виводу Modicon Momentum, що зв'язуються з центральним ПЛК через високошвидкісну промислову мережу.

3. Для контуру контролю температури під муфелем і в печі обрано термоелектричні перетворювачі типу ТХА-1388 (тип К) із вбудованими інтелектуальними нормуючими платами НПТ-1, які трансформують термоерс у завадостійкий струмовий сигнал 4–20 мА.

Для контролю тиску й розрідження застосовано високоточні датчики серії Wika A-10 та мікропроцесорні дифманометри Rosemount 3051CD.

Витрати природного і захисного газів, а також охолоджувальної води реалізовано на базі вихрових витратомірів Endress+Hauser Prowirl та електромагнітних приладів Promag 10W.

Контур протиаварійного захисту (ПАЗ) доукомплектовано блоками контролю полум'я Siemens QRA та швидкісними електромагнітними клапанами-відсікачами з часом спрацювання до 1–2 секунд.

4. Запроєктовано та детально описано роботу 8 ключових контурів контролю, регулювання та блокування. Центральне місце посідає цифровий ПІ-алгоритм регулювання температури під муфелем, який взаємодіє з контуром оптимізації горіння за співвідношенням «паливо-повітря». Реалізовано трирежимне управління (автоматичне за графіком, дистанційне з АРМ та аварійне ручне з фізичного пульта в обхід ПЛК), що гарантує високу живучість системи при повній відмові контролерного обладнання.

5. Описано принципову електричну схему проходження сигналів по каналу регулювання температури: від термопари через перетворювач НПТ-1, модуль Momentum, центральний процесор Quantum і назад на електронний позиціонер електричного виконавчого механізму типу *МЕО* регулюючого газового клапана. Забезпечено гальванічну розв'язку та екранування ліній зв'язку.

6. Розрахунок показників економічної ефективності підтвердив високу рентабельність впроваджуваних рішень. Завдяки оптимізації горіння газу (економія 3,5%) та впровадженню частотно-регульованих приводів на вентиляторах стенда, загальна річна економія становить 1482000 грн. При загальних капітальних витратах у розмірі 1146250 грн, чистий річний економічний ефект складає 1298 600 грн. Проєкт повністю окуповується за 10,5 місяців ($Т_{ок}$ = 0,88 року), що значно перевищує нормативні галузеві вимоги.

Таким чином, розроблений проєкт автоматизації повністю відповідає вимогам технічного завдання, сучасному рівню розвитку комп'ютерно-інтегрованих технологій і може бути рекомендований до впровадження на термічних дільницях металургійних підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конституція України : офіц. текст. Київ : КМ, 2013. 96 с.

2. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII Голос України. 2017. 27 верес. (№ 178-179). С. 10–22.

3. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Вид. офіц. Київ. 1998. 45 с. (Інформація та документація).

4. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с.

5. ПУЕ-2021. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2021-01-01]. К. : Міненерговугілля України, 2021. 617 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Інформація та документація).

7. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Чинний від 2002-01-01]. Київ : Мінпраці України, 2001. 45 с. (Інформація та документація).

8. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [Чинний від 2014-12-30]. Київ : МВС України, 2014. 91 с. (Інформація та документація).

9. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [Чинний з 1997-10-06]. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1997. 97 с. (Інформація та документація).

10. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [Чинний з 1998-01-09]. Київ : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Інформація та документація).

11. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроям. [Чинний від 2018-05-18]. Київ : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. (Інформація та документація).

12. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [Чинний з 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Інформація та документація).

13. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : МОЗ України, 1999. 106 с. (Інформація та документація).

14. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Інформація та документація).

15. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [Чинний з 01.01.2016]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Інформація та документація).

16. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

17. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Інформація та документація).

18. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Інформація та документація).

19. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [Чинний від 2018-02-23]. Київ : МВС України, 2018. 23 с. (Інформація та документація).

20. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем : навч. посібник. Черкаси : ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.

21. Вимоги до ергономіки та технічної естетики. URL: http://wikipage.com.ua/1x400f.html (дата звернення: 13.02.2024).

22. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.11.2022).

23. Будник А. Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: навч. посіб. : Суми, СумДУ, 2008. 212 с.

24. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. К. : Знання, 2014. 373 с.

25. Збірник наукових праць студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука – 2020» : у 5 т. / Запорізький національний університет. – Запоріжжя : ЗНУ, 2020. Т.5. 280 с.

26. Зінченко Ю. М., Барішенко О. М. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 35 с.

27. Ніколаєнко А. М. Технічні засоби автоматизації. Цифрові регулятори : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 84 с.

28. Манько О. О. Методичні вказівки та завдання до виконання контрольної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» для студентів заочної форми навчання. Рівне, 2012. 40 с.

29. Манько О. О., Кутя В. М. Методичні вказівки до виконання розрахунково – графічної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» для студентів, які навчаються за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології». Рівне, 2010. 31 с.

30. Металургійна теплотехніка : збірник наукових праць Національної металургійної академії України. Дніпро : «ПП Грек О.С.», 2020. 364 с.

31. Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Розрахунок ректифікаційної установки періодичної дії. Проектування насадкової колони.» з курсу «Процеси та апарати хімічних виробництв» для студентів III–IV курсів; уклад. В. М. Задорожній, В. І. Зражевський, С. О. Опарін. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2010. 38 с.

32. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації: методичні вказівки до курсового проекту для студентів спеціальності 151 «Автоматизація

так комп’ютерно-інтегровані технології» / ред. А. М. Ніколаєнко. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 34 с.

33. Мочалін В. Н., Кочнев Н. В. Моделювання та дослідження систем автотичних управління з використанням ПЕОМ : нав. посіб. Череповець : ЧГІІ, 2005. 178 с.

34. Ткачук К. Н., Халімовський М. О., Зацарний В. В., Зеркалов Д. В., Сабарно Р. В., Полукаров О. І., Коз’яков В. С., Мітюк Л. О. Основи охорони праці : підручник. 2-ге вид. Київ: Основа, 2006. 448 с.

35. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР : метод. вказ. до практ. зан. / уклад. В.Г. Трегуб. Київ : НУХТ, 2008. 67 с.

36. Ніколаєнко А.М. Програмування ПЛК у Softlogic-системі. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 203с.

37. Солодовников В.В., Коньков В.Г. Мікропроцесорні автоматичні системи регулювання. Київ: Вища школа, 2021. 255 с.

38. Полянський Г.О. Методичні вказання к розрахунку надійності систем автоматизованого керування. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 24с.

39. Пейсхахов А.Н., Кучер А.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник. Изд-во Михайлова., 2004. 407 с

40. Проектування систем керування : конспект лекцій для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами»; уклад. М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький, Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 279 с.

41. Промислові мікропроцесорні мережі. URL: http://um.co.ua/8/8-11/8-110801.html (дата звернення: 15.02.2026).

42. Рішан О. Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» ден. та заочн. форм. навчан. Київ : НУХТ, 2007. 162 с.

43. Свинолобов Н.П. Печи черной металлургии : Учебное пособие для вузов. Днепропетровск : Пороги, 2004. 54 с.

44. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації : навч. посіб. Київ : НМКВО, 2015. 80 с.

45. Тимофеев Б. Б. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Справочник/ ред. Б. Б. Тимофеева. Киев : Техника, 1983. С. 87 – 88.

46. Емпіріко-теотетичні методи дослідження систем управління. URL: http://examen.od.ua/upravlen/page117.html (дата звернення 22.02.26).

47. Інформаційні технології в металургії. URL: it.edu.ua/news/16-05- 2025-informatsijni-tekhnologiji-v-metalurgiji-ta-mashinobuduvanni-itmm-2025 (дата звернення 15.10.25).

48. Металургійні підприємства України. URL: http://www.steeltorg.com.ua/mp/mp_27.php (дата звернення 20.02.26).

49. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.03.2026).

50. Електрична піч опору. Матеріал з Вікіпедії – вільної енциклопедії: URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Електрична_піч_опору (дата звернення 13.05.2026).