

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Форма навчання Заочна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Діковіцького Дмитра Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система
керування тепловим режимом повітрянагрівача доменної печі

(повна назва теми)

за матеріалами технологічного процесу доменного цеху №1
ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг"

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник доцент, к.т.н. Жуков М.С.
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 16.06.2026р. № 398-ст

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.
Наук. ступень, вчене звання

Є.О. Модло
Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ(КИ)

Діковіцького Дмитра Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система керування тепловим режимом повітрянагрівача доменної печі
керівник випускної роботи Жуков Микола Степанович, доцент, к.т.н.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «06» квітня 2026 року
№ 240-ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 10.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи Корисний об'єм доменної печі - 2000 м³. Продуктивність - близько 12 000 тонн чавуну, 4 000 тонн шлаку та 27 000 тонн колошникового газу за добу. Комплекс повітрянагрівачів складається з 4 одиниць діаметром 9 м та висотою 36 м. Максимальна температура нагріву повітря у повітрянагрівачах - 1200-1350°C. Тиск гарячого дуття на виході з повітрянагрівачів - 350-400 кПа. Доменна піч обладнана 24 повітряними фурмами. Як паливо у повітрянагрівачах використовується природний газ та доменний газ. Повітрянагрівачі працюють в трьох основних режимах: нагрівання, дуття та відділення. До складу системи входять клапани (шиберні, тарілчасті, зворотні тощо), засувки, димові канали, повітропроводи. Система автоматизації повинна забезпечувати регулювання температури дуття, контроль режимів роботи повітрянагрівачів, протиаварійний захист.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 4.1 Аналітична частина. Короткий опис технологічного процесу. Технічна характеристика основного технологічного устаткування. Конструкція й принцип дії повітрянагрівача 4.2 Основна частина. Функції системи

автоматичного управління повітрянагрівачами. Завдання автоматичного керування тепловим режимом повітрянагрівача. Розробка схеми автоматизації й опис принципу її дії. Вибір технічних засобів автоматизації. Розробка алгоритму САУ нагріванням повітрянагрівачів. Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Схема розташування обладнання ВРБ.151.240-ст.01.Е7; Функціональна схема системи керування нагріванням повітрянагрівача ВРБ.151.240-ст.01.Е2; Графік перехідного процесу при внесенні стрибкоподібного збурювання ВРБ.151.240-ст.01.Е0.1; Графік перехідного процесу при зміні завдання ВРБ.151.240-ст.01.Е0.2; Алгоритм роботи САУ температурою купола повітрянагрівача ВРБ.151.240-ст.01.Е0.3.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Жуков М.С.	08.04.2026	08.04.2026
Основна частина	Жуков М.С.	08.04.2026	08.04.2026

7. Дата видачі завдання 08.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	29.05.2026	
2.	Основна частина	03.06.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2026	
4.	Виконання графічної частини	08.06.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	10.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	22.06.2026	

Студент _____
(підпис)

Діковіцький Д.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Жуков М.С.
(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.
1	A3	ВРБ.151.240-ст.01.Е7			Схема розташування	1		
2					обладнання			
3								
4	A3	ВРБ.151.240-ст.01.Е2			Функціональна схема	1		
5					системи керування			
6					нагріванням			
7					повітронагрівача			
8								
9	A3	ВРБ.151.240-ст.01.Е0.1			Графік перехідного процесу	1		
10					при внесенні			
11					стрибкоподібного			
12					збурювання			
13								
14	A3	ВРБ.151.240-ст.01.Е0.2			Графік перехідного процесу	1		
15					при зміні завдання			
16								
17	A3	ВРБ.151.240-ст.01.Е0.3			Алгоритм роботи САУ	1		
18					температурою купола			
19					повітронагрівача			
20								
21	A4	ВРБ.151.240-ст.01.ПЗ			Пояснювальна записка	69		
22								
					<i>ВРБ.151.240-ст.01.ВР</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система керування тепловим режимом повітронагрівача доменної печі Відомість роботи	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Діковіцький Д.І.</i>					4	1
<i>Пров.</i>		<i>Жуков М.С.</i>						
<i>Н.контр.</i>		<i>Жуков М.С.</i>				ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. ЗАВ-22		
<i>Затв.</i>		<i>Модло Є.О.</i>						

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота складається з 69 сторінок, включає 20 рисунків, 9 таблиці та посилається на 27 джерел.

Ключові слова: автоматизація, алгоритм, витрати енергії, датчики, доменна піч, повітрянагрівач, продуктивність, система керування, температура, ПІ-регулятор, SIMATIC S7-1500.

Об'єкт розробки – повітрянагрівач доменної печі №6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Метою роботи є розробка системи автоматичного керування температурою повітрянагрівачів, що забезпечує підвищення ефективності та надійності доменного процесу.

Метод дослідження – аналіз існуючих схем регулювання температури та впровадження сучасного мікропроцесорного обладнання. У результаті роботи розроблено функціональну схему та алгоритм роботи системи, обрано технічні засоби автоматизації, виконано розрахунок регулятора і моделювання системи автоматичного регулювання.

Впровадження системи автоматичного керування температурою повітрянагрівачів дозволяє значно підвищити ефективність роботи доменної печі, знизити питомі витрати на енергоносії та підвищити стабільність технологічного процесу виплавки чавуну.

Ключові слова: автоматизація, алгоритм, витрати енергії, датчики, доменна піч, повітрянагрівач, продуктивність, система керування, температура.

ЗМІСТ

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Короткий опис технологічного процесу	10
1.2 Технічна характеристика основного технологічного устаткування....	15
1.2.1 Конструкція доменної печі.....	15
1.2.2 Завантаження доменної печі	17
1.2.3 Подача і нагрівання дуття	18
1.3 Конструкція й принцип дії повітрянагрівача	21
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	24
2.1 Функції системи автоматичного управління повітрянагрівачами.....	24
2.2 Завдання автоматичного керування тепловим режимом повітрянагрівача	25
2.3 Розробка схеми автоматизації й опис принципу її дії.....	29
2.4 Вибір технічних засобів автоматизації	32
2.4.1 Вибір датчиків температури	32
2.4.2 Вибір датчика полум'я	35
2.4.3 Вибір датчика витрати	36
2.4.4 Вибір і розрахунок регулятора для АСУ температури повітрянагрівача	37
2.4.5 Моделювання САР температури купола повітрянагрівачів.....	39
2.4.6 Вибір програмувального контролера.....	43
2.4.7 Вибір блоків ручного керування	50
2.4.8 Вибір пускача	52
2.4.9 Вибір виконавчого механізму.....	53
2.4.10 Вибір регулювального органа.....	54
2.5 Розробка алгоритму САУ нагріванням повітрянагрівачів	55
2.6 Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.....	58
2.6.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів на ділянці АСУТП доменної печі №6 ДЦ-1.....	58
2.6.2 Заходи щодо зниження шкідливих і небезпечних факторів.....	61

2.6.3 Пожежна безпека.....	63
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	68

ВСТУП

Металургійне виробництво є однією з найбільш енергоємних галузей промисловості, і доменний процес займає в ній центральне місце. Виплавка чавуну потребує безперервної подачі нагрітого дуття під значним тиском, а якість і температура цього дуття безпосередньо визначають і продуктивність доменної печі, і питому витрату коксу – найдорожчого компонента доменної шихти. Саме тому блок повітрянагрівачів, що перетворює холодне повітря на розпечене дуття з температурою 950-1150 °С, є одним з найважливіших допоміжних агрегатів усього доменного комплексу.

Актуальність даної роботи визначається кількома взаємопов'язаними обставинами. По-перше, в умовах постійного зростання цін на природний газ і електроенергію будь-яке підвищення ефективності спалювання доменного газу у повітрянагрівачах дає відчутний економічний ефект у масштабах металургійного підприємства. По-друге, ручне або напівавтоматичне керування повітрянагрівачами вимагає постійної присутності кваліфікованого оперативного персоналу і не виключає людських помилок при перемиканні клапанів, що може призвести до серйозних аварійних ситуацій, включаючи вибух газоповітряної суміші. По-третє, сучасний рівень мікропроцесорної техніки дозволяє реалізувати повністю автоматизовану систему управління, яка не лише виключає вплив людського фактора, а й дає змогу оптимізувати тепловий режим роботи повітрянагрівачів у реальному часі.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка системи автоматичного керування температурою повітрянагрівачів доменної печі №6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Розроблена система повинна виконувати такі функції:

а) здійснювати автоматичне керування блоком повітрянагрівачів, включаючи формування ознак необхідності переходу повітрянагрівачів з одного стану в інший;

б) забезпечувати безпечне керування об'єктом із реалізацією системи блокувань при ручному втручанні оператора;

в) реалізовувати управління як з центрального поста доменної печі, так і з місцевих пультів, розташованих безпосередньо поблизу повітронагрівачів;

г) забезпечувати роботу клапанів повітронагрівачів від основних і резервних частотних перетворювачів.

На сучасному етапі розвитку промисловості питання ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів набуває дедалі більшого значення. Доменне виробництво вимагає великої кількості повітря, яке перед подачею в піч необхідно попередньо нагріти до досить високих температур. Застосування автоматизованих систем управління у цьому процесі дозволяє не лише підвищити стабільність теплового режиму, а й забезпечити суттєве зниження витрат на енергоносії та підвищення загальної продуктивності підприємства.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувалися такі завдання:

а) проаналізувати існуючі схеми регулювання температури повітронагрівачів та визначити напрями їх вдосконалення;

б) розробити функціональну схему та алгоритм роботи системи автоматичного керування температурою купола повітронагрівача;

в) обґрунтовано вибрати технічні засоби для реалізації системи автоматизації;

г) розробити схему автоматизації та детально описати принцип її дії;

д) виконати розрахунок і моделювання регулятора системи автоматичного регулювання;

е) оцінити заходи з охорони праці та екологічної безпеки у зв'язку з впровадженням системи.

Ця робота є комплексним підходом до підвищення ефективності та надійності процесів доменного виробництва за рахунок впровадження сучасних систем автоматизації. Реалізація запропонованих рішень дозволяє значно знизити витрати на енергоносії та забезпечити стабільний, безаварійний процес виробництва чавуну на підприємстві.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Короткий опис технологічного процесу

Доменна піч №6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» являє собою шахтну піч об'ємом 2000 м³, що є типовим представником сучасного доменного агрегату середньої потужності. Вона складається з колошника, шахти, розпарення, заплічок і горна і є одним з найбільш автоматизованих та механізованих металургійних агрегатів підприємства. До складу всього доменного комплексу входять такі основні технологічні ділянки:

- а) блок повітронагрівачів;
- б) бункерна естакада зі скіповою подачею матеріалів на колошник;
- в) система газоочищення;
- г) власне доменна піч;
- д) ливарний двір.

Доменна піч ставиться до числа плавильних агрегатів шахтного типу. Її основним габаритним параметром є корисний об'єм, обмежений знизу горизонтальною площиною через вісь чавунної льотки, а зверху – горизонтальною площиною через підставу великого конуса засипного апарата в опущеному стані. Найважливішими розмірами профілю доменної печі є корисна й повна висота, висота горна, заплічок, розпару, шахти й колошника, а також діаметри горна, розпару й колошника та кути нахилу стін шахти і заплічок.

Доменна піч №6 має 24 повітряні фурми, дві чавунні й одну жужільну льотки; кут між чавунними льотками становить 45 градусів. Опорна система печі виконана у вигляді чотирьох колон шахти, які є продовженням чотирьох колон горна, на які встановлена кільцева балка круглого перерізу, що служить опорою колошникової площадки й усіх конструкцій колошника. Режим роботи доменної печі – безперервний цілодобовий, з плановими зупинками для проведення профілактичних ремонтів.

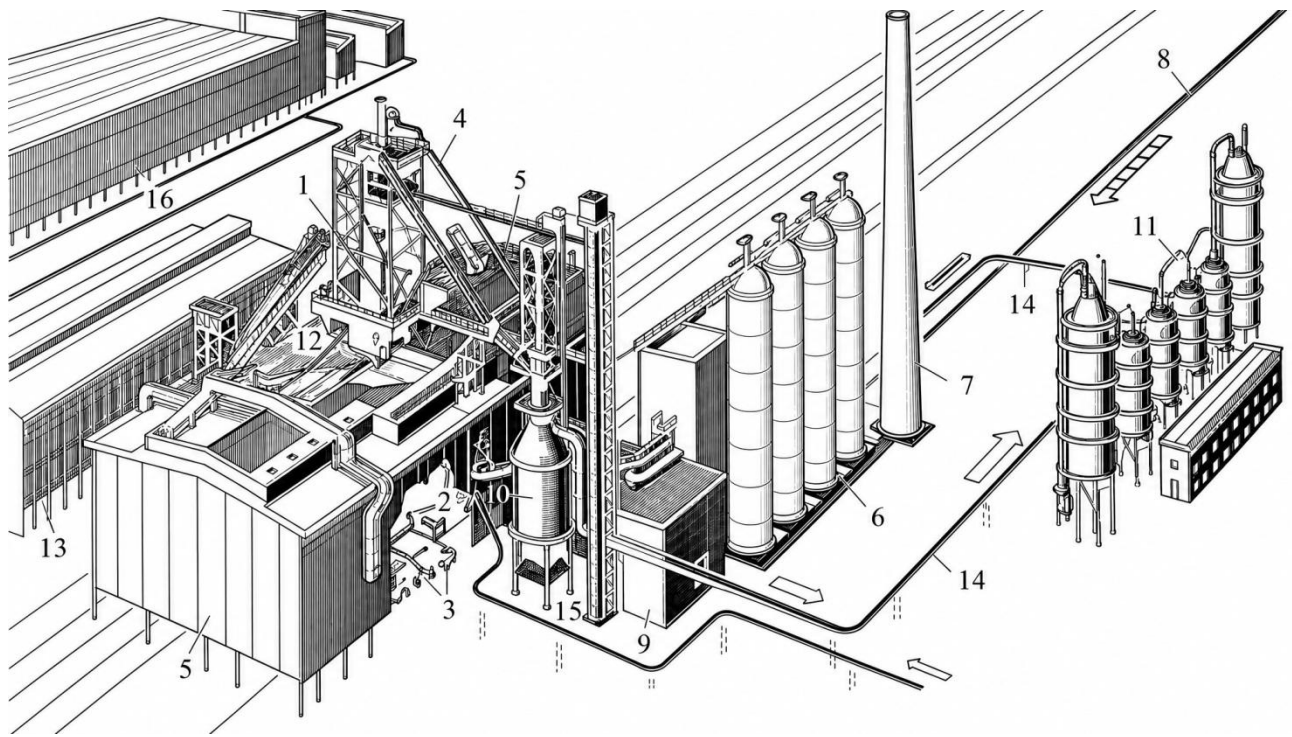


Рис. 1.1. Сучасний доменний цех

(розроблено автором з використанням [1; 2; 3; 4])

1 – доменна піч; 2 – чавунна лютка; 3 – чугуновози; 4 – газоовідвід; 5 – ливарні двори; 6 -повітронагрівачі; 7 – димар; 8 – повітропроводи холодного й гарячого дуття; 9 – пункт керування; 10 – пиловловлювач; 11 – апарати тонкої газоочистки; 12 – скіпової підйомник; 13 – бункерна естакада; 14 – газопроводи брудного й чистого газу; 15 – ліфт; 16 – агломераційна фабрика.

Доменний процес являє собою відновлювальний протиточний процес, що полягає у взаємодії шихтових матеріалів, які опускаються, з потоком розпечених відновних газів, що піднімається назустріч. Продуктами доменного процесу є чавун, шлаки й колошниковий газ. Критеріями оптимальності технологічного режиму доменної плавки є форсований рівний хід печі, найкращі техніко-економічні показники її роботи, а також виплавка якісного чавуну відповідно до вимог споживача.

Процес виробництва чавуну може бути розбитий на такі послідовні етапи:

- а) формування запасу шихтових матеріалів і коксу на бункерній естакаді;
- б) дозування й завантаження коксу та шихтових матеріалів у скіпи;
- в) завантаження шихти й коксу у піч через засипний апарат;
- г) нагрівання і подача збагаченого дуття в піч через повітряні фурми;
- д) безпосередня виплавка чавуну в горні доменної печі;
- е) випуск рідких продуктів плавки через льотки;
- є) очищення колошникового газу від пилу і відведення його споживачам.

Завантаження доменної печі здійснюється окремими подачами, тип яких характеризується числом і масою коксових і залізорудних скіпів та порядком їх набору на великий конус. Перед подачею в піч дуття збагачується природним газом і киснем, а за необхідності – зволожується. Дуття надходить у піч з температурою 950-1150 °С, збагачене киснем до 25 %, при тиску до 400 кПа. Передбачається також вдмухування у горно печі через повітряні фурми природного газу, що надходить під тиском 700–800 кПа. Тиск газу під колошником підтримується на рівні 150-200 кПа.

Нагрівання дуття здійснюється чотирма повітрянагрівачами з убудованими камерами горіння, що працюють у послідовному режимі. Повітрянагрівачі призначені для попереднього нагрівання повітря перед подачею його в доменну піч, що дозволяє істотно підвищити продуктивність агрегату та зменшити витрату коксівного вугілля – найбільш дорогої складової в собівартості чавуну.

Існує два основних і один допоміжний режими роботи повітрянагрівачів. Режим нагрівання характеризується тим, що в камеру горіння примусово подають газоповітряну суміш, яка, стикаючись з розпеченими стінами у нижній частині камери, запалюється і повністю згоряє в шахті. Максимальна температура продуктів горіння досягає 1200-1350 °С; досягаючи підкупольного простору і змінюючи напрямок на 180°, ці гази передають тепло вогнетривкій насадці через вертикальні канали, охолоджуючись при цьому до 200-400 °С, і виходять через димовий канал у димар. Режим дуття настає після того, як

повітронагрівач нагрівається до заданої температури: холодне повітря проходить у зворотному напрямку через насадку і підкупольний простір, відбираючи тепло, і надходить у повітропровід гарячого дуття доменної печі. Режим відділення є допоміжним і застосовується для переходу між двома основними режимами – усі клапани закриті й повітронагрівач перебуває в стані очікування.

Бункерна естакада складається з 18 бункерів, призначених для розподілу запасів шихтових матеріалів: кокс – 2 бункери ємністю 230 м³; окатиші – 4 бункери по 205 м³; агломерат – 10 бункерів по 205 м³; добавки – 2 бункери по 230 м³. Транспортування матеріалів здійснюється двома скіпами ємністю 13,5 м³ кожен. На кожену тонну виплавленого чавуну в доменній печі утворюється 2000-2500 м³ колошникового газу, який після очищення використовується як паливо у повітронагрівачах і для інших технологічних потреб підприємства.

Очищення колошникового газу від пилу здійснюється у три послідовних стадії: груба, напівтонка і тонка. Газ виходить з колошникової частини через газовідводи, з'єднується в один похилий газовідвід і надходить до пиловловлювача, де проходить грубе очищення. Потім він надходить до скрубера на напівтонке очищення, після чого через трубу Вентурі і дросельну групу – до систем тонкого очищення. Після цього очищений газ під тиском надходить у заводський колектор і використовується як паливо.

При виплавці чавуну як вихідна сировина використовуються агломерат, окатиші, залізна руда, зварювальні шлаки, вапняк звичайний та доломітизований. Кожен вид шихтових матеріалів і паливо піддаються обов'язковому аналізу для встановлення відповідності між фактичною якістю сировини і зазначеним у паспорті. По коксу контролюються технічний аналіз, міцність по барабанах М25 і М10 та фракційний склад. По агломерату й окатишам контролюються хімічний склад, вміст фракції 0-5 мм і міцнісні характеристики. Передбачається відсівання дрібниці агломерату фракції 0-5 мм і коксу 0-25 мм перед завантаженням у скіп.

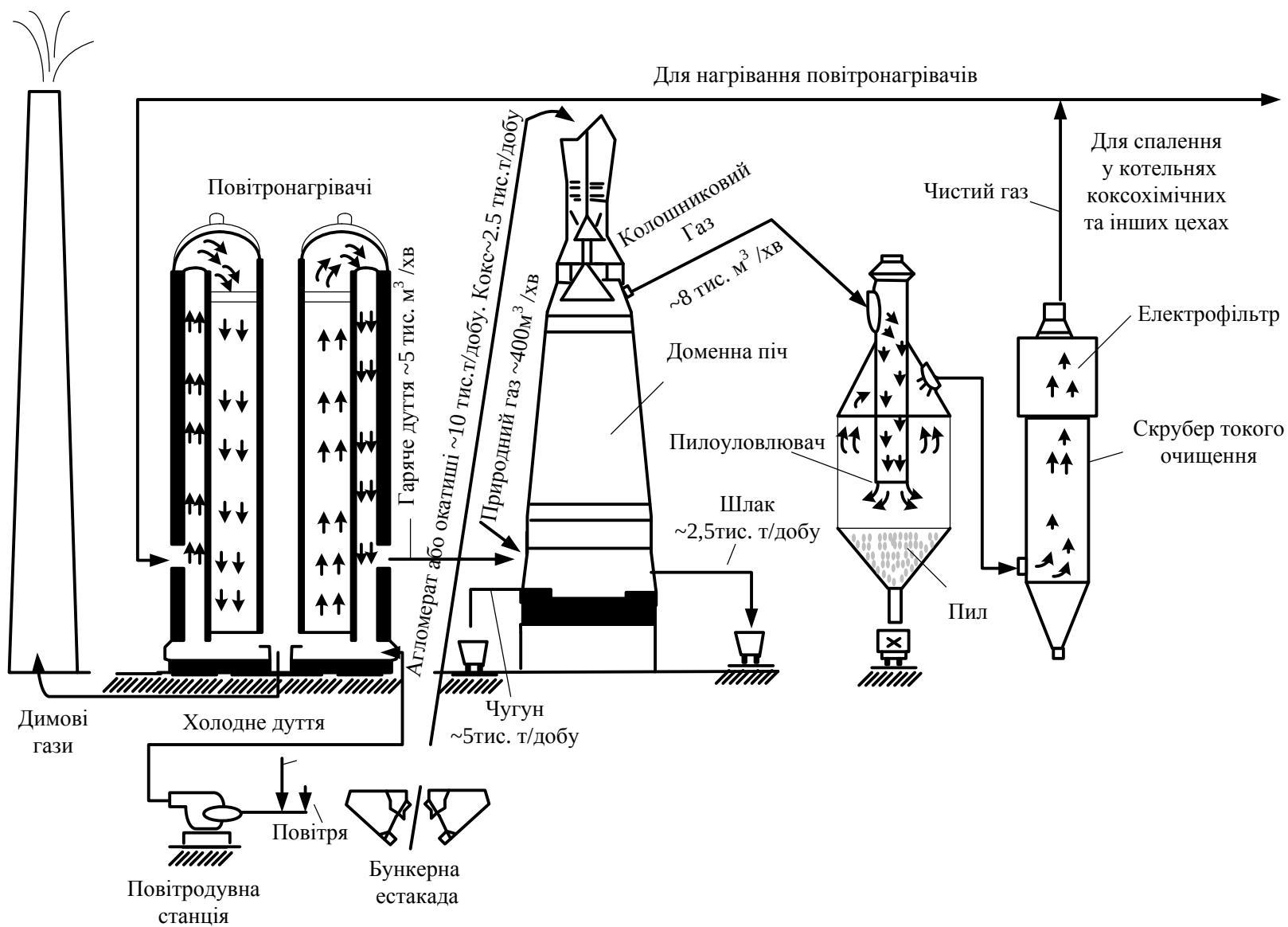


Рис. 1.2. Технологія доменного процесу
(розроблено автором з використанням [1; 2; 3; 4])

1.2 Технічна характеристика основного технологічного устаткування

1.2.1 Конструкція доменної печі

Доменна піч є великою і продуктивною установкою, що споживає величезну кількість шихти та дуття. Сучасна доменна піч щодоби переробляє приблизно 23 000 тонн шихти, 18 000 тонн дуття і 1 700 тонн природного газу, виробляючи при цьому 12 000 тонн чавуну, 4 000 тонн шлаків і 27 000 тонн колошникового газу. Це означає, що у великій доменній печі за кожну хвилину виплавляється близько 9 тонн чавуну. Щоб забезпечити безперервне подавання і випуск такої кількості матеріалів, конструкція печі повинна бути простою, надійною і допускати тривалу роботу без простоїв.

Внутрішній профіль вертикального розрізу доменної печі складається з п'яти основних зон: колошника, шахти, розпару, заплічок і горна. Піч оточена суцільнозварним металевим кожухом товщиною 20-25 мм у верхній частині та 35-40 мм у нижній. Внутрішня частина кожуха оздоблена вогнетривкою футеровкою, що охолоджується холодильниками. У ряді конструкцій верхня частина печі підтримується мараторним кільцем, а нижня частина спирається безпосередньо на фундамент. Матеріали на колошник подаються за допомогою двох скіпів, що рухаються по похилому мосту, або стрічкового транспортера.

Основною частиною колошникового пристрою є засипний апарат, який буває двох типів. Перший складається з великого і малого конусів з прийомною вирвою; для рівномірного розподілу шихти малий конус і його вирва обертаються навколо своєї осі. Скіп перекидається на колошнику, шихта спочатку вивантажується у прийомну вирву, потім у міжконусний простір і далі у доменну піч. Наявність двох конусів забезпечує надійну герметизацію колошника під час завантаження. Засипний апарат іншого типу має прийомні вирви з герметичними затворами, що виключає потребу в герметизації за допомогою додаткового розподільного пристрою.

У нижній частині печі розташовані фурмені пристрої, через які подаються нагріте дуття й добавки газоподібного, рідкого або пиловугільного палива.

Рідкі продукти плавки стікають у горно, де облаштовані льотки для випуску чавуну та шлаків; ці продукти накопичуються і потім через певні проміжки часу випускаються через льотки.

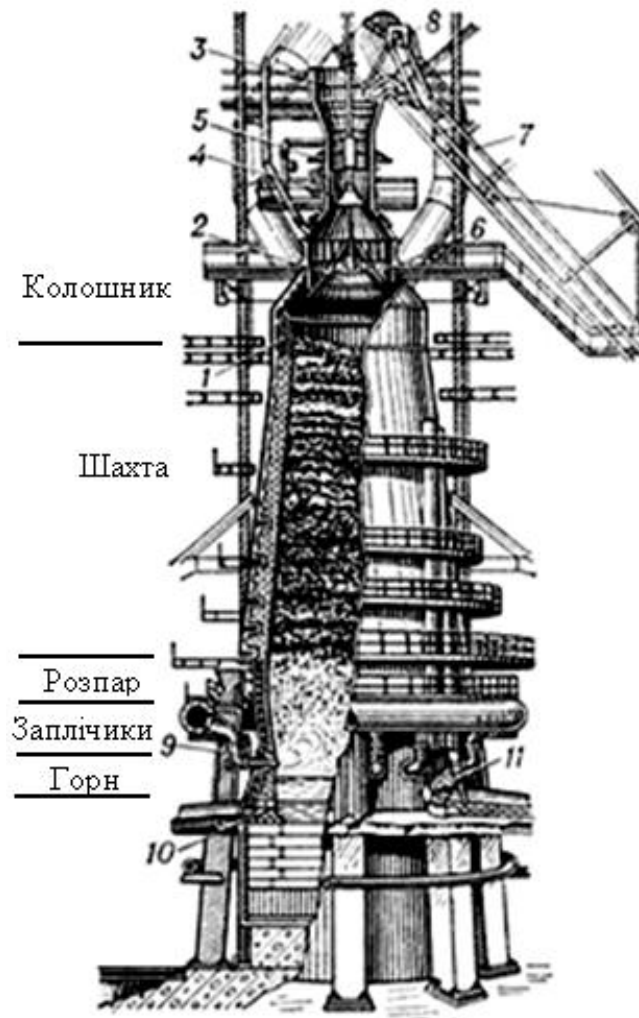


Рис. 1.3. Конструкція доменної печі №6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»
(розроблено автором з використанням [1; 2; 3; 4])

Для футерівки доменної печі застосовуються шамотна цегла, високоглиноземиста цегла і вуглецеві блоки. Шамотна цегла складається з обпаленої вогнетривкої глини і сирої глини, містить 30-40 % Al_2O_3 і не більше 1,6 % Fe_2O_3 . Цегла з нижчим вмістом глинозему використовується для верхньої частини печі, з вищим вмістом – для нижньої, більш відповідальної ділянки. Вуглецеві блоки виготовляються з коксу та обпаленого антрациту, їх довжина досягає 3-4 м; їх застосовують для кладки лещаді печі, де температури та механічні навантаження найбільші.

Шви між вогнетривкою цеглою заповнюють розчином з мертелів, що відповідають класу використовуваної цегли. Мертель – це порошок, що складається з подрібненого шамоту; для відповідальних видів кладки до нього додають невеликі кількості поверхнево-активних і клейких речовин для підвищення пластичності розчину. Шви між вуглецевими блоками заповнюють вуглецевою пастою з коксу і маслопеку, причому допустимий зазор між блоками становить не більше 0,5 мм для вертикальних і 1,5 мм для горизонтальних швів.

1.2.2 Завантаження доменної печі

В сучасній доменній печі шихтові матеріали перебувають всередині агрегату протягом 4-6 годин, тоді як газу проходять через стовп шихти лише за 1-3 секунди. Саме тому досягнення високих показників плавки суттєво залежить від правильного розподілу газів по перерізу печі, що забезпечує максимальне використання тепла та відновної здатності газів. Характер розподілу газового потоку в свою чергу безпосередньо залежить від того, як розподілена шихта по колошнику.

Шихту завантажують у піч окремими порціями – колошами. Рудну частину колоші можна завантажувати окремо або разом з коксом. Величина колоші і спосіб її завантаження вибираються так, щоб розподіл газів у печі був оптимальним. При цьому необхідно враховувати, що дуття надходить у піч переважно біля стін, а газовий опір шихти біля стін менший, ніж у центрі, тому газу мають природну тенденцію рухатися вздовж стін. Агломерат як основний залізорудний матеріал є менш газопроникним порівняно з коксом, тому шар агломерату у периферійній зоні повинен бути товстішим, ніж у центрі, тоді як шар коксу – навпаки. Таке розташування матеріалів дозволяє вирівняти газовий потік по перерізу печі і підвищити ступінь використання відновних газів.

Для завантаження шихти використовуються транспортери із засипними апаратами нових типів, що дозволяють гнучко регулювати газовий потік

шляхом перерозподілу шихти по радіусу колошника. Впровадження таких апаратів у поєднанні з автоматизованими системами управління завантаженням дало змогу суттєво підвищити рівномірність теплового і газодинамічного режимів доменної плавки.

1.2.3 Подача і нагрівання дуття

Доменний процес є складним сукупністю теплових, хімічних, газодинамічних і механічних явищ, що відбуваються одночасно в різних зонах шахтної печі. Управління доменною піччю здійснюється на основі багаторічного досвіду фахівців і включає кілька взаємопов'язаних підсистем: управління шихтовкою і шихтоподачею, регулювання теплового режиму, контроль розподілу газового потоку та забезпечення рівномірного сходу стовпа шихтових матеріалів.

Для нормального перебігу доменного процесу і досягнення запланованої продуктивності необхідно вдмухувати від 1,6 до 2,3 м³ (або від 1,9 до 3,2 кг) дуття на 1 м³ корисного об'єму печі. Для доменної печі об'ємом 3000 м³ це означає необхідність подачі близько 4800 м³ дуття щохвилини, а для печі об'ємом 5000 м³ – порядку 8000 м³/хв. Тиск дуття на виході з повітродувки досягає 350-400 кПа. Для подачі і стиску дуття застосовуються повітродувні машини; найпоширенішими серед них є відцентрові повітродувні машини з паротурбінним приводом, продуктивністю 4000-7000 м³/хв і тиском дуття на виході 400-500 кПа.

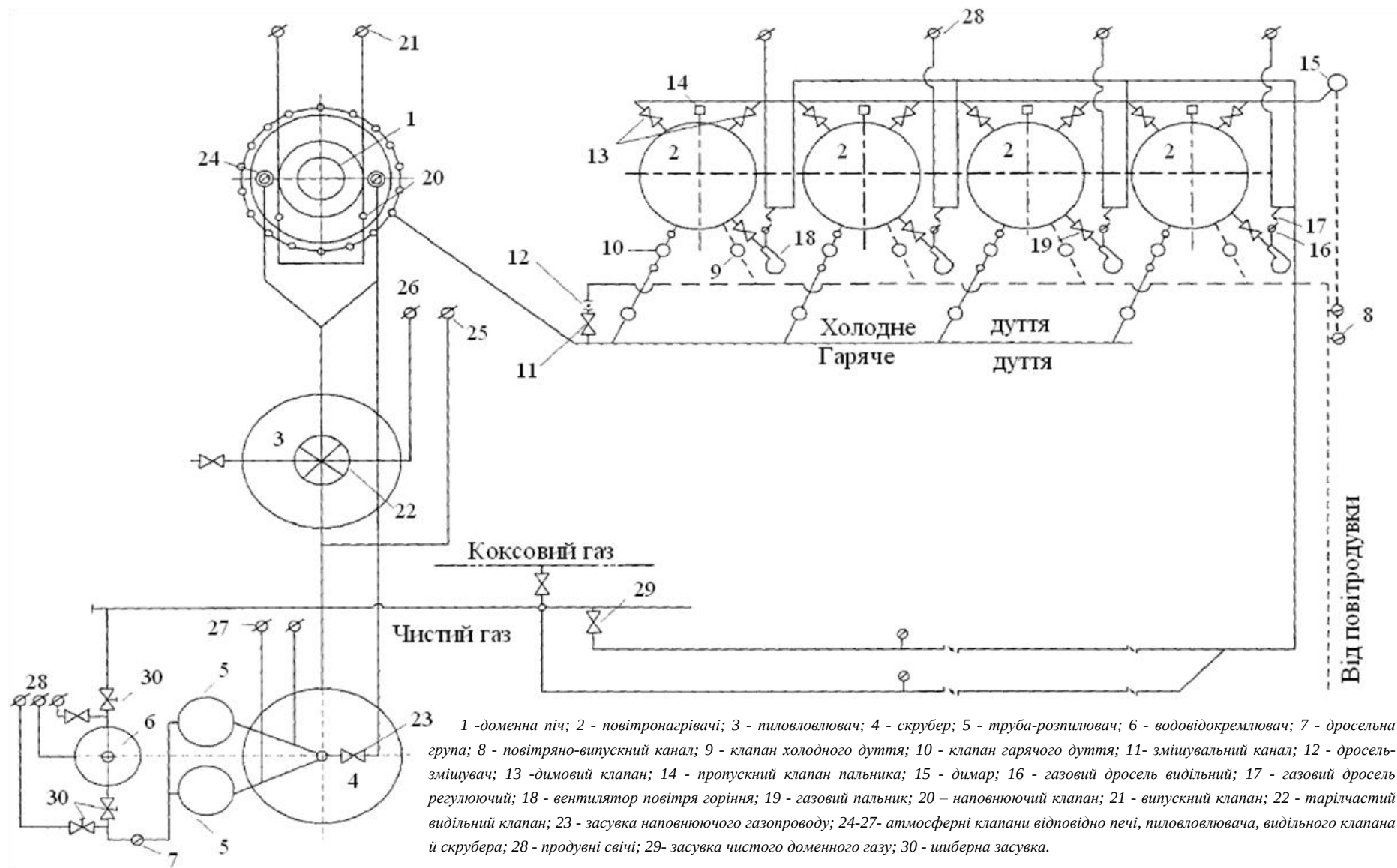


Рис. 1.4. Схема газового господарства та тракту дуття для доменної печі
(розроблено автором з використанням [1; 2; 3; 4])

Для підвищення температури дуття до 1050-1300 °С використовують повітронагрівачі, які іноді називають кауперами – на честь англійського інженера Едварда Альфреда Купера, який винайшов їх у 1860 році. Сучасний повітронагрівач має діаметр близько 9 м і висоту 36 м. Верхня частина насадки і купол виконані з високоглиноземистої цегли або динасу, а нижня частина – з шамотної цегли. Насадка складається з вертикальних осередків розміром 45×45 мм. Останнім часом, у зв'язку з переходом на природний газ, у повітронагрівачах спалюють або чистий природний газ, або суміш доменного газу з природним.

Кількість повітронагрівачів може досягати 4-6 на одну доменну піч. Вони працюють по чергово: поки одні перебувають у режимі нагрівання і накопичують тепло у вогнетривкій насадці, інші підігрівають повітря для доменної печі. На трубопроводах дуттєвого тракту встановлені листові засувки для повного відключення ділянок на час ремонту, а також різноманітні клапани: відбірні, регулюючі, зрівняльні, запобіжні, зворотні та повітряно-розвантажувальні. Клапани бувають шиберного (вертикального) та тарілчастого (горизонтального і дросельного) типів. Пропускний клапан служить для зниження тиску у повітронагрівачі до атмосферного перед відкриванням димових клапанів.

Нагрівання дуття позитивно впливає на хід плавки в доменній печі, збільшуючи її продуктивність, знижуючи температуру колошникового газу та зменшуючи витрату дефіцитного і дорогого коксу. Разом з тим воно висуває більш жорсткі вимоги до якості шихтових матеріалів та їх підготовки. Подальше підвищення температури дуття залишається одним з найефективніших засобів інтенсифікації доменного процесу, а автоматизація роботи повітронагрівачів є вкрай важливим завданням для забезпечення стабільної і безпечної роботи всього доменного комплексу.

1.3 Конструкція й принцип дії повітронагрівача

Сучасні промислові повітронагрівачі мають вертикальну циліндричну форму з куполоподібним верхом. Їхня висота може сягати 50 метрів, а діаметр – 9 метрів. Ззовні повітронагрівач обладнаний сталевим корпусом, який зсередини вкритий шаром вогнетривкої та теплоізоляційної цегли. Така конструкція запобігає тепловій деформації металевому корпусу від дії надзвичайно високих внутрішніх температур та зменшує теплові втрати назовні, що є важливою умовою енергетичної ефективності агрегату.

Внутрішній простір повітронагрівача розділений на дві принципово різні частини вертикальною стіною з вогнетривкої цегли, яка не доходить до купола: камеру горіння та вогнетривку насадку з вертикальними каналами. У верхній частині камера горіння з'єднана з каналами насадки через підкупольний простір, а в нижній – через піднасадочний простір, який залежно від поточного режиму роботи може сполучатися або з димоходом, або з повітропроводом холодного дуття. Залежно від режиму роботи, в один і той самий агрегат спочатку нагнітаються гарячі продукти горіння газу, а потім прокачується холодне повітря, яке відбирає накопичене тепло.

Корпус повітронагрівача виготовлений зі зварених листів низьколегованої сталі товщиною 12-18 мм і є повністю герметизованим. Знизу до нього приварене днище, закріплене на фундаменті болтами. На корпусі передбачені штуцери з фланцями для приєднання допоміжного обладнання, а також технологічні люки і лази для огляду внутрішніх поверхонь та проведення ремонтних робіт. Внутрішні стіни мають шарувату конструкцію з різних видів вогнетривкої цегли та теплоізоляційного шару між цеглою і корпусом; компенсаційний зазор між вогнетривкою та теплоізолюючою цеглою заповнений дрібною крихтою теплоізоляційного матеріалу.

У камері горіння відбувається змішування газу з повітрям і процес їх горіння. Площа поперечного перерізу камери становить 15-20 % від загального внутрішнього перерізу повітронагрівача. Стінки камери складаються з двох

шарів різних видів вогнетривкої цегли, здатних витримувати екстремальні температури продуктів горіння.

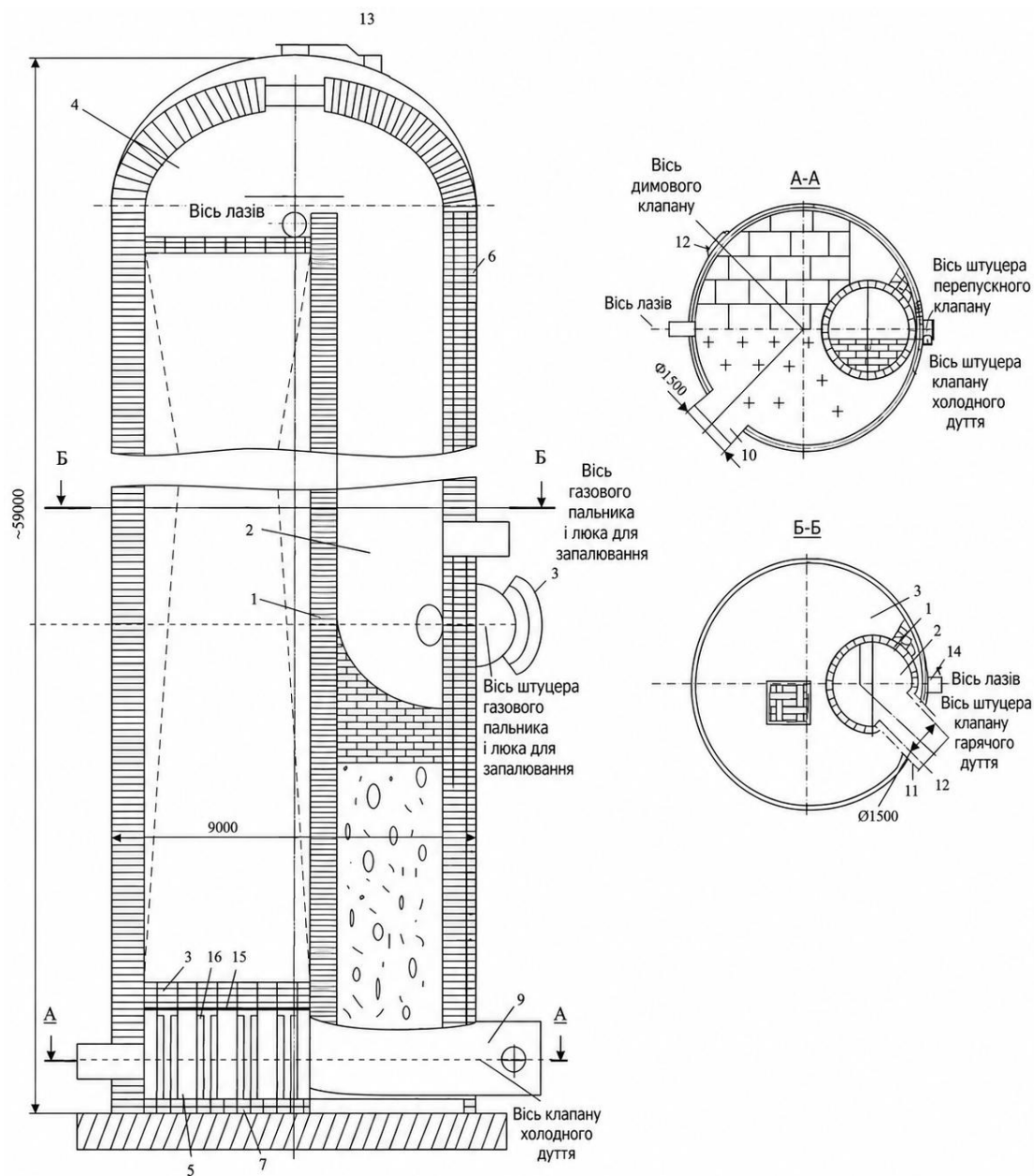


Рис. 1.5. Конструкція повітрянагрівача

(розроблено автором з використанням [1; 2; 3; 4])

1 - Вертикальна стіна з вогнетривкої цегли 2 - Камера згоряння 3 - Вогнетривка насадка з вертикальними каналами 4 - Підкупольний простір 5 - Піднасадочний простір 6 - Сталевий кожух 7 - Днище 8-11 - Штуцери з фланцями 12 - Фланці 13 - Люки 14 - Лази 15 - Чавунні ґрати 16 - Чавунні колони

Насадка займає більшу частину об'єму повітронагрівача і є ключовим елементом теплообміну – вона накопичує тепло від продуктів горіння під час режиму нагрівання і передає це тепло холодному повітрю під час режиму дуття. Насадка складається з вертикальних каналів постійного або змінного перерізу, викладених з вогнетривкої цегли. Знизу насадка спирається на чавунні ґрати, встановлені на чавунних опорних колонах.

Повітронагрівачі зазвичай розташовуються групами по чотири безпосередньо біля доменної печі на спільному фундаменті. Димар розміщується окремо і з'єднується з повітронагрівачами за допомогою димового борову. Поруч облаштовується робоча площадка для розміщення обслуговуючого персоналу та необхідного обладнання. Розміри повітронагрівача розраховуються на підставі теплотехнічного та гідравлічного розрахунків, виходячи з необхідної температури і витрати дуття, а також умов міцності та довговічності конструкції.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Функції системи автоматичного управління повітрянагрівачами

На складному та потенційно небезпечному тепловому агрегаті, яким є доменна піч, відсутність контролю над будь-яким технологічним параметром може призвести до серйозної аварії. Тому при проектуванні системи автоматизації повітрянагрівачів особливу увагу необхідно приділяти надійності як апаратних засобів, так і програмного забезпечення – ці питання мають принципове значення для безпеки всього виробничого процесу.

До основних функцій системи автоматичного управління повітрянагрівачами належать такі:

- а) збір та опрацювання даних про параметри енергоносіїв, що подаються на доменну піч, – стиснене повітря, технологічну пару і кисень;
- б) безперервний контроль параметрів доменного газу, що надходить на повітрянагрівачі;
- в) збір та аналіз технологічної інформації про перебіг процесу нагрівання насадок;
- г) автоматичне регулювання температури куполів повітрянагрівачів під час режиму нагрівання;
- д) підтримання стабільного тиску доменного газу на вході до блоку повітрянагрівачів;
- е) визначення оптимальної тривалості циклу роботи повітрянагрівачів – як фази нагрівання, так і фази дуття;
- є) пошук і підтримання оптимального режиму роботи блоку: послідовного, попарно-паралельного або змішаного;
- ж) автоматичне керування блоком повітрянагрівачів, включно з формуванням сигналів про необхідність переходу кожного повітрянагрівача з одного стану в інший;
- з) реалізація системи блокувань для забезпечення безпечного управління при ручному втручанні оператора з місцевого або центрального пульта;

и) керування з центрального поста доменної печі та з двох пультів місцевого керування, розташованих на робочих площадках блоку повітронагрівачів;

і) управління роботою клапанів від основних і резервних частотних перетворювачів.

Метою керування доменними повітронагрівачами при наявності обмежень на теплову потужність може бути або досягнення максимальної температури гарячого дуття, або максимальне середнє поглинання тепла насадкою. При обмеженнях на температуру гарячого дуття цілями керування стають: мінімізація витрат палива на нагрівання дуття, мінімізація витрат палива на одиницю теплової енергії гарячого дуття або мінімізація теплових втрат з відхідними газами. При розробці системи автоматичного управління повітронагрівачами доменної печі об'ємом 2000 м³ для досягнення найвищої економічної ефективності як критерій оптимальності використовується мінімум приведених витрат при нагріванні дуття. Найпростішим і водночас досить ефективним керуючим впливом у цьому разі є тривалість фази нагрівання.

2.2 Завдання автоматичного керування тепловим режимом повітронагрівача

Основними завданнями автоматичного керування тепловим режимом повітронагрівача є: забезпечення повного й економічного згоряння палива у камері горіння, нагрівання насадки до заданої температури з одночасним обмеженням граничної температури купола – для захисту вогнетривкої кладки від термічного руйнування, – а також автоматичне перемикання між режимом нагрівання і режимом дуття і навпаки. Конкретними завданнями автоматичного регулювання процесу нагрівання є обмеження температури купола, регулювання температури відхідних продуктів горіння та підтримання оптимального співвідношення витрат палива та повітря для горіння.

Автоматичне регулювання нагрівання повітрянагрівача полягає в такому. Горіння газу регулюється спеціальним регулятором співвідношення, виконавчий механізм якого керує регулювальним дросельним клапаном на газопроводі, що підводить газ до пальника. На мембрану регулятора як сигнал зворотного зв'язку, пропорційний витраті повітря для горіння, подається величина розрідження на вхідному патрубку вентилятора пальника. При будь-якій зміні кількості повітря, що подається вентилятором, регулятор забезпечує відповідне коригування подачі газу, завжди підтримуючи задане співвідношення компонентів горіння.

Процес нагрівання повітрянагрівача включає три послідовних характерних періоди. Перший період – початкове максимальне нагрівання з використанням повної потужності вентилятора при фіксованому заданому співвідношенні газ–повітря. Другий період починається у момент, коли купол досягає максимально допустимої температури: з цього моменту співвідношення газ–повітря поступово змінюється у бік збільшення надлишку повітря при незмінній його витраті. Вентилятор продовжує працювати з тією ж частотою обертання, а регулювальні заслінки залишаються в максимально відкритому положенні. Дроселем регулювального клапана зменшується кількість газу, що надходить, збільшується відносний надлишок повітря, і в результаті температура купола знижується до безпечного рівня, тоді як нижні шари насадки інтенсивніше прогріваються. Коли температура купола знижується нижче певного порогу, система автоматично відновлює режим першого періоду. Ці два режими чергуються між собою аж до повного прогрівання насадки по всій висоті, після чого починає помітно підвищуватися температура в піднасадочному просторі.

Третій, завершальний, період нагрівання визначається досягненням граничної температури в піднасадочному просторі. Якщо ця температура досягає максимально допустимого значення, система одночасно знижує подачу і повітря, і газу. Після зниження температури в піднасадочному просторі система автоматично відновлює режим другого періоду. Таке циклічне

регулювання продовжується до настання сигналу на перемикання повітронагрівача у режим дуття.

Автоматичне керування повітронагрівачами передбачає не лише підтримання відповідного теплового режиму, але й виконання чітко визначеної послідовності перемикань клапанів при переведенні повітронагрівача між режимами. Автоматизація цих перемикань дозволяє суттєво скоротити їх тривалість завдяки мінімізації пауз між спрацьовуванням окремих клапанів, що забезпечує кращу утилізацію часу нагрівання і підвищення теплової потужності блоку. Крім того, і це надзвичайно важливо з точки зору безпеки, автоматичне перемикання повністю виключає можливі помилки обслуговуючого персоналу у послідовності відкривання та закривання клапанів – помилки, які можуть призвести до вибуху газу.

Порядок перемикання клапанів при переведенні повітронагрівача з режиму нагрівання в режим дуття при послідовному режимі роботи блоку такий:

- а) закривається регулювально-видільний клапан на газопроводі;
- б) вимикається двигун вентилятора пальника;
- в) закривається видільний клапан на газопроводі;
- г) послідовно, один за одним, закриваються димові клапани;
- д) відкривається пропускний клапан на лінії холодного дуття для вирівнювання тиску між порожниною повітронагрівача і повітропроводом холодного дуття;
- е) відкривається клапан гарячого дуття;
- є) відкривається клапан холодного дуття.

Після переведення даного повітронагрівача у режим дуття повітря в доменну піч буде надходити одночасно через два повітронагрівачі. Потім остиглий повітронагрівач переводиться у режим нагрівання. При цьому повинен дотримуватись такий порядок перемикання клапанів:

- а) закриваються клапан холодного дуття і пропускний клапан;
- б) закривається клапан гарячого дуття;

- в) відкривається пропускний клапан для вирівнювання тиску всередині повітрянагрівача і в димовому боріві;
- г) послідовно відкриваються один за одним димові клапани;
- д) відкривається видільний клапан на газопроводі;
- е) відкривається регулювально-видільний клапан на газопроводі;
- є) вмикається двигун вентилятора пальника.

Сигналом для переведення нагрітого повітрянагрівача у режим дуття слугує положення дроселя змішувального клапана. Повністю закритий дросель сигналізує про те, що тепловий потенціал насадки вичерпано і подальше нагрівання повітря у цьому повітрянагрівачі стає неможливим. Реле, яке виконує функцію шляхового вимикача цього клапана, подає імпульс на запуск послідовної роботи клапанів для переведення чергового повітрянагрівача у режим дуття. Автоматичне перемикання режимів також може здійснюватися за часом від спеціального реле часу, якщо теплопередача в конкретних умовах досить стабільна.

Автоматичне перемикання клапанів вимагає надійного контролю запалювання газу та безперервного моніторингу процесу горіння протягом усього режиму нагрівання. У разі зниження тиску газу може виникнути небезпека потрапляння повітря у газопровід через зворотний перепад тиску. Може також вийти з ладу вентилятор пальника. В обох цих випадках система зобов'язана негайно припинити подачу газу, закривши регулювально-видільний клапан. Контроль наявності полум'я в початковий момент запалювання пальника і в ході всього процесу горіння здійснюється спеціальним фотореле, встановленим у корпусі пальника. Важливою перевагою цього пристрою є те, що він реагує тільки на пульсуюче полум'я і не реагує на розжарену стінку камери горіння. Якщо газ не запалюється або полум'я з будь-якої причини гасне, фотореле миттєво подає сигнал на закривання регулювально-видільного клапана і відключення вентилятора.

2.3 Розробка схеми автоматизації й опис принципу її дії

Система автоматичного керування технологічним процесом доменної печі №6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» призначена для повністю автоматизованого управління виробництвом чавуну, а також для своєчасного й повного забезпечення персоналу необхідною технологічною інформацією. Основна мета створення цієї автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) доменної печі – підвищити продуктивність агрегату, знизити питому витрату коксу та покращити загальні техніко-економічні показники шляхом ефективного регулювання температури гарячого дуття і надання персоналу повної обробленої інформації про хід технологічних процесів.

Ефективність досягнення поставленої мети забезпечується застосуванням сучасних методів збору, обробки та представлення даних, перспективними методами інтегрування технічних і програмних засобів, а також розподілом функцій управління із використанням високонадійних мікропроцесорних систем. Саме мікропроцесорна архітектура дозволяє досягти максимальної ймовірності безвідмовної роботи всього програмно-технічного комплексу АСУТП.

Для безперервного нагрівання дуття до температур вище 1300 °С доменна піч обладнана трьома або чотирма повітрянагрівачами – регенеративними теплообмінними пристроями циклічної дії, що по черзі акумулюють тепло в насадках регенераторів (режим нагрівання) або нагрівають дуття (режим дуття). Перемикання повітрянагрівачів з одного режиму в інший відбувається автоматично за заданою програмою: одна година в режимі дуття і дві години в режимі нагрівання. Альтернативно, перемикання може здійснюватися за показником ступеня закриття заслінки регулювання підмішування холодного повітря до дуття. Якщо заслінка наближається до повного закриття, це означає, що повітрянагрівач охолов до межі і температура нагрівання дуття в ньому

небезпечно близька до мінімально допустимого значення, тому необхідно негайно перемкнути цей агрегат у режим нагрівання.

Основними завданнями автоматичного керування тепловим режимом повітрянагрівачів є: забезпечення повного та економічного згоряння палива, нагрівання насадки до заданої температури з обмеженням граничної температури купола для захисту вогнетривких матеріалів від руйнування, а також автоматичне перемикання між режимами нагрівання та дуття.

Функціональна схема системи керування нагріванням повітрянагрівача наведена на рис. 2.1. Газ для опалення повітрянагрівачів надходить по газопроводу I. Тиск газу стабілізується локальною системою регулювання, що включає датчик 5а, вторинний вимірювальний прилад 5б, регулятор 5м, задавач 5в, виконавчий механізм 5д і регулюючу заслінку 5є.

Витрата газу на кожен повітрянагрівач II контролюється датчиком 2а у комплекті з вторинним приладом 2б і підтримується на заданому рівні регулятором витрати 2м за допомогою виконавчого механізму 2д з регулюючою заслінкою 2є, встановленою на підведенні газу до пальника III. Температура купола стабілізується системою, що складається з датчика температури 1а, вторинного приладу 1б, регулятора 1в і виконавчого механізму 1д, який впливає на лопатки напрямного апарата вентилятора IV або на жалюзі повітряного тракту пальника. Температура димових газів після повітрянагрівача вимірюється термоелектричним термометром – термопара 4а та вторинний прилад 4б.

Робота системи регулювання нагрівання повітрянагрівача відбувається наступним чином. Зі схеми автоматичного перемикання надходять сигнали на включення вентилятора та часткове відкриття клапана на газопроводі. Якщо в камері горіння з'являється факел, датчик наявності полум'я 3а дозволяє включити регулятор витрати газу 2г, який з цього моменту підтримує задану витрату газу. Витрата повітря в цей момент встановлюється з розрахунком, щоб коефіцієнт надлишку повітря був близький до одиниці.

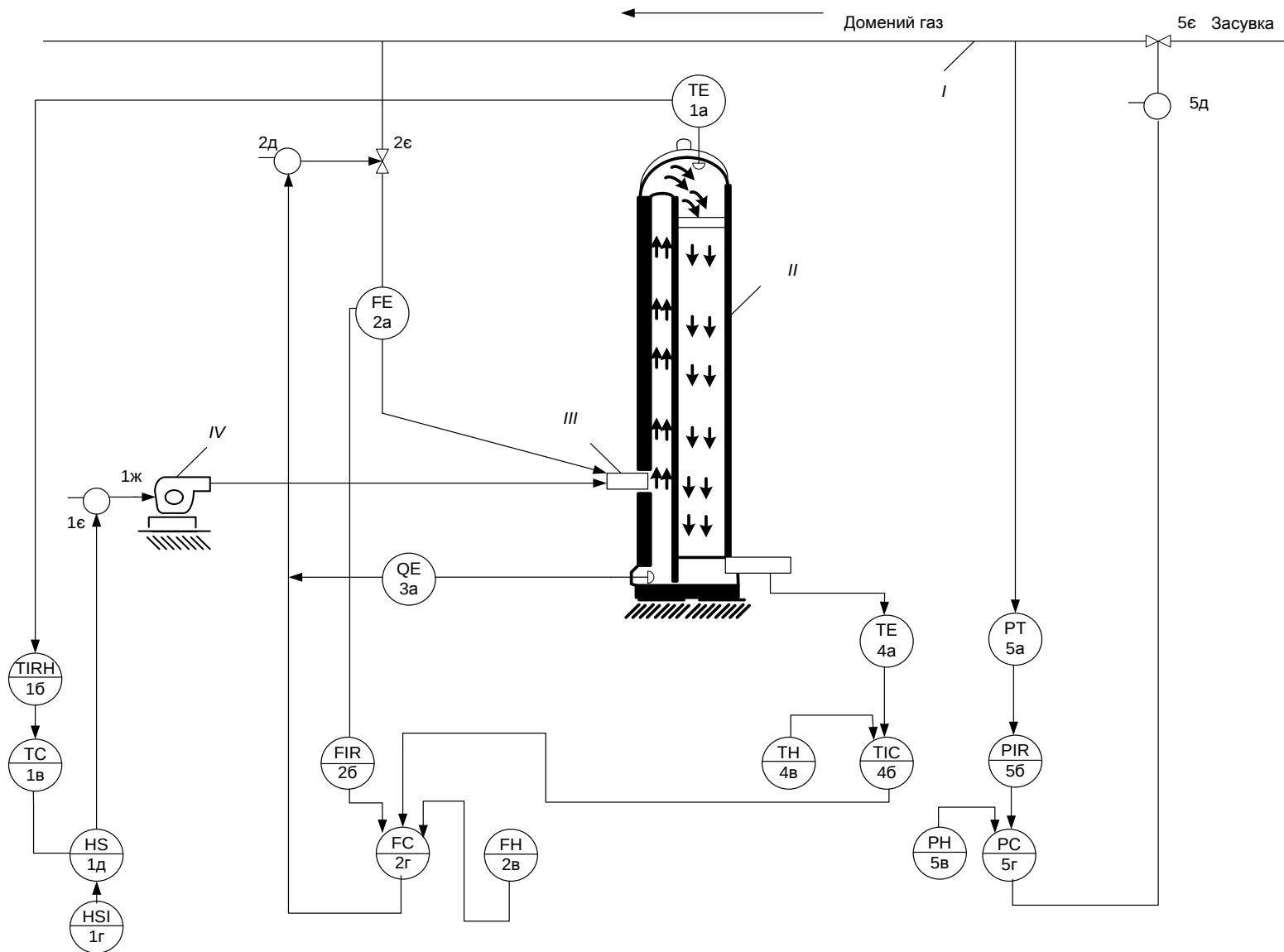


Рис. 2.1. Схема системи автоматичного керування повітрянагрівачами
(розроблено автором)

Температура купола починає зростати й у певний момент досягає максимально допустимого значення, встановленого задавачем. З цього моменту регулятор 1в починає збільшувати витрату повітря, відкриваючи лопатки напрямного апарата вентилятора 1є. При цьому температура купола стабілізується внаслідок зменшення температури продуктів горіння, а тепловіддача від газів до насадки повітряонагрівача збільшується, оскільки зростає об'єм продуктів горіння та збільшується швидкість їх руху по каналах насадки.

У міру прогрівання насадки зростає температура димових газів на виході з повітряонагрівача. Коли вона досягає максимально допустимого значення, заданого задавачем 4в, регулятор витрати газу 2г зменшує подачу газу, не допускаючи подальшого підвищення температури диму. Якщо при цьому температура купола дещо знизиться, регулятор температури 1в відповідно зменшить витрату повітря, відновлюючи температуру купола до заданого значення. Таким чином, функціональна схема реалізує взаємопов'язане регулювання температури купола, витрати газу та повітря, а також температури димових газів на виході з повітряонагрівача, забезпечуючи оптимальні умови нагрівання дуття при економічному спалюванні палива та захисті вогнетривкої кладки.

2.4 Вибір технічних засобів автоматизації

2.4.1 Вибір датчиків температури

Для вимірювання температури купола повітряонагрівача вибираємо сучасний датчик Rosemount 214C. Цей термоелектричний датчик призначений для вимірювання температури газових потоків в умовах впливу високих температур і механічних навантажень, що є типовими умовами для конструктивних елементів доменного обладнання.

Основні технічні характеристики датчика Rosemount 214C:

- а) діапазон вимірювань: від -200 до $+1200$ °С – достатній для вимірювання температури купола навіть в максимальних режимах нагрівання;
- б) вхідний опір: $2,5 \pm 0,2$ Ом;
- в) час реакції: не більше 1,0 с, що забезпечує достатню швидкодію системи управління;
- г) надійність (ймовірність безвідмовної роботи з ймовірністю 0,8): не менше 0,99;
- д) маса: не більше 0,15 кг;
- е) номінальна статична характеристика: тип К (хромель–алюмель), що добре підходить для вимірювання в широкому температурному діапазоні.



Рис. 2.2. Датчик температури Rosemount 214C[5]

Умови експлуатації датчика: температура навколишнього середовища від -50 до $+80$ °С; температура в місці встановлення датчика – не більше $+150$ °С; температура зануреної в контрольоване середовище частини корпусу – не більше $+1000$ °С; тиск робочого середовища протягом 2 с – $0,5$ МПа; вібрація у смузі частот 3...30 Гц із прискоренням 20...50 м/с². Чутливим елементом датчика є закрита термопара з діаметром електродів 0,3 мм. Герметизація датчика та кріплення чутливого елемента в корпусі забезпечуються герметичним виводом з високотемпературного матеріалу. Кабель датчика складається з термопарних провідників, ізольованих один від одного та екранованих плетінкою з нержавіючої сталі, що забезпечує надійний захист від електромагнітних завад. Розробник: Emerson [5].

Для вимірювання температури диму після повітрянагрівача застосовується датчик WIKA TR10-B. Цей термоелектричний датчик призначений для вимірювання температури різноманітних газових потоків, включаючи агресивні димові гази, в умовах підвищеного тиску і запиленості.

Основні технічні характеристики датчика WIKA TR10-B:

- а) діапазон вимірювань: від -200 до $+800$ °C – цілком достатній для контролю температури димових газів, що не перевищує 400 °C;
- б) час реакції: не більше 2 с;
- в) маса: 1,0 кг;
- г) номінальна статична характеристика: тип J (залізо–константан);
- д) робочий тиск: 1,6 МПа;
- е) ступінь захисту від пилу і вологи: IP 65, що забезпечує надійну роботу в умовах запиленого виробничого середовища;
- є) вид вибухозахисту: Ex d (вибухозахищена оболонка);
- ж) матеріал захисних арматур: нержавіюча сталь 316L, стійка до агресивного впливу димових газів.



Рис. 2.3. Датчик температури WIKA TR10-B

(розроблено автором з використанням [6])

Виробник датчика WIKA TR10-B – компанія WIKA, Німеччина, яка є одним з провідних світових виробників вимірювальної апаратури. Обраний датчик добре зарекомендував себе в умовах металургійного виробництва.

2.4.2 Вибір датчика полум'я

Для контролю наявності полум'я в камері горіння повітрянагрівача обираємо фотосигналізатор Honeywell C7027A. Контроль полум'я є критично важливою функцією системи безпеки: відсутність полум'я при відкритому газовому клапані призводить до накопичення вибухонебезпечної газоповітряної суміші в камері горіння і може спричинити потужний вибух при наступній спробі запалювання.

Основні технічні дані фотосигналізатора Honeywell C7027A:

а) живлення: ~220 В (допускається від 180 до 250 В), частота 50–60 Гц; споживана потужність – не більше 3 ВА, що робить пристрій дуже економічним;

б) габаритні розміри: 100×50×50 мм; маса: не більше 0,5 кг; монтаж – фланцевий, безпосередньо на пальниковому пристрої;

в) вхідний сигнал: низькочастотна пульсація світла з частотою 5–10 Гц у діапазоні довжин хвиль від 1 до 3 мкм – саме таким є спектр випромінювання полум'я доменного газу;

г) вихідний сигнал: замикання контактів реле контролю полум'я при виявленні пульсуючого світлового потоку;

д) чутливість (поріг спрацьовування): не більше 1 лк при освітленості у визначеному спектральному діапазоні і частоті пульсацій 8 ± 1 Гц, що забезпечує надійне виявлення навіть слабкого полум'я;

е) швидкодія при появі полум'я: від 0,2 до 0,5 с; при зникненні: від 0,5 до 1,0 с – достатня оперативність для своєчасного аварійного відключення подачі газу.



Рис. 2.4. Фотосигналізатор полум'я Honeywell C7027A
(розроблено автором з використанням [7])

Виробник: Honeywell, США. Важливою перевагою обраного фотосигналізатора є те, що він реагує виключно на пульсуюче полум'я і не дає хибних спрацьовувань від розжарених поверхонь камери горіння, що значно підвищує надійність системи безпеки.

2.4.3 Вибір датчика витрати

Як датчик витрати газу та повітря вибираємо електромагнітний витратомір Siemens SITRANS F M MAG 5100W. Ця модель є одним з найбільш надійних і точних рішень у своєму класі і широко застосовується в металургійній промисловості. Основні технічні характеристики витратоміра:

- а) робочий тиск: до 16 МПа, що значно перевищує робочий тиск у дугтевому тракті і забезпечує великий запас міцності;
- б) діапазон витрат: від 0,1 до 50 000 м³/год, що дозволяє використовувати один тип приладу для вимірювання як малих, так і великих витрат;
- в) похибка вимірювання: $\pm 0,2$ %, що є дуже високою точністю для промислового витратоміра;
- г) маса первинного перетворювача: 5 кг;

д) матеріал корпусу: нержавіюча сталь, стійка до агресивних середовищ.



Рис. 2.5. Витратомір Siemens SITRANS F M MAG 5100W

(розроблено автором з використанням [8])

Виробник: Siemens, Німеччина. Використання витратомірів цього типу дозволяє забезпечити точне дотримання заданих витрат газу і повітря, що є необхідною умовою оптимального спалювання палива і регулювання теплового режиму повітрянагрівачів.

2.4.4 Вибір і розрахунок регулятора для АСУ температури повітрянагрівача

Основним завданням системи є стабілізація температури купола повітрянагрівачів на заданому рівні. При цьому об'єктом регулювання є ділянка від місця зміни витрат газу й повітря до місця установки датчика температури дуття.

Практично всі металургійні агрегати являють собою складні нестационарні об'єкти керування, які описуються диференціальними рівняннями високих порядків і мають нелінійні залежності між вхідними й вихідними

величинами. Разом з тим, при певних допущеннях і дослідженні роботи об'єкта у відносно вузьких межах зміни вхідних і вихідних величин багато об'єктів регулювання, у тому числі й ділянка доменного процесу по каналу регулювання температури купола повітронагрівачів, можна розглядати як лінійний стаціонарний об'єкт з зосередженими параметрами. При виборі типу регулятора й розрахунку його налаштувань необхідно знати коефіцієнт підсилення $K_{об}$, постійну часу $T_{об}$ і час чистого запізнення $t_{об}$ об'єкта, тобто представити об'єкт у вигляді статичного ланцюга із запізнюванням, передатна функція якого має вигляд:

$$W(p) = K_{об} \cdot e^{(-t_{об} \cdot p)} / (T_{об} \cdot p + 1) \quad (2.1)$$

де: $K_{об}$ – коефіцієнт підсилення об'єкта регулювання;

$T_{об}$ – постійна часу об'єкта регулювання;

$t_{об}$ – час чистого запізнення об'єкта.

Для визначення числових значень $K_{об}$, $T_{об}$ і $t_{об}$ металургійних об'єктів використовують експериментально зняті динамічні характеристики, тобто криву розгону. Кривою розгону називають залежність у часі вихідної величини об'єкта регулювання від ступінчастої зміни вхідної величини. Прийняті параметри об'єкта:

а) $K_{об} = 1,3$ – коефіцієнт підсилення об'єкта регулювання, коли виходом є температура купола, вимірювана термopарою в сталевому чоxлі, а входом – коефіцієнт надлишку повітря;

б) $T_{об} = 88$ с – постійна часу об'єкта;

в) $t_{об} = 18$ с – час чистого запізнення об'єкта.

Для визначення закону регулювання й розрахунку параметрів регулятора необхідно задатися вимогами до показників якості перехідного процесу, які стосовно повітронагрівача зводяться до такого:

а) допустима статична помилка $x_{ст}$ не повинна перевищувати 15°C ;

б) перехідний процес приймаємо аперіодичним з мінімальним часом регулювання;

в) час перехідного процесу t_p від початку до повного завершення нагрівання не повинен перевищувати 500 с.

Вибір типу регулятора виконуємо за методикою у такій послідовності:

а) розраховуємо динамічний коефіцієнт регулювання, що дорівнює відношенню відхилення регульованої величини x_1 при наявності регулятора до її відхилення при відсутності регулятора за однакового збурення:

$$R_o = \frac{x_1}{K_{об} \cdot \Delta Z} = \frac{20}{1,3 \cdot 20} = 0,77 \quad (2.2)$$

б) знаходимо відношення часу запізнення до постійної часу об'єкта:

$$a = \tau_{об} / T_{об} = 18 / 88 \approx 0,2 \quad (2.3)$$

в) по типових графіках вибираємо найпростіший регулятор, що забезпечує значення $R_d = 0,77$ при значенні $a = 0,2$ с і для заданого аперіодичного типу перехідного процесу. Вибираємо пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор), що є оптимальним вибором для об'єктів з самовирівнюванням і помірним часом запізнення.

2.4.5 Моделювання САР температури купола повітрянагрівачів

Для остаточного вибору параметрів регулятора, що забезпечують необхідну за технологією якість регулювання, виконаємо моделювання у пакеті прикладних програм SIMULINK, що призначений для автоматизованого дослідження й проектування автоматичних систем регулювання. Він дозволяє виконувати моделювання, аналіз й оптимізацію на основі математичної моделі системи, представленої у вигляді структурної схеми. Структурна схема об'єкта

регулювання при подачі величини стрибкоподібної зміни збурювання наведена на рис. 2.6.

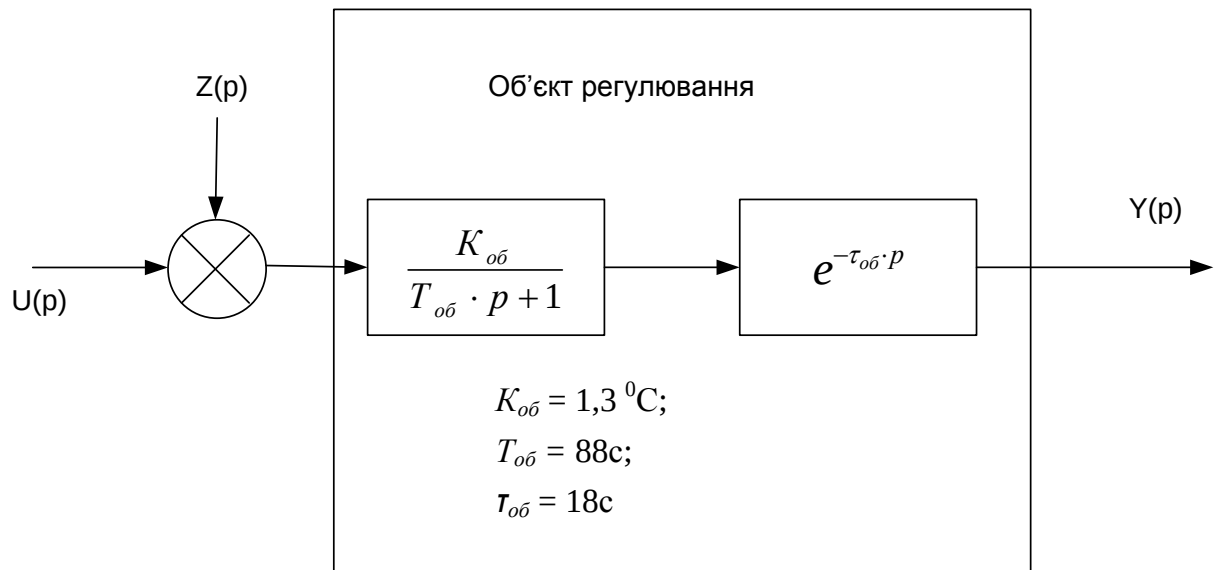


Рис. 2.6. Структурна схема об'єкта регулювання при подачі стрибкоподібного збурювання
(розроблено автором)

Знаходимо коефіцієнти для ПІ-регулятора, що забезпечує аперіодичний перехідний процес:

$$K_p = \frac{0,6}{K_{об} \cdot \alpha} = \frac{0,6}{1,3 \cdot 0,2} = 2,3 \quad (2.4)$$

$$T_i = 0,6 \cdot T_{об} = 0,6 \cdot 88 = 52,8c \quad (2.5)$$

$$K_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{52,8} = 0,019 \quad (2.6)$$

На рис. 2.7 наведена схема моделювання САР температури купола повітрянагрівача при нанесенні стрибкоподібного збурювання, зведеного до входу об'єкта регулювання й еквівалентного 20 % стрибкоподібній зміні ходу виконавчого механізму повітрянагрівача.

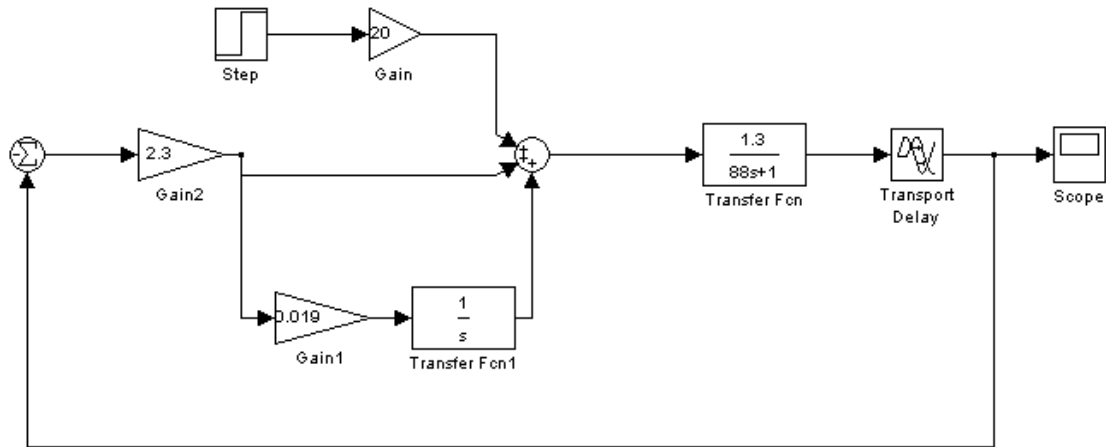


Рис. 2.7. Схема моделювання САР температури купола повітрянагрівача
(розроблено автором)

Графік перехідного процесу при внесенні стрибкоподібного збурювання, наведеного до входу об'єкта й рівного 20 % ходу регулювального органа, наведений на рис.2.8.

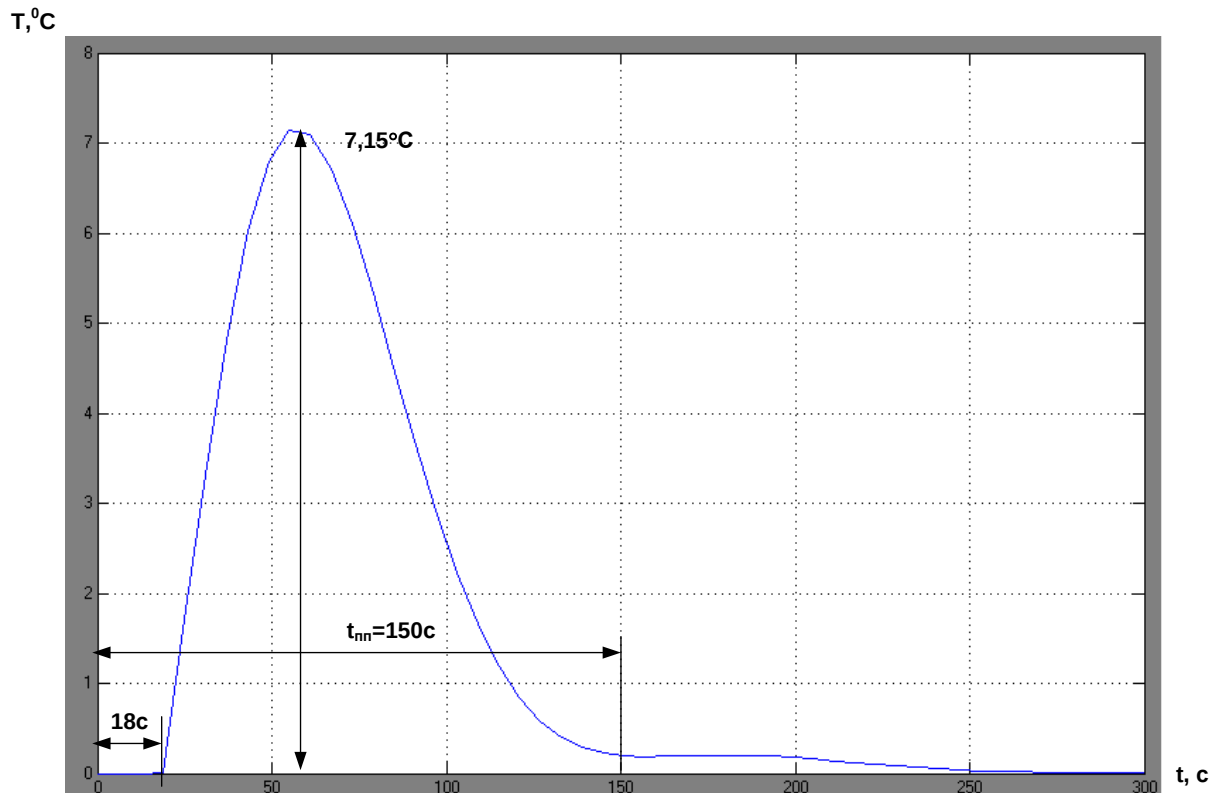


Рис. 2.8. Графік перехідного процесу при внесенні стрибкоподібного збурювання
(розроблено автором)

Аналіз перехідного процесу, представленого на рис. 2.8, показує, що після нанесення стрибкоподібного збурювання, еквівалентного 20 % зміні встановленого в трубопроводі напрямного апарата вентилятора, перехідний процес починається через 18 с, що пояснюється наявністю ланки чистого запізнення. Максимальне динамічне відхилення становить 7,15 °С, при цьому перехідний процес є аперіодичним, а його тривалість не перевищує 170 с – що значно менше допустимих 500 с. Таким чином, якість регулювання повністю задовольняє технологічним вимогам.

Якщо необхідно змінити завдання, тобто задане значення температури купола повітрянагрівача, для цього моделюємо у пакеті прикладних програм SIMULINK структурну схему, зображену на рис. 2.9.

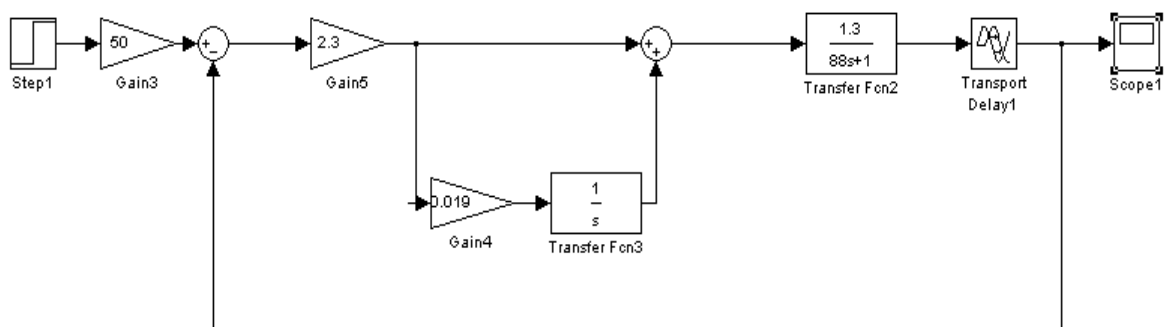


Рис. 2.9. Схема моделювання САР температури купола повітрянагрівача при стрибкоподібній зміні заданого значення на 50 °С
(розроблено автором)

Графік перехідного процесу при зміні заданого значення температури купола повітрянагрівача на 50 °С (рис. 2.10) показує, що максимальне динамічне відхилення становить 15 °С, що повністю задовольняє вимогам експлуатації АСР температури купола повітрянагрівача.

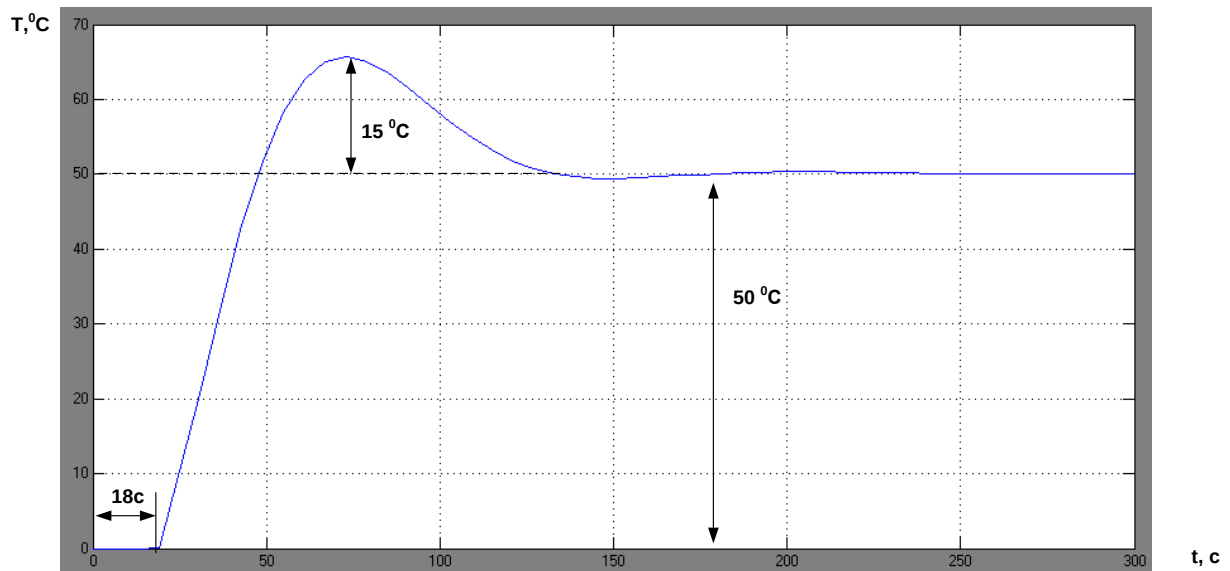


Рис. 2.10. Графік перехідного процесу при зміні заданого значення температури купола повітрянагрівача
(розроблено автором)

Остаточні параметри ПІ-регулятора температури купола повітрянагрівача визначаються у процесі налаштування програмувального контролера в промислових умовах, оскільки точні значення параметрів об'єкта можуть дещо відрізнятися від розрахункових через нелінійності та нестационарність реального технологічного процесу.

2.4.6 Вибір програмувального контролера

Перед вибором апаратної платформи необхідно визначити повний перелік вхідних та вихідних сигналів системи, що проектується. Відповідно до функціональної схеми (рис. 2.1) та описаного алгоритму роботи блоку чотирьох повітрянагрівачів, сигнали систематизовані у табл.2.1.

Таблиця 2.1

**Перелік входних і вихідних сигналів системи керування блоком
повітрянагрівачів**

№	Найменування сигналу	Тип	К-ть на 1 ПН	К-ть для 4 ПН	Загальні сигнали	Всього
1	2	3	4	5	6	7
1	Температура купола (Rosemount 214С, тип К)	AI (TC)	1	4	–	4
2	Температура димових газів (WIKА TR10-B, тип J)	AI (TC)	1	4	–	4
3	Витрата газу на пальник (MAG 5100W, 4–20 мА)	AI	1	4	–	4
4	Витрата повітря на пальник (MAG 5100W, 4–20 мА)	AI	1	4	–	4
5	Тиск газу на вході до блоку (4–20 мА)	AI	–	–	1	1
Всього аналогових входів (AI)				16	1	17
6	Завдання напрямному апарату вентилятора (4–20 мА)	АО	1	4	–	4
7	Завдання регулюючому клапану газу (4–20 мА)	АО	1	4	–	4
8	Завдання регулюючому клапану тиску газу (4–20 мА)	АО	–	–	1	1
Всього аналогових виходів (АО)				8	1	9
9	Наявність полум'я (Honeywell C7027A)	DI	1	4	–	4
10	КВ «відчинено» клапана гарячого дуття (КГД)	DI	1	4	–	4
11	КВ «закрито» КГД	DI	1	4	–	4
12	КВ «відчинено» клапана холодного дуття (КХД)	DI	1	4	–	4
13	КВ «закрито» КХД	DI	1	4	–	4
14	КВ «відчинено» пропускнуго клапана	DI	1	4	–	4

Продовження табл.2.1

1	2	3	4	5	6	7
15	КВ «закрито» пропускного клапана	DI	1	4	—	4
16	КВ «відчинено» видільного клапана газу	DI	1	4	—	4
17	КВ «закрито» видільного клапана газу	DI	1	4	—	4
18	КВ «відчинено» димового клапана 1	DI	1	4	—	4
19	КВ «закрито» димового клапана 1	DI	1	4	—	4
20	КВ «відчинено» димового клапана 2	DI	1	4	—	4
21	КВ «закрито» димового клапана 2	DI	1	4	—	4
22	Вентилятор пальника «Працює»	DI	1	4	—	4
23	Вентилятор пальника «Аварія»	DI	1	4	—	4
24	Тиск газу в нормі (загальний)	DI	—	—	1	1
Всього дискретних входів (DI)				60	1	61
25	Відкрити КГД	DO	1	4	—	4
26	Закрити КГД	DO	1	4	—	4
27	Відкрити КХД	DO	1	4	—	4
28	Закрити КХД	DO	1	4	—	4
29	Відкрити пропускний клапан	DO	1	4	—	4
30	Закрити пропускний клапан	DO	1	4	—	4
31	Відкрити видільний клапан газу	DO	1	4	—	4
32	Закрити видільний клапан газу	DO	1	4	—	4
33	Відкрити димовий клапан 1	DO	1	4	—	4
34	Закрити димовий клапан 1	DO	1	4	—	4
35	Відкрити димовий клапан 2	DO	1	4	—	4
36	Закрити димовий клапан 2	DO	1	4	—	4
37	Пуск вентилятора пальника	DO	1	4	—	4
38	Стоп вентилятора пальника	DO	1	4	—	4
39	Загальна аварійна сигналізація	DO	—	—	1	1
Всього дискретних виходів (DO)				56	1	57

Таким чином, система потребує: DI – 61, DO – 57, AI – 17 (з них 8 термодатчиків типу К та J), AO – 9. Серія S7-1200 обмежена 8 сигнальними модулями розширення для будь-якого CPU; навіть максимальна конфігурація на базі CPU 1215C не дозволяє розмістити потрібну кількість модулів у локальній стійці. Для забезпечення повного набору I/O в одній шасі з резервом для розширення вибираємо програмований контролер Siemens SIMATIC S7-1500 CPU 1511-1 PN [9], що є оптимальним рішенням для критично важливих промислових застосувань рівня доменного цеху. Основні технічні характеристики обраного CPU наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Технічні характеристики SIMATIC S7-1500 CPU 1511-1 PN

Параметр	Значення
Каталожний номер	6ES7 511-1AK02-0AB0
Робоча пам'ять (програма / дані)	175 кБ / 1 МБ
Час виконання бітових операцій	60 нс
Вбудований комунікаційний інтерфейс	PROFINET IO (2 порти, 100 Мбіт/с)
Додаткові інтерфейси	1× Mini USB (сервіс)
Напруга живлення	24 В DC (20,4 – 28,8 В)
Споживання від шини	≤ 3,5 Вт (без модулів)
Максимальна кількість модулів у стійці	32
Підтримувані протоколи	PROFINET IO, Modbus TCP/IP, OPC UA
Діапазон робочих температур	0...+60 °C
Ступінь захисту	IP20
Монтаж	DIN-рейка (TS35)
Маса	340 г

На підставі підрахованих сигналів визначаємо мінімально необхідну кількість модулів розширення, округлюючи до цілого числа модулів у більший бік:

а) дискретні входи: $61/16 = 4$ модулі SM 521 DI $16 \times 24VDC$;

б) дискретні виходи: $57/16 = 4$ модулі SM 522 DO $16 \times 24VDC/0,5A$;

в) аналогові входи (всі типи): $17/8 = 3$ модулі SM 531 AI $8 \times U/I/RTD/TC$ – кожен канал незалежно конфігурується для сигналів 4-20 мА, термопар типу J або K;

г) аналогові виходи: $9/4 = 3$ модулі SM 532 AO $4 \times U/I$.

Разом 14 модулів, що значно менше максимально допустимих 32 для обраного CPU і залишає достатній резерв для подальшого розширення. Технічні характеристики кожного модуля наведено в таблицях 2.3-2.6.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики модуля дискретних входів SM 521 DI $16 \times 24VDC$ (4 шт.)

Параметр	Значення
Каталожний номер	6ES7 521-1BH00-0AB0
Кількість каналів	16
Номінальна напруга вхідного сигналу	24 В DC
Вхідний струм при 1-сигналі	4 мА
Напруга 1-сигналу (гарантовано)	15...30 В
Напруга 0-сигналу (гарантовано)	-3...+5 В
Затримка вхідного сигналу (конфігурується)	0,05...20 мс
Гальванічна ізоляція	Так (групами по 16)
Споживання від шини	90 мА
Діапазон робочих температур	0...+60 °C
Ступінь захисту	IP20
Маса	220 г

Таблиця 2.4

Технічні характеристики модуля дискретних виходів SM 522 DO**16×24VDC/0,5A (4 шт.)**

Параметр	Значення
Каталожний номер	6ES7 522-1BH01-0AB0
Кількість каналів	16
Тип виходів	Транзисторні (p-switching)
Номінальна напруга навантаження	24 В DC
Максимальний вихідний струм на канал	0,5 А
Максимальний вихідний струм на модуль	8 А (при 40 °C)
Захист від короткого замикання	Так (електронний)
Захист від перевантаження	Так
Гальванічна ізоляція	Так (групами по 16)
Час спрацьовування	≤ 0,5 мс
Споживання від шини	120 мА
Діапазон робочих температур	0...+60 °C
Ступінь захисту	IP20
Маса	270 г

Таблиця 2.5

Технічні характеристики модуля аналогових входів SM 531 AI**8×U/I/RTD/TC (3 шт.)**

Параметр	Значення
1	2
Каталожний номер	6ES7 531-7KF00-0AB0
Кількість каналів	8 (незалежно конфігуровані)
Підтримувані типи сигналів	±10 В, 0–10 В, 0–20 мА, 4–20 мА; RTD (Pt100, Pt1000, Ni100 та ін.); TC (типи J, K, E, N, R, S, T та ін.)
Роздільна здатність	16 біт (знакових)
Похибка вимірювання (при 25 °C)	±0,1 % від діапазону
Час перетворення (на канал)	2,5 мс (стандартний режим)
Пригнічення завад (50/60 Гц)	> 100 дБ

Продовження табл.2.5

1	2
Гальванічна ізоляція	Канали від шини – так; між каналами – ні
Споживання від шини	70 мА
Діапазон робочих температур	0...+60 °С
Ступінь захисту	IP20
Маса	300 г

Таблиця 2.6

Технічні характеристики модуля аналогових виходів SM 532 АО 4×U/I (3 шт.)

Параметр	Значення
Каталожний номер	6ES7 532-5HD00-0AB0
Кількість каналів	4
Діапазони вихідного сигналу	0-20 мА, 4-20 мА, ±20 мА; 0-10 В, ±10 В
Роздільна здатність	16 біт
Похибка (при 25 °С)	±0,1 % від діапазону
Максимальний опір навантаження (струм)	600 Ом
Мінімальний опір навантаження (напруга)	1 кОм
Час встановлення вихідного сигналу	≤ 1 мс
Захист від короткого замикання	Так (для струмових виходів)
Гальванічна ізоляція	Канали від шини – так
Споживання від шини	80 мА
Діапазон робочих температур	0...+60 °С
Ступінь захисту	IP20
Маса	240 г

Підсумкова конфігурація системи керування

Позиція	Найменування модуля	Кат. номер	К-ть	Використано каналів	Вільно
CPU	SIMATIC S7-1500 CPU 1511-1 PN	6ES7 511- 1AK02- 0AB0	1	—	—
SM-DI	SM 521 DI 16×24VDC	6ES7 521- 1BH00- 0AB0	4	61 з 64	3
SM-DO	SM 522 DO 16×24VDC/0,5A	6ES7 522- 1BH01- 0AB0	4	57 з 64	7
SM-AI	SM 531 AI 8×U/I/RTD/TC	6ES7 531- 7KF00-0AB0	3	17 з 24	7
SM-AO	SM 532 AO 4×U/I	6ES7 532- 5HD00- 0AB0	3	9 з 12	3

2.4.7 Вибір блоків ручного керування

Для ручного керування процесами у блоці повітрянагрівачів обираємо блоки серії Siemens SIRIUS ACT [10]. Ці блоки характеризуються високою надійністю, ергономічним дизайном, відмінним ступенем захисту від пилу і вологи та простотою інтеграції у систему автоматизації. Блоки SIRIUS ACT випускаються у вигляді стандартизованих модулів і дозволяють гнучко будувати пости управління будь-якої конфігурації.

Основні технічні характеристики SIRIUS ACT:

- а) типи блоків: кнопки з фіксацією і без, перемикачі, сигналізаційні лампи, звукові сигналізатори;
- б) матеріали: високоякісний полікарбонат і метал, стійкі до механічних впливів та хімічних речовин, характерних для металургійного виробництва;
- в) монтаж: проста установка завдяки модульній конструкції та систему швидкого підключення;
- г) захист: ступінь IP69K, що забезпечує надійну роботу в умовах інтенсивного пилу, бризок і навіть струменевого зрошення водою;
- д) інтерфейси: підтримка PROFINET і AS-Interface для зручної інтеграції у мережу автоматизації.



Рис. 2.11. Блоки серії Siemens SIRIUS ACT [10]

SIRIUS ACT забезпечує необхідний рівень надійності та довговічності в умовах важкого промислового виробництва, що робить їх оптимальним вибором для органів ручного керування на постах управління блоком повітрянагрівачів.

2.4.8 Вибір пускача

Для запуску та захисту електродвигунів допоміжного обладнання повітрянагрівачів – насамперед вентиляторів пальника – вибираємо сучасні електромагнітні пускачі Schneider Electric серії TeSys D [11]. Ці пускачі відрізняються від аналогів поєднанням простого технічного обслуговування, компактних габаритів і надійного захисту двигунів від перевантажень і коротких замикань.

Основні технічні характеристики TeSys D:

- а) номінальний струм: до 150 А, що перекриває потреби всіх двигунів у даній системі;
- б) номінальна напруга: до 690 В АС;
- в) кількість головних полюсів: 3 або 4;
- г) допоміжні контакти для сигналізації стану пускача (включений/відключений);
- д) монтаж на DIN-рейку або безпосередньо на панель щита управління.



Рис. 2.12. Пускач Schneider Electric серії TeSys D
(розроблено автором з використанням [11])

TeSys D забезпечує надійний запуск, реверс і захист електродвигунів, що робить їх ідеальними для використання у системах автоматизації металургійного виробництва з великою кількістю пускових циклів на добу.

2.4.9 Вибір виконавчого механізму

Для керування клапанами у дуттєвому і газовому трактах повітронагрівачів вибираємо електричні виконавчі механізми Rotork серії IQ [12]. Ці приводи є одними з найпоширеніших у металургійній галузі завдяки поєднанню надійності, точності позиціонування та розвинених діагностичних можливостей.

Основні технічні характеристики Rotork IQ:

- а) тип приводу: електричний багатооборотний з черв'ячним редуктором;
- б) номінальний момент на виході: до 3000 Нм, що забезпечує впевнений привод великих засувки і кранів;
- в) живлення: 24 В DC, 230 В AC або 400 В AC на вибір замовника;
- г) комунікаційні інтерфейси: Modbus, Profibus, HART, що забезпечує безпроблемну інтеграцію з SIMATIC S7-1500;
- д) ступінь захисту: IP68 – повна водонепроникність, що важливо в умовах вологого виробничого середовища;
- е) вбудовані датчики положення, моменту і температури для безперервної діагностики стану механізму.



Рис. 2.13. Виконавчий механізм Rotork серії IQ
(розроблено автором з використанням [12])

Виконавчі механізми Rotork IQ забезпечують точне, надійне і безпечне керування трубопровідною арматурою повітронагрівачів, що є необхідною умовою коректного виконання алгоритму перемикання режимів роботи.

2.4.10 Вибір регулювального органа

Для безперервного регулювання витрат газу і повітря у технологічних трактах повітронагрівачів вибираємо регулювальні клапани серії SAMSON Type 3241 [13]. Ці клапани відрізняються надзвичайно широким діапазоном регулювання, низькими гідравлічними втратами у відкритому стані і тривалим ресурсом роботи без заміни ущільнень.

Основні технічні характеристики SAMSON Type 3241:

- а) тип конструкції: односідловий регулювальний клапан з прямим ходом штока;
- б) умовний прохід: від DN 15 до DN 300 – є типорозміри для всіх трубопроводів тракту;
- в) умовний тиск: PN 16–PN 40;

г) матеріал корпусу: нержавіюча сталь або чавун залежно від умов застосування;

д) привод: електричний або пневматичний – сумісний з обраними виконавчими механізмами Rotork IQ;

е) вбудовані датчики положення і система самодіагностики стану клапана і приводу.



Рис. 2.14. Регулювальний клапан серії SAMSON Type 3241

Клапани SAMSON Type 3241 забезпечують точне та надійне регулювання потоків газу і повітря у системі автоматизації повітрянагрівачів, що є ключовим елементом реалізації заданого закону регулювання температурного режиму.

2.5 Розробка алгоритму САУ нагріванням повітрянагрівачів

Після переведення повітрянагрівача у режим нагрівання основна вимога – це досягнення максимально можливої температури насадки за найкоротший проміжок часу. Однак температура продуктів горіння обмежена стійкістю

вогнетривкої кладки купола повітрянагрівача: для високоглиноземистої кладки максимально допустима температура становить 1320 °С. Перевищення цієї температури навіть протягом короткого часу може призвести до необоротного руйнування кладки і позапланового простою агрегату.

Для запобігання руйнуванню вогнетривкої кладки автоматичне регулювання режиму нагрівання здійснюється шляхом підтримання постійної температури купола. Необхідна температура факела досягається за допомогою певного співвідношення витрат газу та повітря. Тому існують два можливих способи регулювання температури купола:

- а) регулювання витрати повітря при постійній витраті газу;
- б) регулювання витрати газу при постійній витраті повітря.

Для сучасних доменних печей прийнята система регулювання температури купола при постійній витраті газу. Це забезпечує зниження температури купола шляхом збільшення надлишку повітря порівняно з оптимальним: більша кількість повітря охолоджує продукти горіння і при цьому збільшує їх об'єм і швидкість руху по каналах насадки, що забезпечує кращий прогрів насадки на всю її глибину.

Система регулювання при постійній витраті повітря передбачає зниження температури купола шляхом зменшення витрати газу. Однак це призводить до зниження температури насадки і збільшує час нагрівання повітрянагрівача, тому перевагу надають першому способу.

Автоматичне регулювання здійснюється за допомогою комплексу приладів, що включає термопару у кладці купола, електронні потенціометр і регулятор, які керують приводом регулювального органа – жалюзі газового пальника. У системах з постійною витратою повітря виконавчим регулювальним органом є газовий дросельний клапан.

Алгоритм роботи САУ температури купола повітрянагрівача (рис. 2.15) передбачає такі операції:

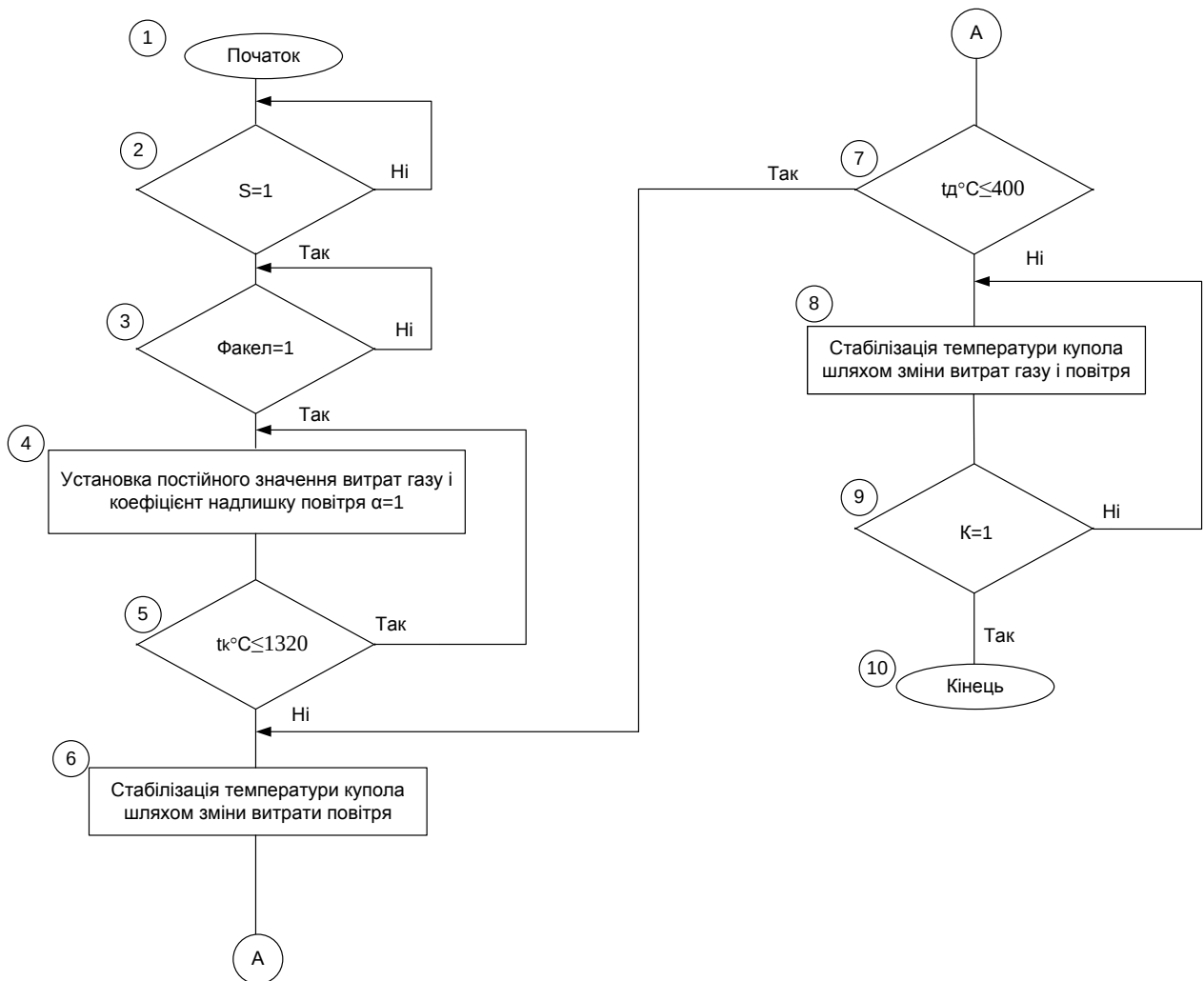


Рис. 2.15. Алгоритм роботи САУ температури купола повітрянагрівача
(розроблено автором)

а) включення системи нагрівання – система автоматичного перемикавання повітрянагрівачів надсилає сигнал S на включення вентилятора та часткове відкриття клапана на газопроводі (ознака переходу повітрянагрівача у режим нагрівання);

б) запуск факела – при спалаху факела датчик наявності полум'я дозволяє встановити постійне значення витрати газу та коефіцієнта надлишку повітря; витрата повітря встановлюється таким чином, щоб коефіцієнт надлишку повітря α був близьким до одиниці;

в) зростання температури – температура купола починає зростати і досягає максимально допустимого значення 1320 °С; з цього моменту починається стабілізація температури купола шляхом зміни витрати повітря через відкриття лопаток напрямного апарата вентилятора;

г) стабілізація температури – стабілізація досягається шляхом зменшення температури продуктів горіння через збільшення їх кількості і швидкості руху по каналах насадки;

д) контроль температури диму – температура диму зростає; при досягненні максимально допустимого значення 400 °С завдання регулятора витрати газу змінюється, щоб не допустити подальшого зростання температури на виході;

е) завершення нагрівання – при надходженні ознаки переходу повітрянагрівача у режим дуття ($K = 1$) нагрівання завершується і виконується автоматична послідовність перемикавання клапанів.

Робота системи регулювання нагрівання повітрянагрівача протікає згідно зі схемою, що представлена на рис. 2.15 і ілюструє послідовність операцій та взаємодію компонентів системи автоматичного управління нагріванням. Описаний алгоритм є циклічним і виконується незалежно для кожного з чотирьох повітрянагрівачів, забезпечуючи безперервне постачання доменної печі гарячим дуттям заданої температури.

2.6 Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності

2.6.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів на ділянці АСУТП доменної печі №6 ДЦ-1

При обслуговуванні повітрянагрівачів на ділянці АСУТП доменної печі №6 виникають різноманітні шкідливі та небезпечні виробничі фактори. Основною небезпекою є отруєння робітників доменним газом і його вибухи. Доменний газ є безбарвним і практично не має запаху, що унеможливорює його виявлення за органолептичними ознаками – це робить його особливо

підступним. Щоб уникнути цих небезпек, необхідно суворо дотримуватись правил безпеки у газовому господарстві металургійних заводів [14].

На персонал ділянки АСУТП впливають такі шкідливі і небезпечні виробничі фактори:

Підвищена температура повітря: робота поблизу гарячих елементів обладнання, корпусів повітронагрівачів і трубопроводів гарячого дуття підвищує ризик теплового стресу та опіків; у літню пору в поєднанні з тепловим випромінюванням від обладнання ця проблема стає особливо гострою.

Шум і вібрація: шум від працюючого обладнання – вентиляторів пальника, повітродувних машин, клапанів – може досягати значних рівнів і призводить до зниження гостроти слуху, стресу та порушень роботи серцево-судинної системи при тривалому впливі.

Підвищена загазованість повітря: при можливих витоках доменний газ, що містить значні кількості чадного газу (CO), може накопичуватися в зонах роботи персоналу; вдихання навіть невеликих концентрацій CO призводить до отруєння, яке може мати летальний наслідок.

Небезпека ураження електричним струмом: робота з електрообладнанням в умовах підвищеної вологості або запиленості збільшує ризик ураження струмом; несправні ізоляція або кабелі у поєднанні з вологим середовищем можуть спричинити небезпечну ситуацію.

Недостатнє освітлення: вночі та у затемнених ділянках площадки обслуговування недостатнє освітлення ускладнює виконання точних робіт і підвищує ризик нещасних випадків; при роботі з засувками і клапанами в темряві вірогідність помилки різко зростає.

Крім фізичних факторів, персонал ділянки АСУТП зазнає нервово-психічних перевантажень: розумова перенапруга через необхідність одночасного контролю великої кількості параметрів, перенапруга зорових і слухових аналізаторів при тривалій роботі з дисплеями і в умовах шуму, монотонність окремих операцій. Вплив зазначених факторів знижує загальну

працездатність персоналу і може призводити до виробничих помилок та професійних захворювань.

Основними джерелами тепловиділення в приміщеннях ділянки АСУТП є мікропроцесори і сервери систем автоматичного керування, допоміжне і сервісне устаткування та прилади освітлення. Для створення нормальних умов праці для працівників ділянки встановлені норми виробничого мікроклімату, що визначають оптимальні та допустимі значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря для різних категорій робіт [15].

Персонал підпадає під вплив шуму, який є одним з найбільш поширених шкідливих факторів у виробництві. Шум – це сукупність безладних звукових коливань, що передаються через середовище і сприймаються органами слуху як небажаний подразник. Тривалий вплив шуму та вібрації призводить до зниження гостроти зору і слуху, підвищення артеріального тиску, розладів нервової і серцево-судинної систем, а також порушень опорно-рухового апарату. Шум рівнем 120-140 дБ здатен викликати механічне ушкодження органів слуху, а тривалий вплив шуму з рівнем вище 100 дБ на частотах до 200 Гц може призвести до необоротних змін у слухових органах [17]. Вібрація у свою чергу викликає підвищену втому, головний біль, болі у суглобах та порушення координації рухів.

Ступінь впливу пилу на організм залежить від його фізико-хімічних властивостей, токсичності, дисперсності та концентрації. Пил може подразнювати шкіру, очі та дихальні шляхи, викликаючи різноманітні професійні захворювання. У приміщеннях ділянки АСУТП вміст пилу не повинен перевищувати 2 мг/м³ для зон обслуговування локальної автоматики і 0,75 мг/м³ для приміщень з мікропроцесорною технікою [19].

Шкідливі виробничі фактори на ділянці АСУТП

Шкідливий фактор	ГПК (норма)	Фактично	Одиниці
Температура повітря	17–23	25	°С
Шум ДВА	80	50	дБ
Пил	6,0	0,8	мг/м ³
Окис вуглецю СО	20	0,2	мг/м ³

2.6.2 Заходи щодо зниження шкідливих і небезпечних факторів

Для зниження впливу виявлених шкідливих і небезпечних виробничих факторів на ділянці АСУТП доменної печі №6 необхідно вжити такі заходи.

Безпека підводів газу: підводи газу до пальників повітрянагрівачів мають бути виключно надземними – це забезпечує можливість візуального огляду та своєчасного виявлення витоків. Пристрої для відведення конденсованої води повинні надійно запобігати можливості прориву газу в дренажні канали. Продування підведень газу для витіснення повітря або залишкового газу дозволяється здійснювати лише через свічки, розташовані на значній висоті понад рівнем землі, – щоб газ розсіювався безпечно і не міг накопичуватися поблизу робочих місць.

Безпека при продуванні й запалюванні: продування через пальники повітрянагрівачів категорично заборонено через надзвичайно високий ризик отруєння та вибуху. Газові затвори на підводах до пальників повинні ефективно перекривати газ без будь-якого просочування назовні; для цього застосовуються подвійні затвори – дві дискові засувки з вимірювальною свічкою між ними. При запуску газу його можна подавати лише після попереднього розігріву кладки камери горіння; підпалювати газ відкритим факелом категорично заборонено. Якщо газ не спалахнув або полум'я з будь-якої причини погасло, необхідно негайно припинити подачу газу, добре

провітрити порожнину повітронагрівача і повторювати пуск лише після додаткового прогріву камери.

Правильне перемикання режимів роботи: при переведенні повітронагрівачів з газу на дуття спочатку вимикається газ, і через 2-3 хвилини, коли залишковий газ виходить у димову трубу, закривається засувка, що відокремлює повітронагрівач від пальника, і перекривається димовий канал; після цього відкриваються засувки холодного та гарячого дуття. Для переведення повітронагрівача з дуття на нагрів газом інший агрегат спочатку переводять з газу на дуття; після встановлення нормальної тяги у повітронагрівачі обережно включається газ шляхом поступового відкривання засувки на підводі газу до пальника.

Вентиляція і захист від шуму: гаряче повітря з повітронагрівача при підготовці до технічного обслуговування випускається через димову трубу через спеціальну засувку або обвідний трубопровід – це запобігає як можливим опікам персоналу, так і підвищеному рівню шуму. Для запобігання скупченню газів, парів і пилу у виробничих приміщеннях необхідно забезпечити безперервну ефективну вентиляцію. Виробничі приміщення ділянки АСУТП повинні бути обладнані системами кондиціонування повітря для підтримання нормативних значень температури, вологості і швидкості руху повітря, що сприятиме комфортним умовам праці та підвищенню продуктивності персоналу [19].

Освітлення: правильний підбір і розміщення освітлювальних пристроїв на робочих площадках знижує стомлюваність і суттєво зменшує ризик виробничих травм. Для цього використовується штучне освітлення у вигляді захищених електричних світильників у вибухобезпечному виконанні.

Усі перелічені заходи дозволять значно знизити вплив шкідливих і небезпечних виробничих факторів на здоров'я і безпеку персоналу ділянки АСУТП та підвищать загальну ефективність виробничих процесів.

2.6.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека є комплексом організаційних та технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, запобігання виникненню пожеж, обмеження їх поширення та створення умов для успішного їх гасіння. Особливу небезпеку пожежі становлять у цехах з підвищеним ступенем пожежонебезпеки – таких як доменний, – оскільки вони можуть призводити до значних матеріальних втрат та становити пряму загрозу для життя людей.

Пожежі в доменному цеху можуть виникати з різних причин, проте найбільшу небезпеку становить електрообладнання. У табл. 2.9 наведено основні причини пожеж та їх коротку характеристику.

Таблиця 2.9

Основні причини пожеж та їх характеристика

Причина	Характеристика
Електричні перевантаження	Перевищення допустимого навантаження призводить до перегріву та займання ізоляції проводів
Коротке замикання	Контакт проводів різного потенціалу через пошкодження або зношену ізоляцію призводить до іскріння та займання
Погана якість електромонтажу	Неякісні матеріали або помилки монтажу створюють вогнища нагрівання контактів та іскроутворення
Перегрів електроприладів	Несправні або застарілі прилади без належного охолодження можуть перегріватися та займатися
Використання пошкоджених кабелів	Кабелі з пошкодженою ізоляцією можуть спричинити коротке замикання або локальний перегрів
Статична електрика	Накопичена статична електрика може утворити іскру і запалити горючі матеріали

Розглянемо кожну причину пожеж детальніше.

Електричні перевантаження є однією з найпоширеніших причин займань у промисловості. Коли електричне навантаження тривало перевищує допустимий рівень, проводи і кабелі нагріваються, що може призвести до займання ізоляції. Особливо небезпечно це у місцях прихованої проводки або у важкодоступних зонах, де займання можуть довго залишатися непоміченими.

Коротке замикання виникає при безпосередньому контакті між провідниками різного потенціалу. Це може статися через механічні пошкодження, зношеність ізоляції від часу або температурних перепадів, або через помилки при монтажі. Коротке замикання призводить до інтенсивного виділення тепла та іскріння, яке може спалахнути у вигляді іскрового дугового розряду.

Перегрів електроприладів виникає при використанні несправних або морально застарілих пристроїв, що не мають ефективної системи тепловідведення, або при порушенні умов вентиляції навколо працюючого обладнання. В умовах металургійного виробництва, де температура навколишнього середовища і без того підвищена, ця проблема стає особливо актуальною.

Для запобігання пожежам у приміщеннях з електронним обладнанням та іншими електроприладами необхідно виконувати такі заходи:

а) проводити регулярний технічний огляд і профілактичне обслуговування електроприладів – це дозволяє виявити та усунути можливі несправності ще до того, як вони стануть причиною пожежі;

б) застосовувати якісні матеріали і забезпечувати кваліфікований монтаж – це знижує ризик займань через погану якість з'єднань або матеріалів;

в) встановлювати автоматичні системи пожежної сигналізації та пожежогасіння – такі системи забезпечать своєчасне виявлення займання та оперативну його ліквідацію ще на початковій стадії;

г) правильно розміщувати електроприлади – вони повинні встановлюватися в місцях, де відсутні легкозаймисті матеріали, і бути обладнані справними системами охолодження;

д) регулярно навчати персонал правилам пожежної безпеки – всі працівники повинні знати порядок дій при виникненні пожежі та вміти правильно і впевнено користуватися первинними засобами пожежогасіння.

Пожежна безпека є невіддільним аспектом нормальної роботи металургійного підприємства. Комплексне виконання всіх превентивних заходів і підтримання персоналу у постійній готовності до дій в аварійних ситуаціях дозволяє мінімізувати ризики і забезпечити захист як людей, так і матеріальних цінностей.

ВИСНОВКИ

Впровадження системи автоматичного керування температурою повітрянагрівачів доменної печі №6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» значно підвищило ефективність роботи повітрянагрівачів. Система забезпечила стабільне регулювання температури купола в межах допустимих значень, що дозволило оптимізувати процес горіння і зменшити витрати палива при одночасному збереженні ресурсу вогнетривкої кладки.

Автоматизація процесу керування повітрянагрівачами сприяла значному зниженню питомих витрат на енергоносії та підвищенню загальної продуктивності підприємства. Завдяки оптимальному підтриманню співвідношення палива і повітря для горіння вдалося зменшити питому витрату коксу, що є важливим чинником у структурі собівартості чавуну.

Система автоматичного управління забезпечила суттєво вищий рівень стабільності доменного процесу. Це дозволило знизити ймовірність аварійних ситуацій і підвищити загальну безпеку виробництва. Реалізована система блокувань при ручному керуванні оператором з центрального поста та з місцевих пультів виключає можливість помилкових дій при перемиканні клапанів, що раніше нерідко призводило до надзвичайних ситуацій.

Вибір сучасних мікропроцесорних пристроїв – контролера Siemens SIMATIC S7-1500, датчиків Rosemount 214C і WIKA TR10-B, фотосигналізатора Honeywell C7027A, витратомірів Siemens SITRANS F M MAG 5100W – для реалізації системи автоматичного керування дозволив створити надійну і ефективну систему з широкими можливостями подальшої модернізації. Функціональна схема та алгоритм роботи системи забезпечують необхідний рівень автоматизації і точність регулювання температурних режимів.

Завдяки автоматизації вдалося знизити кількість небезпечних ситуацій на виробництві, пов'язаних з помилками персоналу, і покращити умови праці для операторів шляхом зниження необхідності безпосереднього перебування у

небезпечних зонах. Розроблені заходи з охорони праці та екологічної безпеки відповідають чинним вимогам і стандартам і спрямовані на мінімізацію всіх виявлених виробничих ризиків.

Впровадження системи автоматичного керування температурою повітронагрівачів на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» продемонструвало значний позитивний вплив на ефективність, безпеку та економічність виробничого процесу, сприяючи підвищенню загальної продуктивності та стабільності роботи підприємства в умовах жорсткої конкуренції на ринку чорної металургії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Колпаков С.В., Шелков Є.М., Поліковський М.В., Горшков Ю.А. Високотемпературні доменні повітрянагрівачі з насипною насадкою з корундових куль // Сталь. – 1992. – №10. – С. 11–17.
2. Чернов М.М., Чечуро А.М. Ведення доменної печі. – М.: Металургія, 1987. – 138 с.
3. Леонідов М.К., Клягін Г.С. Підвищення температури доменного дуття шляхом переведення повітрянагрівачів на попарно-паралельну роботу // Сталь. – 1993. – №3. – С. 204–207.
4. Доменні повітрянагрівачі / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкін, С.Д. Каштанова та ін. – М.: Металургія, 1982. – 176 с.
5. Датчик температури Rosemount 214C: технічний опис / Emerson. – URL: <https://trade-control.com.ua/ua/products/rosemount-214c> (дата звернення: 30.05.2026).
6. Датчик температури WIKA TR10-B. – URL: <https://www.koda.ua/ukr/products/desc.html?id=1177> (дата звернення: 30.05.2026).
7. Honeywell C7027A / C7035 Flame Detectors. – URL: <https://process.honeywell.com> (дата звернення: 30.05.2026).
8. SITRANS F M MAG 5100W: опис продукту / Siemens AG. – URL: <https://www.siemens.com/ua/uk> (дата звернення: 30.05.2026).
9. SIMATIC S7-1500: системний посібник / Siemens AG. – Нюрнберг, 2020. – 884 с.
10. SIRIUS ACT: технічний опис / Siemens AG. – URL: <https://www.siemens.com/global/en> (дата звернення: 30.05.2026).
11. Пускач LE1D09M7 серії TeSys D / Schneider Electric. – URL: <https://elektrovoz.com.ua> (дата звернення: 30.05.2026).
12. Rotork IQ Electric Actuator: настанова з монтажу та обслуговування / Rotork Controls Ltd. – URL: <https://www.rotork.com> (дата звернення: 30.05.2026).

13. SAMSON Type 3241 Control Valve: технічні дані / SAMSON AG. – URL: <https://www.samsongroup.com> (дата звернення: 30.05.2026).
14. Правила безпеки систем газопостачання: Наказ Міністерства енергетики України від 25.01.2017 № 39.
15. Державні санітарні норми і правила: Наказ МОЗ України від 08.04.2014 № 248.
16. ДСТУ EN ISO 9612:2018. Акустика. Оцінка впливу шуму на робочих місцях.
17. ДСТУ ISO 1999:2018. Акустика. Оцінка професійного впливу шуму.
18. Правила охорони праці при експлуатації електроустановок: Наказ Міністерства соціальної політики України від 31.03.2015 № 181.
19. ДСТУ EN 481:2018. Повітря робочої зони. Визначення розміру частинок аерозолів.
20. Гнатенко П.І. Основи пожежної безпеки. – К.: Освіта, 2010.
21. Левченко В.М. Пожежна безпека в електроустановках. – Х.: Фоліо, 2012.
22. Державний стандарт України. Пожежна безпека. Основні положення. – К.: Держстандарт, 2015.
23. Савчук О.Г. Пожежна профілактика на виробництві. – К.: Либідь, 2011.
24. Миколайчук А.В. Системи пожежної сигналізації. – К.: Політехніка, 2014.
25. Смирнов О.І. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. – К.: Знання, 2013.
26. Костенко М.М. Електробезпека та пожежна безпека. – Л.: Видавництво Львівської політехніки, 2012.
27. Гушко С. Вимоги з оформлення письмових робіт у державному університеті економіки і технологій. – Кривий Ріг, 2020. – 53 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок
151-13-2026арб
Автор
151-13-2026арб

Науковий керівник / Експерт
Модло Є

ІД документу
334133572

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації
STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ
STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту
6/2/2026

Дата редагування
—

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



10800
Кількість слів



80466
Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		7
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		140

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз	Колір тексту
#	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	

**ЗГОДА здобувача вищої освіти
Державного університету економіки і технологій про перевірку
кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії Університету**

Я, *Діковіцький Дмитро Ігорович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система керування тепловим режимом повітронагрівача доменної печі виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» зазначена робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ). З умовами такого розміщення ознайомлений.

01.06.2026