

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій  
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»  
Гарант ОПП

Олексій КОЙФМАН

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси  
в гірничо-металургійному виробництві»  
за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка

**на тему «Модернізація АСУТП нагріву металу в методичній 6-ти  
зонній печі з крокуючими балками»**

Керівник роботи

Олександр СІМКІН

Консультант від  
бази практики

Михайло ЦИБИК

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Ольга ПОКОТИЛОВА

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Андрій ЛЕОНОВ

## ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра	автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Освітньо-кваліфікаційний рівень	магістр
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
ОПП	Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси в гірничо-металургійному виробництві

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант ОПП

Олексій КОЙФМАН

27.11.2024 р.

### **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

**ПОКОТИЛОВОЇ Ольги Вікторівни**

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Модернізація АСУТП нагріву металу в методичній 6-ти зонній печі з крокуючими балками

керівник роботи Сімкін Олександр Ісакович, професор, канд. техн. наук,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 14.10.2024 р. №238/14.10.2024

2. Термін подання роботи 03.02.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції, дані заводу, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, недоліки існуючих систем, сучасні тенденції). 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури системи управління та сигналізації технологічних параметрів (Основні задачі АСУТП, концепція роботи системи, обґрунтування та вибір технічних рішень). 3. Реалізація запропонованої системи (3.1. Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації, 3.2. Проектування САР співвідношення «газ-повітря» в зварювальній зоні печі з використанням ПЗ TIA Portal 3.3. Математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення окремих задач верхнього рівня АСУТП та проектування екранної форми ЛМІ нагрівальника). 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки

(обов'язкові: опис конструкції агрегату та технологічного процесу, скан-копії тез і статей, інші матеріали на розсуд автора).

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Схема функціональна автоматизації. 2. Взаємозв'язок функціональних завдань. 3. Схема структурна комплексу технічних засобів. 4. Блок-схеми алгоритмів керування та програмного забезпечення. 5. Презентація магістерської роботи.

Плакати (за вибором): результати розрахунків, розрахунок економічного ефекту, графіки, екранні форми тощо.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Усі розділи	Сімкін О.І., професор кафедри АБЕРС

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проекту)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	31.12.2024	
2	Розділ 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури комп'ютерної системи управління	03.01.2025	
3	Розділ 3. Реалізація запропонованої системи автоматизації	17.01.2025	
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи автоматизації	27.01.2025	
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	31.01.2024	
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	03.02.2025	
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	10.02.2025	
8	Рецензування завершеної роботи. захист	До 17.02.2025	

Здобувач

Ольга ПОКОТИЛОВА

Керівник роботи

Олександр СІМКІН

## АНОТАЦІЯ

*Покотилова Ольга Вікторівна.* Модернізація АСУТП нагріву металу в методичній 6-ти зонній печі з крокуючими балками. - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». ОПП «Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси в гірничо-металургійному виробництві» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя. 2025.

*Об'єктом дослідження* є автоматизована система управління технологічними процесами (АСУТП) нагріву металу в методичній 6-зонній печі з крокуючими балками.

*Предметом дослідження* є модернізація АСУТП нагріву металу в методичній 6-ти зонній печі з крокуючими балками

У першому розділі проаналізовано предметну область, надано загальну характеристику технологічного процесу та чинної системи автоматизації. Проведено аналіз аналогічних рішень, визначено основні недоліки існуючої системи та сформульовано необхідність її модернізації.

У другому розділі розглянуто технологічний процес як об'єкт автоматизації, визначено основні керовані параметри та їхній взаємозв'язок. Визначено структуру АСУТП, сформульовано основні задачі управління, наведено розподіл функціональних рівнів системи автоматизації.

У третьому розділі виконано проектування систем автоматичного регулювання температури та співвідношення газ-повітря. Виконано аналіз та необхідні розрахунки для оновлення програмного забезпечення WinCC та перехід на версію v8.0. Розроблено алгоритми автоматизації для прогнозування часу нагріву заготовок в залежності від швидкості прокатки та алгоритм прогнозування зношення футеровки печі.

У четвертому розділі наведено економічне обґрунтування модернізації, розраховано економічний ефект від впровадження оптимізаційних алгоритмів та нових методів управління.

МЕТОДИЧНА ПІЧ, SCADA-СИСТЕМА, ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ,  
СПІВВІДНОШЕННЯ ГАЗ-ПОВІТРЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ПРОГНОЗУВАННЯ  
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ВСТУП.....	7
<b>1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....</b>	<b>8</b>
1.1 Функції методичної печі .....	8
1.2 Основні етапи роботи печі .....	8
1.3 Основні проблеми управління сучасних методичних печей .....	10
1.4 Аналіз предметної області. Літературний огляд .....	11
<b>2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА СИГНАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ .....</b>	<b>17</b>
2.1 Основні параметри управління та взаємозв'язок між ними .....	17
2.2 Постановка задач автоматизації.....	19
2.3 Структура АСУ ТП методичної 6-зонної печі з крокуючим подом .....	20
2.4 Основні компоненти комп'ютерної системи управління.....	22
2.5 Обґрунтування та вибір технічних рішень .....	23
<b>3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....</b>	<b>25</b>
3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації .....	25
3.1.1 Обладнання .....	25
3.1.2 Програмне забезпечення .....	25
3.1.3 Мережеві технології.....	26
3.1.4 Оновлення програмного забезпечення WinCC .....	27
3.2. Проекування САР співвідношення «газ-повітря» в зварювальній зоні печі з використанням ПЗ TIA Portal .....	29
3.2.1 Алгоритм управління температурою та співвідношенням газ- повітря.....	29
3.2.2 Налаштування та дослідження моделі ПІД-регулятора за допомогою інструментів Matlab .....	32
3.2.3 Програмна реалізація алгоритму за допомогою TIA Portal .....	35
3.3 Математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення окремих задач верхнього рівня АСУТП та проектування екранної форми ЛМІ нагрівальника	40
3.3.1 Розробка та впровадження алгоритмів автоматизації для прогнозування часу нагріву заготовок та динамічного регулювання потужності печі залежно від швидкості прокатки та технологічних вимог....	40
3.3.2 Регулювання витрат палива залежно від продуктивності .....	47
3.3.3 Прогнозування зношення футерівки печі на основі аналізу температурних режимів .....	50

3.3.4 Проектування екранної форми НМІ нагрівальника .....	56
4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ .....	62
_ ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	65
ДОДАТОК А .....	67
ДОДАТОК Б .....	71
Параметр .....	71
Пристрій вимірювання .....	71
Нормативні встановлені значення .....	71
Допустима похибка вимірювання .....	71
Призначення .....	71
ДОДАТОК В .....	78
ДОДАТОК Г .....	80
ДОДАТОК Д .....	82
ДОДАТОК Е .....	85
ДОДАТОК Ж .....	86
ДОДАТОК З .....	89
ДОДАТОК И .....	90
ДОДАТОК К .....	92

## ВСТУП

Метою даної роботи є модернізація АСУТП 6-зонної методичної печі з крокуючими балками для підвищення точності управління, енергоефективності та інтеграції з сучасними комп'ютерно-інтегрованими системами.

Методичні печі з крокуючими балками є невід'ємною частиною металургійного виробництва, забезпечуючи нагрів металу перед подальшими технологічними процесами. В умовах сучасної економіки, що вимагає мінімізації витрат енергії, підвищення продуктивності та якості продукції, модернізація автоматизованих систем управління 2і23етехнологічними процесами (АСУТП) є нагальною потребою. Актуальність обраної теми зумовлена необхідністю інтеграції сучасних автоматизованих систем із комп'ютерно-інтегрованими технологіями для забезпечення конкурентоспроможності підприємства.

Розробка та впровадження енергоефективних, надійних і адаптивних систем управління дозволяють зменшити виробничі витрати, підвищити точність регулювання температури та забезпечити стабільність технологічного процесу. Зростаючий попит на енергозбереження та автоматизацію робить дослідження в цій галузі особливо затребуваними з боку промислових підприємств.

Новизна роботи полягає у створенні гнучкої системи управління, яка дозволяє автоматично адаптувати параметри нагріву до типу заготовок та змін у технологічному процесі. Науково-практичне значення роботи полягає в розробці нових алгоритмів управління температурними зонами методичної печі, що враховують змінювані умови виробництва та зменшують енергетичні втрати. Серед основних результатів, які мають практичну цінність: оновлення SCADA-системи для моніторингу та оптимізації роботи печі, використання адаптивних PID-регуляторів із само налаштуванням.

### **Апробація роботи**

Перелік публікацій за результатами виконання кваліфікаційної роботи:

1. Pokotylova O. V., Simkin O. I., Tsibik M. S. Modernization of the automatic control system of the methodical 6-zone furnace with stepping beams. *MININGMETALTECH 2024 – THE MINING AND METALS SECTOR: INTEGRATION OF BUSINESS, TECHNOLOGY AND EDUCATION. Volume 2.* 2024. P. 61–63. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-137>

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

## 1.1 Функції методичної печі

Методичні печі із крокуючими балками використовуються для нагріву металевих заготовок до необхідної температури перед подальшою обробкою (прокатка, кування, термообробка). Їх основна функція — забезпечення рівномірного прогріву заготовок з мінімальними енергетичними втратами. Якість нагріву металу є критично важливою складовою для забезпечення нормативних властивостей кінцевого продукту. Від якості нагріву металу залежать подальші процеси прокатки. Рівномірний нагрів заготовок гарантує відсутність дефектів металу, таких як тріщини чи внутрішні напруги. Оптимальна та ритмічна робота печі дозволяє уникнути перепадів у завантаженні прокатного обладнання та ефективно використовувати енергоресурси. Загалом, робота методичної печі є основою для стабільної та економічно ефективної діяльності підприємства.

Рисунок 1.1 ілюструє сучасну методичну піч з крокуючими балками – високотехнологічний агрегат періодичної дії. У Додатку А наведено Опис конструкції та основні характеристики методичної печі з крокуючим подом.



Рисунок 1.1 - Методична піч з крокуючими балками

## 1.2 Основні етапи роботи печі

Основні етапи роботи печі: завантаження заготовок, нагрів заготовок по заданим параметрам, вивантаження заготовок. На рисунку 1.2 зображено схему печі з крокуючими балками.

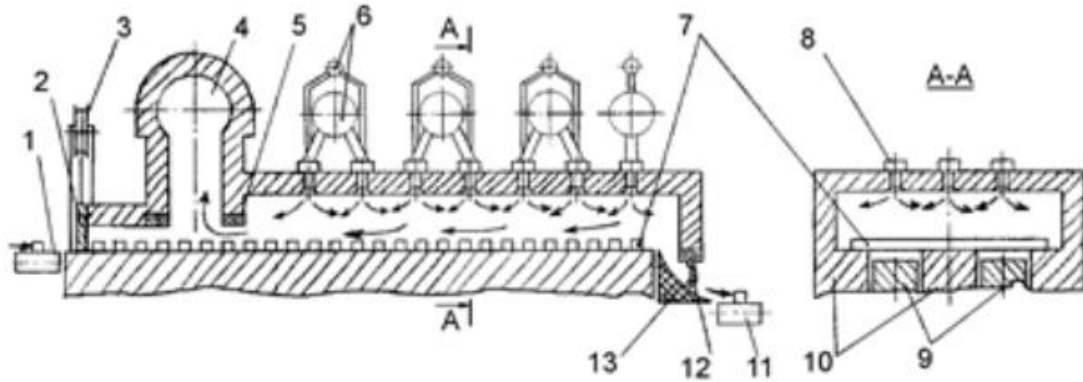


Рисунок 1.2 - Схема печі з крокуючими балками:

- 1 – ввідний рольганг; 2 - затвор; 3 - механізм підйому затвору;  
 4 - димохід; 5 - водо охолоджувані труби; 6 – повітря і газопроводи;  
 7 - заготовки; 8 - пальники; 9 – крокуючі балки; 10 - нерухомі балки; 11 –  
 виймальна машина; 12 – рухомий затвор; 13 – клапан

Етап завантаження. Заготовки транспортуються до печі через підвідний рольганг, ввідний рольганг забезпечує подачу заготовок всередину печі. Для моніторингу розмірів та положення заготовок використовуються фотоелементи. Завантаження супроводжується автоматичним відкриванням завантажувального люка, який герметизує піч після введення металу. Відштовхуюча машина переміщує заготовки на нерухомі балки для подальшого нагріву. Приводи рольгангів мають тиристорне керування, що дозволяє регулювати швидкість руху. Для захисту футеровки передбачено буфер, що амортизує удари довгих заготовок.

Етап нагріву. Виконується плавне нагрівання заготовок до необхідної температури для подальшої обробки. Заготовки проходять через шість температурних зон: зони попереднього нагріву (верхнього та нижнього, 1-2 зони), основна зона нагріву (3 зона), зони вирівнювання (4-6 зони: центральне вирівнювання, вирівнювання зліва, вирівнювання справа). Переміщення заготовок між зонами відбувається за допомогою крокуючих балок, які послідовно переміщують заготовку уздовж печі. Цикл включає підйом заготовки, рух і повернення балок у вихідне положення.

Нагрівання здійснюється плоскополуменевими та довгополуменевими пальниками. Оператор може задавати параметри нагріву для кожної зони через систему керування. Для зниження утворення окалини підтримується тиск у печі на рівні 5-10Па. Інтегровані пірометри та термопари забезпечують контроль температури в кожній зоні. Для управління параметрами температури та співвідношення газ-

повітря в кожній зоні використовуються ПІД-регулятори. Рисунок 3 ілюструє схему камер печі.

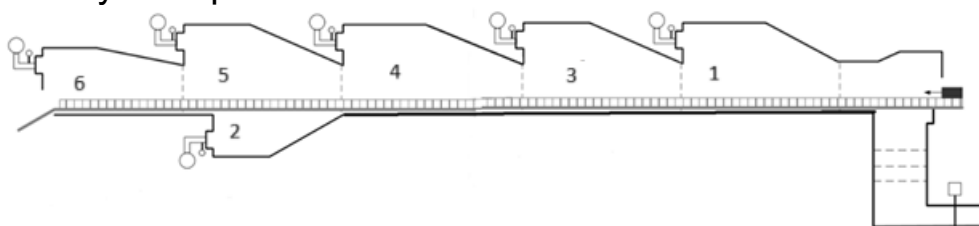


Рисунок 1.3 - Схема камери печі (1-6 – зони нагріву)

Етап вивантаження. Виймальна машина витягує заготовки з печі, використовуючи горизонтальні та вертикальні рухи маніпуляторів. Заготовки передаються на відповідний рольганг, який транспортує їх до прокатного стану. Телевізійна камера здійснює контроль за процесом вивантаження. Система автоматично регулює частоту та синхронізацію вивантаження.

Методична піч це високотехнологічний агрегат і для забезпечення стабільної роботи потребує ефективного централізованого управління, яке інтегрує температурний контроль, розподіл енергоносіїв, управління завантаженням в залежності від замовлень і темпу прокатки.

### 1.3 Основні проблеми управління сучасних методичних печей

Основні проблеми автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) сучасних методичних печей пов'язані із застарілими технологіями, відсутністю інтеграції між різними рівнями управління, низькою енергоефективністю та недостатньою адаптивністю до змінюваних умов. Розрізненість та низька гнучкість систем управління на різних рівнях підприємства ускладнює координацію та ефективне управління виробничими процесами.

Стосовно дослідженого об'єкту - методична 6-зонна піч з крокуючими балками на базі підприємства, можна виділити такі проблеми та недоліки управління:

- 1) система побудована на застарілому програмному забезпеченні (WinCC), що обмежує впровадження нових функцій та інтеграцію з сучасними рішеннями;
- 2) недостатній рівень автоматизації.
- 3) застарілі апаратні компоненти. Контролери SIMATIC S7-300 потребують оновлення;
- 4) обмежені можливості для автоматичної діагностики обладнання;
- 5) недостатній рівень управління енергоефективністю. Хоча рекуператори ефективно працюють, температура димових газів на виході (380 °C) залишається високою, що вказує на можливість подальшого зниження втрат тепла;

б) відсутні прогнозуючі алгоритми та керування чергою заготовок і маршрутизація.

#### **1.4 Аналіз предметної області. Літературний огляд**

Аналіз предметної області свідчить, що управління методичними печами є критично важливим етапом виробничого процесу на підприємствах. На металургійних заводах країн Європи існують схожі проблеми з автоматизованими системами управління технологічними процесами методичних печей. Зокрема, це застарілість обладнання, нерівномірність нагріву, високе енергоспоживання та недостатня інтеграція систем управління. Для вирішення цих проблем європейські підприємства активно впроваджують сучасні SCADA-системи, адаптивні ПІД-регулятори на основі штучного інтелекту (AI) та цифрові платформи управління. Наприклад, підприємство Tata Steel IJmuiden (Нідерланди) впровадила інтегровану платформу управління на основі IoT для своїх потужностей, що дозволило здійснювати моніторинг та управління процесами в реальному часі. Публікація [13] «Tata Steel Mission 2025: Lead the Digital Steelmaking» розглядає стратегію Tata Steel щодо лідерства в цифровому виробництві сталі до 2025 року, включаючи використання цифрових двійників та інших передових технологій. Компанія ThyssenKrupp Steel Europe, Німеччина також активно впроваджує сучасні технології для підвищення ефективності та надійності своїх виробничих процесів. Публікація [14] присвячена впровадженню інтелектуальних датчиків для більш ефективного використання ресурсів. «Принцип аналогічний принципу, що використовують в додатках «розумний будинок», майже 40 відсотків населення Німеччини: користувачі, встановлюють певну температуру, а розумні радіатори регулюють себе» - йдеться в статті. «Той же принцип справедливий і для стану гарячої прокатки, де постійний вимір і контроль температури також мають ключове значення, оскільки вони надають вирішальний вплив на механічні властивості сталевих заготовок.»

Металургійні підприємства все активніше шукають альтернативні джерела енергії, щоб знизити залежність від викопного палива та скоротити викиди парникових газів. Одним із яскравих прикладів є шведська компанія Ovation, яка реалізувала перший у світі проект з використання водню, виробленого без викопного палива, для нагріву сталі. Публікація [15] присвячена використанню водню для нагріву сталі. Цей підхід дозволяє значно зменшити вуглецевий слід металургійного виробництва, адже водень, як джерело енергії, виділяє лише воду в процесі згоряння. Такі інновації в енергетиці металургійних підприємств сприяють переходу до більш стійких технологій, що відповідають глобальним цілям зі скорочення викидів та підвищення екологічності виробництва. Використання водню в методичних печах є перспективним напрямком, однак воно все ще залишається значно затратними у

порівнянні з традиційним використанням природного газу. Основні витрати пов'язані з виробництвом, транспортуванням та зберіганням водню, особливо якщо він виробляється шляхом електролізу з використанням відновлюваних джерел енергії. Попри це, водень є відновлюваним джерелом енергії, яке не виробляє викидів під час згоряння, що робить його ключовим фактором у переході до вуглецевого нейтрального виробництва. Інвестиції у розвиток водневої інфраструктури та зниження вартості водневих технологій можуть зробити його конкурентоспроможним і екологічно вигідним вибором для методичних печей у майбутньому.

Ще декілька публікацій по темі. У статті [1] розглядається створення інтегрованого комплексу для дослідження технологічних процесів управління. Комплекс поєднує SCADA-систему Softlogic S3, програму для візуального моделювання Matlab/Simulink і OPC-сервер Matrikon. Основним призначенням розробки є імітаційне моделювання технологічних процесів у режимі реального часу, зокрема для температурного регулювання методичних печей. Комплекс надає можливість налаштування та підтримки автоматизованих систем управління різного рівня, моделювання аварійних ситуацій та оцінювання дій оператора в таких умовах. Це сприяє оптимізації процесу нагріву металу в печі. На основі запропонованої в статті математичної моделі та алгоритмів зворотного зв'язку можна модернізувати АСУ ТП методичної печі, що дозволить автоматично коригувати роботу печі в залежності від фактичних даних.

У статті [2] автори пропонують розробити модель штучної нейронної мережі (ШНМ), яка здатна аналізувати температуру у різних зонах методичної печі. Навчання мережі проводиться на реальних даних процесу нагріву. Модель включає динамічний аналіз даних з датчиків та порівняння фактичних і оптимальних параметрів. Навчання ШНМ проводиться із застосуванням алгоритмів зворотного поширення помилки. Мережа контролює вхідні параметри: температуру, витрати газу та повітря окремо в кожній зоні печі, враховуючи теплоємність слябів. Для модернізації АСУ ТП методичної печі з крокуючим подом можна запропонувати розробити адаптовану модель ШНМ для специфіки роботи печі з крокуючими балками. Провести інтеграцію з існуючим ПЗ SCADA-системи через програмний модуль. Це дозволить знизити використання палива та зменшити ручне втручання оператора, підвищити точність управління та діагностики.

Стаття [3] присвячена імітаційному моделюванню автоматизованих технологічних комплексів (АТК) промислової логістики на базі програмного забезпечення Simio з метою підвищення ефективності виробничих процесів. Автори пропонують застосовувати Simio для моделювання та оптимізації логістики і температурного режиму печей. Об'єктом дослідження є ділянка методичних печей прокатного стану, що відповідає за нагрів металу для прокатного виробництва. Розглянуто принцип роботи

печей, порядок проходження металевих слябів та вимоги до температурних режимів. Для планування і оптимізації процесів у режимі реального часу застосована діаграма Ганта. Для модернізації автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) методичної 6-зонної печі з крокуючими балками можна також використати підходи, описані в статті, а саме: впровадження нейронних мереж для адаптивного налаштування параметрів системи керування печі в реальному часі, що дозволить підвищити точність контролю температурних режимів та зменшити енергоспоживання. Розробка системи моніторингу стану обладнання та процесів у печі підвищить надійність та ефективність роботи обладнання печі.

Стаття [4] присвячена математичному моделюванню процесів теплообміну при нагріванні металу в печі. Автори використовують рівняння теплопровідності, такі, як закон Ньютона-Ріхмана (для конвекції) і закон Стефана-Больцмана (для випромінювання) для розробки математичної моделі, яка враховує складні теплофізичні процеси при нагріванні металу. Модель використовується для оцінки ефективності роботи нагрівальних печей і визначення можливостей утилізації тепла відхідних газів. Результатом є зниження витрат палива та зменшення шкідливих викидів.

Робота [5] присвячена модернізації технологічних процесів у методичних печах шляхом впровадження безполум'яних пальників, які забезпечують значне зменшення споживання енергії та викидів шкідливих речовин. Застосування безполум'яних пальників дозволяє досягти рівномірного нагріву заготовок у печі. Зменшення зон локального перегріву сприяє зниженню окислення поверхні металу. Оптимізація роботи пальників забезпечує зниження споживання палива на 10–15% та суттєве скорочення викидів оксидів азоту (NOx) за рахунок низькотемпературного горіння. Автори підкреслюють необхідність адаптації систем управління для підтримки параметрів роботи безполум'яних пальників. Запропоновані рішення підходять для модернізації існуючих печей без необхідності капітального ремонту. Ідеї статті можна використати для оновлення методичної печі з інтеграцією безполум'яних пальників та модернізації системи управління піччю.

Стаття [6] досліджує створення комп'ютерної моделі штучної нейронної мережі (ШНМ) для автоматизованої системи контролю та діагностики технологічного процесу нагріву слябів у методичній печі. Розробка спрямована на підвищення ефективності нагріву та поліпшення процесу прокатки. Запропоновані рішення:

- одношарова структура з прямою передачею сигналу;
- чотири нейрони, які відповідають різним зонам печі (методичній, двом зварувальним та томильній);

Вхідні параметри: витрати газу та повітря, температура в зоні, середньо масова температура слябів. Алгоритм навчання реалізований у

Matlab. Впровадження дозволяють проводити діагностику порушень температурного режиму в кожній зоні печі, враховуючи динамічний рух слябів; зменшити пошкодження металу через перегрів. Запропонована модель ШНМ є перспективним рішенням для вдосконалення управління методичними печами. Її застосування в АСУ ТП з крокуючими балками дозволить знизити витрати енергії, поліпшити якість нагріву заготовок.

Автори статті [7] торкаються теми управління температурним режимом печі в залежності від розмірів і типів сталевих заготовок, а також вплив темпу прокатки на температурний режим. Алгоритм роботи системи: оператор задає параметри заготовок (тип профілю, січення, марка сталі); система автоматично визначає розташування заготовок у печі; температура у зонах печі коригується автоматично в залежності від темпу видачі заготовок та геометричних розмірів і матеріальних властивостей металу. Система включає датчики завантаження та видачі заготовок та контролер для обробки інформації. Автоматичне регулювання температури налаштовано в залежності від типу заготовки та темпу прокатки. Це підвищує якість нагріву та зменшує людський вплив на процес. Для об'єкту АСУ ТП методичної зонної печі також можна додати до існуючої системи контури автоматичної корекції температури зон, залежно від типу заготовок. Налаштувати автоматичну зміну заданих температурних значень для кожної зони печі залежно від геометричних розмірів заготовки і темпу прокатки та виконати інтеграцію зі SCADA-системою для управління процесами в реальному часі. Розробка призведе до оптимізації роботи пальників відповідно до потреб нагріву для різних типів заготовок та сприяє можливості забезпечення плавного і безпечного переключенню між температурними режимами під час змін темпу прокатки.

У статті [8] розглядається необхідність автоматизації температурного режиму методичної печі через нерівномірність нагріву, різноманітність типів та розмірів заготовок та потребу зниження енерговитрат. Автори приділяють увагу стадійному опалюванню тризонної методичної печі та змінюванню швидкості течії пічних газів за довжиною робочих камер. Виконано розрахунок співвідношення газ-повітря. Розроблена математична модель, яка враховує динаміку теплових потоків у кожній зоні печі в залежності від вхідних параметрів та кінцевих характеристик нагріву. Алгоритм розрахунку включає параметри теплового потоку для кожної зони печі та моделювання динаміки нагріву заготовок з оптимальними значеннями температури і теплових потоків. Модель інтегрована в автоматизовану систему управління та враховує можливість рекуперації тепла для додаткового підвищення ефективності. Каскадне управління реалізується за допомогою двох рівнів регуляторів: верхній контур - виконує функцію управління температурою в конкретній зоні печі; нижній контур - контролює допоміжні параметри (витрати газу, витрати повітря, тиск). Переваги каскадного управління:

- точніший контроль над параметрами;
- адаптивність до змін, гнучкість у налаштуванні.

Запропонована модель може бути інтегрована у SCADA-систему і використана задля автоматичного коригування температури в кожній зоні методичної печі та для прогнозування можливих відхилень алгоритмів реагування.

Робота [9] присвячена підвищенню енергоефективності камерних нагрівальних печей за допомогою керованих електричних полів. Основна мета полягає в оптимізації теплових потоків для зменшення втрат енергії та підвищення ефективності процесу нагріву металу. Автор виділяє такі ключові проблеми: теплові витрати (коли значна частка тепла втрачається з відхідними газами, що знижує ККД печей) та нерівномірний розподіл температур. Введення електричного поля в робочий простір печі дозволяє спрямовувати теплові потоки до металу, покращуючи ефективність нагріву. Доведено, що застосування електричних полів зменшує втрати енергії до 10% і підвищує ККД. Розроблена математична модель враховує вплив електричного поля на розподіл температур у робочому просторі. Чисельне моделювання використовується для оптимізації параметрів печі, таких як напруженість електричного поля. Запропоновано алгоритм управління нагрівом металу, що враховує електричні поля та адаптується до умов процесу в реальному часі. Інтеграція сенсорів і автоматичних регуляторів для контролю теплових і газових потоків. Представлені дослідження демонструють значний потенціал підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей. Розроблені математичні моделі і алгоритми управління можуть стати основою для модернізації існуючої АСУТП шляхом додавання модуля управління електричним полем.

Стаття [10] досліджує проблему енергозбереження у сортопрокатному виробництві з акцентом на нагрівальні печі, які є найбільш енергоємною частиною процесу. Для зменшення втрати тепла автори пропонують Впровадження тепло відбиваючих екранів у робочому просторі печі. Екрани забезпечують зменшення тепловтрат на рольгангах, підтримуючи оптимальну температуру заготовок. Випромінювання тепла від екранів сприяє рівномірному нагріву заготовок. Установка екранів дозволяє знизити перепад температур між переднім і заднім кінцем заготовки. Результатом впровадження є:

- зменшення втрат тепла до 60%;
- зниження витрат палива на 30%;
- підвищення температури кінця прокатки на 50 °С.

Додаткові переваги:

- можливість зменшити товщину та збільшити ширину готового прокату;
- зниження утворення окалини;
- зменшення дефектів.

Реалізація запропонованих підходів із впровадженням теплозберігаючих технологій дозволить значно зменшити витрати енергії, підвищити якість продукції та знизити екологічний вплив виробництва. Ці заходи є економічно доцільними та екологічно необхідними у сучасних умовах.

У статті [11] основна увага приділяється необхідності модернізації існуючих енергетичних систем, впровадженню інноваційних методів управління і автоматизації, а також пошуку альтернативних джерел енергії для зменшення витрат на енергоносії та мінімізації втрат тепла. Для модернізації об'єкта модернізації також актуальна оптимізація режимів горіння та підтримання ідеальних умов роботи печі, а також використання альтернативних відновлювальних джерел енергії, наприклад, біопаливо або водень, а також комбіноване використання природного газу та електроенергії для зменшення залежності від одного виду палива.

У роботі [12] запропоновані методи розпізнавальної та динамічної оптимізації, динамічного програмування, використання моделювання теплових процесів для оптимізації витрати палива. Для підвищення роботи АСУ ТП методичної печі можна використати метод розпізнавальної оптимізації. Цей метод передбачає автоматичне коригування теплового процесу на основі аналізу поточних параметрів нагріву. Він не вимагає жорсткої математичної постановки задачі і дозволяє збільшувати кількість інформаційних каналів для підвищення точності управління. Це допоможе покращити енергоефективність методичної печі та знизити витрати палива. Математичні моделі, описані в дисертації, можуть бути використані для аналізу та прогнозування поведінки печі в реальному часі, що допоможе підвищити точність управління та забезпечити рівномірний нагрів матеріалу.

## **2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА СИГНАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ**

### **2.1 Основні параметри управління та взаємозв'язок між ними**

У процесі управління нагрівом металу в методичній печі можна виділити наступні параметри:

Основні вхідні вимірювані параметри:

–параметри заготовки на вході (розмір, маса, марка сталі, температура);

–хімічний склад палива;

–температура повітря для горіння.

Основні вихідні керовані параметри:

–температура заготовки на виході з печі – ключовий параметр, що забезпечує відповідність технологічним вимогам подальшої обробки;

–температура по перерізу заготовки – рівномірний нагрів по перерізу дозволяє уникнути внутрішніх напружень і дефектів;

–використання палива – ключовий показник ефективності роботи методичної печі.

Додаткові вихідні керовані параметри:

–недопущення перегріву металу – контроль, що запобігає втраті якості та появі окалини;

–хімічний склад вихідних газів – зменшення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та інших шкідливих речовин.

Збурюючі впливи:

–зміна продуктивності печі – коливання в подачі заготовок або зміна режимів роботи;

–марка нагрівного металу – необхідність адаптації до різних теплових характеристик сталі;

–підсоси повітря в піч – неконтрольоване проникнення повітря, що впливає на температурний режим;

–пошкодження футеровки печі та водо охолоджуваних балок – порушення ізоляції, що призводить до втрат тепла;

–температура повітря після рекуператора – впливає на ефективність згоряння палива;

–хімічний склад палива – зміни у складі природного газу можуть вплинути на співвідношення газ/повітря;

–температура охолоджувальної води – впливає на охолодження нерухомих і рухомих балок.

Регульовані параметри:

–витрата природного газу – регулюється в кожній зоні печі для досягнення потрібної температури;

–витрата повітря для горіння – забезпечує ефективне згоряння палива;

–співвідношення газ/повітря – налаштовується для оптимізації згоряння;

–положення шибера – регулює тиск у камері печі;

–витрата води - для охолодження рухомих і нерухомих балок.

Взаємозв'язок між параметрами. Керовані величини залежать від збурюючих впливів і регулюються через керуючі величини. Оптимальне управління передбачає зменшення впливу збурюючих величин і точний контроль керуючих параметрів для стабілізації процесу

Математичні залежності між параметрами.

$$T_{\text{кінц}} = T_{\text{почат}} + \frac{Q_{\text{матер}}}{C_m M} \quad (2.1)$$

де  $T_{\text{кінц}}$  – температура, до якої необхідно нагріти матеріал °С;

$T_{\text{поч}}$  – початкова температура матеріалу °С;

$Q_{\text{матер}}$  – кількість тепла, необхідного для нагрівання матеріалу

(Дж);

$C_m$  – питома теплоємність матеріалу (Дж);

$M$  – маса матеріалу (кг)

$$V_{\text{газ}} = \frac{Q_{\text{матер}} + Q_{\text{втрат}}}{H_u \eta_{\text{горіння}}} \quad (2.2)$$

де  $V_{\text{газ}}$  – об'ємна витрата газу (м<sup>3</sup>)

$Q_{\text{матер}}$  – кількість тепла, необхідного для нагрівання матеріалу

(Дж);

$Q_{\text{втрат}}$  – теплові втрати печі (Дж);

$H_u$  – теплотворна здатність газу (Дж/м<sup>3</sup>)

$\eta_{\text{горіння}}$  – коефіцієнт ефективності згоряння газу

$$t = \frac{C_m M (T_{\text{кінц}} + T_{\text{поч}})}{P_{\text{печі}}} \quad (2.3)$$

де  $t$  – час, необхідний для нагрівання матеріалу (год.);

$C_m$  – питома теплоємність матеріалу (Дж);

$M$  – маса матеріалу (кг);

$T_{\text{кінц}}$  – температура, до якої необхідно нагріти матеріал °С;

$T_{\text{поч}}$  – початкова температура матеріалу °С;

$P_{\text{печі}}$  – теплова потужність печі (Вт).

$$V_{\text{повітря}} = \lambda V_{\text{газ}} \quad (2.4)$$

де  $V_{\text{повітря}}$  – об'ємна витрата повітря (м<sup>3</sup>);

$V_{\text{газ}}$  – об'ємна витрата газу (м<sup>3</sup>);

$\lambda$  – коефіцієнт співвідношення газу до повітря.

В процесі роботи методичної печі також вимірюються і контролюються наступні параметри:

- температура в кожній зоні печі;
- температура нагрітого металу на виході з печі;
- температура вихідних димових газів;
- температура повітря для горіння після рекуператора;
- витрати природного газу для кожної зони печі;
- витрати повітря для горіння;
- тиск у пічній камері;
- тиск природного газу на вході до системи;
- тиск повітря для горіння після рекуператора;
- співвідношення газ-повітря у кожній зоні;
- стан пальників;
- положення клапанів,
- позиція заготовок у печі;
- швидкість та крок руху заготовок;
- час перебування заготовок у кожній зоні;
- контроль аварійних параметрів.

Також можливе переключення між режимами роботи печі. Основне переключення:

- ручний режим;
- автоматичні режими.

Автоматичні режими складаються з:

- режим розігріву печі;
- режим основного нагріву;
- режим охолодження;
- режим очікування;
- аварійний режим.

Перелік і параметри даних, що вимірюються наведено в додатку Б.

## **2.2 Постановка задач автоматизації**

Для методичної печі завдання автоматизації поділяються на такі основні напрями:

1) контроль та управління параметрами процесу нагріву, підтримання стабільної температури в зонах печі з урахуванням продуктивності, типу заготовок та технологічних карт, моніторинг і корекція температурного градієнта для забезпечення однорідності нагріву;

2) оптимізація витрат ресурсів, регулювання співвідношення газу та повітря для досягнення ефективного згорання, контроль витрати палива та електроенергії;

3) управління рухом заготовок, автоматизація крокуючого руху балок, синхронізація швидкості руху з іншими механізмами завантаження/вивантаження;

4) контроль та сигналізація технологічних параметрів та стану обладнання. Автоматичне виявлення відхилень технологічних параметрів. Виявлення та попередження операторів про аварійні ситуації (перегрів, підвищення тиску, збої в подачі газу чи повітря). Аварійна зупинка системи при досягненні критичних значень параметрів. Ведення історії роботи печі для аналізу аварій та оптимізації процесів;

5) інтеграція з іншими виробничими процесами, узгодження роботи печі з прокатними лініями для безперервності виробництва. Вивантаження готових заготовок у відповідний момент часу;

6) автоматизоване керування чергою заготовок, забезпечення гнучкої черговості та маршрутизації заготовок залежно від їх параметрів.

Відносно дослідженого об'єкту - методична 6-зонна піч з крокуючими балками, на підставі виявлених проблем управління поставлено наступні задачі автоматизації:

1) оновлення програмного забезпечення WinCC v7 та перехід на WinCC v8.0, яке забезпечує покращену інтеграцію з сучасними PLC-контролерами, додаткові можливості для аналізу даних і реалізації прогнозуючих алгоритмів, підтримку сучасних операційних систем Windows 11 (64-біт) Professional, Enterprise та промислових протоколів (таких як OPC UA та MQTT), покращення роботи з архівами даних та великими об'ємами інформації;

2) оновлення контролерів SIMATIC S7-300 до SIMATIC S7-1500, які підтримують Profinet та мають вищу швидкодію;

3) впровадження системи енергетичного моніторингу. Налаштування ПІД-регулятора для підтримання оптимальної температури по зонах печі та заданого співвідношення газу та повітря. Аналіз теплових втрат і розробка додаткових заходів щодо зниження температури вихідних газів;

4) впровадження функцій прогнозуючого обслуговування;

5) впровадження прогнозуючих алгоритмів, які враховують завантаження, стан заготовок і зміну виробничих умов.

### **2.3 Структура АСУ ТП методичної 6-зонної печі з крокуючим подом**

Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУ ТП) для методичної 6-зонної печі з крокуючим подом є багаторівневою структурою, яка включає підсистеми, кожна з яких виконує визначені функції. Ця структура забезпечує контроль, управління, збір даних, аналіз та безпеку процесів.

Підсистема нижнього рівня. Забезпечує безпосередній зв'язок із технологічними об'єктами через датчики та виконавчі механізми. Пов'язана з верхнім рівнем АСУ ТП.

Основні функції:

- опитування та збір сигналів датчиків та контролерів;

- фільтрація сигналів: моніторинг, усунення шумів і недостовірних даних;
- регулювання: замкнені контури управління підтримують задані параметри (температура, співвідношення газ-повітря, тиск);
- масштабування сигналів: приведення сигналів до уніфікованого формату;
- виконавчі механізми: управління клапанами, приводами, нагрівальними елементами;
- сигналізація та блокування: попередження та автоматична зупинка обладнання в аварійних ситуаціях;
- зв'язок із верхнім рівнем: передача зібраних даних до системи SCADA.

Підсистема запуску АСУ ТП. Забезпечує ініціалізацію та стабільний запуск технологічного процесу.

Основні функції:

- програмний запуск/перезапуск: ініціалізація системи після зупинки або обслуговування;
- синхронізація пуску: послідовне включення компонентів для уникнення конфліктів;
- сигналізація про аварійний режим: інформування про несправності під час запуску;
- відновлення параметрів: встановлення стандартних або безпечних значень для початку роботи.

Підсистема управління. Реалізує контроль і регулювання основних процесів у печі.

Основні функції:

- управління виконавчими механізмами: контроль крокуючого поду, приводу клапанів, насосів і вентиляторів;
- управління режимами роботи: підтримка заданих температурних і технологічних умов;
- управління технологічними параметрами: регулювання подачі газу, повітря, температури у зонах;
- управління якістю: збір і аналіз даних для забезпечення стабільності якості;
- управління ресурсами: мінімізація споживання палива та електроенергії;
- динамічна зміна конфігурації: оперативне налаштування системи під потреби виробництва.

Підсистема безпеки. Забезпечує безпеку операцій шляхом аналізу відхилень критичних параметрів.

Основні функції:

- обробка аварійних сигналів: аналіз критичних відхилень параметрів;
- автоматичне включення аварійних режимів: захист від аварій;

- оповіщення оператора: своєчасне повідомлення про проблеми.  
Інформаційна підсистема. Забезпечує збір, обробку і візуалізацію даних, взаємодіє з іншими підсистемами підприємства. .

Основні функції:

- інтеграція з ERP та MES: узгодження виробничих завдань;
- сповіщення операторів: інформація про поточний стан процесів;
- візуалізація: графічне відображення даних у SCADA;
- оптимізація взаємодії: синхронізація між різними рівнями системи.

Підсистема збору і аналізу даних. Виконує аналіз показників роботи на основі зібраних даних.

Основні функції:

- аналіз показників: оцінка продуктивності;
- збереження історичних даних: архівування для довгострокового аналізу;
- генерація звітів: автоматизація створення звітної документації.

Адаптивна підсистема. Використовується для адаптації та тестування налаштувань.

Основні функції:

- реєстрація помилок: автоматичний запис збоїв у роботі;
- тестування обладнання: діагностика стану компонентів;
- адаптація параметрів: автоматична зміна налаштувань.

Запропонована структура системи управління забезпечує можливість адаптації до змін у виробничих процесах, фіксацію та запобігання аварійних ситуації, взаємодію підсистем та обмін інформацією.

## **2.4 Основні компоненти комп'ютерної системи управління**

Основні компоненти структури комп'ютерної системи управління:

1) модуль збору даних включає вимірювальні пристрої (термопари, датчики тиску, витрати газу та повітря), інтерфейс для збору даних з усіх зон печі;

2) модуль управління - програмований логічний контролер (ПЛК) для виконання задач в реальному часі, алгоритми автоматичного регулювання температури, співвідношення газ/повітря, тиску;

3) людино-машинний інтерфейс (HMI) - екрани управління для операторів на базі оновленої до WinCC v8.0 SCADA-системи, можливість налаштування параметрів, перегляду історії та оперативного реагування на події;

4) інформаційний модуль - база даних для зберігання параметрів технологічного процесу, система звітності та аналізу для вдосконалення роботи печі;

5) мережевий модуль з інтеграцією з системами верхнього рівня (SAP ERP) та обміну даними з іншими вузлами виробничої лінії.

## 2.5 Обґрунтування та вибір технічних рішень

Вибір технічних рішень складається з аналізу вимог об'єкта автоматизації, вибору архітектури системи, визначення відповідних алгоритмів управління та програмного забезпечення.

Архітектура системи. Система має розподілений тип архітектури з рівнями:

- польовий рівень: датчики температури, тиску, витратоміри, газоаналізатори, виконавчі механізми (клапани, приводи);
- рівень управління: контролери SIMATIC S7-1500;
- верхній рівень: SCADA-система WinCC v8.0 для моніторингу, управління та аналізу.

Рис. 2.1 демонструє багаторівневу архітектуру автоматизованої системи управління процесом нагріву заготовок у методичній печі. Кожен рівень відповідає за окремі функції, забезпечуючи взаємодію між компонентами від датчиків і виконавчих механізмів до ERP-системи підприємства. Розподілена архітектура забезпечує модульність системи, спрощує інтеграцію нових зон і дає можливість резервування.

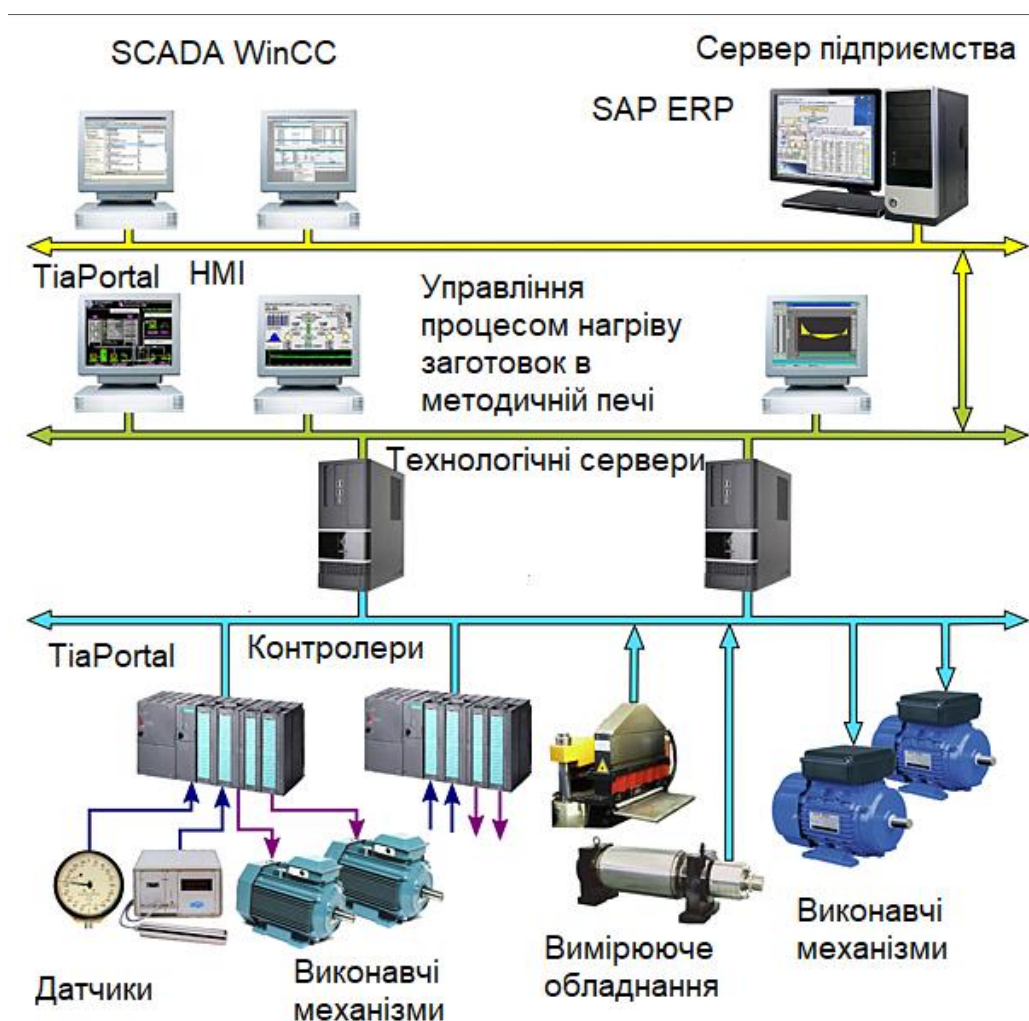


Рисунок 2.1 - Архітектура системи управління методичною піччю

Алгоритми управління є ключовими об'єктами технічних рішень, оскільки вони визначають логіку роботи автоматизованої системи. Визначена потреба у налаштуванні наступних алгоритмів управління:

- налаштування ПІД-регулятора для кожної зони для автоматичного підтримання заданої температури та співвідношення газ-повітря;
- впровадження алгоритмів прогнозуючого обслуговування стану обладнання;
- налаштування алгоритму керування чергою заготовок.

Програмне забезпечення:

- TIA Portal: для програмування контролерів і HMI;
- SCADA WinCC 8.0: для моніторингу, аналізу та візуалізації;
- SAP ERP: для управління виробничими завданнями.

## **3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

### **3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації**

Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації для методичної печі базується на забезпеченні ефективності, точності та надійності управління технологічним процесом. Основні етапи включають підбір обладнання на основі затверджених стандартів, параметрів та діапазону вимірювання, вибір програмного забезпечення на основі вимог автоматизації та вибір мережевого обладнання на основі потреб передачі даних між компонентами системи. Основні технічні засоби автоматизації включають обладнання, програмне забезпечення та мережеві технології.

#### **3.1.1 Обладнання**

Вибір обладнання виконується згідно зі стандартом АСУ ТП та згідно з призначенням пристрою, діапазону вимірювання, типу сигналу і умов експлуатації.

Обладнання польового рівня включає датчики та виконавчі механізми.

Рівень локального управління виконує контролер. В рамках виявлених проблем та недоліків визначена необхідність оновлення контролерів SIMATIC S7-300 до SIMATIC S7-1500. Контролер Siemens SIMATIC S7-1500 CPU 1516-3 PN/DP має до 64 аналогових входів/виходів для підключення під різні типи обладнання, підтримує PID-регулювання з вбудованою функцією обробки сигналів у реальному часі, підтримує модулі розширення для аналогових сигналів, ідеально підходить для інтеграції у великі системи.

Панель оператора HMI серії SIMATIC HMI Comfort, KTP700 для візуалізації даних у реальному часі. Панель зручна у користуванні, має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для моніторингу та управління та міцний корпус для роботи у виробничому середовищі, гнучка у налаштуванні екранних форм у TIA Portal.

Сервери та мережеве обладнання: для централізації даних.

Перелік обраного обладнання наведено в Додатку В.

#### **3.1.2 Програмне забезпечення**

Програмне забезпечення автоматизованої системи управління методичної печі відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного та безпечного функціонування технологічного процесу нагріву металу. Основними компонентами такого програмного забезпечення є системи моніторингу та контролю, які дозволяють оператору в реальному часі відстежувати параметри роботи печі та оперативна реагувати на будь-які відхилення. Сучасні АСУ методичних печей інтегрують SCADA-системи для візуалізації процесів, збору та аналізу даних, а також для забезпечення зручного інтерфейсу користувача. Нижче наведено перелік

основних типів програмного забезпечення для управління методичною піччю:

1) TIA Portal - інтегроване середовище розробки від Siemens для програмування та налагодження контролерів (PLC), HMI-панелей, а також для налаштування мережевих пристроїв. Призначення: налаштування функцій регулювання, таких як ПІД-регулятори для температури та співвідношення газ-повітря; розробка інтерфейсів та екранних форм для операторів; налаштування зв'язку між PLC, HMI та SCADA через Profinet;

2) SCADA WinCC 8.0 - система для моніторингу та управління технологічними процесами, яка забезпечує візуалізацію, архівування даних і сигналізацію. Призначення: відображення параметрів процесу нагріву заготовок в реальному часі, стану зон печі та аварійні сигнали. Переваги використання. Підтримує сучасні операційні систем Windows 11 (64-біт) Professional, Enterprise, сучасні протоколи (OPC UA) для взаємодії з ERP та MES. Має можливість інтеграції с хмарними сервісами та TIA Portal для швидкого налаштування; скорочення часу завантаження та реакцію на команди; можливість змінювати параметри системи через SCADA-інтерфейс. Оптимізація оперативної пам'яті та процесора знижує вимоги до апаратних ресурсів; покращена робота з архівами даних та великими об'ємами інформації;

3) MATLAB/Simulink використовується для моделювання динамічних систем та розробки алгоритмів управління;

4) SAP ERP - програмне забезпечення для управління бізнес процесами підприємства, включаючи виробниче планування, фінанси, логістику та людські ресурси. Призначення: планування виробництва, узгодження завдань печі з загальними виробничими планами, управління графіками завантаження та продуктивністю печі. Переваги: гнучка інтеграція з SCADA (через OPC UA) для отримання даних про процес, підтримка взаємодії між виробничими та бізнес-процесами, автоматичне формування звітів про ефективність виробництва, Аналіз простоїв і аварійних ситуацій.

### **3.1.3 Мережеві технології**

Мережеві технології забезпечують взаємодію між комп'ютерами, пристроями та користувачами через передачу даних у цифровій формі. Вони лежать в основі Інтернету та корпоративних мереж, дозволяючи обмінюватися інформацією, отримувати доступ до ресурсів і забезпечувати безперервний зв'язок. Основними компонентами комп'ютерних мереж є клієнти та сервери, мережеві пристрої (такі як маршрутизатори, комутатори, модеми), мережеві протоколи (TCP/IP, HTTP, FTP) та середовища передачі даних (кабелі, бездротові з'єднання). Для забезпечення стабільної роботи автоматизованої системи управління технологічними процесами методичної печі з крокуючими балками необхідно впровадити надійну мережеву інфраструктуру, яка забезпечить

швидкий та безперебійний обмін даними між усіма компонентами системи. Основні мережеві технології, що застосовуються:

- промислові мережі Ethernet для зв'язку між контролерами, SCADA, HMI та серверами;
- польові шини Profibus для зв'язку між датчиками, витратомірами, газоаналізаторами та виконавчими механізмами.

Обладнання для реалізації: комутатори: Siemens Scalance X для організації мереж Profinet/Ethernet; шлюзи: для інтеграції Profibus із сучасними мережами Profinet; маршрутизатори: забезпечують доступ до ERP-системи через Ethernet/IP.

### 3.1.4 Оновлення програмного забезпечення WinCC

На підставі виявлених проблем управління дослідженого об'єкту виявлена необхідність оновлення програмного забезпечення WinCCv7 та перехід на WinCC v8.0. Для оновлення потрібно виконати наступні дії:

- скласти список сигналів, сторінок та архівів даних, що потребують перенесення;
- виконати розрахунки: обсяг пам'яті, необхідний для збереження історичних даних у SCADA; трафік у мережі;
- оновити операційну систему серверів до Windows 11;
- створити резервну копію всього проекту у WinCC v7;
- налаштувати мережеві параметри (IP-адреси, протоколи зв'язку: Profinet, OPC UA);
- імпортувати проект із резервної копії WinCC v7.x у WinCC v8.0;
- оптимізувати графічний інтерфейс із використанням сучасних елементів WinCC v8.0;
- оновити аварійні повідомлення;
- перевірити зв'язок між WinCC v8.0 та SIMATIC S7-1500 через Profinet;
- налаштувати передачу сигналів та даних про продуктивність через OPC UA4;
- створити резервну копію WinCC v8.0 для тестування, провести тестування та запустити продуктивну експлуатацію.

В рамках підготовчого етапу по оновленню WinCC виконаємо наступні дії:

- 1) розрахунок обсягу архівованих даних:

$$V = N * R * T \quad (3.1)$$

де N=300 кількість вимірюваних змінних;  
 $R = \frac{1}{10}$  Hz – частота запису (кожні 10 секнд)

$$V = 300 * 0.1 * 31536000 = 7.8 \text{ ГБ/рік};$$

2) розрахунок необхідного трафіку у мережі:

$$T = N \frac{S}{t} \quad (3.2)$$

де T – необхідний трафік у мережі;

S=256 байт – середній розмір пакета для однієї змінної у реальному часі;

t=1с - частота передачі даних

$$T=256*300/1=0,77 \text{ Мбіт/с};$$

3) перелік сигналів, які передаються наведено в Додатку Г, приблизно 300 сигналів, які включають: аналогові сигнали ~150; дискретні ~100, сигнали аварій ~50;

4) налаштування сповіщень. SCADA-система методичної печі виводить сповіщення, які можна розділити на кілька категорій. Вони забезпечують операторів інформацією про стан системи, аварії та необхідність втручання. Перелік категорій сповіщень для налаштування наведено в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Перелік категорій сповіщень, які формує SCADA-система

Категорія сповіщення	Опис сповіщення
Нормальні повідомлення	Інформація про стандартну роботу системи
Попередження (жовті)	Вказують на відхилення від нормативних значень, які потребують уваги оператора
Аварійні повідомлення (червоні)	Серйозні порушення, які можуть вплинути на безпеку або працездатність системи
Технологічні сповіщення	Відображають стан окремих елементів системи або зміну режимів роботи
Сигнали стану обладнання	Інформація про статус виконавчих механізмів, насосів, вентиляторів тощо

Повний перелік сповіщень наведено в Додатку Д.

Перехід на WinCC v8.0 забезпечить покращену інтеграцію з сучасними PLC-контролерами, дасть додаткові можливості для аналізу даних і реалізації прогнозуючих алгоритмів, підтримку сучасних операційних систем Windows 11 (64-біт) Professional, Enterprise та промислових протоколів (таких як OPC UA та MQTT), покращить роботу з архівами даних та великими об'ємами інформації.

## **3.2 Проектування САР співвідношення «газ-повітря» в зварювальній зоні печі з використанням ПЗ TIA Portal**

Система автоматичного регулювання (САР) співвідношення газ–повітря та температури є ключовим елементом оптимізації роботи методичної печі, оскільки забезпечує стабільність горіння, оптимізує витрати палива та підтримує необхідний температурний режим у печі.

### **3.2.1 Алгоритм управління температурою та співвідношенням газ-повітря**

Одним із основних показників ефективності роботи печі є кількість тепла, необхідна для нагрівання одиниці маси матеріалу. Цей показник відображає, наскільки ефективно використовується енергія для нагрівання металу. Температура в кожній зоні печі визначається кількістю тепла, яке генерується внаслідок спалювання природного газу, і безпосередньо залежить від ефективності процесу горіння. Якість горіння, у свою чергу, визначається співвідношенням газ-повітря, оскільки надлишок або нестача повітря можуть знижувати теплову ефективність і призводити до утворення окалини або неповного згорання. Таким чином, температура та співвідношення газ-повітря є взаємопов'язаними показниками, які потребують спільного налаштування для забезпечення стабільного теплового режиму. Розглянемо налаштування САР співвідношення «газ-повітря» в третій зварювальній зоні печі. Система автоматичного регулювання повинна забезпечити підтримання заданого діапазону температур у третій зварювальній зоні та стабільне співвідношення газ-повітря на рівні заданого значення.

На рис.3.1 відображена паралельна робота двох регуляторів. Головного - регулятора температури. Та підлеглому регулятору газ/повітря, який виконує завдання на основі дій температурного регулятора. Така модель забезпечує стабільний температурний режим при мінімальних витратах газу та повітря.

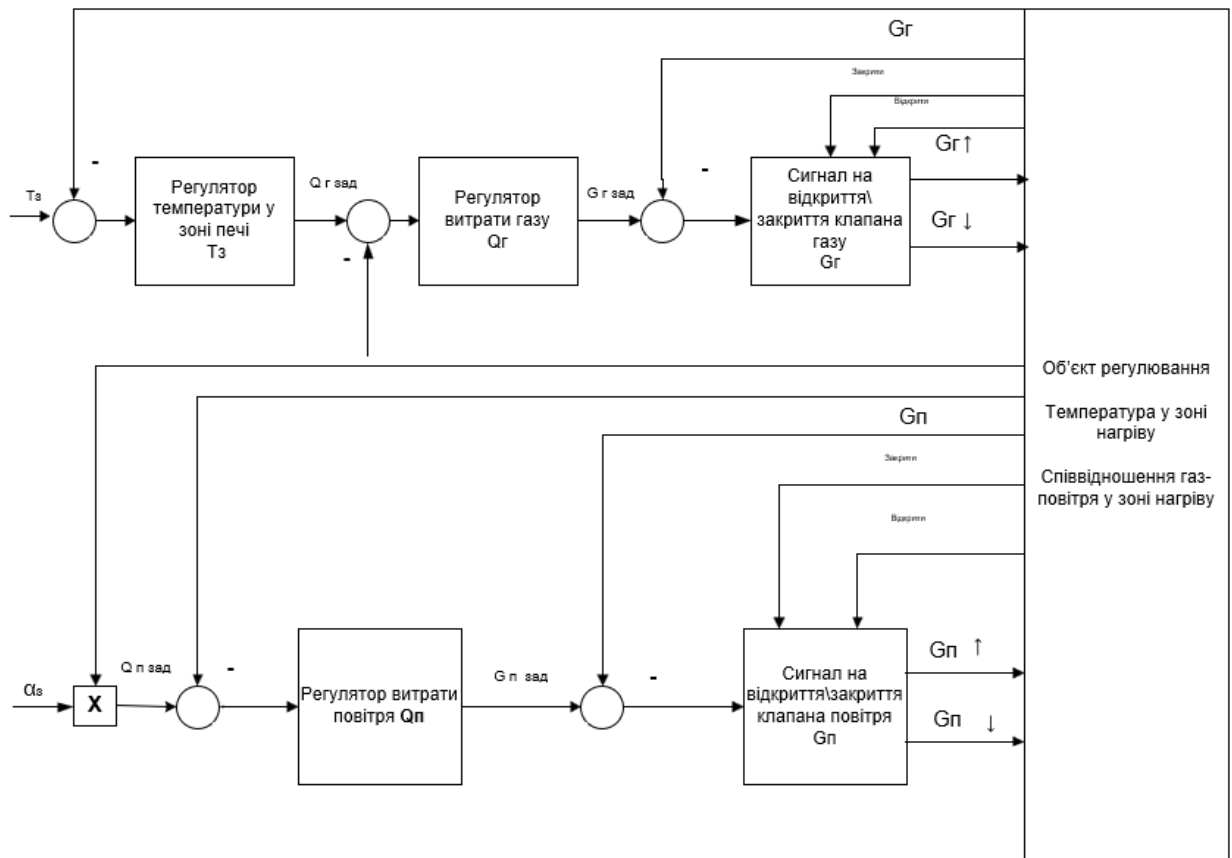


Рисунок 3.1 - Схема управління температурою та співвідношенням газ-повітря

Алгоритм роботи моделі:

1) обчислення відхилення температури для кожної зони:

$$\Delta T, i = T_{\text{поточна}, i} - T_{\text{задана}, i} \quad (3.3),$$

якщо абсолютне відхилення температури відхиляється від встановленого (10 °C), обчислюється необхідна витрата газу:

$$G_{\text{необх}, i} = K_{pT} \Delta T, i + K_{iT} \int \Delta T, i dt + K_{dT} \frac{d_{eT}, i}{dt} \quad (3.4)$$

де  $K_{pT}, K_{iT}, K_{dT}$  – коефіцієнти пропорційного, інтегрального та диференціального регулювання регулятора температури.

Порівнюється поточна витрата газу з необхідною. Подається відповідний сигнал на виконавчий механізм клапану газу: збільшити або зменшити витрату газу. Якщо абсолютне відхилення температури не відхиляється від встановленого, підтримується встановлена витрата газу.

2) обчислення фактичного співвідношення газ-повітря:

$$R_{\text{факт}, i} = \frac{G_{\text{необх}, i}}{A_{\text{факт}, i}} \quad (3.5)$$

3) обчислення відхилення фактичного співвідношення від заданого:

$$\Delta R, i = R_{\text{факт}, i} - R_{\text{задан}, i} \quad (3.6)$$

4) запуск PID-регулятора газ/повітря, обчислення необхідної витрати повітря для підтримання заданого співвідношення :

$$A_{\text{необх}, i} = K_{pR} \Delta R, i + K_{iR} \int \Delta R, i dt + K_{dR} \frac{d_{eR}, i}{dt} \quad (3.7)$$

де  $K_{pR}, K_{iR}, K_{dR}$  – коефіцієнти пропорційного, інтегрального та диференціального регулювання регулятора газ-повітря.

Порівнюється поточна витрата повітря з необхідною. Подається відповідний сигнал на виконавчій механізм клапану повітря: збільшити або зменшити витрату повітря.

Як працює САР на прикладі роботи третьої зони печі де температурний діапазон  $800^{\circ}\text{C} < T < 1300^{\circ}\text{C}$ .

Якщо початкова температура – нижче встановленого, наприклад  $600^{\circ}\text{C}$ , система виявляє що температура нижче заданого діапазону ( $T < 800^{\circ}\text{C}$ ). Включає інтенсивний нагрів, збільшуючи витрату газу  $G_z$ , алгоритм співвідношення газ/повітря розраховує коефіцієнт та коригує витрату повітря  $G_v$ .

Якщо початкова температура  $T_z = 1100^{\circ}\text{C}$  – в межах встановленого, система підтримує стабільний нагрів, регулятор температури утримує значення витрати газу  $G$  на поточному рівні, регулятор співвідношення газ/повітря підлаштовує витрату повітря під встановлений коефіцієнт.

Якщо початкова температура  $T = 1350^{\circ}\text{C}$  – вище встановленого, система виявляє, що температура вище заданого діапазону ( $T > 1300^{\circ}\text{C}$ ). Знижується інтенсивність нагріву, зменшуючи витрату газу  $G_z$ , алгоритм співвідношення газ/повітря розраховує коефіцієнт та коригує витрату повітря  $G_v$ .

Рисунок 3.2 ілюструє систему автоматичного регулювання співвідношення газ-повітря. Датчики тиску газу та повітря передають дані про поточний стан тиску до блоку управління. Потік газу та повітря контролюється клапанами, які відкриваються або закриваються в залежності від команд, що надходять від ПІД-регулятора. Блок управління складається з двох вхідних каналів, які отримують дані від датчиків тиску, модуля для обчислення співвідношення газ/повітря, та ПІД-регулятора, що генерує вихідні сигнали для регулювання потоків. Сигнали від ПІД-регулятора надходять на виконавчі механізми, які керують положенням клапанів і забезпечують точне дозування газу та повітря. Ця система спрямована на підтримання стабільного співвідношення газ-повітря, необхідного для забезпечення якісного та енергоефективного процесу горіння в печі.

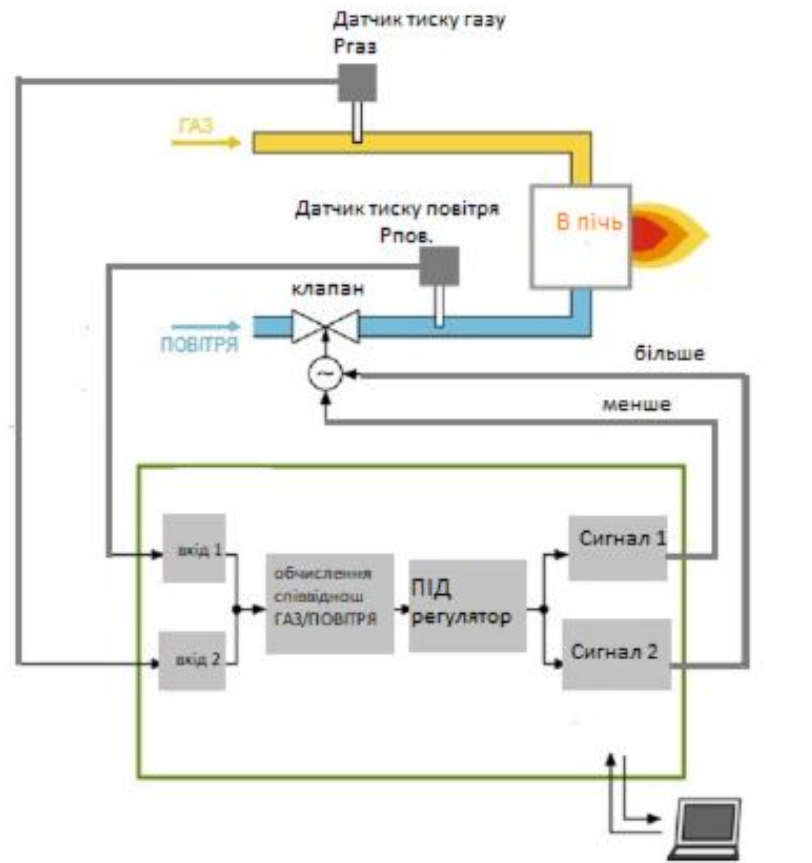


Рисунок 3.2 - Схема САР співвідношення газ-повітря

### 3.2.2 Налаштування та дослідження моделі ПІД-регулятора за допомогою інструментів Matlab

Налаштуємо модель регулювання співвідношення газ-повітря. Основні технологічні параметри для розрахунку:

- температура у 3 зоні– 800-1300 °С;
- тиск у печі 5-10 ПА ;
- співвідношення газ-повітря – 10;
- теплова потужність у 3 зоні – 627 КВт;
- задане співвідношення газ/повітря:1:10.

Налаштуємо модель ПІД-регулятора в Matlab Simulink. Передавальна функція об'єкта регулювання має вигляд передавальної функції першого порядку з затримкою. Функція враховує час транспортування газу або повітря до пальників. Ця модель дозволяє врахувати інерційність і затримку системи для правильного проектування регуляторів.

$$G = \frac{K}{T+1} e^{-Ls} \quad (3.8)$$

де  $G$  – передавальна функція об'єкта управління;  
 $T$  – стала часу системи, що визначає швидкість її реакції;

L - час запізнення;  
s – комплексна змінна в перетворенні.

Модель ПІД-регулятора температури та співвідношення газ-повітря наведено на рисунку 3.3.

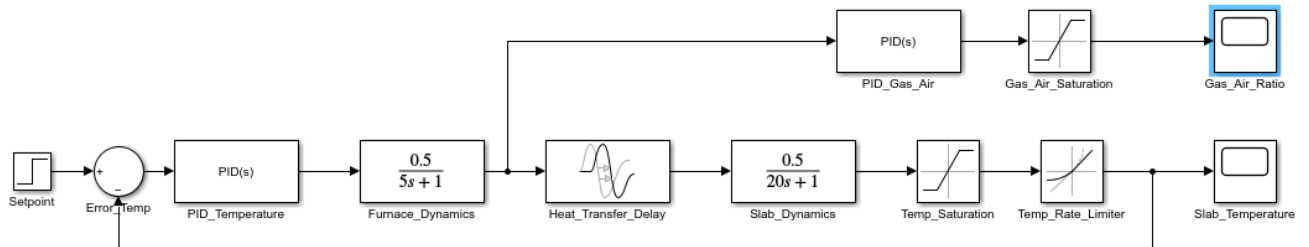


Рисунок 3.3 - Модель ПІД-регулятора температури та співвідношення газ-повітря

Виконаємо налаштування ПІД-регулятора за допомогою функції pidTuner у ПЗ Matlab. Результати налаштування наведено на рисунку 3.4.

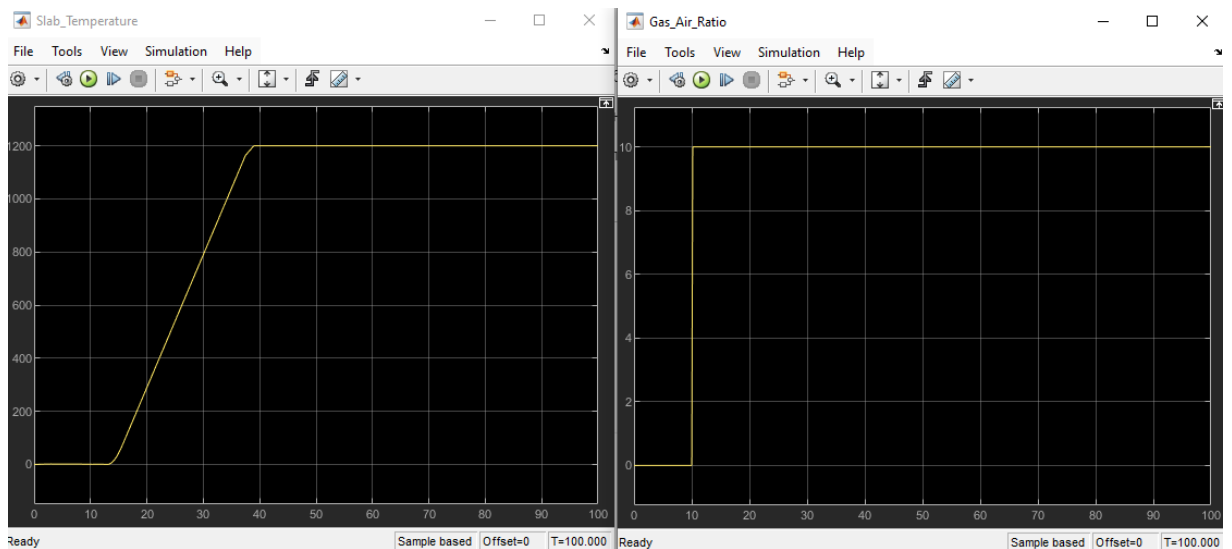


Рисунок 3.4 - Перехідний процес для автоматично налаштованого ПІД-регулятора за допомогою функції pidTuner у ПЗ Matlab

Результати аналізу наведено на рисунку 3.5 Із аналізу графіку бачимо швидкий час реакції, перехідний процес швидко загасає мінімальне перегулювання та точність у сталому режимі. Висновок: ПІД-регулятор налаштований ефективно та може бути використаний для керування системою газ-повітря.

Налаштовані параметри PID-регулятора:

pid with properties:

Kp: 0.1689

Ki: 0.0409

Kd: 0

Tf: 0

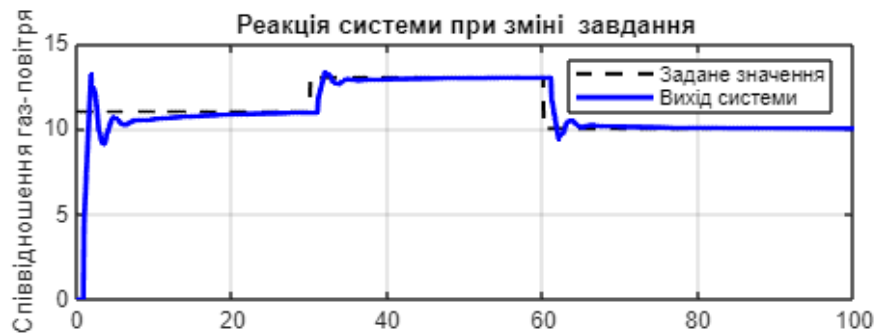
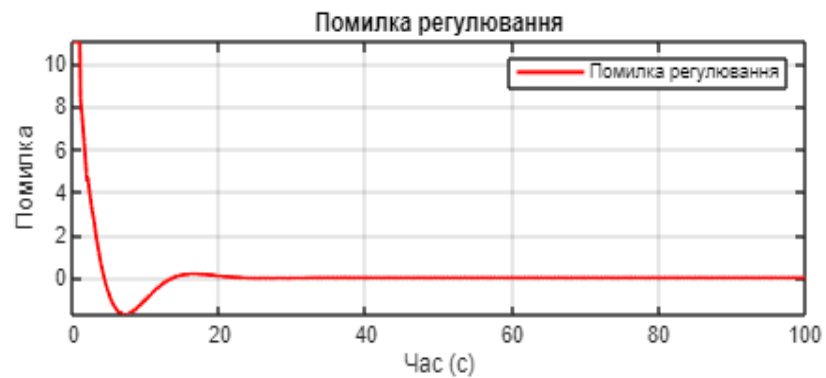
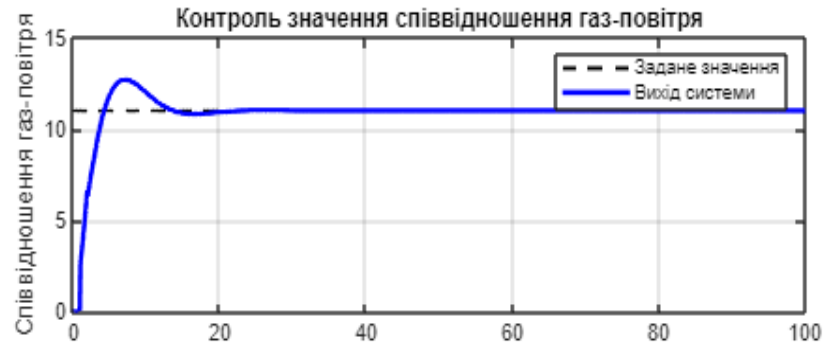


Рисунок 3.5 - Дослідження налаштувань ПІД-регулятора

### 3.2.3 Програмна реалізація алгоритму за допомогою TIA Portal

Для налаштування управління температурою і співвідношенням газ-повітря у зварювальній зоні печі створюємо новий проект у TIA Portal і додаємо контролер. При виборі контролера необхідно враховувати складність технологічного процесу, та вимоги до точності регулювання. Для цих задач найбільш підходить раніше обраний сучасний контролер PLC SIMATIC S7-1500 (CPU 1516-3PN/ND). Це високопродуктивний контролер, його потужність дозволяє виконувати складні обчислення та багаторівневу логіку при збереженні стабільного циклічного часу, він має вбудовані функції обробки аналогових і цифрових сигналів, що робить його ідеальним для задач управління в промислових системах, таких як печі та прокатні стани, він має 2МБ пам'яті, температурний діапазон від -25 °С до +60°С. Вибір контролера в Tia Portal та його апаратна конфігурація наведено на рисунку 3.6.

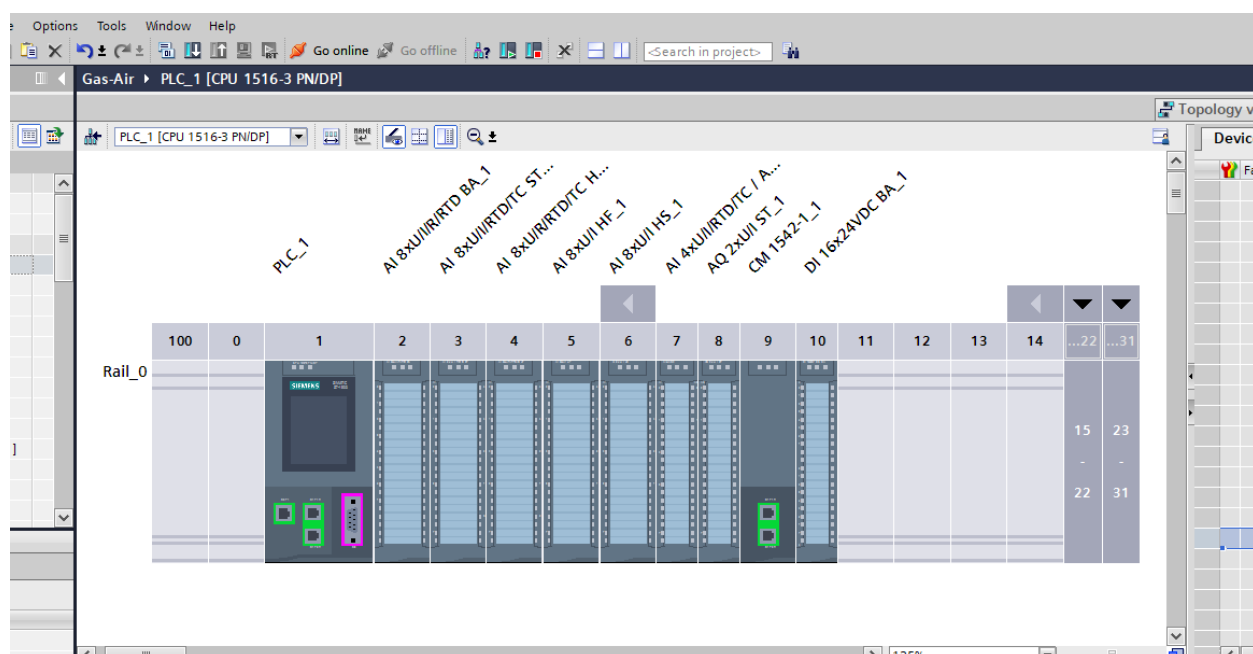


Рисунок 3.6 - Вибір контролера в Tia Portal та його апаратна конфігурація

Налаштуємо конфігурацію апаратної частини.

На рисунку 3.7 показана детальна конфігурація апаратної частини контролера SIMATIC S7-1500 у середовищі TIA Portal для керування температурою та співвідношенням газ-повітря в зварювальній зоні печі. Відображені модулі аналогових входів (AI 8xU/I/RTD/TC) використовуються для зчитування температури за допомогою термопар і датчиків RTD, а аналогові виходи (AQ 2xU/I ST) керують подачею газу та повітря. Цифрові входи (DI 16x24VDC) забезпечують контроль стану клапанів, датчиків тиску та аварійних сигналів. Конфігурація включає PROFINET та DP interface для комунікації

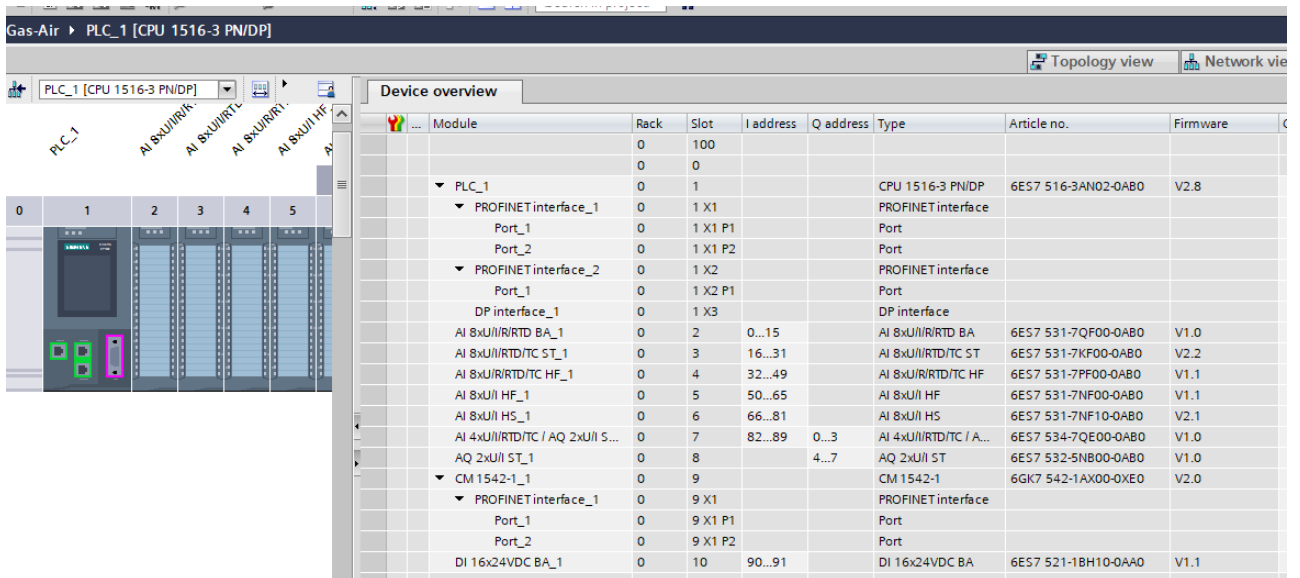


Рисунок 3.7- Апаратна конфігурація контролера в TIA Portal

Виконаємо налаштування тегів у TIA Portal, які будемо використовувати для передачі даних між сенсорами, регуляторами та виконавчими механізмами. Кожен тег має свою адресу в пам'яті контролера, тип даних, доступність для запису та читання. Основні теги включають витрату газу, витрату повітря, тиск, співвідношення газ/повітря, температурні дані та аварійні сигнали, їхні типи даних, задані параметри для регуляторів, адресацію, а також атрибути доступу та видимості.

Рисунок 3.8 ілюструє перелік змінних (PLC Tags), які використовуються для керування співвідношенням газ-повітря.

Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Write...	Visibl...	Supervis...	Comment
Q_Gas	Tag table_1	Real	%ID64	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Витрата газу (аналоговий вхід).
Q_Air	Tag table_1	Real	%ID68	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Витрата повітря (аналоговий вхід).
Pressure_Gas	Tag table_1	Real	%ID72	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Тиск газу.
Pressure_Air	Tag table_1	Real	%ID76	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Тиск повітря.
R_Current	Tag table_1	Real	%ID80	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Поточне співвідношення.
R_Set	Tag table_1	Real	%ID84	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Задане значення (11.0).
Valve_Gas	Tag table_1	Real	%ID88	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Керування клапаном газу.
Valve_Air	Tag table_1	Real	%ID92	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Керування клапаном повітря.
Alarm_Gas	Tag table_1	Real	%ID96	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Аварійний сигнал для газу.
Alarm_Air	Tag table_1	Real	%ID100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Аварійний сигнал для повітря.
Tag_1	Default tag table	Word	%IW64	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Аварійний сигнал для тиску
Temp_Setpoint_Zone3 (Real)	Tag table_1	Real	%MD104	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Задана температура для 3-ї зони
Temp_Current_Zone3 (Real)	Tag table_1	Real	%ID0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Поточна температура, з датчика
Heater_Control_Zone3 (Real)	Default tag table	Real	%ID4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Сигнал для керування нагрівом у 3-й з...
Alarm_Temp_Zone3	Tag table_1	Real	%ID8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Аварійний сигнал для 3-ї зони

Рисунок 3.8 - Перелік змінних (PLC Tags) у TIA Portal

Налаштування PID-регулятора температури наведено на Рисунку 3.9. Вхідні параметри: поточна і задана температура, вихідні - різниця між фактичною та заданою температурою та формування команди на зміну

витрати газу в залежності від отриманої різниці. У нижній частині екрана зображено програмний код у SCL у першій мережі (Network 1). У коді виконується передача поточного значення температури (PV\_Temperature) та заданої температури (SP\_Temperature) у PID-регулятор. Також включається сам регулятор (EN = TRUE), а вихідний сигнал (MV\_Temperature) використовується як управління подачею газу (SP\_GasAir) для наступного PID-регулятора газ/повітря.

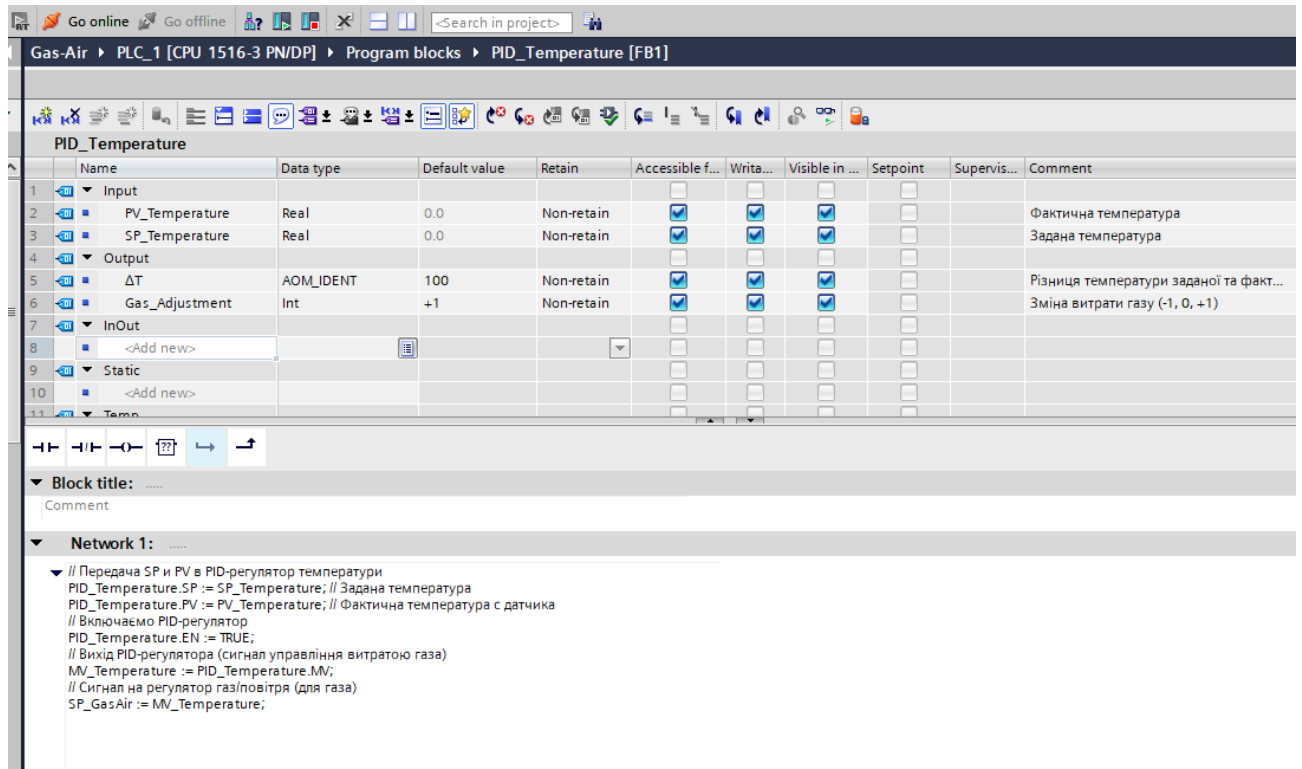


Рисунок 3.9 - Конфігурація PID-регулятора температури

Якщо  $\Delta T > 0$ , температура нижча за встановлену, потрібно збільшити подачу газу, клапан газу (Valve\_Gas) відкривається, і подача газу збільшується. Якщо  $\Delta T < 0$ , температура вища за встановлену, потрібно зменшити подачу газу зменшується. Налаштування PID-регулятора газ-повітря наведено на Рисунку 3.10. Вхідні параметри: витрата газу – параметр передається з ПІД-регулятора температури, поточна витрата повітря та задане співвідношення газ-повітря. Вихідні параметри включають фактичне співвідношення витрат газу і повітря, та формування команди клапану повітря на зміну витрати повітря залежно від необхідності корекції співвідношення (збільшити, зменшити, утримати на рівні).

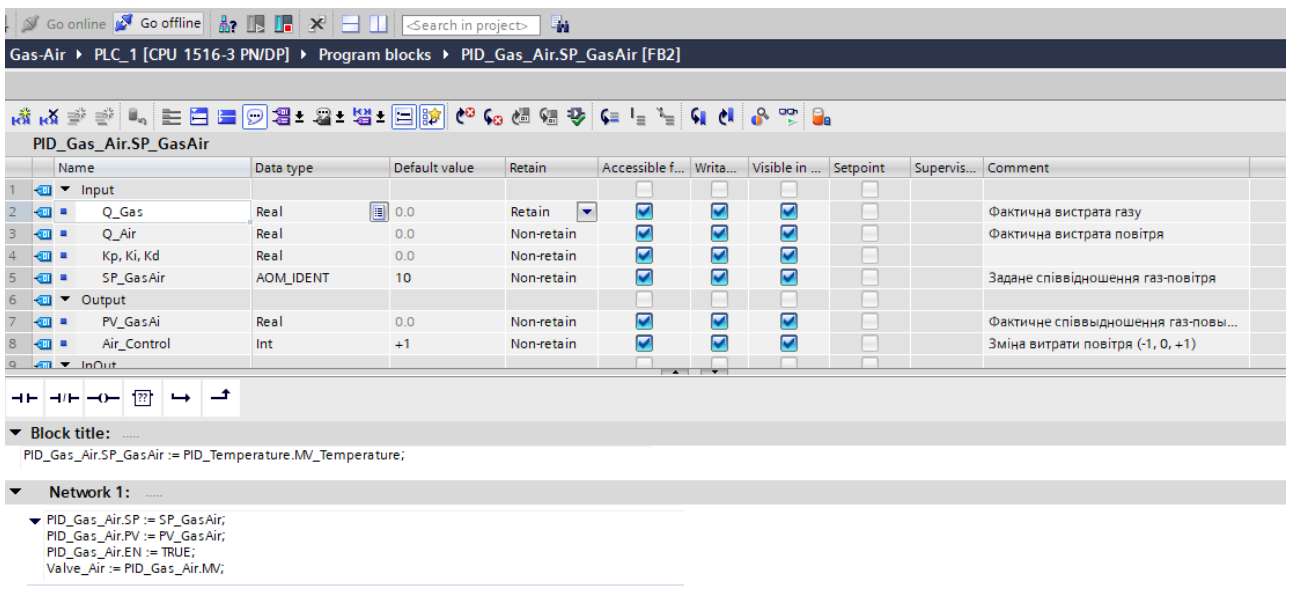


Рисунок 3.10 - Конфігурація PID-регулятора газ-повітря

Для перевірки роботи PID-регуляторів температури та газ/повітря без підключення реального контролера виконаємо симуляція у PLCSIM.

Завантаження програми у PLCSIM для тестування PID-регуляторів наведено на рисунку 3.11.

Рисунок 3.12 демонструє симуляцію роботи PID-регуляторів температури та газ/повітря у PLCSIM.

Відображено головний програмний блок OB1, в якому викликаються два PID-регулятори: PID\_Temperature (FB1) – керує подачею газу для підтримки заданої температури та PID\_Gas\_Air (FB2) – підтримує задане співвідношення газ/повітря, керуючи клапаном повітря.

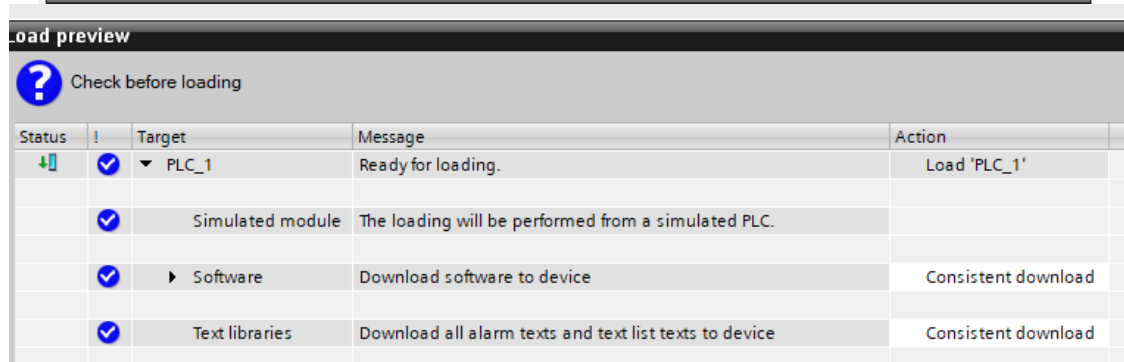
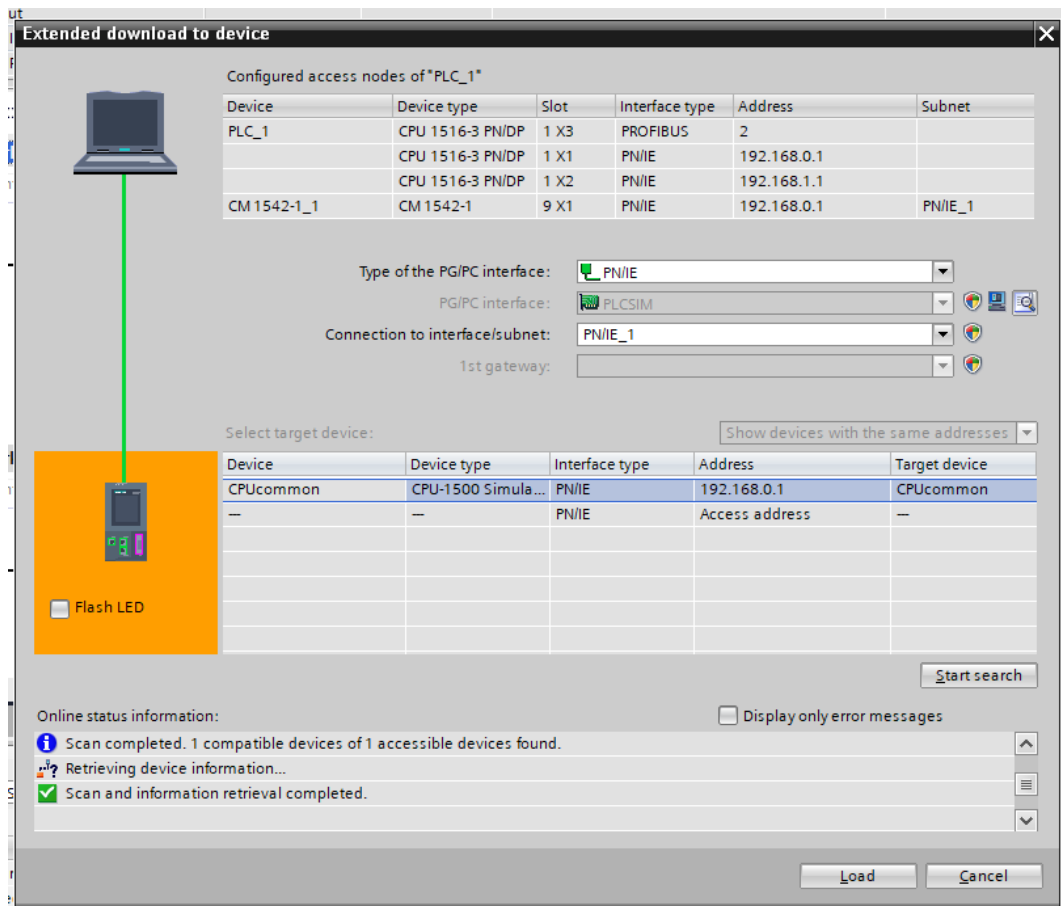


Рисунок 3.11 - Завантаження програми у PLCSIM для тестування PID-регуляторів

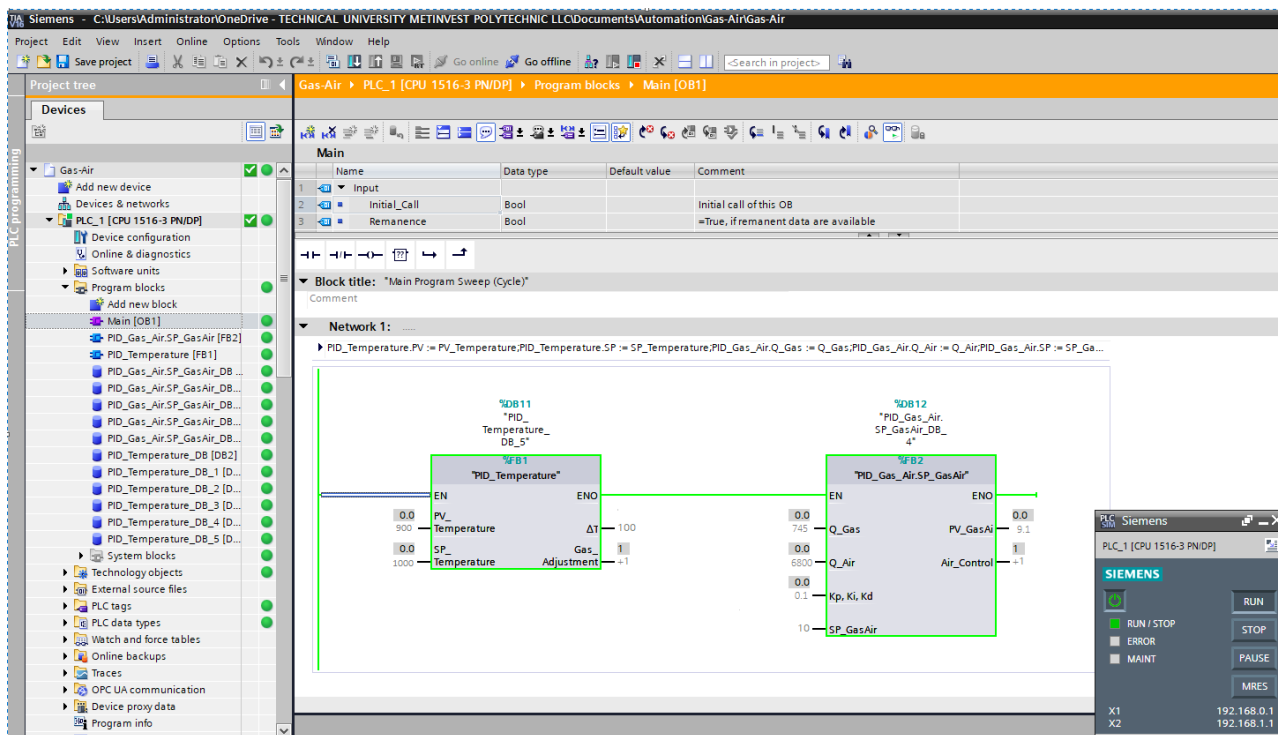


Рисунок 3.12 -Симуляція роботи ПІД-регуляторів

Симуляція у PLCSIM підтвердила коректність роботи алгоритму, налаштування здатні підтримувати задані параметри температури та співвідношення газ-повітря.

### 3.3 Математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення окремих задач верхнього рівня АСУТП та проектування екранної форми ЛМІ нагрівальника

Математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення верхнього рівня АСУТП орієнтоване на вирішення задач стратегічного управління та оптимізації технологічних процесів. До таких задач належать прогнозування часу нагріву залежно від параметрів заготовки та продуктивності прокатного стану, динамічне регулювання витрати палива для зменшення енерговитрат, автоматичне коригування співвідношення газ/повітря, а також аналіз і моніторинг стану обладнання. Розглянемо задачу прогнозування часу нагріву залежно від параметрів заготовки та продуктивності прокатного стану.

#### 3.3.1 Розробка та впровадження алгоритмів автоматизації для прогнозування часу нагріву заготовок та динамічного регулювання потужності печі залежно від швидкості прокатки та технологічних ВИМОГ

Завдання: оптимізувати процес нагріву сталевих заготовок у печі шляхом оптимізації часу нагріву та потужності кожної зони, забезпечуючи

рівномірний температурний профіль, з урахуванням параметрів заготовки та продуктивності прокатного стану.

Вхідні дані.

Фізичні параметри заготовки:

- розмір (L, W, H) і маса;
- марка сталі.

Параметри нагріву згідно з технологічною картою, наведеної на рисунку 3.13.

Технологічні параметри:

- допустима потужність зон нагріву  $P_{зона,і}$ , із характеристики печі;
- продуктивність прокатного стану (швидкість прокатки)  $P_{прок}$ ;
- цільова температура нагріву у кожній зоні  $T_{зона,і}$ .



"ПРОМЕТ СТИЛ" ЕАД

### Технологічна карта №2

Дата: 01.10.2024г.

Напречно сечение на заготовката	150*150 мм
Дължина на заготовката	12,0-12,1 м
Марка стомана:	СтЗспМод, Ст4спМод, Gr60
Профили:	№№10-40, #3-11, 10М-35М
Режим на валцуване:	на две нитки

Производителност, т/час	Стъпка, мм	Время за нагриване, мин	Температура по зони (задание), °C						Налягане в пеща, Pa
			1	2	3	4	5	6	
100 - 104	260	135 - 141	935	800	1215	1205	1200	1215	8,0
105 - 109	240	140 - 145	935	800	1215	1205	1200	1215	8,0
110 - 114	240	134 - 139	940	800	1220	1210	1205	1220	8,0
115 - 119	240	128 - 133	940	800	1220	1210	1205	1220	8,0
120 - 124	240	123 - 127	945	800	1220	1210	1205	1220	8,0
125 - 129	240	118 - 122	945	800	1225	1215	1210	1225	7,5

Съотношение газ/въздух на зони 1, 3, 4, 5, 6 (при CV =>30%) -	1,03±0,01
Съотношение газ/въздух в зона 2 (при CV =>30%) -	1,15±0,05
Допустимо отклонение от задана температура по зони -	±10 °C
Температу Т1 -	1030 - 1080 °C

### Рисунок 3.13 - Приклад технологічної карти параметрів нагріву заготовок

Для розв'язання задач нелінійної оптимізації з обмеженнями використовуємо функцію `fmincon` в ПЗ MATLAB. Функція мінімізує загальні енергетичні витрати печі шляхом оптимального розподілу часу нагріву та потужності в кожній зоні. Забезпечує досягнення необхідного температурного профілю для заготовки перед прокаткою. Виконує автоматичне коригування часу нагріву та потужності у разі зміни продуктивності прокатки або виникнення аварійного простою.

Основні математичні рівняння, які використовуються в розрахунках:

- 1) цільова функція оптимізації `fmincon`:

$$\Sigma(t_{opt} \times P_{opt} ) \quad (3.9)$$

де  $P_{opt}$  – оптимальна потужність зони;

$t_{opt}$  – оптимальний розрахований час нагріву у зоні печі.

Алгоритм намагається знайти такий розподіл часу та потужності, щоб досягти потрібної температури з мінімальними витратами енергії. Оптимізація через  $fmincon$  мінімізує загальні енерговитрати печі.

2) оптимальний час нагріву заготовки визначається рівнянням:

$$t_{opt} = \frac{cpV (T_{задана} - T_{початкова})}{P_{opt}} \quad (3.9)$$

де  $t_{opt}$  – оптимальний час нагріву в зоні

$T_{задана}$ ,  $T_{початкова}$  – задана і початкова температура заготовки;

$P_{opt}$  – оптимальна потужність зони;

$V$  - об'єм заготовки;

$c$  - питома теплоємність сталі;

$\rho$  – густина сталі;

$P_{opt}$  – потужність в зоні нагріву.

3) регулювання потужності:

$$P_{opt} = \min (P_{номінал}, P_{номінал} * \max (1, scaling\_factor)) \quad (3.10)$$

$P_{opt}$  – оптимальна потужність зони;

$P_{номінал}$  – номінальна потужність печі;

$scaling\_factor$  - коефіцієнт масштабування продуктивності:

$$scaling\_factor = \frac{P_{real}}{P_{max}} \quad (3.11)$$

де  $P_{real}$  – реальна продуктивність прокатного стану;

$P_{max}$  – максимальна продуктивність прокатного стану.

Формула визначає оптимальну потужність нагріву залежно від швидкості прокатки. Потужність не перевищує номінальну (щоб уникнути перевантажень печі). Якщо продуктивність зростає, потужність також збільшується.

4) компенсація аварійного простою:

$$t_{кориг} = t_{опт} + t_p \quad (3.12)$$

де  $t_{кориг}$  – скоригований час нагріву;

$t_{опт}$  – оптимальний розрахований час нагріву без урахування простою;

$t_p$  – тривалість простою.

Якщо піч працювала з простоєм, то збільшується час нагріву. Час простою повністю додається до розрахункового часу нагріву, щоб заготовка не була недогрітою.

5) коригування часу нагріву при відхиленні температури:

$$T_H^p(i, j) = T_H^p(i, j - 1) + K(j) \quad (3.13)$$

$$KT(j) = \frac{\varepsilon T(j) \Delta \tau s}{\Delta T_j} \quad (3.14)$$

де  $T_H^p(i, j)$  - прогнозований час нагріву в зоні  $i$  для заготовки  $j$ ;

$KT(j)$  - коефіцієнт корекції нагріву;

$\varepsilon T(j)$  – відхилення температури від заданої;

$\Delta T_j$  – зміна температури за останній крок;

$\Delta \tau s$  – крок часу в системі управління.

Якщо фактична температура не відповідає заданій, то час нагріву коригується. Використовується коефіцієнт коригування  $KT(j)$ , що залежить від температурного відхилення. Якщо температура надто низька, час збільшується. Якщо температура надто висока, час зменшується.

6) оновлення потужності при відхиленні температури:

$$P_{opt}(i) = P_{opt}(i) + \alpha \cdot \varepsilon T(j) \quad (3.15)$$

де  $P_{opt}(i)$  – оновлена потужність у зоні  $i$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт корекції потужності;

$\varepsilon T(j)$  – температурне відхилення.

Якщо температура не відповідає нормі, змінюємо потужність у зоні.

Якщо температура занадто низька, підвищуємо потужність.

Якщо температура занадто висока, зменшуємо потужність.

Обмеження, які враховує  $f_{mincon}$ :

- межі потужності – потужність у кожній зоні не перевищує номінальну та не падає нижче мінімального рівня;

- температурний діапазон – температура заготовки після виходу з печі повинна залишатися в межах:

$$T_{min} \leq T_{кінц} \leq T_{макс} \quad (3.16)$$

де  $T_{min}$  і  $T_{макс}$ ,  $T_{кінц}$  – мінімальна, максимальна та кінцева температура заготовки, згідно технологічної карти;

- сумарний час нагріву заготовки відповідає заданому у технологічній карті.

Алгоритм автоматичного регулювання температурного профілю та потужності печі працює у динамічному режимі, враховуючи параметри заготовки, продуктивність прокатного стану та аварійні простои. Основна

мета – прогнозувати час нагріву та оптимально розподіляти потужність у зонах печі, щоб забезпечити стабільне досягнення заданої температури при мінімальних енергетичних витратах. Покроковий опис алгоритму:

1)отримання вхідних даних: параметри заготовки (марка сталі, розміри), технологічні параметри (продуктивність печі, потужність зон, цільова температура нагріву), параметри прокатного стану (швидкість прокатки, одностручковий або двостручковий режим), час аварійного простою, якщо він мав місце; алгоритм ініціалізує початкові змінні, включаючи час нагріву в кожній зоні, початкову потужність зон та межі допустимих значень;

2)перевірка аварійного простою. Алгоритм перевіряє, чи був аварійний простій печі. Якщо простою не було, переходимо до розрахунку часу нагріву. Якщо простій був, алгоритм додає час простою до розрахункового часу нагріву, щоб компенсувати втрати тепла. Після цього система оновлює значення температури у зонах та переходить до основного розрахунку;

3)прогнозування часу нагріву для кожної зони, на цьому етапі алгоритм обчислює оптимальний час перебування заготовки в кожній зоні печі. Враховується продуктивність прокатного стану (чим швидше рухаються заготовки, тим менше часу вони мають для нагріву); алгоритм встановлює межі мінімального та максимального часу перебування в зоні, якщо продуктивність збільшується, час нагріву автоматично коригується, але не може бути нижче мінімального допустимого значення, якщо виявлено відхилення температури від заданого профілю, алгоритм враховує його при наступному етапі – коригуванні потужності;

4)динамічне регулювання потужності зон, для кожної зони алгоритм перевіряє чи відповідає температура в зоні заданій якщо відхилень немає, потужність залишається без змін, якщо температура нижча за необхідну, збільшуємо потужність у цій зоні, якщо температура вища за необхідну, зменшуємо потужність; також перевіряються допустимі межі потужності; потужність не може перевищувати номінальне значення для кожної зони; потужність не може впасти нижче мінімально допустимого рівня, щоб не порушити тепловий режим; якщо необхідне значення потужності виходить за межі, алгоритм перераховує час нагріву, щоб уникнути перегріву або недогріву;

5)оптимізація через  $f_{mincon}$ , після визначення попередніх значень часу нагріву та потужності виконується нелінійна оптимізація, яка мінімізує загальні енергетичні витрати, коригує час нагріву та потужність так, щоб забезпечити мінімально необхідне енергоспоживання, використовує обмеження для контролю часу нагріву та допустимого температурного діапазону; оптимізація відбувається у циклі, де коригується потужність та час у кожній зоні печі;

6)оновлення та перевірка результатів, після оптимізації алгоритм обчислює скоригований час нагріву та потужність для кожної зони,

перевіряє, чи всі параметри відповідають технологічним вимогам; якщо всі умови дотримані, алгоритм переходить до наступної заготовки; якщо виявлено відхилення температури або потужності, алгоритм повертається до попередніх етапів для додаткового коригування;

7) візуалізація температурного профілю, на фінальному етапі алгоритм будує графік фактичного та розрахункового температурного профілю по зонах печі; відображає час нагріву по зонах; відображає оптимальні значення потужності для кожної зони; аналізує відхилення температури та можливі коригування; графік допомагає оператору оцінити, наскільки ефективно працює система.

Алгоритм динамічно адаптує потужність та час нагріву залежно від продуктивності прокатного стану. Система автоматично враховує аварійні простой та компенсує втрати тепла. Оптимізація через `fmincon` мінімізує витрати енергії, забезпечуючи необхідний температурний режим. Графічний аналіз дозволяє оцінити ефективність роботи печі у реальному часі.

Програмна реалізація алгоритму через MATLAB з інтеграцією зі SCADA через API-запити та візуалізацією на HMI.

У цьому рішенні MATLAB використовується для розрахунку оптимального часу нагріву та потужності печі, а SCADA-система приймає дані через API та візуалізує їх на HMI.

Основні етапи реалізації:

- отримання вхідних параметрів MATLAB від SCADA через API-запити;
- розрахунок оптимальних значень часу нагріву та потужності у MATLAB;
- передача розрахованих даних у SCADA через API-запити;
- зворотний зв'язок SCADA → MATLAB (отримання реальних значень температури, потужності, аварійних подій);
- відображення параметрів на HMI (панелі оператора).

Реалізація алгоритму у MATLAB.

Основні етапи роботи алгоритму в MATLAB: отримання вихідних параметрів від SCADA (через API); розрахунок оптимальних значень часу нагріву та потужності; передача результатів у SCADA для відображення на HMI.

Скрипт для розрахунку оптимальних значень часу нагріву та потужності у MATLAB наведено у Додатку Ж. Використовується функція `fmincon`, яка дозволяє знайти оптимальні значення параметрів часу нагріву і потужності печі із дотриманням встановлених обмежень. Результатом стає оптимальний час нагріву та оптимальна потужність зон печі в залежності від параметрів заготовки і швидкості прокатки.

Ключові параметри для розрахунку задаються/отримуються через API-запити. Це: розміри заготовки, густина, теплоємність матеріалу – в залежності від марки сталі, також задаються технологічні параметри, такі

як продуктивність печі, швидкість прокатки, режими прокатки (одноритковий або дворитковий), потужність зон нагріву та цільові температури, які повинні бути досягнуті в кожній зоні. Для забезпечення стабільності процесу враховуються обмеження на допустимі температурні межі і потужність печі та задану швидкість прокатки з урахуванням режиму прокатки (одноритковий або дворитковий).

Після виконання коду в MATLAB отримуємо розраховані параметри часу нагріву та потужності, які виводяться у вигляді таблиці з оптимальними значеннями для кожної зони печі. Основні результати включають: загальний час нагріву, оптимальний час нагріву для кожної зони, оптимальна потужність нагріву по зонах, температурний профіль, корекція параметрів у разі аварійного простою. Температурний профіль виводиться в форматі графіка, що показує зміну температури по зонах печі. Приклад результату виконання розрахунку наведено на рисунку 3.14.

```
=== Оптимізовані параметри нагріву ===  
Швидкість прокатки: 173.80 т/год  
Режим прокатки: Дворитковий  
Загальний час нагріву: 143.99 хв  
Аварійний простій: 15.00 хв  
-----  
Зона 1: Час нагріву = 40.00 хв, Потужність = 9964.53 кВт  
Зона 2: Час нагріву = 32.00 хв, Потужність = 8009.28 кВт  
Зона 3: Час нагріву = 40.00 хв, Потужність = 20064.00 кВт  
Зона 4: Час нагріву = 16.00 хв, Потужність = 2824.25 кВт  
Зона 5: Час нагріву = 8.00 хв, Потужність = 1657.50 кВт  
Зона 6: Час нагріву = 8.00 хв, Потужність = 1657.50 кВт
```



### Рисунок 3.14 - Результат розрахунку оптимального часу нагріву і потужності печі в MATLAB

Обмін даними між MATLAB і SCADA.

Скрипт для обміну даними між MATLAB і SCADA через REST API наведено в Додатку 3. SCADA надсилає в MATLAB поточні технологічні параметри печі, такі як фактична температура, поточна потужність, аварійні події, що дозволяє MATLAB виконувати динамічне коригування розрахунків відповідно до змін у процесі. MATLAB в свою чергу надсилає оптимізовані значення часу нагріву та потужності у SCADA-систему через HTTP-запити, що дозволяє передавати результати розрахунків на HMI для відображення та контролю оператором. Такий підхід забезпечує автоматизоване керування температурним профілем у режимі реального часу, підвищуючи ефективність процесу нагріву та точність регулювання потужності печі.

Використання алгоритму для тестових сценаріїв та прогнозування.

Налаштовані алгоритми можливо використовувати для тестування і прогнозування, вводячи параметри вручну. Оператор може задати фізичні характеристики заготовки, продуктивність прокатного стану, температуру по зонах печі, потужність нагріву та можливі аварійні простої, щоб оцінити, як система буде реагувати на зміну параметрів.

Ця можливість дає змогу моделювати різні виробничі сценарії, тестувати ефективність алгоритму оптимізації, передбачати потенційні проблеми у нагрівальному процесі та знаходити найбільш енергоефективні режими роботи печі.

#### **3.3.2 Регулювання витрат палива залежно від продуктивності**

У процесі нагріву сталевих заготовок у печі витрати палива (природного газу) є одним із ключових параметрів, що впливають на енергоефективність та економічні показники виробництва.

Завдання: Автоматичне регулювання подачі палива в залежності від продуктивності прокатки, температурного профілю та потужності зон нагріву, мінімізуючи при цьому енергетичні витрати без порушення технологічного процесу.

Для вирішення використовується розроблений в п.3.3.1 алгоритм регулювання часу нагріву та потужності. Оптимізація витрат палива за рахунок динамічного коригування подачі газу залежно від продуктивності прокатки та поточного стану температурного профілю. Для уникнення перевитрат під час аварійних простоїв врахуємо можливі зупинки печі. Зворотний зв'язок з реальними датчиками забезпечить точне прогнозування та коригування параметрів нагріву. Перелік вхідних даних наведено в Таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Перелік вхідних даних для налаштування витрат палива

Параметр	Позначення	Джерело
Параметри заготовки	L, W, H	SCADA / Користувач
Маса заготовки	m	SCADA
Густина сталі	$\rho$	Технологічні карти
Питома теплоємність	ср	Технологічні карти
Температури по зонах	Tзона, i	Датчики SCADA
Цільові температури по зонах	Tзадана, i	Технологічна карта

Продовження таблиці 3.2

Параметр	Позначення	Джерело
Потужність у зонах	Pзона, i	SCADA
ККД печі	$\eta_{\text{печі}}$	Визначається експериментально
Витрата палива (поточна)	Vгаз	SCADA
Фактична продуктивність прокатки	Pпрокат	SCADA
Максимальна продуктивність прокатки	Pмакс	Заводські параметри
Кількість ниток прокатки	kb	SCADA
Час аварійного простою	тр	SCADA
Температурний профіль перед простоєм		SCADA

Математичне забезпечення. Математичне забезпечення базується на рівнянні балансу енергії в печі.

1) Витрата палива визначається через тепловий баланс печі:

$$Q_{\text{газ}} = \frac{c\rho V \cdot (T_{\text{задана}} - T_{\text{початковf}})}{\eta_{\text{печі}}} \quad (3.17)$$

де  $Q_{\text{газ}}$  – необхідна теплота від спалювання газу;

с - питома теплоємність сталі;

$\rho$  - густина сталі;

V – об'єм заготовки;

Tзадана – температура, якої потрібно досягти;

Тпочаткова – початкова температура заготовки;  
ηпечі – ККД печі.

2) Витрати газу:

$$V_{\text{газ}} = \frac{Q_{\text{газ}}}{H_{\text{газ}}} \quad (3.18)$$

де  $H_{\text{газ}}$  - теплота згоряння природного газу (~8 200 ккал/м<sup>3</sup> або 34.3 МДж/м<sup>3</sup>).

Якщо продуктивність прокатки збільшується, витрата газу теж зростає, але з урахуванням оптимізації.

Якщо продуктивність прокатки падає, газова подача зменшується відповідно до температурного профілю.

$$V_{\text{газ, опт}} = V_{\text{газ, ном}} * \max(1, \text{scaling\_factor}) \quad (3.19)$$

$$\text{scaling\_factor} = \frac{P_{\text{real}}}{P_{\text{max}}} \quad (3.20)$$

де  $V_{\text{газ, опт}}$ ,  $V_{\text{газ, ном}}$  – оптимальна і номінальна витрата газу;

$P_{\text{real}}$  – фактична продуктивність прокатного стану

Алгоритмічне забезпечення.

Зчитування поточних параметрів з датчиків SCADA: температура в кожній зоні, поточне споживання газу, продуктивність прокатного стану.

Розрахунок необхідної витрати газу на основі продуктивності та температури.

Корекція витрати газу залежно від відхилень температури. Якщо температура нижча за необхідну, подача газу збільшується. Якщо температура вища, витрату палива зменшується. Якщо піч у простої, витрата газу знижується до мінімального рівня.

Програмне забезпечення містить такі компоненти: SCADA-система для отримання даних . MATLAB – для розробки та тестування математичних моделей оптимізації. Скрипт для реалізації алгоритму наведено в додатку К. Вхідними параметрами є отримані оптимальні параметри часу нагріву і потужності печі в залежності від параметрів заготовки і швидкості прокатки. Основна функція, яка використовується для розрахунку витрати газу - `calculate_gas_consumption`. Функція працює за алгоритмом енергетичного балансу, де для кожної зони нагріву обчислюється кількість теплоти, необхідна для підтримки заданих температурних умов, після чого визначається відповідна витрата газу. Вона також підсумовує загальну витрату палива для всієї печі та формує звіт про споживання газу в кожній зоні, що допомагає оптимізувати процес нагріву і мінімізувати енергетичні втрати. Результатом виконання програми стало планування витрати газу для кожної зони нагріву печі, які наведено на рисунку 3.15. Отримані оптимальні значення часу нагріву, необхідної

потужності та відповідної витрати газу у кожній зоні, що дозволяє ефективно контролювати енергетичні витрати.

=== Планування витрати газу ===

Зона 1: Час нагріву = 40.00 хв, Потужність = 9964.53 кВт, Витрата газу = 871.533 м<sup>3</sup>  
Зона 2: Час нагріву = 32.00 хв, Потужність = 8009.28 кВт, Витрата газу = 560.416 м<sup>3</sup>  
Зона 3: Час нагріву = 40.00 хв, Потужність = 20064.08 кВт, Витрата газу = 1754.876 м<sup>3</sup>  
Зона 4: Час нагріву = 16.00 хв, Потужність = 2824.25 кВт, Витрата газу = 98.808 м<sup>3</sup>  
Зона 5: Час нагріву = 8.00 хв, Потужність = 1657.50 кВт, Витрата газу = 28.994 м<sup>3</sup>  
Зона 6: Час нагріву = 8.00 хв, Потужність = 1657.50 кВт, Витрата газу = 28.994 м<sup>3</sup>

-----  
Загальна витрата газу: 3343.621 м<sup>3</sup>

Рисунок 3.15 - Результат розрахунку витрати газу на основі часу нагріву та потужності в зонах

### 3.3.3 Прогнозування зношення футерівки печі на основі аналізу температурних режимів

Футерівка печі є одним з найважливіших елементів конструкції, що визначає її ефективність, термін служби та витрати на технічне обслуговування. Прогнозування зношення футерівки дозволяє зменшити аварійні зупинки, оптимізувати витрати на ремонт та покращити енергоефективність печі. У цій пропозиції наведено детальний опис методології прогнозування, розрахункової моделі, алгоритмічного підходу та програмної реалізації.

Пропозиція передбачає розробку інтелектуальної системи прогнозування зношення футерівки печі, яка враховує температурні режими окремих зон та їх вплив на швидкість деградації матеріалів. Алгоритм аналізує мінімальні та максимальні температури, обчислює середню температуру та коригує термін служби футерівки залежно від теплового навантаження. Використовуючи математичні моделі та експоненційні залежності, система визначає швидкість зношення та прогнозує залишковий ресурс футерівки для кожної зони. Програмна реалізація в MATLAB дозволяє візуалізувати результати, будувати графіки та формувати рекомендації для планування технічного обслуговування. Інтеграція з SCADA-системою дає змогу автоматизувати моніторинг і своєчасно реагувати на критичні відхилення, підвищуючи ефективність роботи печі та зменшуючи витрати на ремонти.

Завдання: розробити систему прогнозування зношення футерівки печі, яка враховує температурні режими окремих зон і їхній вплив на швидкість деградації матеріалу. Визначення залишкового ресурсу футерівки та автоматичне коригування терміну її служби залежно від умов експлуатації. Алгоритм повинен аналізувати температурні коливання, розраховувати швидкість зношення та прогнозувати необхідність ремонту або заміни футерівки. Система має бути інтегрована в SCADA для

автоматичного моніторингу та управління, що дозволить зменшити аварійні зупинки та оптимізувати витрати на технічне обслуговування.

Вхідні дані.

Температурні режими по зонах:

- $T_{min}$  мінімальна температура у кожній зоні;
- $T_{max}$  максимальна температура у кожній зоні;
- $T_{avg}$  середня температура.

$$T_{avg} = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad (3.21)$$

- початкова товщина футеровки  $D_0$  для кожної зони;
- критична товщина футерівки  $D_{кр}$ , при якій необхідний ремонт;
- базовий термін служби, визначений для  $1200^{\circ}\text{C}$  (еталонна температура);
- час роботи печі.

Математичне забезпечення. Зношення футерівки залежить від температури, термостресу та механічного навантаження. Основне припущення: футерівка деградує внаслідок термічних впливів, і швидкість цього процесу може бути змодельована експоненційним або лінійним законом. Основні математичні рівняння, які використовуються:

1) коригування терміну служби футерівки залежно від температури. Базовий термін служби футерівки приймається для еталонної температури  $1200^{\circ}\text{C}$ . Зі збільшенням температури футерівка швидше деградує, що враховується у моделі:

$$T_{life} = T_{life_{base}} e^{\frac{1200 - T_{avg}}{200} \left( 1 + k_{idle} \frac{T_{idle}}{T_{total}} \right)} \quad (3.22)$$

де  $T_{life}$  – реальний термін служби футерівки в годинах;

$T_{life\_base}$  – базовий термін служби (приймаємо 10 000 годин при  $1200^{\circ}\text{C}$ );

$T_{avg}$  – середня температура футерівки у відповідній зоні;

$T_{idle}$  – сумарний час простою, якщо піч працює без зупинок  $T_{idle}=0$ ;

$T_{total}$  – загальний час роботи печі;

$k_{idle}$  – коефіцієнт впливу простою (від 0 до 1, залежно від типу футерівки);

2) швидкість зношення футерівки:

$$V_{зношення} = \frac{D_0 - D_{кр}}{T_{life}} \quad (3.23)$$

де  $V_{зношення}$  – швидкість зношення футеровки;

$D_0$  - початкова товщина футеровки для кожної зони;

$D_{кр}$ - критична товщина футерівки, при якій необхідний ремонт;

$T_{life}$  – прогнозований термін служби футерівки;.

формула дозволяє оцінити, наскільки швидко футерівка зношується, та прогнозувати момент її критичного стану, в таблиці 3 наведено значення початкової і критичної товщини футеровки.

Таблиця 3.3 - Значення початкової і критичної товщини футеровки

Зона печі	Початкова товщина D0 (мм)	Критична товщина Dкр (мм)	Відносне зношення (%)
1-2 зони	250	150	40%
3 зона	300	150	50%
4 зона	280	160	43%
5-6 зони	270	150	45%

3) прогнозована товщина футерівки у часі, для кожної зони розраховується функція зміни товщини футерівки у часі:

$$D(t) = D0 - V_{\text{зношення}} t \quad (3.24)$$

де  $D(t)$  – прогнозована товщина футерівки у момент часу  $t$ ;  
 $t$  – час роботи печі (години).

Якщо  $D(t) > D_{\text{кр}}$  – футерівка в нормі.

Якщо  $D(t) \sim D_{\text{кр}}$  – необхідно запланувати ремонт.

Якщо  $D(t) \leq D_{\text{кр}}$  - необхідно зупиняти піч і проводити ремонт футерівки;

4) врахування температурних стрибків під час простою, коли піч зупиняється, температура футерівки падає. Це враховуємо як фактор термостресу:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T_{\text{idle}} \quad (3.25)$$

де  $\sigma$  - напруження в футерівці (Па);

$E$  - модуль пружності футерівки (ГПа);

$\alpha$  - коефіцієнт теплового розширення футерівки;

$\Delta T_{\text{idle}}$  - зміна температури між зупинкою та повторним запуском.

Якщо цей термострес перевищує межу міцності футерівки, він прискорює зношення, і необхідно ввести коригуючий коефіцієнт для швидкості деградації:

$$V_{\text{зношення}} = V_{\text{зношення}} \left( 1 + \frac{\sigma}{\text{межа } \sigma} \right) \quad (3.26)$$

Це означає, що занадто часті зупинки і пуски можуть збільшувати швидкість деградації футерівки, незважаючи на те, що загальний час роботи зменшується.

Основні кроки алгоритму:

- 1) зчитування вхідних даних: температурні режими ( $T_{min}$ ,  $T_{max}$ ), товщина футерівки ( $D_0$ ), час роботи, час простою ;
- 2) обчислення середньої температури  $T_{avg}$  для кожної зони;

$$T_{avg} = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad (3.27)$$

- 3) коригування терміну служби футерівки  $T_{life}$  за температурою;

$$T_{life} = T_{lif} e_{base} e^{\frac{1200 - T_{avg}}{200} (1 + k_{idle} \frac{T_{idle}}{T_{total}})} \quad (3.27)$$

- 4) розрахунок швидкості зношення футеровки –  $V_{зношення}$ ;

$$V_{зношення} = V_{зношення} \left( 1 + \frac{\sigma}{\text{межа } \sigma} \right) \quad (3.28)$$

облік впливу простою та термостресу.

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T_{idle} \quad (3.29)$$

Якщо  $\sigma > \sigma_{\text{межа}}$ ,

$$V_{зношення}^* = \left( 1 + \frac{\sigma}{\sigma_{\text{м}}} \right) \quad (3.30)$$

- 5) прогноз товщини футерівки у часі;

$$D(t) = D_0 - V_{зношення} t \quad (3.31)$$

6) перевірка критичних рівнів  $D(t)$  да  $D_{кр}$ : якщо футеровка в нормі - продовжити роботу, якщо футеровка досягла критичної межі - запланувати ремонт, якщо футерівка нижче критичної товщини - терміновий ремонт.

Програмне забезпечення. Для реалізації алгоритму прогнозування зношення футерівки та інтеграції в SCADA-систему використовується наступне програмне забезпечення: SCADA-система: Siemens WinCC 8.0, MATLAB (версія R2021a, або новіша), OPC UA Server у WinCC.

SCADA-система: Siemens WinCC 8.0. Виконуваний функціонал: отримання даних про температуру футерівки та час роботи, відображення результатів прогнозу футерівки у вигляді графіків та діаграм, надсилання аварійних повідомлень при критичному зношенні, інтеграція з OPC UA Server для взаємодії з MATLAB.

WinCC 8.0 SCADA виконує моніторинг технологічного процесу печі, отримуючи дані з датчиків: температура футерівки по зонах печі ( $T_{min}$ ,  $T_{max}$ ,  $T_{avg}$ ), час роботи печі ( $T_{total}$ ) та час простою ( $T_{idle}$ ). Ці параметри передаються через OPC UA сервер WinCC, який забезпечує доступ до даних для зовнішніх обчислювальних систем

MATLAB (версія R2021a, або новіша). Призначення: в іконання математичних розрахунків зносу футерівки, читання технологічних параметрів із WinCC через OPC UA, обчислення залишкового ресурсу футерівки у годинах, передача прогнозів назад у WinCC через OPC UA.

Основні формули для виконання розрахунків наведено в розділі «Алгоритмічне забезпечення». Виконується обчислення середньої температури у кожній зоні, коригування терміну служби футеровки, залежно від температури. Основна функція для розрахунку в MATLAB – calculateWearPrediction.

Функція calculateWearPrediction в MATLAB обчислює залишковий час до досягнення критичного зносу для матеріалу, що деградує з часом. Вона враховує початкову та критичну товщину, температурні впливи, а також коригує термін служби залежно від зовнішніх факторів, таких як простої, або змінні експлуатаційні умови. У підсумку функція повертає прогнозований час до необхідного технічного обслуговування або заміни матеріалу.

В контексті нашої задачі функція виконує прогнозування залишкового ресурсу футерівки в MATLAB, розраховує, скільки часу залишилося до її критичного зносу на основі температурних режимів і часу роботи печі. Вона використовує середню температуру футерівки для коригування її терміну служби, враховуючи вплив простоїв. Далі визначається швидкість зношення футерівки, і на цій основі обчислюється залишковий час до ремонту. Це дозволяє заздалегідь планувати технічне обслуговування та уникати аварійних зупинок виробництва. Скрипт для розрахунку наведено в Додатку И.

Для демонстрації роботи алгоритму прогнозування було виконано розрахунок залишкового ресурсу футерівки для різних зон печі. У таблиці відображено відпрацьований час, залишковий час до ремонту та статус футерівки. Візуалізація у вигляді кругових діаграм допомагає швидко оцінити стан кожної зони: зелений сегмент показує, скільки часу футерівка ще може працювати, жовтий вказує, що зона наближається до критичного зносу, а червоний сигналізує про термінову необхідність ремонту. Наприклад, у зоні 1-2 залишковий час становить лише 25 годин, що підтверджується червоною діаграмою та статусом "Терміновий ремонт". Це дозволяє операторам заздалегідь планувати технічне обслуговування та уникати аварійних зупинок. На рисунку 3.16 представлено результати прогнозування зношення футеровки печі для різних зон на основі аналізу температурних режимів.

Перший ряд діаграм демонструє ситуацію на початковому етапі експлуатації печі після оновлення футеровки.

Зона	Відпрацьовано (год)	До ремонту (год)	Статус
{'1-2'}	0	2265.7	"Стабільна робота"
{'3' }	0	3269.6	"Стабільна робота"
{'4' }	0	3272.7	"Стабільна робота"
{'5-6'}	0	2928.1	"Стабільна робота"



Зона	Відпрацьовано (год)	До ремонту (год)	Статус
{'1-2'}	1570	695.73	"Стабільна робота"
{'3' }	1570	1699.6	"Стабільна робота"
{'4' }	1570	1782.7	"Стабільна робота"
{'5-6'}	1570	1358.1	"Стабільна робота"

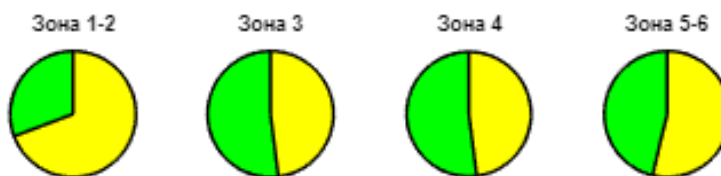


Рисунок 3.16 - Результати прогнозування зношення футерівки

Друга група діаграм (нижні кола) показує ситуацію після певного часу роботи (1570 годин). Система прогнозування дозволяє оцінити стан футерівки та своєчасно запланувати ремонтні роботи.

Для обміну даними між між MATLAB і SCADA використовуємо OPC UA Server у WinCC.OPC UA – це відкритий стандарт для передачі даних між промисловими системами.

У даному проекті WinCC 8.0 виступає як OPC UA Server, надаючи доступ до ключових технологічних параметрів печі, таких як температурні режими, час роботи та залишковий ресурс футерівки. MATLAB, у свою чергу, працює як OPC UA Client, отримуючи дані в реальному часі, виконуючи розрахунки прогнозу зношення футерівки та повертаючи результати (час до ремонту, статус футерівки) назад у SCADA. Ця інтеграція дозволяє операторам отримувати аналітичні прогнози безпосередньо на HMI WinCC, автоматизуючи процес планування технічного обслуговування.

### 3.3.4 Проектування екранної форми HMI нагрівальника

HMI (Human-Machine Interface) – це інтерфейс взаємодії оператора з машиною або процесом. У промислових системах HMI використовується для моніторингу, керування, візуалізації та аналізу технологічних процесів. Існує чимало програмних забезпечень за допомогою яких можна налаштовувати HMI-екрани, зокрема це: SCADA Siemens WinCC; MATLAB App Designer; PLC-дисплеїв; LabVIEW; Node-RED, Ignition HMI; Python + Dash / PyQt.

Основні функції HMI:

- візуалізувати параметри технологічного процесу – температури, тиск, витрати газу;
- налаштовувати параметри процесу – оператор може вводити задані значення;
- контролювати стан обладнання – відображати режими роботи, аварійні ситуації;
- аналізувати історичні дані – графіки температур, тиску, витрати ресурсів;
- генерувати звіти та сигнали – автоматичне повідомлення про відхилення;

Компоненти екранних форм HMI:

- графічні віджети (Gauges, Charts, Indicators);
- текстові поля (Labels, Numeric Fields);
- кнопки керування (Buttons, Switches);
- логування подій та аварій (Log Panels);
- індикатори стану (Lamps, Alarms);
- графіки та таблиці (Trends, Data Tables).

Вимоги до проектування HMI:

- використання інтуїтивно зрозумілих знаків;
- стислий але достатній об'єм інформації;
- гнучкість у налаштуванні;
- кольорове супроводження інформації;
- реальний час оновлення інформації без затримок.

Ефективність вибору програмного забезпечення для реалізації залежить від конкретних завдань, масштабу системи та вимог до інтеграції з обладнанням. Для наукового моделювання та тестування найбільше підходить MATLAB App Designer, в межах класичного промислового підприємства, де важлива стабільність та безпека, найбільш оптимальним рішенням буде WinCC, що добре інтегрується з контролерами та ПЗ TIA Portal. Одже для нашого об'єкту - методична 6-зонна піч з крокуючими балками для проектування екранних форм найкращим буде використання ПЗ WinCC.

Структура екранних форм HMI для методичної печі у SCADA-WinCC.

Головний екран відображає схему методичної печі, основні параметри печі, кнопки швидкого реагування та переходу на інші сторінки.

На рисунку 3.17 відображено головну екранну форму моніторингу та керування нагрівальним процесом печі. Ліва частина містить індикатори температури для різних зон нагріву, де оператор може бачити встановлені та фактичні значення температури, а також статус регулювання. У центрі показані температури пірометрів, які контролюють рівномірність нагріву заготовок. Праворуч розташовані графіки тиску, подачі газу та стан рекуператора, що відповідає за ефективне використання тепла. У нижній частині знаходиться журнал подій, що фіксує попередження та аварійні ситуації. Загальний витрата газу та тиск у системі відображаються у спеціальних інформаційних блоках для швидкого аналізу оператором.

Екрани зон нагріву (1-6) з відображенням температурного профілю кожної зони. На рисунку 3.18 наведено екранну форму зони нагріву методичної печі з відображення температурного профілю, витрат газу, повітря, показника співвідношення газ-повітря.

Екран охолоджувальної системи.

Екран роботи рекуператора. Інформація про стан роботи рекуператора та витрати повітря для горіння наведено на рисунку 3.19.

Екран контролю витрат енергоресурсів з інформацією про витрати газу, електроенергії, повітря, Аналіз ефективності роботи печі, прогнозування витрат на основі історичних даних.

Екран аварійних повідомлень наведено на рисунку 3.20.

Екран регулювання та керування технологічним процесом з графічним відображення руху заготовок у печі, продуктивністю печі і стана, журналом подій.

Окремим розділом слід виділити управління рівнями доступу.

По рівням доступу слід виділити наступні рівні:

- оператор: доступ до перегляду всієї інформації і до змін технологічних параметрів, передбачених технологічним процесом;
- інженер – доступ до налаштування конфігурації системних параметрів, калібрування датчиків, налаштування PID;
- адміністратор – повний перелік повноважень по налаштуванню.

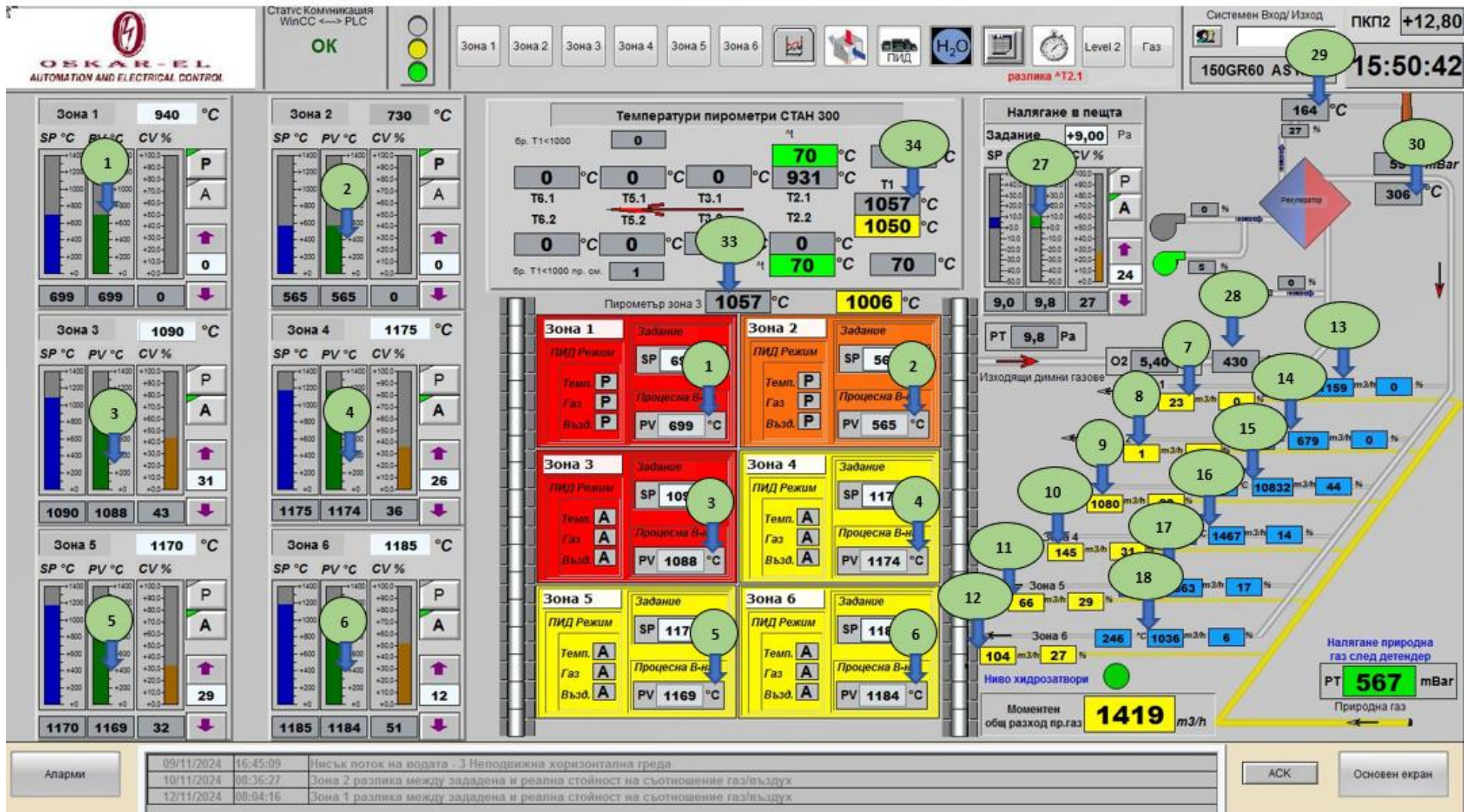


Рисунок 3.17 - Головний екран HMI системи керування нагрівальною піччю

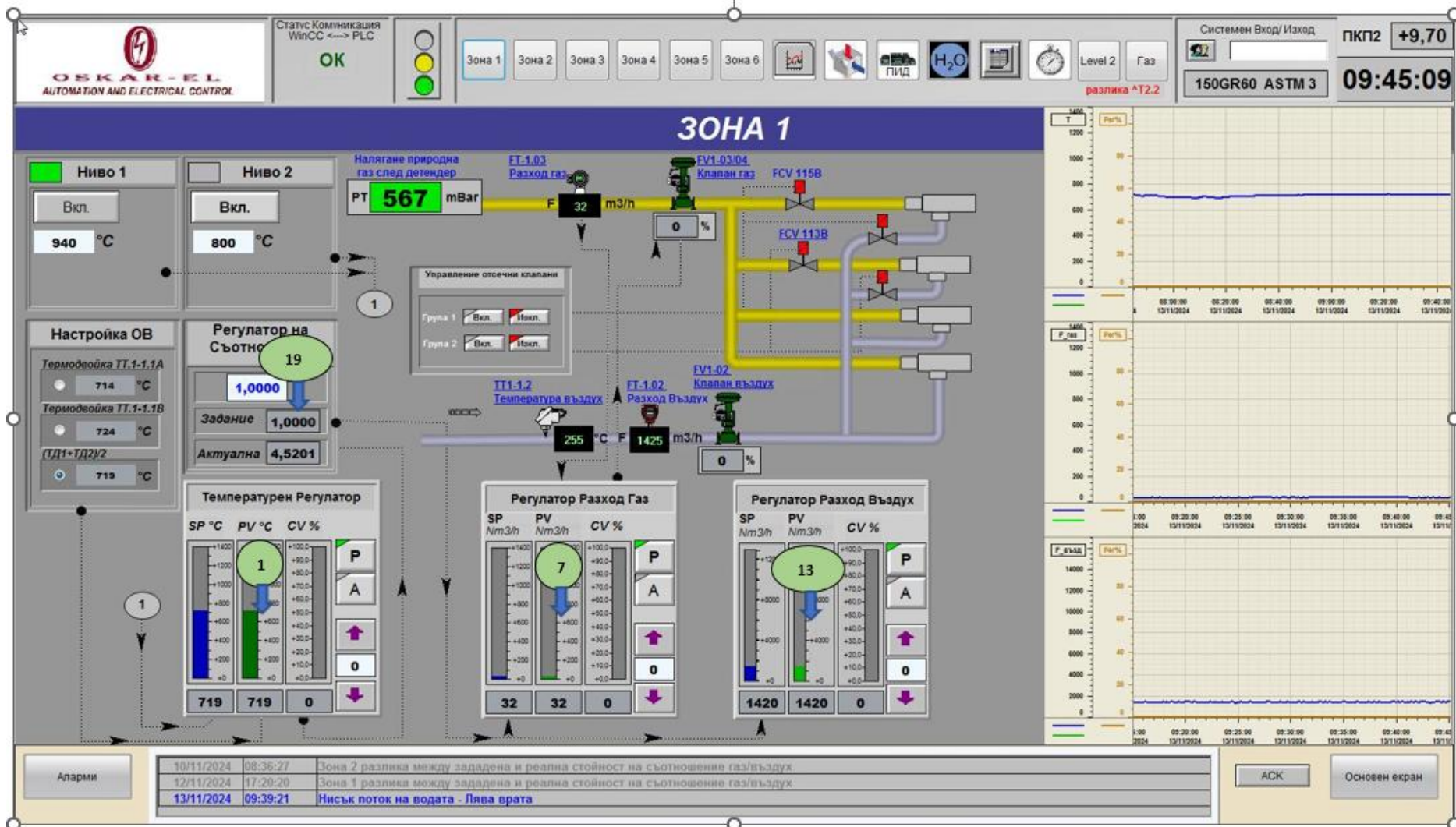


Рисунок 3.18 - Екран з відображенням зон нагріву методичної печі

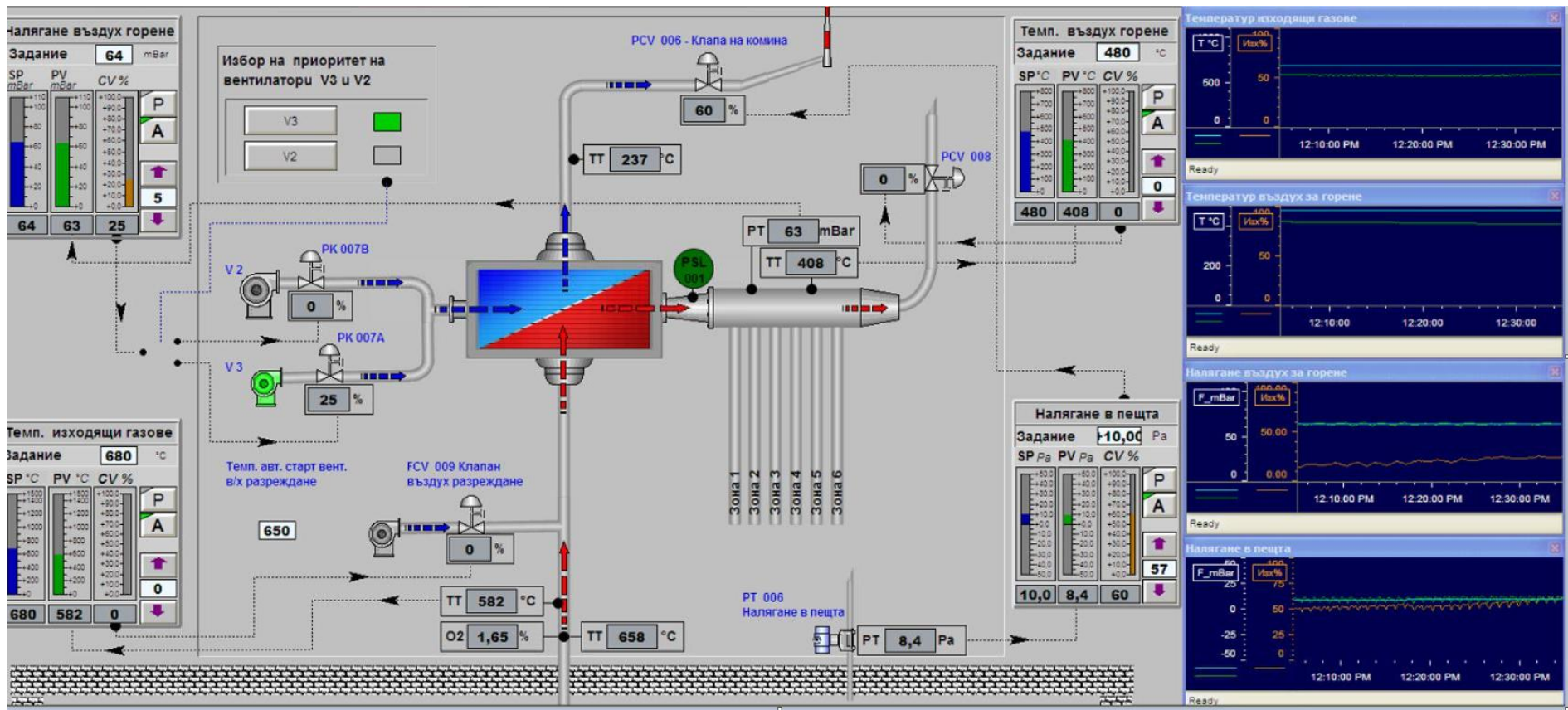


Рисунок 3.19 - Екран з відображенням роботи рекуператора

Блокировки					
Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5	Зона 6
<b>Температурен регулатор</b>	<b>Температурен регулатор</b>	<b>Температурен регулатор</b>	<b>Температурен регулатор</b>	<b>Температурен регулатор</b>	<b>Температурен регулатор</b>
Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>
Регулатор Газ в автомат. режим <input checked="" type="checkbox"/>	Регулатор Газ в автомат. режим <input type="checkbox"/>	Регулатор Газ в автомат. режим <input checked="" type="checkbox"/>	Регулатор Газ в автомат. режим <input checked="" type="checkbox"/>	Регулатор Газ в автомат. режим <input checked="" type="checkbox"/>	Регулатор Газ в автомат. режим <input checked="" type="checkbox"/>
Регулатор Въздух в автомат. реж <input checked="" type="checkbox"/>	Регулатор Въздух в автомат. реж <input type="checkbox"/>	Регулатор Въздух в автомат. реж <input checked="" type="checkbox"/>	Регулатор Въздух в автомат. реж <input checked="" type="checkbox"/>	Регулатор Въздух в автомат. реж <input checked="" type="checkbox"/>	Регулатор Въздух в автомат. реж <input checked="" type="checkbox"/>
Термодвойка 1 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 1 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 1 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 1 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 1 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 1 ОК <input checked="" type="checkbox"/>
Или <input checked="" type="checkbox"/>	Или <input checked="" type="checkbox"/>	Или <input checked="" type="checkbox"/>	Или <input checked="" type="checkbox"/>	Или <input checked="" type="checkbox"/>	Или <input checked="" type="checkbox"/>
Термодвойка 2 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 2 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 2 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 2 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 2 ОК <input checked="" type="checkbox"/>	Термодвойка 2 ОК <input checked="" type="checkbox"/>
Не е достигната гранична температура 800 C <input checked="" type="checkbox"/>	Не е достигната гранична температура 800 C <input type="checkbox"/>	Не е достигната гранична температура 800 C <input checked="" type="checkbox"/>	Не е достигната гранична температура 800 C <input checked="" type="checkbox"/>	Не е достигната гранична температура 800 C <input checked="" type="checkbox"/>	Не е достигната гранична температура 800 C <input checked="" type="checkbox"/>
<b>Регулатор газ</b>	<b>Регулатор газ</b>	<b>Регулатор газ</b>	<b>Регулатор газ</b>	<b>Регулатор газ</b>	<b>Регулатор газ</b>
Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>
Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>
Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>
<b>Регулатор въздух</b>	<b>Регулатор въздух</b>	<b>Регулатор въздух</b>	<b>Регулатор въздух</b>	<b>Регулатор въздух</b>	<b>Регулатор въздух</b>
Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп <input checked="" type="checkbox"/>
Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>
Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>
<b>Темп изходящи газове</b>	<b>Налягане въздух горене</b>	<b>Темп въздух горене</b>	<b>Налягане в пещта</b>	<b>Аварийен Стоп</b>	
Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - над Мах ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Сумарен стоп D108 <input checked="" type="checkbox"/>	Въздух горене <input checked="" type="checkbox"/>
Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Грешка в измерването - под Мин ст-с <input checked="" type="checkbox"/>	Аварийен стоп D109A <input checked="" type="checkbox"/>	Авар. Вода <input checked="" type="checkbox"/>
					Въздух КИП <input checked="" type="checkbox"/>
					Газ високо Р <input checked="" type="checkbox"/>
					Въздух КИП <input checked="" type="checkbox"/>
					Газ ниско Р <input checked="" type="checkbox"/>
<b>Вода</b>					
Обща аларма вода <input type="checkbox"/>					

Рисунок 3.20 - Екран з відображенням аварійних повідомлень

#### 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ

Капітальні інвестиції на модернізацію об'єкта:

- 1) оновлення SCADA-системи до версії WinCC v8.0 ΔIC: 50 000 \$.
  - 2) заміна контролерів Siemens S7-300 на Siemens S7-1500 30 000 \$.
  - 3) закупка нового серверного обладнання і промислових ПК 30 000 \$
  - 4) закупка промислових екранів для операторів - 10 000 \$
  - 5) додаткові витрати на монтаж, комунікацію, навчання – 1 000 \$
- Всього: 121 000 \$

Розрахунок економічного ефекту від модернізації: оновлення SCADA-системи до сучасної версії WinCC v8.0, а також впровадження запропонованих алгоритмів аналізу дозволить підвищити продуктивність. Розрахуємо прогнозний процент зростання продуктивності печі. Середній фактичний час нагріву заготовки становить 210 хвилин, при цьому існує збільшений часу нагріву, який пов'язан з темпом роботи прокатного стану. Припустимо, що оновлення SCADA-системи і впровадження прогнозуючих алгоритмів дозволять зменшити на середній час нагріву на 1 хвилину, збільшення продуктивності при цьому становить:

$$\text{Збільшення продуктивності} = \frac{1}{210} = 0,5\% \quad (4.1)$$

Виконаємо розрахунок чистого прибутку від збільшення продуктивності на 0,5%:

- початковий обсяг виробництва: 500 000т/рік.
- собівартість продукції: 250 \$/т
- ціна реалізації: 400 \$/т
- додатковий дохід=2 500\*400\*= 1 000 000\$

$$\begin{aligned} \text{Собівартість додаткової продукції} &= 250 \frac{\$}{\text{т}} = & (4.2) \\ 2\,500 * 250 &= 625\,000\$ \end{aligned}$$

Чистий прибуток=Додатковий дохід – Собівартість

$$\text{Чистий прибуток} = 1\,000\,000 - 625\,000 = 375\,000\$ \quad (4.3)$$

Розрахуємо чистий економічний ефект:

$$\text{Чистий економічний ефект} = \text{Прибуток} - \text{Собівартість продукції} \quad (4.4)$$

$$\text{Чистий економічний ефект} = 375\,000 - 121\,000 = 254\,000 \$$$

Визначимо рентабельність інвестицій :

$$RI = \frac{\text{Чистий економічний ефект}}{\text{Капітальні інвестиції}} = \frac{254000}{121000} * 100 = 209,9\% \quad (4.5)$$

Рентабельність 209,9% свідчить про високу окупність проекту.

Визначимо термін окупності:

$$\text{Термін окупності} = \frac{\text{Щорічний чистий економ ефект}}{\text{Капітальні інвестиції}} = \frac{121000}{375000} = 0,32 \text{ року} = 4 \text{ міс.} \quad (4.6)$$

Тобто знадобиться менше ніж 4 місяців, щоб інвестиції окупились.

Розрахуємо чистий приведений дохід - показує, наскільки вигідним буде проект з урахуванням дисконтування (вартості грошей у часі):

$$NPV = \sum \frac{\text{Грошовий потікт}}{(1+r)^t} - \text{Капітальні інвестиції} \quad (4.7)$$

де  $NPV$  – чистий приведений дохід

$r$  – ставка дисконту ( 10%)

$t$  – кількість років

$$NPV = \frac{375000}{(1+0.1)^1} + \frac{375000}{(1+0.1)^2} + \frac{375000}{(1+0.1)^3} - 121000 \quad (4.8)$$

$NPV$  буде значно більшим за 0, що підтверджує вигідність модернізації.

Внутрішня норма рентабельності ( $IRR$  )- це рівень прибутковості проекту, при якому  $NPV$  дорівнює 0. Якщо  $IRR >$  вартості капіталу (наприклад, 10%), то проект слід реалізовувати. За розрахунками  $IRR$  буде значно вищою за 100%, що говорить про високу дохідність інвестицій.

Коефіцієнт рентабельності ( $RI$ ):

$$RI = \frac{\text{Чистий прибуток}}{\text{Капітальні витрати}} = \frac{375000}{121000} = 3.1 \quad (4.9)$$

Це означає, що на кожен вкладений 1\$ отримуємо майже 3 \$.

Операційна рентабельність - показує, яку частку від загального доходу становить прибуток:

$$OM = \frac{\text{Чистий економічний ефект}}{\text{Загальний економічний ефект}} \times 100\% \quad (4.10)$$

$$OM = \frac{273000}{375000} \times 100\% = 69.3\% \quad (4.11)$$

Операційна рентабельність 69% – це дуже високий показник.

Висновки: проект окупиться дуже швидко, проект економічно доцільний. Модернізація АСУ ТП методичної 6-зонної печі з крокуючими балками – дуже вигідна та швидкоокупна інвестиція.

## ВИСНОВКИ

В рамках виконання роботи було проведено аналіз існуючої автоматизованої системи управління технологічним процесом нагріву металу в методичній печі, визначено її недоліки та розроблено комплекс заходів з модернізації. Виконано обґрунтування оновлення програмного забезпечення для SCADA-системи, оновлення екранних форм, встановлення нових промислових екранів, комп'ютерів та оновлення контролерів. Це дозволить підвищити точність управління та мінімізувати простої. Також виконані розрахунки по впровадженню алгоритмів оптимізації: співвідношення газ-повітря, оптимізація часу нагріву заготовок з урахуванням швидкості прокатки та прогнозуванню зношення футеровки, що сприятиме зниженню витрат енергоресурсів.

Розраховано економічний ефект від модернізації, який включає економію на простої, паливі та додатковий дохід від збільшення продуктивності. Встановлено, що загальний фінансовий ефект значно перевищує початкові інвестиції, а термін окупності проекту складає менше ніж 7 місяців. Висока рентабельність модернізації підтверджує доцільність її впровадження, що забезпечить підприємству технологічну стійкість, підвищення якості продукції та конкурентоспроможність.

Основні вигоди від модернізації досягаються за рахунок скорочення простоїв, зменшення витрат на енергоресурси та підвищення продуктивності виробництва. Оновлення SCADA-системи дозволяє покращити контроль за технічним станом обладнання, що мінімізує аварійні зупинки та знижує втрати часу. Окрім фінансових переваг, модернізація підвищує технологічну надійність процесу, зменшує ймовірність людських помилок та покращує контроль виробничих параметрів. Загалом, проект модернізації дозволяє підприємству знизити витрати, підвищити якість продукції та збільшити його конкурентоспроможність у галузі.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рибальченко М.О, Маначин І.О, Потап О.Ю, Шибакінський В.І Розробка комплексу для дослідження систем управління на базі SCADA-системи та прикладного пакету візуального моделювання. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2022. Том 33 (72) №6, с.122-129 DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/21>.
2. Добровольська Л.О., Карпенко В.Є. Удосконалення системи автоматичного управління котлом-утилізатором методичної печі. The scientific heritage, Budapest, Hungary, 2021. VOL1, №78, с.8-10: URL: <https://www.scientific-heritage.com/wp-content/uploads/2021/11/The-scientific-heritage-No-78-78-2021-Vol-1.pdf>
3. Федь Т.І., Батюк С.Г. Імітаційне моделювання АТК промислової логістики на основі програмного забезпечення SIMIO: Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація, 2020, том 31 (70) ч.1 №6 с.150-155 DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-1/25>.
4. Амурський Є.О., Кравченко В.П. Система автоматичної корекції температури зон методичної печі при коливаннях типу (геометричних розмірів) і темпу прокатки нагрітих заготовок. Наука та виробництво, 2020, Вип. 23, с.298-№ 23 (2020): НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990232020>.
5. Viktor Aulin, Mykola Bosiy, Volodymyr Kropivnyi, Olexandr Kuzyk, Alena Kropivna Mathematical modeling of heat exchange processes when heating metal in a furnace. Вісник Тернопільського національного технічного університету, 2021 №4 с.123 -130 DOI: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu).
6. Добровольська Л.О., Шкапа Г.О.. Модернізація методичної печі на основі використання безполум'яних пальників. The scientific heritage, Vol 1, 2021, №78 с.10-13 URL: <https://www.scientific-heritage.com/wp-content/uploads/2021/11/The-scientific-heritage-No-78-78-2021-Vol-1.pdf>
7. Черевко О.О., Щербаків С.В. Комп'ютерна модель штучної нейронної мережі для автоматизованої системи контролю та діагностики технологічного процесу нагріву слябів у методичній печі. Наука та виробництво, 2024, Вип. 27, с.12-18 DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990272024>.
8. Зінченко В.Ю., Іванов В.І., Нестеренко Т.М., Чепрасов О.І., Каюков О.М. Про управління стадійним спалюванням палива в методичних печах. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2018. Том 29 (68) №4, с.80-84  
URL: [https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/4\\_2018/part\\_2/4-2\\_2018.pdf](https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/4_2018/part_2/4-2_2018.pdf).
9. Єрофєєва А.А. Підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей шляхом використання керованих електричних полів. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за

спеціальністю «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» – Національна металургійна академія України, м. Дніпро, 2021 р. URL: [http://212.3.124.102/file/diss\\_yerofieieva.pdf](http://212.3.124.102/file/diss_yerofieieva.pdf)

10. Перерва В.Я., Форись С.М., Федоров С.С., Усенко А.Ю. Підвищення ефективності енергоспоживання у сортопрокатному виробництві. Системні технології, 2020, №4 (129), с.74-84

11. Сімкін А.І., Потьомкін В.В. Проблеми роботи нагрівальних печей в умовах дефіциту палива. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2000, Вип.10, с.252-256.

12. Степкін В.В. Система автоматичної оптимізації процесу нагріву металу в методичних печах. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю «Автоматизація процесів управління» – Національний гірничий університет, м. Дніпро, 2010 р. URL: <https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/124/A13916.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

13. Rahul Neel Mani. Tata Steel Mission 2025: Lead the Digital Steelmaking. URL: <https://www.cio.inc/tata-steel-mission-2025-lead-digital-steelmaking-a-19996>

14. Volker Lang, Marcus van Marwick. Smart sensor technology for steel production. Офіційний сайт thyssenkrupp AG. [thyssenkrupp.com website](https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/company/digitalization/smart-factory/smart-factory.html), 2025 URL: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/company/digitalization/smart-factory/smart-factory.html>

15. World's first fossil-free hydrogen plant revolutionizes steel. Офіційний сайт Ovako.2024 Ovako AB. All rights reserved URL: <https://www.ovako.com/en/about-ovako/worlds-first-fossil-free-hydrogen-plant-for-steel-heating/>

## ДОДАТОК А

### ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДИЧНОЇ ПЕЧІ З КРОКУЮЧИМ ПОДОМ

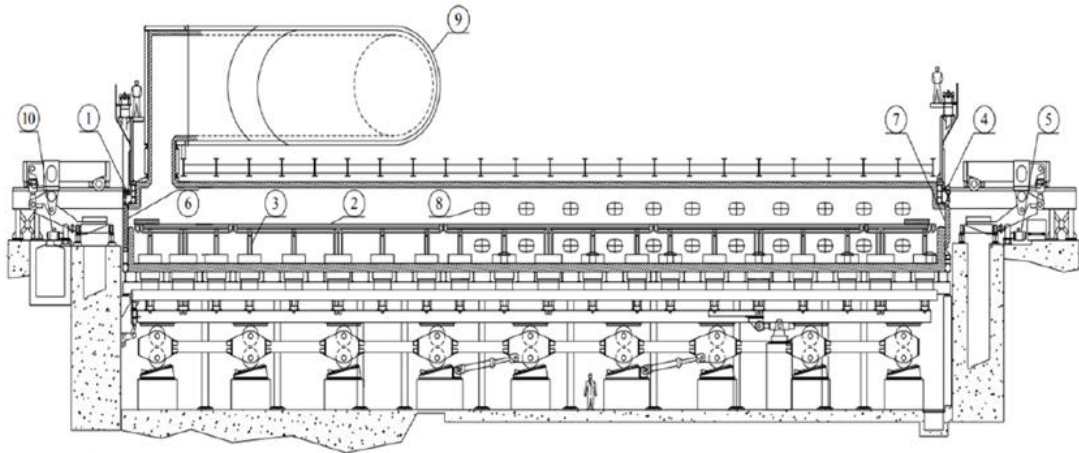


Рисунок А.1 Схема методичної печі з крокуючими балками:  
1- завантажувальна машина; 2- крокуючі балки (рухомі/нерухомі); 3 - стояки подових труб; 4 - механізм розвантажувальної машини; 5- розвантажувальний рольганг; 6 - завантажувальні двері печі; 7 - вивантажувальні двері печі; 8 - оглядові вікна; 9 – рекуператор; 10 – завантажувальний рольганг

Основні частини конструкції печі.

Металева конструкція складається з рухомої і нерухомої частин, які забезпечують стабільність і рух крокуючого поду. Нерухома частина закріплена на залізобетонному фундаменті. Рухома частина складається з рам, що забезпечують вертикальний і горизонтальний рух для переміщення заготовок.

Пічна камера. Основні характеристики:

- корисна довжина камери: 28 500 мм.
- корисна ширина між стінами: 12 880 мм.
- висота камери:

У зонах з вогнетривкими балками: 1500 мм.

У зоні з трубними балками (для нижнього нагріву): 2700 мм.

Елементи конструкції пічної камери

Конструкція підлоги: Складається з нерухомих і рухомих частин.

Трубні балки в зоні нижнього нагріву охолоджуються для зменшення теплового навантаження.

Стіни: Побудовані з вогнетривких матеріалів. Зовнішній шар стін виконаний із щільного вогнетривкого бетону "LIKOFEST 34", а ізоляційний шар із "LIKOFEST L-05". Стіни оснащені входними люками та спостережними отворами для моніторингу процесу.

Звід печі: Має плоску конструкцію, за винятком 2-ї зони, де свід трохи опущений для підвищення ефективності теплообміну. Виготовлений із легких вогнетривких матеріалів, що знижує теплові втрати.

Підлога: Рухомі частини підлоги виконані з охолоджуваних трубних балок, що забезпечують довговічність і зниження теплового навантаження. Нерухомі частини облицьовані щільним вогнетривким бетоном для стійкості до високих температур.

Рухомі балки: Використовуються для переміщення заготовок вздовж печі. Балки виготовлені з вогнетривких матеріалів і забезпечують необхідний тепловий контакт із заготовками.

Особливості пічної камери. Рівномірне нагрівання: Забезпечується конструкцією пальників та розташуванням теплових зон. Радіаційні пальники створюють однорідне температурне поле.

Відведення димових газів. Димові гази виводяться через спеціальні канали, розташовані в зоні нижнього нагріву. Це дозволяє забезпечити оптимальний теплообмін і знизити теплові втрати.

Герметизація: В місцях стику рухомих і нерухомих елементів встановлені водяні затвори, що запобігають витoku димових газів.

Футеровка. Використовується для теплоізоляції, захисту металевих конструкцій та економії палива. Матеріали футеровки: вогнетривка цегла, легкий і щільний вогнетривкий бетон, керамоперліт. Основні елементи: стіни, підлога, звід. Забезпечує мінімальні тепловтрати через огорожувальні поверхні.

Крокуючий под. Основний елемент для переміщення заготовок. Має складний рух: підйом, горизонтальне переміщення, опускання. Рухома частина поду складається з металевих балок із вогнетривкою поверхнею. Нерухома частина виконує функцію опори для заготовок між циклами.

Нагрівальні зони.

Попередній нагрів – 1-2 зони : Верхні та нижні зони забезпечують початкове нагрівання металу.

Основний нагрів 3 зона: Найінтенсивніше нагрівання до заданої температури.

Вирівнювальні зони 4-6 зони: Доводять температуру заготовок до однорідного рівня.

Технологічні характеристики печі по зонам наведено в таблиці А1

Кінцева температура підігріву - 1250 °С - для конструкційних вуглецевих і низьколегованих сталей. 1150 °С - для легованих сталей. Ємність печі – 322 т. Теплова потужність - 47,392 МВт ( $40,75 \cdot 10^6$  ккал/год).

Пальники.

Радіаційні пальники забезпечують рівномірне нагрівання заготовок без контакту з полум'ям. Довгополуменеві пальники використовуються в нижніх зонах для покращення конвективного теплообміну. Типи пальників: BFM-G (плоскополуменеві) та GBR-G (довгополуменеві).

Таблиця А1- Технологічні характеристики печі по зонам

№ зони	Нагрівальна зона	Витрата газу м <sup>3</sup> /сек(нм <sup>3</sup> /ч)		Пальники			
				Місце	Потужність кВт	Кількість	Тип
1	Верхнє попереднє нагрівання	0,392	1410	Свод	430	32	радіаційний
2	Нижнє попереднє нагрівання	0,314	1130	Стіни	2765	4	факельний
3	Верхнє нагрівання	0,711	2560	Свод	627	40	радіаційний
4	Вирівнювання центральне	0,111	400	Свод	325	12	радіаційний
5	Вирівнювання зліва	0,056	200	Свод	325	6	радіаційний
6	Вирівнювання справа	0,056	200	Свод	325	6	радіаційний

Система подачі повітря та газу.

Повітря для горіння підігрівається в рекуператорі. Газорозподільна система забезпечує регульовану подачу природного газу до пальників.

Система рекуперації тепла:

Відбирає тепло від димових газів і передає його повітря для горіння. Знижує витрати палива і підвищує енергоефективність.

Вентиляція та охолодження.

Вентилятори охолоджують димові газу, запобігаючи перегріву рекуператора. Система відведення окалини охолоджує заготовки і видаляє окалину з підлоги печі.

Димоходи.

Забезпечують відведення димових газів на висоту до 80 м для їх розсіювання. У димарі встановлений рекуператор для додаткового зниження теплових втрат.

Технічні характеристики:

- нагрівний матеріал: конструкційні вуглецеві, низьколеговані та леговані сталі;

- температура нагріву заготовки: 1150-1250 °С в залежності від типу сталі;

- температурний режим печі: 600 -1250 °С в залежності від зони, максимальна допустима температура -1400 °С;

- вмістимось печі: 322 т

Продуктивність печі:

- номінальна продуктивність: 75-120 т/год в залежності від типу сталі і розміру заготовки;

- річна продуктивність: 600 000 - 1 000 000 т в залежності від режиму роботи.

В таблиці А.2 наведено продуктивність печі в залежності від розміру заготовки та марки сталі.

Таблиця А.2 - Продуктивність печі в залежності від розміру заготовки та марки сталі

Переріз	Продуктивність, т/год	Марка сталі
120x120 мм	75-80	Леговані сталі
125x125 мм	80-95	Конструкційні вуглецеві, низьколеговані сталі
200x200 мм	120	Конструкційні вуглецеві, низьколеговані сталі

Енергетична ефективність:

- основне паливо: природний газ;

- витрати палива: 100-200 м<sup>3</sup>/год в залежності від навантаження;

- споживання електроенергії: 50-100 кВт год

Ефективність роботи:

- тривалість безперервної роботи: 7200 – 8000 год/рік

Розміри заготовок:

Розміри заготовок наведено в таблиці А.3.

Таблиця А.3 – Розміри заготовок

200 X 200 X (6 000 - 12 000) мм	1884 - 3768 кг
120 X 120 X (6 000 - 12 000) мм	678 - 1356,5 кг
125 X 125 X (6 000 - 12 000) мм	736 - 1724 кг

**ДОДАТОК Б**  
**ПЕРЕЛІК І ПАРАМЕТРИ ДАНИХ, ЯКІ ВИМІРЮЮТЬСЯ**

Таблиця Б.1 - Перелік і параметри даних, які вимірюються

Параметр	Пристрій вимірювання	Нормативні встановлені значення	Допустима похибка вимірювання	Призначення
Температура у зоні 1	Термопари типу К (ТТ.1-1.1А, ТТ.1-1.1В)	400–600 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Алгоритм регулювання температури зони
Витрата природного газу у зоні 1	Витратоміри (FT)	50 – 100 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Витрата повітря для горіння у зоні 1	Витратоміри (FT)	500 – 1000 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Температура у зоні 2	Термопари типу К (ТТ1.2-1А, ТТ1.2-1В)	600–800 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Алгоритм регулювання температури зони
Витрата природного газу у зоні 2	Витратоміри (FT)	100 – 200 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Витрата повітря для горіння у зоні 2	Витратоміри (FT)	1000 – 2000 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Температура у зоні 3	Термопари типу К (ТТ1.3-2, ТТ1.4.1А)	1150–1250 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Алгоритм регулювання температури зони
Витрата природного газу у зоні 3	Витратоміри (FT)	150 – 250 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря

Продовження таблиці Б.1 - Перелік і параметри даних, які вимірюються

Параметр	Пристрій вимірювання	Нормативні встановлені значення	Допустима похибка вимірювання	Призначення
Витрата повітря для горіння зони 3	Витратоміри (FT)	1500 – 2500 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Температура у зоні 4	Термопари типу К (ТТ1.4.1А, ТТ1.4.2)	1150–1200 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Алгоритм регулювання температури зони
Витрата природного газу зони 4	Витратоміри (FT)	50 – 100 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Витрата повітря для горіння зони 4	Витратоміри (FT)	500 – 1000 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Температура у зоні 5	Термопари типу К (ТТ1.5.1А, ТТ1.5.1В)	1150–1200 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Алгоритм регулювання температури зони
Витрата природного газу зони 5	Витратоміри (FT)	50 – 100 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Витрата повітря для горіння зони 5	Витратоміри (FT)	500 – 1000 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Температура у зоні 6	Термопари типу К (ТТ1.6.1А, ТТ1.6.1В)	1100–1200 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Алгоритм регулювання температури зони
Витрата природного газу зони 6	Витратоміри (FT)	50 – 100 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря

Продовження таблиці Б.1 - Перелік і параметри даних, які вимірюються

Параметр	Пристрій вимірювання	Нормативні встановлені значення	Допустима похибка вимірювання	Призначення
Витрата повітря для горіння зони 6	Витратоміри (FT)	500 – 1000 нм <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Алгоритм регулювання співвідношення газ-повітря
Температура димових газів на вході в рекуператор	Термопари (ТТ)	700–800 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Контроль параметра, сигналізація
Температура димових газів на виході з рекуператора	Термопари (ТТ)	300–450 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Контроль параметра, сигналізація
Температура нагрітого повітря для горіння	Термопари (ТТ)	400–500 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Алгоритм регулювання нагрітого повітря для горіння
Тиск у пічній камері	Датчик тиску (РТО 06)	0.5–1.5 мбар	±0.5% від робочого діапазону	Контроль параметра, сигналізація
Тиск у магістралі газу	Датчики тиску (РТО)	0.05–0.1 МПа	±0.5% від робочого діапазону	Контроль параметра, сигналізація
Температура води на вході	Термодатчики (ТТ)	15–30 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Контроль параметра, сигналізація
Температура води на виході	Термодатчики (ТТ)	40–60 °С	±1.5°С або 0.4% від вимірюваної величини	Контроль параметра, сигналізація
Витрата охолоджувальної води	Витратоміри (FT)	5–50 м <sup>3</sup> /год	±2% від вимірюваного значення	Контроль параметра, сигналізація
Швидкість руху рольгангу	Енкодери /тахогенератори	0.3–1.5 м/с	±0.1% від вимірюваного значення	Контроль параметра, сигналізація
Тиск масла у гідросистемі	Датчики тиску	100–300 бар	±0.5% від робочого діапазону	Контроль параметра, сигналізація



Продовження таблиці Б.1 - Перелік і параметри даних, які вимірюються

Параметр	Пристрій вимірювання	Нормативн і встановлені значення	Допустима похибка вимірювання	Призначення
Температура масла у гідросистемі	Датчик температури	40–60 °С	±2% від вимірюваного значення	Контроль параметра, сигналізація
Рівень масла у гідросистемі	Датчики рівня	50-100% ємності резервуару	вище мінімального	Контроль параметра, сигналізація
Температура балок	Термодатчики	50–120 °С	±2% від вимірюваного значення	Контроль параметра, сигналізація
Вібрації балок	Вібраційні датчики	Допустимі вібрації: амплітуда вібрацій: 0.2-0.5мм швидкість вібрацій: до 10 мм/с частота вібрацій 10-50Гц	±0.1% від вимірюваного значення	Контроль параметра, сигналізація
Рівень кисню в димових газах	Газоаналізатор	2–4%	±0.5% від вимірюваного значення	Контроль параметра, сигналізація
Рівень CO <sub>2</sub> у викидах	Газоаналізатор	<10%	+1% від допустимого значення	Контроль параметра, сигналізація
Рівень NO <sub>x</sub> у викидах	Газоаналізатор	<100 мг/м <sup>3</sup>	+1% від допустимого значення	Контроль параметра, сигналізація
Рівень твердих часток у викидах	Пиломір	<50 мг/м <sup>3</sup>	+1% від допустимого значення	Контроль параметра, сигналізація
Тиск димових газів	Датчик тиску (РТО 06)	10–50 мбар	±1% від вимірюваного значення	Контроль параметра, сигналізація
Швидкість руху крокуючих балок	Енкодери/тахогенератори	0.3–1.5 м/с	±0.1% від вимірюваного значення	Контроль параметра, сигналізація



Продовження таблиці Б.1 - Перелік і параметри даних, які вимірюються

Параметр	Пристрій вимірювання	Нормативні встановлені значення	Допустима похибка вимірювання	Призначення
Стан рекуператора	Датчик перепаду тиску	відсутність засмічень		Контроль параметра, сигналізація
Стан подачі заготовок	Фотоелементи	відсутність накопичень та збоїв		Контроль параметра, сигналізація

## ДОДАТОК В ПЕРЕЛІК ОБЛАДНАННЯ

Таблиця В.1 Перелік обладнання

Обладнання	Модель	Діапазон вимірювання	Сигнал	Призначення
Датчики температури	Siemens SITRANS TS500	0–1400°C	4–20 мА	Температура газу
	WIKA TR10-C	-50°C до 500°C	4–20 мА	Температура повітря
	Endress+Hauser Omnigrad T TMT82	-200°C до 1200°C	4–20 мА, HART	Температура газу/повітря
	Siemens SITRANS TF280	-50°C до 600°C	4–20 мА, HART	Температура повітря
Датчики витрати	Siemens SITRANS FS230	0–5000 м³/год	4–20 мА, Modbus	Витрата газу
	Endress+Hauser Prosonic Flow G	0–2500 м³/год	4–20 мА, HART	Газові трубопроводи
	ABB Sensyflow FMT500-IG	0–1000 м³/год	4–20 мА, Modbus	Витрата повітря
	KROHNE OPTISWIRL 4200	0–2000 м³/год	4–20 мА, HART	Витрата повітря
Датчики тиску	Siemens SITRANS P320	0–6 бар	4–20 мА, HART	Тиск газу
	Yokogawa EJA530E	0–10 бар	4–20 мА	Тиск газу
	WIKA A-10	0–0.25 бар	4–20 мА	Тиск повітря
	Endress+Hauser Deltabar S PMD55	0–1 бар	4–20 мА, HART	Тиск повітря
Регулюючі клапани	Samson 3730	0–10 бар	4–20 мА, HART	Керування газом/повітрям
	Siemens Acvatix	0–6 бар	0–10 В, 4–20 мА	Керування газом/повітрям
Регулюючі клапани	Samson 3730	0–10 бар	4–20 мА, HART	Регулювання потоку газу
	Siemens Acvatix VVI46	0–6 бар	0–10 В, 4–20 мА	Регулювання потоку повітря
	Belimo RDM24	0–4 бар	0–10 В	Привод для клапанів (повітря)

Продовження таблиці В.1 Перелік обладнання

Обладнання	Модель	Діапазон вимірювання	Сигнал	Призначення
Пневматичні клапани	Festo VZWM	0–6 бар	24 В DC	Подача/відключення газу
	SMC SY3000	0–8 бар	24 В DC	Управління подачею повітря
Електроприводи	Rotork IQT	0–25 бар	4–20 мА, HART	Управління великими клапанами
	AUMA SAR	0–16 бар	Modbus TCP	Привод для запірних клапанів
Контролер PLC	Siemens SIMATIC S7-1500		Аналогові I/O	Обробка сигналів, PID-регулювання
HMI-панелі	SIMATIC HMI KTP700		Profinet	Локальний моніторинг і управління параметрами процесу
SCADA-система	Siemens WinCC Advanced		Profinet	Моніторинг та візуалізація
Мережеве обладнання	Profinet		Profinet	Передача даних між компонентами системи
UPS	Schneider Electric APC			Забезпечення безперебійного живлення критичних компонентів

## ДОДАТОК Г

### ПЕРЕЛІК СИГНАЛІВ, ЯКІ ПЕРЕДАЮТЬСЯ В SCADA СИСТЕМУ

Таблиця Г.1 – Перелік сигналів, які передаються в SCADA систему

№	Категорія сигналу	Опис	Кількість	Тип	Призначення
1	Температурні сигнали	Температура зон печі (по 6 зон)	36	Аналогові	Контроль температури в кожній зоні
2	Температура димових газів	Перед та після рекуператора	2	Аналогові	Оцінка ефективності рекуперації тепла
3	Витрати газу	Подача газу в кожну зону	6	Аналогові	Регулювання витрати газу
4	Витрати повітря	Подача повітря в кожну зону	6	Аналогові	Регулювання витрати повітря
5	Тиск у магістралях	Тиск газу та повітря	6	Аналогові	Моніторинг стану магістралей
6	Тиск у печі	Загальний контроль тиску в печі	1	Аналогові	Моніторинг стабільності процесу
7	Сигнали аварій	Перевищення температури, витрат, тиску	50	Дискретні	Сигналізація про аварійні ситуації
8	Управління клапанами	Управління клапанами подачі газу та повітря	24	Дискретні	Відкриття/закриття клапанів у кожній зоні
9	Управління крокуючими балками	Контроль руху балок	24	Дискретні	Забезпечення синхронізації руху балок
10	Газоаналізатори	Концентрація O <sub>2</sub> та CO <sub>2</sub> у димових газах	2	Аналогові	Оцінка ефективності згорання
11	Охолоджувальна система	Температура та тиск води	8	Аналогові/ дискретні	Моніторинг охолодження печі
12	Електродвигуни та виконавчі механізми	Стан вентиляторів та насосів	6	Дискретні	Контроль роботи виконавчих механізмів

Продовження таблиці Г.1 – Перелік сигналів, які передаються в SCADA систему

№	Категорія сигналу	Опис	Кількість	Тип	Призначення
13	Сигнали рекуперації	Температура перед та після рекуператора	2	Аналогові	Оцінка теплових втрат у рекуператорі
14	Інші сигнали	Локальні аварії та стан обладнання	~20	Дискретні	Моніторинг стану специфічного обладнання
		Всього:	~300		

## ДОДАТОК Д

### ПЕРЕЛІК СПОВІЩЕНЬ, ЯКІ ФОРМУЮТЬСЯ SCADA СИСТЕМОЮ

Таблиця Д.1 - перелік сповіщень, які формуються SCADA системою

Сповіщення	Значення	Категорія
<b>Температурні сповіщення</b>		
Температура в зоні 1 перевищує норму	> 1150°C	Аварія
Температура в зоні 1 нижче мінімального рівня	< 400°C	Попередження
Температура в зоні 1 вище максимального рівня	> 800°C	Попередження
Несправність термопари у зоні 1	Втрата сигналу	Аварія
Температура в зоні 2 перевищує норму	> 1150°C	Аварія
Температура в зоні 2 нижче мінімального рівня	< 400°C	Попередження
Температура в зоні 2 вище максимального рівня	> 900°C	Попередження
Несправність термопари у зоні 2	Втрата сигналу	Аварія
Температура в зоні 3 перевищує норму	> 1300°C	Аварія
Температура в зоні 3 нижче мінімального рівня	< 400°C	Попередження
Температура в зоні 3 вище максимального рівня	> 1250°C	Попередження
Несправність термопари у зоні 3	Втрата сигналу	Аварія
Температура в зоні 4 перевищує норму	> 1300°C	Аварія
Температура в зоні 4 нижче мінімального рівня	< 400°C	Попередження
Температура в зоні 4 вище максимального рівня	> 1250°C	Попередження
Несправність термопари у зоні 4	Втрата сигналу	Аварія
Температура в зоні 5 перевищує норму	> 1150°C	Аварія
Температура в зоні 5 нижче мінімального рівня	< 400°C	Попередження

Продовження таблиці Д.1 - перелік сповіщень, які формуються SCADA системою

Сповіщення	Значення	Категорія
Температура в зоні 5 вище максимального рівня	> 1250°C	Попередження
Несправність термопари у зоні 5	Втрата сигналу	Аварія
Температура в зоні 6 перевищує норму	> 1150°C	Аварія
Температура в зоні 6 нижче мінімального рівня	< 400°C	Попередження
Температура в зоні 6 вище максимального рівня	> 1250°C	Попередження
Несправність термопари у зоні 6	Втрата сигналу	Аварія
Температура димових газів перед рекуператором висока	> 750°C	Попередження
Температура димових газів після рекуператора низька	< 350°C	Попередження
<b>Сповіщення витрати газу та повітря</b>		
Витрата газу в зоні 1 перевищує норму	> 250 нм <sup>3</sup> /год	Аварія
Витрата повітря в зоні 4 нижче норми	< 500 нм <sup>3</sup> /год	Попередження
Несправність витратоміра газу у зоні 5	Втрата сигналу	Аварія
Підвищена витрата повітря у зоні 6	> 2000 нм <sup>3</sup> /год	Попередження
<b>Сповіщення тиску</b>		
Тиск у магістралі газу вправ	< 0.05 МПа	Аварія
Підвищений тиск у печі	> 15 Па	Попередження
Низький тиск повітря після рекуператора	< 1000 мм вод. ст.	Попередження
Тиск охолоджуючої води нижче мінімального	< 2 бар	Аварія
<b>Сигнали аварійних ситуацій</b>		
Зупинка крокуючих балок	Несправність механізму	Аварія
Втрата зв'язку з PLC	Відсутність даних	Аварія

Продовження таблиці Д.1 - перелік сповіщень, які формуються SCADA системою

Сповіщення	Значення	Категорія
Несправність клапана подачі газу	Сигнал несправності	Аварія
<b>Стан виконавчих механізмів</b>		
Вентилятор охолодження: Увімкнено	Нормальний режим	Нормальний стан
Клапан подачі газу в зоні 3 закритий	Контроль стану	Нормальний стан
Несправність двигуна крокуючої балки	Аварійне відключення	Аварія
<b>Сигнали водяного охолодження</b>		
Температура води в системі охолодження висока	> 60°C	Попередження
Тиск води у контурі охолодження низький	< 2 бар	Аварія
<b>Інші сповіщення</b>		
Перехід у режим простою	Система в очікуванні	Нормальний стан
Початок циклу нагрівання	Автоматичний запуск	Нормальний стан

## ДОДАТОК Е

### КОД У МАТЛАВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЇ СИСТЕМИ НА ЗМІНУ ЗАВДАННЯ

```
%% Імітація реакції системи на змінне завдання
time = 0:0.1:100;% Час симуляції
setpoint = 11 * ones(size(time)); % Початкове значення завдання

% Зміна завдання
setpoint(time > 30 & time <= 60) = 13;% Збільшення завдання на 30-й секунді
setpoint(time > 60) = 10; % Зменшення завдання на 60-й секунді

% Симуляція замкненої системи
[output, t] = lsim(system_closed, setpoint, time);
error = setpoint - output;

% Графік реакції системи та помилки регулювання
figure;

% Реакція системи на зміну завдання
subplot(2,1,1);
plot(t, setpoint, 'k--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(t, output, 'b', 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Реакція системи на зміну значення завдання');
ylabel('Вихід системи');
legend('Задане значення', 'Вихід системи');

% Графік помилки регулювання
subplot(2,1,2);
plot(t, error, 'r', 'LineWidth', 1.5);
grid on;
title('Помилка регулювання при зміні завдання');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Помилка');
legend('Помилка регулювання');
```

## ДОДАТОК Ж

### КОД У МАТЛАВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЧАСУ НАГРІВУ ЗАГОТОВОК У ПЕЧІ

```
% Вхідні параметри
L = 12; % Довжина заготовки, м
W = 0.15; % Ширина заготовки, м
H = 0.15; % Висота заготовки, м
A = W * H; % Площа перерізу, м2
V = L * A; % Об'єм заготовки, м3
rho = 7850; % Густина сталі, кг/м3
c = 500; % Теплоємність сталі, Дж/(кг·К)
T_initial = 20; % Початкова температура, °C
T_zones = [650, 900, 1070, 1090, 1100, 1100]; % Температури зон, °C
P_nominal = [13760, 11060, 25080, 3900, 1950, 1950]; % Номінальні потужності зон, кВт

% Часові межі
T_min = 120 * 60; % Мінімальний теоретичний час нагріву (с)
T_max = 300 * 60; % Максимальний час нагріву (с)
T_min_fixed = 90 * 60; % Фіксований мінімальний час нагріву (с)

% Вибір режиму прокатки
double_strand = input('Прокатка у дві нитки? (1 - Так, 0 - Ні): ');
P_furnace = input('Введіть продуктивність печі (т/год): '); % Продуктивність з технологічних карт
tau_p = input('Час аварійного простою (хв, 0 - якщо не було простою): ') * 60; % Час простою у секундах

% Коефіцієнти
k_b = 1 + double_strand; % 1 для однопниткового режиму, 2 для двопниткового
k_eff = 1.1; % Враховує ефективність роботи прокатного стану
% Розрахунок продуктивності прокатки
P_real = P_furnace * k_b * k_eff; % Продуктивність прокатки
% Масштабування часу з урахуванням аварійного простою
scaling_factor = P_real / 120; % Пропорційна залежність продуктивності
t_total = max((T_min + T_max) / (2 * scaling_factor) + tau_p, T_min_fixed); % Додаємо час простою
P0 = min(P_nominal, P_nominal * max(1, scaling_factor)); % Обмежуємо потужність
% Якщо був аварійний простій, збільшуємо потужність
if tau_p > 0
P0 = min(P_nominal * 1.2, P_nominal * max(1, scaling_factor)); % До 20% підвищення
end
% Межі часу
min_time = [0.25, 0.2, 0.25, 0.1, 0.05, 0.05] * t_total;
max_time = [0.55, 0.45, 0.5, 0.2, 0.15, 0.15] * t_total;
% Мінімальна та максимальна потужність
min_power = max(P_nominal * 0.5 * scaling_factor, P_nominal .* [0.6, 0.6, 0.8, 0.7, 0.85, 0.85]);
max_power = P_nominal; % Максимальна межа = номінальна потужність
```

```

% Визначаємо нижні та верхні межі
lb = [min_time, min_power]; % Мінімальні значення
ub = [max_time, max_power]; % Максимальні значення
% Виклик оптимізатора
options = optimoptions('fmincon', 'Algorithm', 'sqp', 'Display', 'iter');
nonlcon = @(x) heat_constraints_corrected(x, T_zones, T_initial, c, rho, V, min_time,
max_time, scaling_factor, P_nominal);
x_opt = fmincon(@(x) sum(x(1:length(T_zones))) .* x(length(T_zones)+1:end)), [min_time,
P0], [], [], [], lb, ub, nonlcon, options);
% Вивід результатів
t_opt = x_opt(1:length(T_zones));
P_opt = x_opt(length(T_zones)+1:end);
total_heating_time = sum(t_opt) / 60; % Загальний час нагріву у хвиликах

% Визначення режиму прокатки
if double_strand
mode_text = "Двонитковий";
else
mode_text = "Однонитковий";
end
% Вивід результатів
fprintf('\n=== Оптимізовані параметри нагріву ===\n');
fprintf('Швидкість прокатки: %.2f т/год\n', P_real);
fprintf('Режим прокатки: %s\n', mode_text);
fprintf('Загальний час нагріву: %.2f хв\n', total_heating_time);
fprintf('Аварійний простій: %.2f хв\n', tau_p / 60);
disp('-----');
for i = 1:length(T_zones)
fprintf('Зона %d: Час нагріву = %.2f хв, Потужність = %.2f кВт\n', i, t_opt(i)/60, P_opt(i));
end
function [c, ceq] = heat_constraints_corrected(x, T_zones, T_initial, c, rho, V, min_time,
max_time, scaling_factor, P_nominal)
N = length(T_zones);
t = x(1:N);
P = x(N+1:end);

% Теплове рівняння
ceq = zeros(1, N);
for i = 1:N
if i == 1
delta_T = T_zones(i) - T_initial;
else
delta_T = T_zones(i) - T_zones(i-1);
end
ceq(i) = (c * rho * V * delta_T) / (P(i) * 1000) - t(i);
end

% Обмеження на час (діапазон)
c = [];
for i = 1:N
c = [c; min_time(i) - t(i); t(i) - max_time(i)];
end

```

```

% Мінімальна потужність адаптована під P_nominal
min_power_dynamic = max(P_nominal * 0.4, P_nominal .* [0.5, 0.5, 0.7, 0.6, 0.8, 0.8]);
for i = 1:N
c = [c; min_power_dynamic(i) - P(i)];
end

% Обмеження по загальному часу
total_time = sum(t);
c = [c; total_time - 300*60; 120*60 - total_time];
end
% Графік температурного профілю
figure;
zones = 0:length(T_zones); % Включаємо початкову точку (0)
temperatures = [T_initial, T_zones]; % Додаємо початкову температуру

plot(zones, temperatures, '-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', 'r');
xlabel('Зона');
ylabel('Температура (°C)');
title('Температурний профіль нагріву');
grid on;

```

## ДОДАТОК 3

### МАТЛАВ ДЛЯ ОБМІНУ ДАНИМИ МІЖ МАТЛАВІ SCADA ЧЕРЕЗ REST API

```
% Функція отримання даних від SCADA
function value = get_SCADA_data(parameter)
url = ['http://scada-system/api/get/', parameter];
response = webread(url);
value = response.value;
end
```

```
% Функція передачі даних у SCADA
function send_SCADA_data(parameter, value)
url = 'http://scada-system/api/send/';
options = weboptions('MediaType', 'application/json');
data.parameter = parameter;
data.value = value;
webwrite(url, data, options);
end
```

## ДОДАТОК И

### КОД У МАТЛАВ ПРОГНОЗУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ФУТЕРІВКИ ПЕЧІ

```
% MATLAB скрипт для прогнозування зношення футерівки
clc; clear; close all;
% Вхідні дані по зонах
zones = {'1-2', '3', '4', '5-6'};
Tmin = [1150, 1100, 1120, 1080];
Tmax = [1300, 1250, 1280, 1230];
D0 = [250, 300, 280, 270];
Dcrit = [150, 150, 160, 150];
Tidle = [500, 600, 400, 700];
Ttotal = [20000, 20000, 20000, 20000];
Delta_Tidle = [300, 250, 200, 350];
base_lifetime = 7200; % Максимальний термін служби футерівки у годинах
kidle = 0.5;
ref_temp = 1200;
operating_time = 2240; % Поточний час роботи печі
max_continuous_runtime = 2250; % Максимальний безперервний час у годинах
% Перевірка перевищення безперервного часу роботи
if operating_time > max_continuous_runtime
warning('Операційний час перевищує можливий безперервний режим роботи печі!');
end
% Розрахунки
Tavg = (Tmin + Tmax) / 2;
Tlife = base_lifetime .* exp((ref_temp - Tavg) / 200 .* (1 + kidle .* Tidle ./ Ttotal));
wear_rate = (D0 - Dcrit) ./ Tlife;
stress = 30e9 * 1e-5 * Delta_Tidle; % Напруження
stress_limit = 50e6;
adjusted_wear_rate = wear_rate .* (1 + stress ./ stress_limit .* (stress > stress_limit));
remaining_thickness = D0 - adjusted_wear_rate * operating_time;
time_to_maintenance = (remaining_thickness - Dcrit) ./ adjusted_wear_rate;
% Корекція негативних значень часу до ремонту
time_to_maintenance(time_to_maintenance < 0) = 0;
% Визначення статусу
status = strings(size(time_to_maintenance));
for i = 1:length(time_to_maintenance)
if time_to_maintenance(i) <= 100
status(i) = "Терміновий ремонт";
elseif time_to_maintenance(i) <= 360
status(i) = "Запланувати ремонт";
else
status(i) = "Стабільна робота";
end
end
% Таблиця з напрацюванням, залишковим часом та статусом
T_worked = operating_time * ones(size(zones));
T_remaining = time_to_maintenance;
T_table = table(zones, T_worked, T_remaining, status, 'VariableNames', {'Зона',
'Відпрацьовано (год)', 'До ремонту (год)', 'Статус'});
```

```

disp(T_table);
% Візуалізація - кругові діаграми для кожної зони
figure;
for i = 1:length(zones)
subplot(1, length(zones), i);
% Визначення кольору
if time_to_maintenance(i) > 360
pieData = [T_remaining(i), T_worked(i)];
colors = [0 1 0; 1 1 0]; % Зелений (можна працювати), Жовтий (відпрацьовано)
else
pieData = [T_remaining(i), T_worked(i)];
colors = [0 1 0; 1 0 0]; % Зелений (можна працювати), Червоний (відпрацьовано)
end
% Побудова кругової діаграми
h = pie(pieData);
% Застосування кольорів до сегментів
patchHandles = findobj(h, 'Type', 'Patch');
for j = 1:length(patchHandles)
set(patchHandles(j), 'FaceColor', colors(j, :));
end
title(['Зона ', zones{i}]);
% Видалення текстових підписів
textHandles = findobj(h, 'Type', 'text');
delete(textHandles);
end

```

## ДОДАТОК К КОД У МАТЛАВ ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА

```
% SCADA MATLAB Model for Fuel Optimization
```

```
% Визначення параметрів заготовки
```

```
H_gas = 34.3; % МДж/м3
```

```
efficiency = 0.8;
```

```
% Дані по зонах нагріву (час у хвилинах, потужність у кВт)
```

```
heating_data = [
```

```
40, 9964.53;
```

```
32, 8009.28;
```

```
40, 20064.08;
```

```
16, 2824.25;
```

```
8, 1657.50;
```

```
8, 1657.50
```

```
];
```

```
num_zones = size(heating_data, 1);
```

```
V_gas_total = 0;
```

```
fprintf('=== Планування витрати газу ===\n');
```

```
for i = 1:num_zones
```

```
heating_time = heating_data(i, 1) * 60; % Перетворення хвилин у секунди
```

```
power = heating_data(i, 2) * 1000; % Перетворення кВт у Вт
```

```
% Розрахунок витрати газу для зони
```

```
Q_gas = (power * heating_time) / (efficiency * 1e6); % Перетворення у МДж
```

```
V_gas = Q_gas / H_gas; % м3
```

```
V_gas_total = V_gas_total + V_gas;
```

```
fprintf('Зона %d: Час нагріву = %.2f хв, Потужність = %.2f кВт, Витрата газу  
= %.3f м3\n', i, heating_time/60, power/1000, V_gas);
```

```
end
```

```
fprintf('-----\n');
```

```
fprintf('Загальна витрата газу: %.3f м3\n', V_gas_total);
```