МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (бакалаврського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Проект автоматизації термічної печі. Система автоматичного регулювання температури робочого простору

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

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Козинець Ю.В.

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

Рецензент _____

Запоріжжя 2026

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (бакалаврський)
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(код та назва)

Спеціалізація _____
(код та назва)

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Козинець Юрій Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Проект автоматизації термічної печі. Система автоматичного регулювання температури робочого простору
керівник роботи Пазюк М.Ю., професор, доктор т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1833-с
2. Строк подання студентом роботи 25 травня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз існуючого рівня автоматизації; розробка схеми інформаційних потоків; розробка технічного завдання; структура програмно-технічного комплексу; проєктування системи регулювання температурним режимом; розробка технічної документації; техніко-економічних показники; охорона праці, пожежна безпека
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема автоматизації, принципові електричні схеми, монтажно-комутаційна схема, схема зовнішніх з'єднань креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи.

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

7 Дата видачі завдання 14.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого рівня автоматизації	14.04-20.04.26	
2	Розробка схеми інформаційних потоків	21.04-27.04.26	
3	Розробка технічного завдання	28.04-04.05.26	
4	Вибір структури та складу програмно-технічного комплексу	05.05-07.05.26	
5	Проєктування системи регулювання температури робочого простору	08.05-10.05.26	
6	Розробка технічної документації	08.05-14.05.26	
7	Розрахунок системи автоматизації та показників її надійності	15.05-18.05.26	
8	Розрахунок техніко-економічних показників	19.05-21.05.26	
9	Розгляд питань охорони праці та техногенної безпеки	22.05-23.05.26	
10	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді	24.05-25.05.26	

Студент _____ Юрій КОЗИНЕЦЬ
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Віктор КОВАЛЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Козинець Ю. В. Проект автоматизації термічної печі. Система автоматичного регулювання температури робочого простору.

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

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, шести розділів, висновків, переліку джерел посилання з 51 найменувань, викладена на 90 сторінках машинописного тексту, включаючи 10 рисунків, 19 таблиць та 9 аркушів графічного матеріалу.

Метою роботи є розробка системи автоматизації процесом термічної обробки зливків у течмічній печі.

У загальній частині роботи дано опис конструкції камерної печі з нерухомим подом, розглянуто чинну технологію термообробки, а також критично оцінено наявні засоби автоматизації, що дозволило чітко окреслити технічні проблеми, які потребують вирішення. Технічні рішення представлені у спеціальному розділі, де спроєктовано функціональну схему автоматизації колодязя, підібрано комплектувальне обладнання й виконано розрахунки регулювальних та виконавчих вузлів. Практична цінність роботи підтверджується розробкою комплекту схем (принципової електричної, монтажної, зовнішніх з'єднань) та конструктиву шафи КВПіА. Питання безпеки життєдіяльності розкрито у розділі охорони праці. Організаційно-економічний ефект від впровадження системи підтверджено розрахунками штатного розпису персоналу, зниження собівартості продукції та загальної рентабельності проєкту.

Ключові слова: автоматизація, термічна піч, інформаційні потоки, камерна піч, функціональна схема, контур управління, технічні засоби, контролер, термопара, трубопровід.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ 9
1.1 Технологічний агрегат і алгоритм його роботи 9
1.2 Аналіз існуючого рівня автоматизації 16
1.3 Розробка схеми матеріальних та інформаційних потоків 19
2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ 24
2.1 Вимоги до структури та функціонування системи 24
2.2 Вимоги до чисельності та кваліфікації персоналу 25
2.3 Вимоги до безпеки 27
2.4 Вимоги до функцій, які виконуються системою 28
2.5 Вимоги до видів забезпечення 30
2.6 Вимоги до інформаційного забезпечення 32
3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 34
3.1 Вибір та обґрунтування функціональної структури СА 34
3.2 Вибір (розробка) математичної моделі системи управління 36
3.3 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня СА 43
4 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ 56
4.1 Функціональна схема автоматизації 56
4.2 Розробка принципової електричної схеми 58
4.3 Розробка принципової електричної схеми живлення 59
4.4 Розробка монтажної комутаційної схеми щита КВПіА 59
4.5 Зовнішній вид шафи та вид внутрішній панелі 60
4.6 Розробка схеми зовнішніх з’єднань системи автоматичного регулювання витрати природного газу 61
4.7 Замовна специфікація обладнання 62
5 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 65
5.1 Розрахунок параметрів наближеним методом 65
5.2 Повний розрахунок параметрів надійності 67

6 ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 72
6.1 Небезпечні та шкідливи фактори виробництва 72
6.2 Організація пожежної безпеки 74
6.3 Електробезпека 77
7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ 81
ВИСНОВКИ 84
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА 86

ВСТУП

Термічні печі камерні з нерухомим подом є оптимальним рішенням для високотемпературного нагрівання масивних і великогабаритних заготовок. Оскільки великі злитки мають значну теплову інерцію та низьку теплопровідність у холодному стані, існує високий ризик виникнення критичних внутрішніх термічних напружень під час швидкого підйому температури.

Щоб забезпечити рівномірне прогрівання по всьому перерізу злитка без загрози його розтріскування, санітарні норми та технологічні інструкції вимагають реалізації чотиристороннього теплообміну. Для цього злитки розташовують у робочому просторі печі вертикально.

Безпечна, надійна та економічно виправдана експлуатація термічної камерної печі з нерухомим подом безпосередньо залежить від точного контролю і стабілізації витрати палива. Вихід цього параметра за регламентні межі призводить до перевитрати дефіцитних енергоресурсів, критичного перегріву металу, виникнення внутрішніх термічних тріщин через нерівномірне розширення шарів злитка, а також до прискореного зносу чи аварійного прогару вогнетривкої футеровки самого агрегату. Саме тому головною метою створення сучасної системи автоматичного регулювання є комплексне підвищення надійності та якості роботи як окремої печі, так і всього термічного відділення цеху загалом. Ця система покликана безперервно утримувати ключові параметри процесу в жорстких допусках, забезпечуючи тим самим високу ефективність, технологічну точність і рентабельність металургійного виробництва.

Важливим кроком на шляху модернізації технологічних процесів у камерних печах є їхня повна автоматизація, яка у сучасному промисловому середовищі дозволяє повністю усунути суб'єктивні помилки обслуговуючого персоналу під час реалізації складних багатоступеневих температурних графіків. Одночасно з цим впровадження засобів автоматики гарантує максимальний рівень промислової безпеки, підвищує точність відпрацювання динамічних режимів, оптимізує співвідношення компонентів паливо-повітря в пальникових

пристроях та суттєво знижує витрати на капітальні й поточні ремонти обладнання. Таким чином, перехід на автоматичне керування безпосередньо трансформується у зростання загального коефіцієнта корисної дії теплотехнічного комплексу та помітне зниження собівартості кінцевої продукції.

Вибір камерних печей з нерухомим подом є найбільш виправданим для термічної обробки масивних і великогабаритних заготовок. Оскільки великі злитки мають колосальну теплову інерцію та низьку теплопровідність у холодному стані, існує висока загроза виникнення небезпечних внутрішніх напружень при інтенсивному підйомі температури. Для прискорення дифузійних процесів та отримання високої макроструктурної однорідності металу необхідно забезпечити всебічне прогрівання заготовки. Це досягається шляхом вертикального розташування злитків у робочому просторі печі, що дозволяє організувати ефективний чотиристоронній теплообмін за рахунок оптимальної циркуляції продуктів згоряння та радіаційного випромінювання від стін печі.

1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний агрегат і алгоритм його роботи

Камерна піч зі стаціонарним подом належить до класу теплотехнічних агрегатів періодичної дії, де ключовим інженерним завданням є забезпечення рівномірного нагрівання металу за умови оптимізації процесу спалювання палива та досягнення максимальної продуктивності. Повсюдне впровадження таких агрегатів у металургійному виробництві обумовлене їхньою високою гнучкістю щодо налаштування температурних режимів, універсальністю стосовно видів термічної обробки, а також можливістю роботи із широкою номенклатурою заготовок різної форми та габаритів. На відміну від агрегатів із викотним подом, стаціонарна конструкція повністю виключає значні втрати теплоти через акумуляцію енергії висувною платформою та її охолодження поза робочим простором. Водночас це вимагає застосування зовнішніх засобів механізації для виконання операцій посадження та видачі металу. У промислових умовах великогабаритні печі обслуговуються потужними напільними завантажувальними машинами, які рейковими шляхами переміщуються вздовж фронту завантаження ряду термічних агрегатів.

Технологічний цикл роботи обладнання розпочинається з формування садки, яку попередньо укладають на спеціальні опорні елементи (бугелі). За допомогою лап напільної машини, що заводяться під бугелі, сформована партія металу транспортується до печі, де після підйому заслінки робочої зони вноситься всередину камери. Потім лапи опускаються у відповідні технологічні канали (поглиблення) в поду печі, передаючи вагу садки на опорну поверхню, після чого механізм висувається назад, а заслінка герметично закривається. Самі бугелі залишаються всередині камери протягом усього циклу термообробки і зазнають багаторазових теплозмін, через що їх виготовляють із високолегованих жароміцних марок сталі. Наступним етапом є запуск пальникових пристроїв,

розташованих у підподових топках, звідки продукти згоряння спрямовуються безпосередньо до робочого простору печі.

Важливою конструктивною особливістю цієї схеми є наявність рециркуляційних каналів, через які під дією розрідження в підподову топку всмоктуються відпрацьовані гази з робочої зони агрегату. Цей процес дозволяє суттєво знизити початкову температуру факела пальника на вході в камеру нагріву, запобігаючи локальному перегріву металу, та одночасно інтенсифікує конвективний теплообмін за рахунок збільшення швидкості циркуляції газового потоку. У разі зміни маси садки або її конфігурації автоматичне керування рециркуляцією дозволяє гнучко адаптувати динаміку теплопередачі. Окрім того, зниження температурного градієнта вздовж висоти камери позитивно позначається на стійкості елементів внутрішнього аркового склепіння. Контроль тиску в робочому просторі печі є додатковим інструментом стабілізації теплового балансу, оскільки мінімізує підсмоктування холодного атмосферного повітря. Сучасне футерування камери волокнистими вогнетривкими матеріалами дозволяє зменшити теплову інерцію стін та скоротити час виходу печі на режим.

Розглянута термічна піч періодичної дії має робочу площу поду 18,3 квадратних метрів і спеціалізується на виконанні операцій високого відпуску, відпалу, а також нормалізації сортового прокату. Конструктивно вона виконана у вигляді футерованої камери з арковим склепінням, геометричні розміри якої становлять 2560 міліметрів за шириною, 1360 міліметрів за висотою та 7065 міліметрів за довжиною, і яка оснащена підподовими паливними відсіками для ефективної генерації теплоти.

Характеристики печі:

- призначення печі – термообробка;
- повна площа печі – 18,3 м^2;
- продуктивність печі – 0,48 - 1,63 т/ч;
- теплова потужність – 4,4 -11,5 млн. ккал/цикл;

– паливо – природно-доменна суміш або природний газ;

– нижча теплотворна здатність суміші або газу – 1650 або 1600 ккал/м^3 відповідно;

– тиск повітря перед піччю – 300…450 кгс/м^2;

– вироби, що нагріваються: коло, квадрат, смуга – 8…300 мм, 20...40 мм, 80...350 мм, перетин - 8...180 мм; довжина – до 6000 мм; марка сталі – вуглеводневі, леговані;

– садка в печі - прямокутної форми, габаритні розміри 1300х1400х6000 мм, максимальна вага садки – 26 т;

– температура металу, що нагрівається, при посаді – 20 ◦С, при видачі 560-860 °С;

– спосіб нагріву – відкритий нагрів продуктами горіння;

– наявність контрольно-вимірювальних приладів – КВП і автоматика;

– відсутність примусової циркуляції газів у печі;

– відсутність захисних газів;

– тип опалювальних пристроїв - «Труба в трубі», ЧПС-НТ;

– відсутні пристрої для підігріву повітря й газу для згорання палива;

– спосіб видалення з печі окалини (шлаків) - сухий, ручний;

– періодичність чищення від окалини (шлаків) – 2 рази на місяць.

Як паливо в печі використається природно-доменна суміш із об'ємною теплотою згорання 1650 ккал/м^3 при 20 °С и Р = 760 мм рт. ст., що спалюється в 5-ти пальниках типу «труба в трубі», розташованих нижче поду печі із правої сторони на печах № 9, 10, 18, 20, 22-24 і з лівої сторони на печах № 12, 16, 17, 19. Параметри пальників типу «труба в трубі» представлені в таблиці 1.1.

Таблиці 1.1 – Параметри пальників типу «труба в трубі»

Найменування	Одиниці виміру	Показники
тип		«труба в трубі»
паливо		природно-доменна суміш
продуктивність по газі проектна фактична	нм/ч нм/ч	150 5…100
тиск фактичний в пальника газу повітря	мм вод. ст. мм вод. ст.	100…150 120…180
температура в пальнику газу повітря	°С °С	20 20
Коефіцієнт надлишку повітря		1,16

Склад сухого газу :

CO – 9 %; CO_2 – 15%; H_2 – 15%; CH_4 – 7%; C_nH_n – 0.75%; O_2 – 0.25%; N_2 – 43%; H_2S – 0%;

Теплотворність робоча – 1650 ккал/нм3;

Тиск газу перед піччю – 350-500 мм вод. ст.;

Тиск повітря перед піччю – 300-450 мм вод. ст.

Евакуація продуктів згоряння з робочого простору печі здійснюється через газовідвідні вікна, виконані на рівні поду в міжпальникових проміжках, з їх подальшим спрямуванням вертикальними вихідними каналами до надпічних димоходів. З метою інтенсифікації теплообміну та забезпечення рівномірного

прогрівання нижньої частини садки, певна частка димових газів відводиться через спеціальні підподові канали, розташовані безпосередньо в подині агрегату.

Кінцеве скидання газового потоку в атмосферу забезпечується через індивідуальну металеву димову трубу, що проходить крізь покрівлю цеху.

Експлуатаційні показники роботи печі показані в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Експлуатаційні показники роботи печі

Найменування	Одиниці виміру	Показники
Продуктивність печі	т/год	0,72
Питома продуктивність печі	кг/м2год	39,34
Витрата матеріального палива (середньогодинна)	нм3/год	286
Витрата тепла за цикл	ккал	11,4 *106
Питома витрата тепла	ккал/кг	635
Питома витрата умовного палива	кг у.т. / т	90,9
Тепловий ККД печі	%	19,39
Коефіцієнт використання палива (КВП)	%	64,35
Угар металу по печі (по всаду)	%	2

Експлуатаційні показники роботи печі в режимі відпалу при $t_{ср}$ = 840 °С, тривалість знаходження металу в печі 25 ч, марка стали 4Х5ФС, вага садки 18 т.

Організаційна структура сучасного термічного цеху базується на чіткій взаємодії трьох основних виробничих ланок, до яких належать ділянка нагрівальних печей, ваговий проліт та ділянка ад'юстажної обробки. Зокрема, у пічному прольоті великих металургійних підприємств, таких як Дніпроспецсталь, може бути зосереджено понад два десятки високопродуктивних печей. Сама термічна обробка є ключовим металознавчим інструментом цілеспрямованої зміни внутрішньої структури металів і сплавів шляхом теплового впливу. Цей процес складається із суворо регламентованих за часом етапів нагрівання, технологічної витримки та наступного охолодження із заданою швидкістю. Термообробку застосовують як проміжну операцію для покращення технологічних властивостей напівфабрикатів, наприклад, для полегшення подальшої обробки різальним інструментом, або як фінішну операцію для формування остаточного комплексу високих механічних та

експлуатаційних характеристик готової продукції.

Теоретичною основою для вибору температурних режимів слугує діаграма стану залізо-вуглець, яка описує фазові перетворення у сплавах. При нагріванні доевтектоїдної сталі вище першої критичної точки починається перекристалізація перлітної складової з утворенням дрібних зерен аустеніту. У процесі подальшого нагріву в інтервалі між першою та третьою критичними точками відбувається поступове розчинення надлишкового фериту, яке повністю завершується при перетині верхньої критичної лінії, де структура металу стає однорідною аустенітною. Для заевтектоїдних сталей температурні перетворення відбуваються аналогічно, проте в інтервалі критичних температур в аустеніті розчиняється надлишковий цементит, а повний перехід в аустенітну фазу завершується вище лінії заевтектоїдних перетворень.

Залежно від поставлених технологічних завдань у промисловості застосовують різні види термічного впливу. Повний відпал передбачає нагрівання сталі вище верхньої критичної точки, тривалу витримку для вирівнювання температури по всьому об'єму садки та подальше дуже повільне охолодження безпосередньо разом із піччю (рис. 1.1).

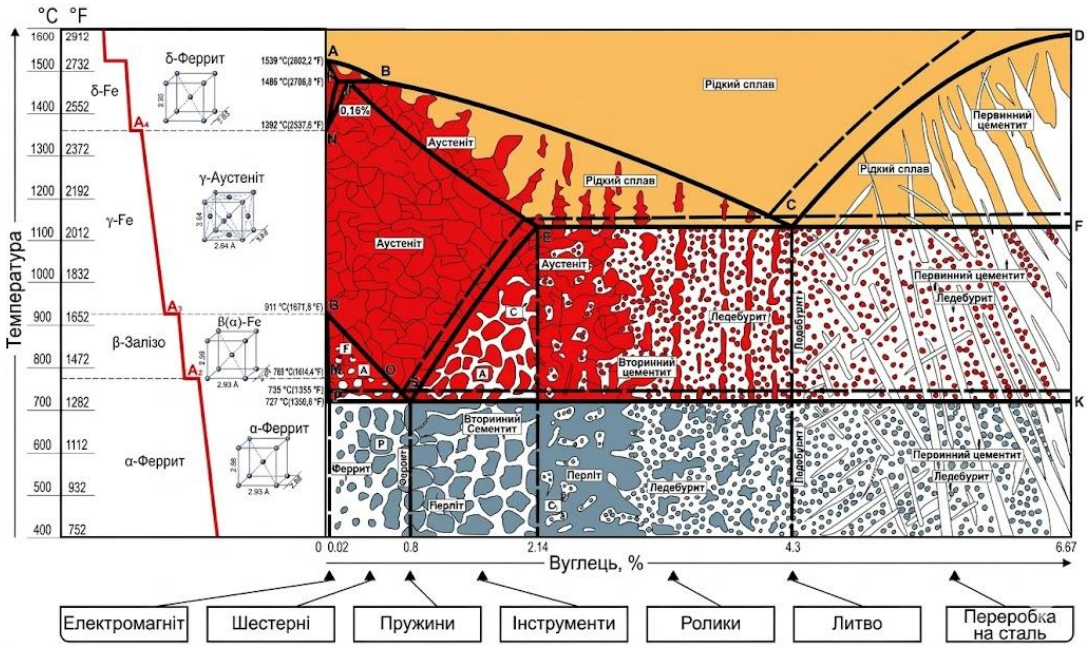


Рисунок 1.1 – Діаграма стану залізо-вуглець

Ця операція є досить тривалою і триває від вісімнадцяти до двадцяти чотирьох годин, оскільки швидкість зниження температури жорстко обмежується в перлітній області для забезпечення повної фазової перебудови, зниження твердості та зняття внутрішніх напружень після гарячої пластичної деформації. Більш продуктивним методом є нормалізація, за якої метал нагрівають вище критичних точок, але охолоджують на спокійному повітрі, що дозволяє отримати дрібнозернисту структуру за коротший проміжок часу. Для оптимізації властивостей загартованих деталей використовують відпуск, який поділяють на низький, середній та високий залежно від температури процесу. Низький відпуск зберігає максимальну твердість інструментів і підшипників, середній формує високу пружність пружинних сталей, а високий відпуск забезпечує найкраще поєднання міцності та пластичності конструкційних матеріалів.

Ваговий проліт цеху виконує важливу логістичну функцію, забезпечуючи точний прийом металопродукції, контроль її маси, формування пакетів та раціональний розподіл садок між діючими нагрівальними агрегатами. Заключним етапом виробничого циклу є ад’юстажна обробка, яка призначена для остаточного фінішного доведення геометрії та поверхні прокату до суворих вимог нормативної документації. На цій ділянці виконується правка прутків на спеціальних машинах для усунення кривизни, а також хімічне травлення або світлення поверхні, що дозволяє виявити та локалізувати внутрішні й зовнішні дефекти. Потім здійснюється абразивне зачищення або шліфування для повного видалення дефектних зон і зневуглецьованого шару, виконується обрізання торців, видалення заусенців та остаточне сортування на інспекторських столах. Завершується ад’юстажний цикл фінішним тавруванням, зважуванням, антикорозійною консервацією та пакуванням готового сортового прокату перед його відправкою замовнику.

1.2 Аналіз існуючого рівня автоматизації

Історичний аналіз розвитку промислової автоматизації свідчить про поступову зміну пріоритетів при створенні керуючих систем на передових металургійних підприємствах світу. Статистичні дослідження, започатковані ще наприкінці минулого століття в Інституті проблем управління, продемонстрували, що найбільша частка впроваджуваних засобів автоматизації припадала на контури управління якістю продукції, що становило близько третини від загальної кількості систем. Наступними за вагомістю були завдання енергозбереження та раціонального використання ресурсів, які охоплювали чверть усіх розробок. Забезпечення промислової безпеки процесів, підтримання заданої продуктивності агрегатів, а також інтелектуальна підтримка оперативного й обслуговуючого персоналу розподілялися приблизно в рівних долях, посідаючи від одинадцяти до чотирнадцяти відсотків, тоді як на інші локальні цілі припадала незначна частина засобів.

Сучасні реалії вітчизняного металургійного комплексу демонструють певну відмінність від світових векторів розвитку. Питання екологічності, енергоефективності та ресурсозбереження в Україні не завжди позиціонуються як домінантні цілі управління, попри те, що глобальна чорна металургія орієнтується на концептуальну тріаду, яка інтегрує енергію, екологію та економіку. Комплексне розв'язання цих проблем має здійснюватися в межах єдиного інформаційного простору інтегрованих автоматизованих систем управління (ІАСУ). Теоретичний фундамент для побудови таких систем був закладений ще у сімдесятих роках XX століття, проте тогочасне загальне технологічне відставання у сфері обчислювальної техніки та мікропроцесорної бази завадило практичному розгортанню повномасштабних інтегрованих комплексів. З огляду на теперішнє складне фінансово-економічне становище вітчизняних підприємств, найбільш раціональним підходом є поетапна розробка та впровадження окремих критично важливих компонентів ІАСУ з їх подальшою інтеграцією при мінімальних капіталовкладеннях.

У сучасних умовах актуальність застосування комп'ютерно-інформаційних технологій для оптимізації енерго-екологічних параметрів металургійних процесів невпинно зростає під впливом двох ключових факторів. Перший зумовлений високим обчислювальним потенціалом новітніх засобів автоматизації, які здатні ефективно відпрацьовувати складні багатокритеріальні завдання за наявності спеціалізованих математичних моделей і алгоритмів. Другий фактор полягає в появі принципово нових енергозберігаючих технологічних процесів та інноваційних теплотехнічних агрегатів, ефективна експлуатація яких апріорі неможлива без використання прецизійних комп'ютерних систем керування. У зв'язку з цим у промислову практику увійшло базове поняття енерго-екологічної якості виробництва, підвищення якого є пріоритетним завданням для розробників обладнання, фахівців з автоматизації та менеджменту підприємств.

Стрімке здорожчання паливно-енергетичних ресурсів перетворює енергозбереження на один із найважливіших важелів підвищення конкурентоспроможності української металопродукції на міжнародних ринках. Ця проблема є комплексною і вимагає взаємопов'язаного вирішення технологічних, економічних та екологічних питань. У періоди економічних коливань роль раціональної організації виробництва та автоматизованого керування суттєво посилюється. За оцінками експертів, якщо за стабільних умов ефект енергозбереження від оптимізації контурів управління становить від десяти до тридцяти відсотків, то у вітчизняній практиці значна частина перевитрат енергії викликана саме недосконалістю та складнощами оперативного керування технологічними об'єктами.

Для впровадження новітніх маловідхідних та низькоенергоємних способів обробки сталі роль комп'ютерного моделювання стає визначальною. Досвід провідних промислових підприємств підтверджує, що застосування адекватних математичних моделей, які повною мірою враховують динаміку і теплофізичну специфіку процесів, дозволяє створювати високоефективні системи керування. Яскравим прикладом практичної реалізації такого підходу є системи управління

енергозберігаючими технологіями, які успішно функціонують у прокатних комплексах при координації температурних режимів нагрівальних печей та станів гарячої прокатки.

Специфіка функціонування камерних печей періодичної дії полягає у суттєвій неоднорідності послідовних завантажень. Технологічні садки суттєво відрізняються між собою кількістю заготовок, їхньою загальною масою, марочним складом сталі, геометрією виробу, а також початковим тепловим станом металу та самої футеровки печі. З огляду на це, першочергову увагу слід приділяти етапу формування садки. Оптимальним є групування виробів за критерієм їхньої термічної масивності та вибір такої схеми укладання, яка забезпечує максимальну площу теплосприймальної поверхні металу. В інженерній практиці керування тепловим режимом печі традиційно реалізують орієнтуючись на найбільш динамічно прогріті зони садки, тоді як тривалість технологічної витримки розраховують за станом найменш прогрітих (масивних) ділянок заготовки. При цьому сумарна маса партії металу повинна жорстко відповідати проєктній потужності агрегату для виключення режимів недовантаження.

Технологічні регламенти термічної обробки зазвичай мають багатоступінчастий характер, що поєднує кілька послідовних циклів примусового нагрівання, стабілізуючої витримки та керованого охолодження. Найбільшу тривалість мають періоди температурної витримки, які необхідні для вирівнювання температурного градієнта за перерізом виробів та забезпечення однорідності фазових перетворень. На більшості підприємств тривалість витримки досі визначається емпірично на основі розрахунку питомого часу на одну тонну маси. Проте суттєвий резерв для інтенсифікації процесу та зниження питомих витрат газу полягає в динамічному квантуванні часу витримки з урахуванням фактичного поточного стану теплофізичної системи, що інтегрує гріюче газове середовище, садку та вогнетривку кладку печі. Для практичної реалізації такого підходу необхідний безперервний моніторинг теплового стану, точне вимірювання маси садки та впровадження адаптивних математичних

моделей теплообміну, параметри яких коригуються безпосередньо під час проходження плавки.

Іншим вагомим чинником енергозбереження є мінімізація втрат теплоти на акумуляцію енергії масивною футеровкою під час підйому температури, що особливо актуально для печей періодичної дії. Згідно з результатами балансових випробувань, витрати енергії на розігрів кладки в камерних печах фасонно-сталеливарних цехів можуть досягати майже третини від усього приведеного тепла, через що реальний коефіцієнт корисної дії таких агрегатів часто не перевищує чверті від потенційно можливого.

Для усунення цього недоліку економічно доцільно виконувати завантаження нової партії металу безпосередньо після видачі попередньої садки, підтримуючи залишковий тепловий рівень у камері в межах від трьохсот до чотирьохсот градусів Цельсія. Оскільки через нестабільність ринку металопродукції простої камерних печей можуть тривати до половини всього календарного часу роботи, виникає гостра потреба у впровадженні інтелектуальних систем прогнозування та оптимального планування роботи всього термічного відділення.

1.3 Розробка схеми матеріальних та інформаційних потоків

Автоматизоване керування сучасним теплотехнічним комплексом є складним інформаційним процесом, який виступає обов'язковою умовою для стабільної реалізації базового матеріального процесу та досягнення заданих техніко-економічних показників. Точність первинної інформації про поточний стан об'єкта, а також її своєчасна й достовірна передача оператору або керуючому контролеру повністю визначають якість відпрацювання складних багатоступінчастих режимів термічної обробки. Будь-яка похибка у вимірюванні або затримка в каналах зв'язку може призвести до температурного дисбалансу та

виходу параметрів за межі технологічних допусків.

Для забезпечення прецизійного ведення процесу нагрівання металу необхідно розглядати камерну піч як цілісну кібернетичну систему, в якій безперервно взаємодіють внутрішні матеріальні та інформаційні потоки. Матеріальний контур охоплює фізичне переміщення та трансформацію речовини й енергії, включаючи подачу палива і повітря до пальникових пристроїв, хімічну реакцію горіння, рух продуктів згоряння через робочий простір печі, а також безпосередній радіаційно-конвективний теплообмін із садкою металу та футеровкою.

Паралельно з матеріальним функціонує інформаційний контур, який забезпечує збирання, обробку та передачу даних про стан системи. Цей процес розпочинається на рівні первинних вимірювальних перетворювачів, таких як термопари для контролю температури у різних зонах камери, датчики тиску в робочому просторі та витратоміри на трубопроводах палива й повітря. Отримані аналогові сигнали трансформуються у цифровий код і надходять до мікропроцесорного контролера, який на основі закладених алгоритмів і математичних моделей розраховує оптимальні керуючі впливи. Далі ця інформація у вигляді графічних трендів та мнемосхем візуалізується на автоматизованому робочому місці оператора, а у зворотному напрямку передається на виконавчі механізми, які регулюють положення запірно-регулюючої арматури. Тільки чітка координація та синхронізація матеріальних потоків енергоносіїв із інформаційними потоками зворотного зв'язку дозволяє мінімізувати теплову інерцію печі, оптимізувати витрату палива та гарантувати високу макроструктурну однорідність оброблюваного металу.

Таким чином, для якісного ведення процесу нагрівання металу необхідно мати уявлення про процес, як про систему матеріальних (рис. 1.2) і інформаційних (рис. 1.1) потоків усередині цієї системи.

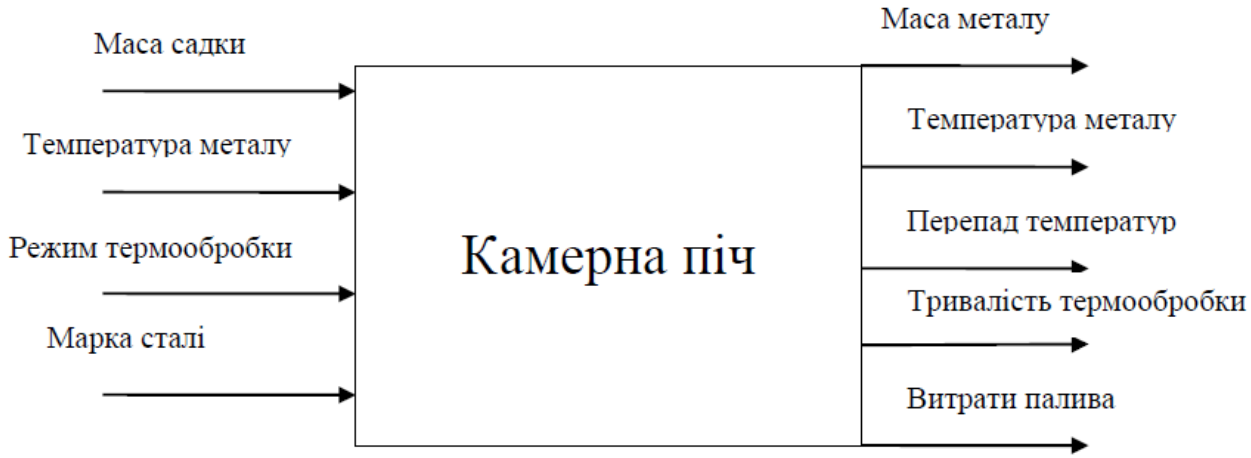


Рисунок 1.1 – Схема інформаційних потоків термічної камерної печі

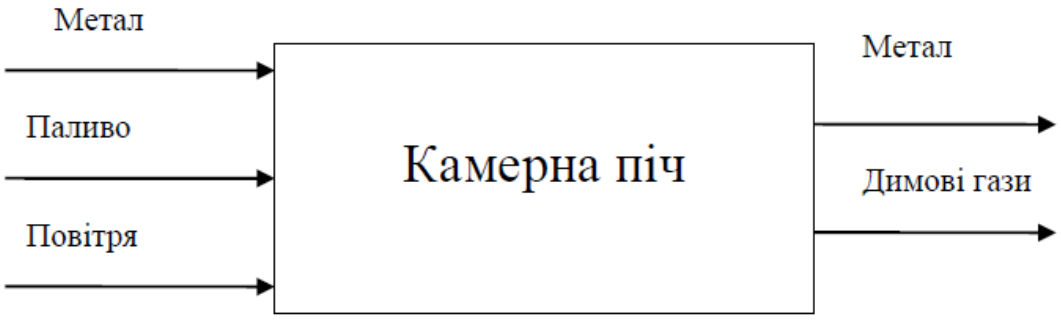


Рисунок 1.2 – Схема матеріальних потоків термічної камерної печі

Вхідним матеріальним потоком, що надходить на досліджуваний об'єкт керування, є сортовий прокат, який після проходження всіх стадій теплового впливу трансформується у кінцеву продукцію – термічно оброблений метал із заданими фізико-механічними властивостями. Для забезпечення стабільного перебігу технологічного процесу на нагрівальний агрегат безперервно подаються зовнішні енергетичні потоки, а саме природний газ як паливо та атмосферне повітря, необхідне для підтримки стехіометричного процесу горіння. Вихідним газоподібним потоком системи є відпрацьовані димові гази, які після віддачі теплоти садці евакуюються через складну систему підподових і надпічних каналів у димову трубу.

Ефективне керування цим взаємопов'язаним комплексом вимагає впровадження прецизійних контурів регулювання співвідношення витрат

«паливо-повітря» для мінімізації хімічного та фізичного недопалу газу. Тонке налаштування цих потоків безпосередньо впливає на товщину утворення окалини та глибину зневуглецьованого шару на поверхні сортового прокату під час нагрівання. Окрім того, частина енергії газу безпосередньо акумулюється масивною вогнетривкою кладкою печі, що зумовлює високу теплову інерційність об'єкта і вимагає застосування адаптивних алгоритмів управління. Стабілізація тиску в робочому просторі печі дозволяє оптимізувати баланс між подачею енергоносіїв та видаленням продуктів згоряння, виключаючи неконтрольовані підсмоктування холодного повітря з цеху.

Висновки. Проведений у першому розділі комплексний аналіз камерної термічної печі періодичної дії зі стаціонарним подом як об'єкта автоматизації дозволив детально вивчити її конструктивні й теплофізичні особливості, а також чітко окреслити ключові техніко-технологічні проблеми її експлуатації. Встановлено, що досліджуваний агрегат площею поду 18,3 квадратних метрів має високу технологічну гнучкість та універсальність щодо номенклатури сортового прокату і видів його термічної обробки, проте характеризується значною тепловою інерційністю масивної вогнетривкої кладки та нестабільністю завантажень. Низький тепловий коефіцієнт корисної дії печі, який за результатами експлуатаційних випробувань становить лише 19,39%, безпосередньо пов'язаний із великими витратами енергії на акумуляцію тепла футеровкою та неефективним ручним керуванням режимами витримки й співвідношення паливо-повітря.

Аналіз чинного рівня автоматизації показав повну моральну та фізичну застарілість наявної приладової бази, яка спирається на аналогові реєструвальні прилади й локальні регулятори колишніх поколінь. Відсутність працездатних систем захисного відсікання палива при відкриванні заслінки печі створює серйозні ризики для промислової безпеки виробництва та робить перебіг процесу критично залежним від суб'єктивного людського фактора. Сформовані схеми матеріальних та інформаційних потоків наочно демонструють необхідність розгляду теплотехнічного агрегату як єдиної кібернетичної системи, де

прецизійна координація витрат енергоносіїв із інформаційними контурами зворотного зв'язку є визначальним чинником енергозбереження.

Таким чином, результати дослідження повністю обґрунтовують актуальність і технічну доцільність розробки сучасної системи автоматичного регулювання температури робочого простору печі на базі мікропроцесорного контролера. Впровадження проєкту дозволить оптимізувати витрату паливно-енергетичних ресурсів шляхом динамічного квантування часу витримки садки, мінімізувати угар металу, повністю нівелювати вплив людських помилок на якість термообробки сталі марки 4Х5ФС та забезпечити максимальний рівень промислової безпеки термічного цеху. Розглянуті шляхи вдосконалення роботи агрегату створюють надійний фундамент для наступних етапів проєктування, що включають вибір сучасних технічних засобів автоматизації та розрахунок регулювальних органів.

2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

2.1 Вимоги до структури та функціонування системи

Проєктована автоматизована система керування технологічним процесом за своєю структурою, термінологічною базою та функціональними можливостями повинна повністю відповідати вимогам ДСТУ 2226-93. Згідно з чинними нормативними положеннями, архітектура системи будується за ієрархічним принципом і розподіляється на три взаємопов'язані рівні, до яких належать локальний рівень, рівень безпосереднього керування виробництвом та верхній рівень диспетчеризації.

На нижньому локальному рівні забезпечується безпосередня взаємодія технічних засобів автоматизації з теплотехнічним агрегатом. Основними завданнями цього ярусу є прецизійне перетворення фізичних величин контрольованих технологічних параметрів в уніфіковані електричні сигнали, формування прямих керуючих впливів на виконавчі пристрої та регулюючі органи, а також апаратна реалізація контурів технологічних блокувань і протиаварійного захисту. Окрім цього, локальне обладнання виконує функцію нормування та узгодження сигналів, що надходять від первинних вимірювальних перетворювачів, із вхідними каналами пристроїв зв'язку з об'єктом. У разі виникнення будь-яких відхилень від норми або аварійних ситуацій на цьому рівні передбачено миттєве ініціювання світлової та звукової сигналізації для оперативного оповіщення персоналу цеху.

Рівень підсистемного керування виробництвом базується на використанні мікропроцесорних контролерів і відповідає за централізований збір, первинну фільтрацію та обробку масивів інформації, які надходять від датчиків технологічної системи. До базового алгоритму роботи цього рівня входить циклічне опитування датчиків стану, двосторонній інформаційний обмін із суміжними підсистемами, автоматичне виявлення виходу контрольованих величин за регламентні межі, а також безпосереднє відпрацювання завдань

програмно-логічного керування термообробкою. Регламент обміну даними встановлює диференційовану частоту опитування датчиків залежно від їхньої теплофізичної інерційності. Зокрема, для контурів вимірювання температури та витрати енергоносіїв період опитування становить одну хвилину, тоді як для високодинамічних контурів тиску в робочому просторі камерної печі та на підвідних трубопроводах газу й повітря інтервал збору даних жорстко обмежений однією секундою.

Верхній рівень ієрархічної структури реалізується на базі засобів комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення класу SCADA. Тут зосереджено функції візуального моніторингу за станом об'єкта у вигляді динамічних мнемосхем, здійснюється розрахунок оптимальних техніко-економічних режимів роботи камерної печі, а також ведеться облік питомих витрат матеріальних та паливно-енергетичних ресурсів із подальшим автоматичним формуванням звітних документів і рапортів плавок. Оновлення інформаційних полів на засобах відображення автоматизованого робочого місця оператора синхронізовано з часовими інтервалами збору даних із первинних датчиків. Аналогічно, видача команд керування на виконавчі механізми здійснюється з частотою, еквівалентною періоду опитування відповідних вимірювальних пристроїв. Для забезпечення можливості ретроспективного аналізу ходу технологічного процесу та розслідування позаштатних ситуацій тривалість обов'язкового зберігання передісторії всіх параметрів у базі даних становить вісім годин.

2.2 Вимоги до чисельності та кваліфікації персоналу

Для забезпечення безперебійної та безпечної експлуатації одного нагрівального комплексу впродовж однієї робочої зміни (при безперервному чотирибригадному графіку роботи) необхідний персонал, наведений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Організаційна структура та чисельність оперативного й обслуговуючого персоналу

Посада / Роль	Кількість	Основні обов'язки в контурі АСУ ТП
Опеартор диспетчер	1	Моніторинг ходу термообробки через АРМ (SCADA), вибір та запуск технологічних програм (рецептів відпалу), дистанційне керування у позаштатних ситуаціях
Черговий слюсар КВПіА	1	Поточний контроль стану первинних датчиків, виконавчих механізмів, перевірка герметичності імпульсних ліній, усунення дрібних механічних несправностей арматури
Програміст	1	Адміністрування верхнього рівня системи, конфігурування ПЛК, калібрування каналів вимірювання, аналіз архівних трендів та передісторії аварійних подій

Увесь персонал, що допускається до взаємодії з комплексами АСУ ТП, повинен пройти спеціалізоване навчання, інструктажі та відповідати критеріям:

1. Оператор диспетчер: повинен мати базову або повну вищу технічну освіту, знати металознавчі основи процесів (відпал, нормалізація), володіти навичками роботи з ПК та операційними системами на рівні впевненого користувача, чітко розпізнавати графічні елементи мнемосхем SCADA-системи та знати алгоритми дій при ініціюванні звукової чи світлової сигналізації протиаварійного захисту.

2. Черговий слюсар КВПіА: повинен мати професійно-технічну освіту, кваліфікаційний розряд не нижче 4-го, знати будову та принципи роботи датчиків температури (термопар), витратомірів, виконавчих механізмів типу МЕО, правила прокладання сигнальних кабель-трас та мати допуск з електробезпеки (не нижче III групи до 1000 В).

3. Програміст: повинен мати повну вищу освіту за спеціальністю «Автоматизація та комп'ютерно-integrated технології», знати архітектуру контролерного обладнання, промислові протоколи зв'язку (Modbus TCP/IP, Profinet), мови програмування стандарту МЕК 61131-3 та принципи адміністрування баз даних передісторії процесів.

2.3 Вимоги до безпеки

Камерна термічна піч є об'єктом підвищеної небезпеки через використання вибухонебезпечного палива (природно-доменна суміш чи природний газ), високі технологічні температури (до 900 °С) та наявність високої напруги живлення обладнання КВПіА. Проєктована АСУ ТП повинна гарантувати безпеку виробничого персоналу та захист технологічного устаткування.

Загальні вимоги до промислової безпеки та електробезпеки.

1. Усі технічні засоби автоматизації (шафи КВПіА, корпуси виконавчих механізмів, датчики) повинні бути надійно заземлені відповідно до вимог ПУЕ. Рівень захисту оболонок обладнання, встановленого безпосередньо біля печі, повинен бути не нижче IP65, а для електронних блоків у приладовій шафі — не нижче IP54.

2. Керування подачею палива повинно виключати можливість утворення вибухонебезпечної газоповітряної суміші в робочому просторі печі та підподових топках.

3. Система ПАЗ повинна функціонувати незалежно від основного керуючого алгоритму ПЛК і забезпечувати автоматичне перекриття швидкодіючого відсічного клапана на загальному трубопроводі подачі газу до печі у таких випадках:

– падіння тиску природного газу перед піччю нижче критичної межі (менше 100 мм вод. ст.);

– падіння тиску повітря для згоряння палива перед пальниками нижче норми (менше 120 мм вод. ст.);

– згасання факела на будь-якому з 5-ти діючих пальників (контроль за допомогою фотодіодних або іонізаційних датчиків полум'я);

– аеревищення температури в робочому просторі печі вище аварійної уставки (наприклад, понад 950 °С);

– зникнення напруги живлення в контурі контролерного обладнання або АРМ оператора.

4. Обов'язковою є реалізація кінцевого вимикача на механізмі підйому заслінки печі. При підйомі заслінки напільна завантажувальна машина запускає механічний цикл, а АСУ ТП зобов'язана автоматично перевести пальники на «мале полум'я» або повністю відсікти подачу газу й повітря, щоб захистити персонал від викиду гарячих газів.

При спрацьовуванні будь-якого захисту в цеху та на дисплеї SCADA вмикається переривчаста звукова сирена та червона світлова індикація із фіксацією першопричини аварії в журналі подій.

2.4 Вимоги до функцій, які виконуються системою

Функціональна структура АСУ ТП підрозділяється на дві основні групи функцій: інформаційні (контроль та моніторинг) та керуючі (регулювання та логістичний захист).

Інформаційні функції системи

– безперервний збір аналогових сигналів від термопар, датчиків тиску та витратомірів, їхня лінеаризація, фільтрація від завад та масштабування у фізичні одиниці виміру (°C, м³/год, мм вод. ст.);

– відображення на екрані АРМ оператора поточної інформації у вигляді мнемосхем, де анімовано стан запірної арматури, положення заслінки печі, числові значення параметрів та графіки їхньої зміни (тренди);

– контроль виходу параметрів за попереджувальні (технологічні) та аварійні межі з негайною текстовою та колірною індикацією на моніторі;

– ведення довгострокової бази даних передісторії процесу, подій оператора, дій системи захисту із глибиною збереження не менше 8 годин для оперативної пам'яті та до 12 місяців на жорсткому диску ПК.

Автоматичне програмно-логічне регулювання температури:

– відпрацювання багатоступінчастих графіків відпалу сталі (наприклад, для марки 4Х5ФС із виходом на 840 °С, витримкою 10–12 годин для вирівнювання і 2–3 години технологічної стабілізації) за ПІД-законом регулювання.

– автоматична зміна витрати повітря пропорційно до поточної витрати газу з підтриманням коефіцієнта надлишку повітря на рівні alpha = 1,16 для забезпечення повного згоряння палива.

– підтримання мінімального надлишкового тиску в печі для виключення підсмоктування холодного атмосферного повітря через нещільності заслінки чи поду.

– можливість переходу оператора на ручне (дистанційне) керування ступенем відкриття клапанів із клавіатури або миші АРМ.

Вимоги за інформаційними функціями наведені у табл. 2.2 – 2.3.

Таблиця 2.2 – Вимоги за інформаційними функціями

Найменування контрольованих параметрів	Кількість однотипних операцій	Засіб отримання та місце відображення	Діапазон вимірювання	Періодичність отримання інформації
Температура в робочому просторі	1	Періодично. ЕОМ оператора, втор втори прилад	0 ... 1600 °С	1 хвилина
Витрата газу	1	Періодично. ЕОМ оператора, втор втори прилад	800-4000 $м^3$/ч	1 хвилина
Витрата повітря	1	Періодично. ЕОМ оператора, втор втори прилад	6000-7000 $м^3$/ч	1 хвилина
Тиск в робочому просторі	1	Періодично. ЕОМ оператора, вторинний прилад	0,3-0,8 кгс/$м^2$	1 хвилина

Таблиця 2.4 – Вимоги по функціям регулювання

Найменування виконуваних функцій	Кількість однотипних функцій	Діапазон значення	Вид системи	Режим управління	Місце розположення обєкту керування	Вимоги похибки
Температура в робочому просторі	1	0 ...1600 °С	Стабілізуюча	1 с	Трубопровід газу	1%
Співвідношення газ/повітря	1	800-4000 $м^3$/ч 6000-7000 $м^3$/ч	Стабілізуюча	1с	Трубопровід повітря	2%
Тиск в робочому просторі	1	0,3-0,8 $кгс/м^2$	Стабілізуюча	1с	Димовідвід	1%

2.5 Вимоги до видів забезпечення

Для надійного функціонування АСУ ТП камерної печі необхідна детальна регламентація всіх видів технічного, програмного та організаційного забезпечення.

1. Технічне забезпечення (Hardware).

Комплекс технічних засобів (КТЗ) повинен будуватися на базі перевіреного промислового обладнання та включати:

– нижній рівень: термопари типу ТХА (хромель-алюмель) або ТПП (платинородий-платина) у захисних чохлах; інтелектуальні датчики тиску та різниці тиску з вихідним сигналом 4–20 мА та підтримкою HART-протоколу; виконавчи механізми МЕО з блоками сигналізації положення;

– середній рівень: програмований логічний контролер (ПЛК) модульної архітектури, встановлений у приладовій шафі КВПіА. Модулі вводу-виводу повинні мати гальванічну ізоляцію каналів для захисту від промислових завад;

– верхній рівень: промисловий комп'ютер (АРМ оператора) у захищеному виконанні, оснащений джерелом безперебійного живлення (ДБЖ/UPS) для підтримки працездатності системи протягом мінімум 30 хвилин при повному зникненні напруги в цеху.

2. Програмне забезпечення (Software).

Програмне забезпечення системи розділяється на дві категорії:

– системне ПО: операційна система промислового ПК з високим рівнем кібербезпеки; вбудоване програмне забезпечення (прошивка) ПЛК (програмне ядро реального часу).

– прикладне ПО: інженерна мова програмування контролера (наприклад, блоки FBD або текст ST відповідно до МЕК 61131-3) для реалізації ПІД-регуляторів та логіки захисту. Для верхнього рівня – SCADA-система, що забезпечує графічний інтерфейс, зв'язок по OPC-серверу, драйвери промислових протоколів та генерацію звітів.

3. Математичне та організаційне забезпечення.

– математичне забезпечення: включає алгоритми цифрової фільтрації вхідних сигналів, дискретні рівняння ПІД-регулювання температури й тиску, а також математичні моделі адаптивного розрахунку часу витримки садки залежно від теплового стану системи «газ-метал-кладка»;

– організаційне забезпечення: сукупність посадових інструкцій, регламентів регламентного технічного обслуговування КВПіА, правил експлуатації системи та журналів обліку метрологічної повірки датчиків.

2.6 Вимоги до інформаційного забезпечення

Інформаційне забезпечення АСУ ТП регламентує структуру масивів даних, кодування сигналів, організацію внутрішніх баз даних та способи обміну інформацією всередині системи й із зовнішніми системами підприємства.

Параметри обміну даними наведено у вигляді часового регламенту в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Регламент збору та відображення інформації в АСУ ТП

Група параметрів	Основні технологічні змінні	Період опитування датчика ПЛК	Частота оновлення на АРМ оператора	Тривалість зберігання в архіві передісторії
Теплова інерційна група	Температура робочого простору печі, температура підподових топок, температура металу.	1 хв	1 хв	8 годин (оперативна) / 1 рік (тренд)
Динамічна газодинамічна група	Витрата природного газу, витрата повітря, тиск газу й повітря в трубопроводах перед пальниками.	1 сек	1 сек	8 годин / 3 місяці
Контур тиску й тяги	Розрідження/тиск у робочій камері печі, тиск у димоході перед шибером.	1 сек	10 сек	8 годин / 1 місяць
Дискретні та аварійні сигнали	Стан клапанів (відкр/закр), положення заслінки печі, сигнали датчиків полум'я, спрацьовування ПАЗ.	По події (мс)	Миттєво (<0,5 сек)	Безстроково (журнальні записи)

Усі сигнали від датчиків кодуються всередині ПЛК у стандартні змінні типу `REAL` (для аналогових величин температури, тиску, витрати) та типу `BOOL` (для дискретних сигналів стану арматури, кінцевиків та кнопок управління).

Інформаційний обмін між ПЛК та АРМ оператора здійснюється через промислову мережу Ethernet за завадостійким протоколом Modbus TCP або Profinet.

Екранні форми SCADA-системи повинні бути ергономічними, колірна гама не повинна втомлювати очі оператора (рекомендується сірий або пастельний фон). Важливі аварійні індикатори повинні миготіти до моменту їх квітування (підтвердження) оператором.

Система інформаційного забезпечення повинна автоматично закривати звітний рапорт після закінчення 25-годинного циклу відпалу садки сталі (наприклад, для поточної партії масою 18 тонн). Звітний документ повинен містити:

– унікальний номер плавки, дату, час початку та завершення процесу;

– марку сталі (4Х5ФС) та фактичну вагу садки;

– сумарну витрату природного газу за весь цикл (нм^3/цикл) та загальну витрату тепла (ккал);

– графік (тренд) фактичної температури в порівнянні із заданою уставкою, що підтверджує якість термообробки та відсутність шлюбу.

– протокол аварійних подій (якщо такі виникали під час роботи зміни).

Висновки. Розроблений комплекс технічних, функціональних та інформаційних вимог до АСУ ТП відповідно до ДСТУ 2226-93 забезпечує створення надійної трирівневої ієрархічної структури керування камерною піччю. Впровадження жорстких апаратних блокувань, прецизійних контурів ПІД-регулювання температури та автоматичного контролю співвідношення «паливо-повітря» дозволяє повністю нівелювати людський фактор і гарантувати високу безпеку персоналу. Сформований диференційований регламент опитування датчиків та автоматична генерація звітних рапортів плавок створюють надійний інформаційний фундамент для оптимізації витрат енергоносіїв та забезпечення стабільно високої якості термообробки сортового прокату.

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної структури СА

Архітектура проєктувальної автоматизованої системи керування будується за вертикально-інтегрованим принципом і розділяється на три взаємопов'язані рівні. На нижньому локальному рівні здійснюється безпосередня взаємодія з корисними елементами теплотехнічного комплексу.

Основними завданнями цього ярусу є:

– прецизійне перетворення фізичних величин контрольованих параметрів в уніфіковані електричні сигнали;

– формування прямих команд керування на виконавчі пристрої;

– апаратна реалізація контурів технологічних блокувань і протиаварійного захисту;

– нормалізація та узгодження сигналів від первинних датчиків із вхідними каналами пристроїв зв'язку з об'єктом.

У разі виникнення будь-яких відхилень або аварійних ситуацій на локальному рівні передбачено миттєве спрацьовування світлової та звукової сигналізації для оперативного сповіщення персоналу.

Рівень безпосереднього керування виробництвом орієнтований на використання мікропроцесорних промислових контролерів, які забезпечують централізований збір, первинну фільтрацію та обробку масивів інформації, що надходять від технологічної системи. До базового алгоритму цього рівня входить циклічне опитування датчиків стану, обмін даними із суміжними підсистемами, автоматичне виявлення виходу керованих величин за регламентні межі, а також відпрацювання завдань програмно-логичного керування. Регламент збору інформації встановлює диференційовану частоту опитування датчиків залежно від їхньої теплофізичної інерційності. Для контурів вимірювання температури та

витрати енергоносіїв період опитування становить одну хвилину, тоді як для високодинамічних контурів тиску в робочому просторі та на підвідних трубопроводах газу й повітря інтервал збору даних обмежений однією секундою.

Верхній рівень ієрархічної структури реалізується на базі засобів комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення класу SCADA. Тут забезпечено візуальний доступ до інформації про поточний стан об'єкта у вигляді динамічних мнемосхем, здійснюється розрахунок оптимальних техніко-економічних режимів роботи агрегату, ведеться облік питомих витрат матеріальних та паливно-енергетичних ресурсів із подальшим автоматичним формуванням звітних документів. Оновлення інформаційних полів на засобах відображення автоматизованого робочого місця оператора та видача команд керування на виконавчі механізми синхронізовані з часовими інтервалами збору даних із первинних датчиків. Для забезпечення можливості ретроспективного аналізу ходу технологічного процесу тривалість зберігання передісторії всіх параметрів у базі даних становить вісім годин.

У цьому проєкті як об'єкт автоматизації розглядається рекуперативний нагрівальний агрегат (камерна піч/колодязь), у контурі якого реалізується безперервний контроль температури повітря до та після рекуператора, тиску в трубопроводах газу й повітря, а також оцінка якості згоряння паливної суміші. Основними контурами автоматичного регулювання системи є контур стабілізації температури в робочому просторі, контур підтримання оптимального співвідношення витрат «газ-повітря» та контур регулювання тиску всередині робочої камери.

Однією з фундаментальних умов коректного теплового оброблення та нагрівання металевих заготовок є жорстке підтримання встановлених температурних режимів у робочому просторі агрегату. На основі промислового досвіду експлуатації рекуперативних нагрівальних систем визначено технологічні регламенти, які вимагають підтримання температури теплоносія в робочій зоні з точністю до десяти градусів Цельсія. Отже, температура є найбільш критичним та визначальним параметром теплотехнічного процесу,

стабілізація якого в найбільш відповідальних точках камери гарантує якість готової продукції.

Температурне поле всередині печі постійно зазнає збурюючих дій, які виникають унаслідок зміни маси й конфігурації завантаженої садки, коливань витрати палива, порушень умов горіння або аеродинамічного режиму. Будь-які некомпенсовані збурення призводять до відхилення від графіка нагрівання, що спричиняє появу внутрішніх дефектів у металі або невідворотний брак. Підтримання стабільної температури за об'ємом камери нерозривно пов'язане із супутнім регулюванням тиску та витрати повітря. Для оптимізації логістичних операцій у цеху транспортування та посадження злитків у робочий простір реалізуються за допомогою автоматизованих кранових механізмів, що дозволяє повністю виключити важку ручну працю та покращити умови безпеки життєдіяльності.

Принцип регулювання тиску в робочому просторі базується на зміні гідравлічного опору тракту евакуації димових газів. Керуючий вплив від мікропроцесорного контролера передається на виконавчий механізм поворотного шибера, встановленого на димоході. Шляхом автоматичної зміни положення шибера регулюється кількість продуктів згоряння, що залишають піч, завдяки чому всередині камери підтримується мінімальний надлишковий тиск, який запобігає підсмоктуванню холодного атмосферного повітря.

3.2 Вибір (розробка) математичної моделі системи управління

У процесі високотемпературного нагрівання металевих заготовок динамічні властивості камерної печі як об'єкта автоматичного регулювання зазнають суттєвих змін залежно від поточного теплотехнічного режиму. Нестаціонарність динамічних характеристик зумовлена безперервною зміною внутрішнього термічного стану системи, коливаннями маси садки, варіацією

витрати паливної суміші, зміною умов її факельного згоряння, а також нестабільністю внутрішнього аеродинамічного режиму камери.

Оскільки об'єкт є параметрично залежним, його математичний опис у різні періоди плавки доцільно представляти у вигляді сімейства передавальних функцій. Динаміка каналу регулювання температури для початкового, проміжного та довільного n-го етапів багатоступінчастого нагрівання описується відповідними математичними моделями:

$$W_{об1}(\mathrm{p}) = \frac{2{,}4 \cdot \mathrm{e}^{-60\mathrm{p}}}{230 \cdot \mathrm{p} + 1}, \tag{3.1}$$

$$W_{об2}(\mathrm{p}) = \frac{1{,}4 \cdot \mathrm{e}^{-60\mathrm{p}}}{230 \cdot \mathrm{p} + 1}, \tag{3.2}$$

$$W_{обn}(\mathrm{p}) = \frac{1 \cdot \mathrm{e}^{-60\mathrm{p}}}{230 \cdot \mathrm{p} + 1}, \tag{3.3}$$

З моделі об’єкта побудованої в середовищі Simulink (MATLAB) отримано перехідні характеристики відповідно до передавальних функцій (рис. 3.1- 3.3).

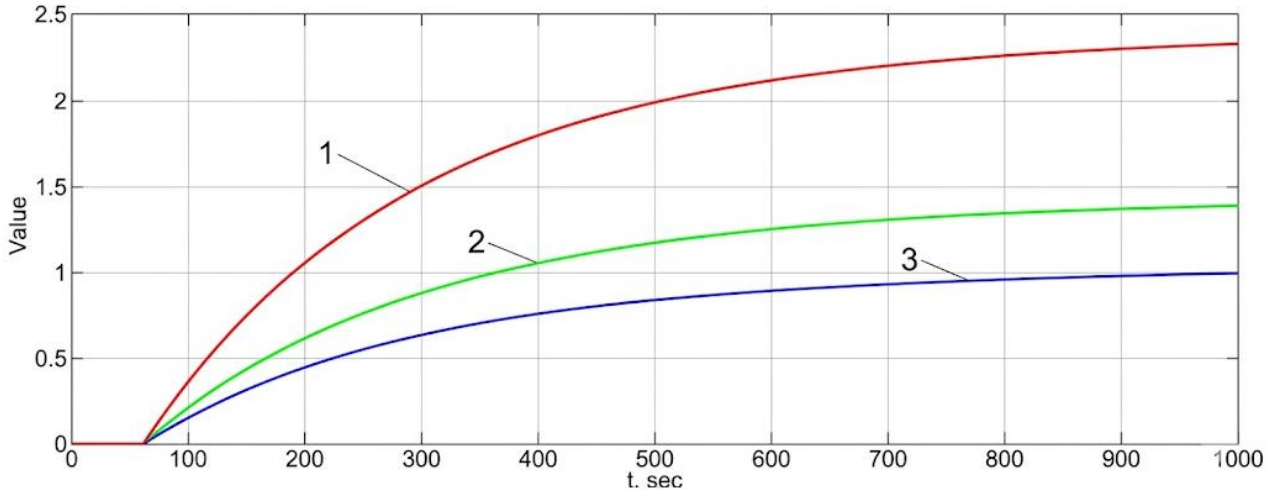


Рисунок 3.1 – Перехідні характеристики об’єкта управління

Отримано перехідний процес в замкненій САР для розрахованих інженерними методами параметрів налаштування ПІ регулятора з

використанням пакету Matlab та розраховано показники якості перехідного процесу.

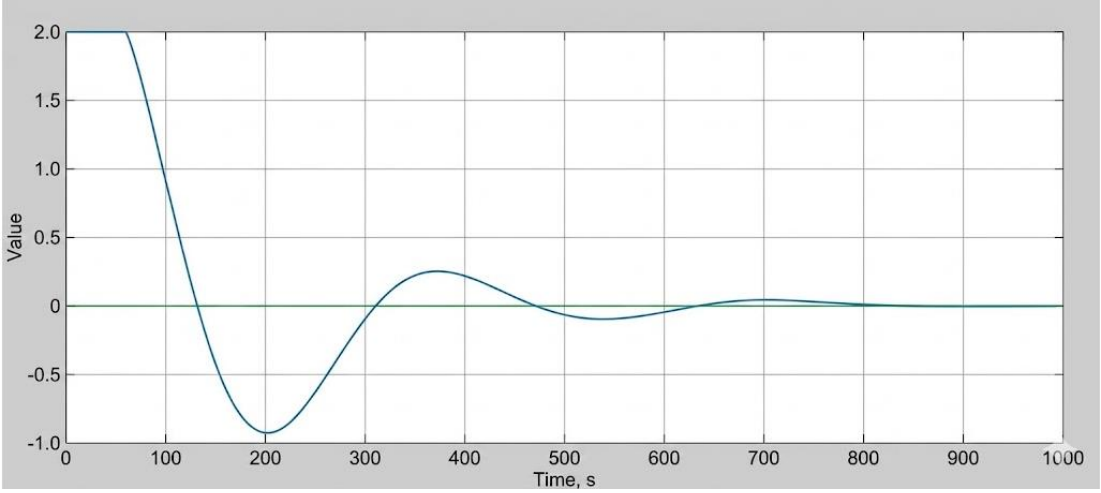


Рисунок 3.2 – Перехідний процес в замкненому контурі:
показники якості K_p = 1,21, T_u=161. Час регулювання – 450 с.

Під поняттям грубості (або робастності) одноконтурної системи автоматичного регулювання (САР) розуміють її здатність зберігати задані показники якості та низьку чутливість основного критерію функціонування до варіації параметрів динамічних ланок розімкненого контуру.

З метою оцінки стійкості та робастних властивостей розробленої системи було виконано моделювання та знято дві перехідні характеристики за каналом «збурення – вихід». Перша крива відображає динаміку поведінки системи за наявності нестаціонарних коливань коефіцієнта передачі об'єкта ($K_{об}$), тоді як друга ілюструє відпрацювання обурення за умови розрахункових оптимальних параметрів налаштування регулятора. Отримані графіки перехідних процесів, що характеризують якість демпфування зовнішніх збурюючих дій, наведено на рисунку 3.3.

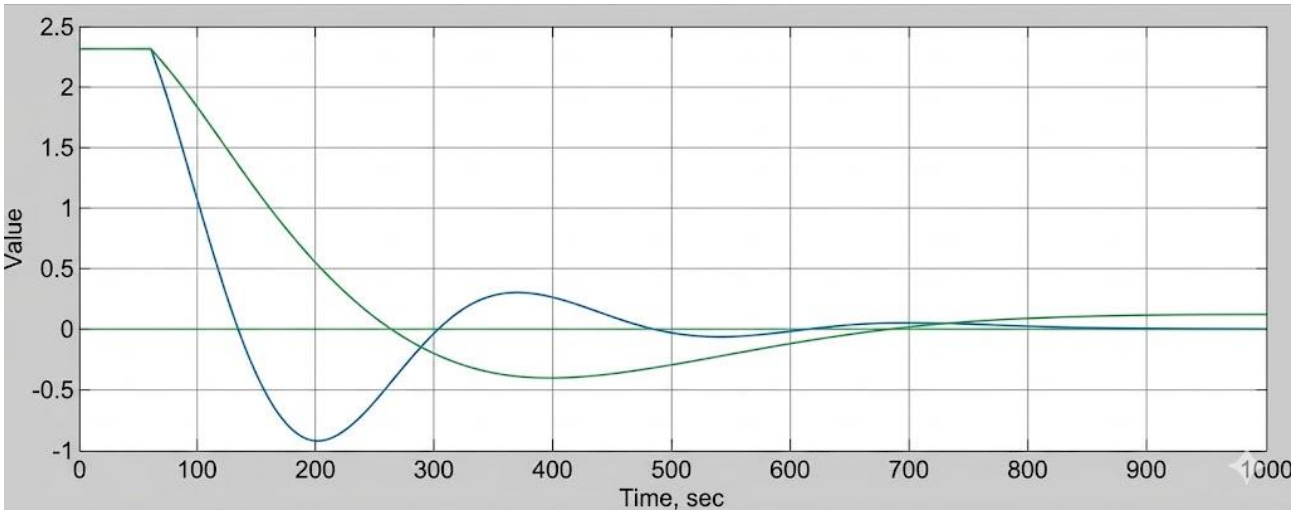


Рисунок 3.3 – Перехідні процеси у замкненій АСР при оптимальних параметрах настроювання регулятора, але при різних значеннях $K_{об}$

На основі проведених досліджень системи на грубість (робастність) було визначено, що синтезована одноконтурна САР є чутливою до варіації параметрів налаштування регулятора (зокрема, сталої часу $T_{рег}$) за умови дрейфу коефіцієнта передачі об'єкта ($K_{об}$). Навіть незначні флуктуації статичного коефіцієнта посилення печі призводять до погіршення основного критерію якості функціонування контуру регулювання температури більше ніж удвічі.

Таким чином, експлуатація стандартних лінійних САР із постійними параметрами налаштування не спроможна забезпечити необхідну точність стабілізації температурного поля, оскільки досліджуваний теплотехнічний агрегат демонструє суттєву нестаціонарність і змінює свої динамічні характеристики під впливом різноманітних виробничих та аеродинамічних факторів. Для компенсації параметричних збурень, гарантування високої точності відпрацювання температурних графіків та підвищення загальної енергоефективності процесу нагрівання злитків є технічно необхідним застосування адаптивних (самоналаштовуваних) мікропроцесорних систем керування.

Для верифікації запропонованих рішень та визначення базових енергетичних показників у середовищі MATLAB було розроблено математичну

модель теплової роботи камери, в основу якої покладено розрахунок теплового балансу. Рівняння теплового балансу робочого простору рекуперативного нагрівального агрегату описує фундаментальний закон збереження енергії, пов'язуючи між собою всі статті приходу та витрати теплоти. Головною інженерною метою складання цього балансу на етапі проєктування та модернізації печі є точне визначення номінальної та максимальної витрати паливної суміші.

Основним джерелом тепловиділення в агрегаті є хімічна енергія палива. Нижча робоча теплота згоряння природно-доменної суміші газу (Q_н^р, ккал/нм³), що визначає прихідну статтю балансу, розраховується на основі його компонентного складу за такою математичною залежністю:

Нижня теплота згоряння:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 127{,}7 \cdot \text{CO} + 108 \cdot \text{H}_2 + 358 \cdot \text{CH}_4 + 590 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + 555 \cdot \text{C}_2\text{H}_2 + 636 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + \\ + 913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1185 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1465 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 234 \cdot \text{H}_2\text{S} \quad (3.4)$$

Прихід тепла:

$$Q_{\text{хим}} = B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} = B \cdot 35\ 133{,}932 \ \ (\text{кВт}) \quad (3.5)$$

– тепло від горіння палива обчислюється:

$$Q_{\text{в}} = B \cdot i_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}}\ Q_{\text{в}} = B \cdot 1109{,}05 \cdot 10{,}209 = B \cdot 11320 \ \ (\text{кВт}), \quad (3.6)$$

– тепло, внесене підігрітим повітрям:

$$Q_{\text{экз}} = 5652 \cdot P \cdot a = 5652 \cdot 20{,}83 \cdot 0{,}01 = 1177{,}311 \ \ \ (\text{кВт}) \quad (3.7)$$

– тепло екзотермічних реакцій (приймаємо, що угар металу становить 1%, а при окисленні 1 кг металу виділяється 5652 кДж) обчислюється:

$$Q_{\text{экз}} = 5652 \cdot P \cdot a = 5652 \cdot 20{,}83 \cdot 0{,}01 = 1177{,}311 \ \ \ (\text{кВт}) \quad (3.8)$$

Витрата тепла:

– тепло, витрачене на нагрів металу:

$$Q_{\text{пол}} = P \cdot \left(i_{\text{м}}^{\text{кон}} - i_{\text{м}}^{\text{нач}}\right) = 20{,}83 \cdot (850{,}21 - 132{,}27) = 14995{,}78 \ \text{(кВт)} \quad (3.9)$$

– тепло, яке відходить горючими газами :

$$Q_{\text{ух}} = B \cdot V_{\text{п.с}} \cdot i_{\text{п.с}} = B \cdot 11{,}233 \cdot 1192{,}127 = B \cdot 13391{,}163 \ \text{(кВт)} \quad (3.10)$$

Втрати тепла через свод печі:

$$Q_{\text{св}} = \frac{t_{\text{кл}}^{\text{вн}} - t_{\text{ок}}}{\frac{\delta_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к}}} + \frac{1}{\alpha}} \cdot F_{\text{св}} \quad (3.11)$$

Загальна кількість тепла, що втрачається теплопровідністю через кладку, визначається:

$$Q_{\text{тепл}} = Q_{\text{св}} + Q_{\text{ст}} \quad (3.12)$$

Втрати тепла з охолоджувальною водою з практичних даними приймаються рівними 10% від тепла, внесеного паливом і повітрям:

$$Q_{\text{охл}} = 0{,}1 \cdot B \cdot (35\ 133{,}932 + 11320) \quad (3.13)$$

Невраховані втрати тепла визначаємо за наступною формулою:

$$Q_{\text{неучт}} = 0{,}1 \cdot (4645{,}39 \cdot B + 406{,}8) = (464{,}539 \cdot B + 40{,}68) \quad (3.14)$$

Таблиця 3.1 – Склад сухого природного газу

Название	CH_4	C_2H_4	C_3H_8	C_4H_{10}	CO_2	H_2S	N_2
Відсоткова частина, (%)	85,78	4,84	1,48	1,038	0,581	1,267	4,95

Таблиця 3.2– Тепловий баланс печі

Прихід	*Q, кВт,*	(%)	Витрата	*Q, кВт,*	(%)
Тепло від горіння палива	18445,39	73,44	Тепло на нагрів металу	14955,78	59,54
Фізичне тепло повітря	5493	21,87	Тепло, яке втрачається горючими газами	7030,36	27,99
Тепло екзотермічних реакцій	1177,311	4,68	Втрати тепла теплопровідністюче рез кладку	406,8	1,61
Всього	25115,99	100	Втрати тепла з охолоджувальною водою	2438,82	9,71
Невраховані втрати		284,562		1,13	
Всього		25115,11		100	

Після написання програмного коду отримаємо таблицю для заповнення у графічному редакторі.



Рисунок 3.4 – Графічний емулятор розрахунку теплового балансу

3.3 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня СА

Згідно з логікою ФСА, технологічний об'єкт (нагрівальний колодязь) оснащується п'ятьма основними функціональними контурами контролю, регулювання та захисту.

1. Контроль температури повітря.

Принцип роботи: термоелектричні перетворювачі типу ТПР (поз. 1а, 2а) генерують термо-ЕРС, пропорційну температурі підігріву повітря.

Сигнал надходить на клемно-блочні з’єднувачі (поз. 1б, 1в), де здійснюється його розгалуження: один напрямок іде на аналогові вхідні модулі контролера для загального алгоритму моніторингу, інший – на багатоканальний реєстратор Метран 900 (поз. 4е) для візуалізації оператору.

2. Регулювання температури робочого простору

Принцип роботи: САР забезпечує оптимальний графік термічної обробки злитків (діапазон 300–1600 ºС), унеможливлюючи оплавлення поверхні металу та гарантуючи рівномірність його нагріву.

Схема керування: Високотемпературна термопара ТПР 0392 (поз. 3а) передає сигнал через клемник (поз. 3б) паралельно на Метран 900 та ПЛК. Центральний процесор обробляє відхилення від заданого значення і через модулі дискретного виходу видає керуючі імпульси на пневморозподілювачі (поз. 3д, 3ж). Останні змінюють тиск живлення у мембранних виконавчих механізмах (поз. 3е, 3з), які безпосередньо регулюють подачу газу та повітря в пальник.

3. Регулювання співвідношення «газ-повітря»

Принцип роботи: Контур призначений для підтримки стехіометричного або оптимального коефіцієнта надлишку повітря α. Це запобігає неповній хімічній редукції палива (економічні втрати, викид CO) та мінімізує утворення шкідливих оксидів азоту (NO_x).

Схема керування: Витрата газу та повітря визначається за допомогою діафрагм ДКС (поз. 4а, 4в) та дифманометрів САФІР 22М (поз. 3б, 4г). Для

динамічної корекції співвідношення використовується сигнал від газоаналізатора кисню/недопалу АКВТ-01 (поз. 4ж). Всі сигнали через клемник (поз. 4д) прямують до контролера та пристрою Метран 900. Контролер формує команду, яка через дискретний вихід і блок БРУ-107 (поз. 4з) надходить на безконтактні пускачі ПБР-3А (поз. 4к, 4р), що безпосередньо керують електричними виконавчими механізмами (поз. 4с, 4л). Поточне положення регулювальних органів контролюється блоками ДУП-М (поз. 4н, 4п).

4. Регулювання тиску в робочому просторі печі

Принцип роботи: Для запобігання вибиванню газів із колодязя або підсосу холодного атмосферного повітря, у робочій зоні підтримується стабільний надлишковий тиск у вузькому діапазоні 6,5–7,0 Па.

Схема керування: Датчик малого надлишкового тиску САФІР 22 (поз. 5а) вимірює параметр, передає його через клемно-блочний з’єднувач (поз. 5б) на ПЛК та Метран 900. Розраховане керуюче рішення від ПЛК через блок ручного керування БРУ-107 (поз. 5д) та пускач ПБР-3А (поз. 5ж) змінює положення виконавчого механізму (поз. 5з), який, як правило, керує шибером на борові (димоході). Датчик ДУП-М (поз. 5к) сигналізує про реальний кут повороту шибера.

Контур автоматичного відсічення газу та повітря (Технологічний захист і блокування)

Принцип роботи: Контур виконує функцію аварійної захисної блокувальної системи (АЗБ). Він безперервно контролює тиск у живильних трубопроводах газу та повітря.

При виникненні будь-якої з аварійних ситуацій:

– падіння тиску газу нижче критичної межі;

– падіння тиску повітря (зокрема через зупинку дуттьового вентилятора);

– повне знеструмлення системи (відключення електроживлення).

Система автоматично знеструмлює або видає сигнал «Заборони» на виконавчі органи, що призводить до миттєвого повного перекриття (відсікання)

ліній подачі палива та повітря в нагрівальний колодязь з метою запобігання утворенню вибухонебезпечної газоповітряної суміші або аварії печі.

Первинний перетворювач температури (термопара) ТПР 0392, здійснює функцію вимірювання температури повітря та робочого простору (від 300 до 1600 ºС).

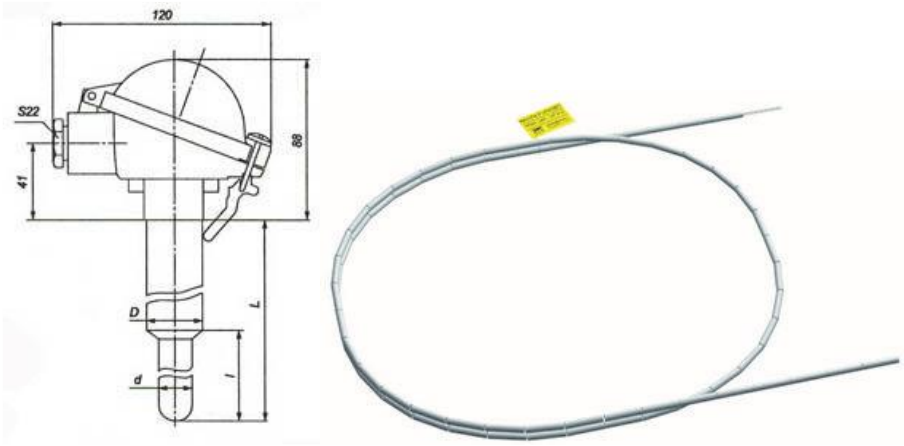


Рисунок 3.5 – Первинний перетворювач температури ТПР 0392

Технічні характеристики:

– liапазон вимірювання температур: від (+600 °С) до (+1600 °С) (номінальна робоча t: (+1300 °С));

– номінальна статична характеристика (НСХ): тип В (згідно з ГОСТ Р 8.585);

– матеріал термоелектродів: платинородій-платина (сплави платині та родію);

– матеріал ізоляції (захисна арматура): корундові керамічні намистини з високим вмістом (Al_2O_3);

– показник теплової інерції: не більше ніж (5) секунд;

– клас допуску: 2-й;

– монтажна довжина: варіюється від (40) до (10000 мм) (залежно від вимог замовника);

– вибухозахист: відсутній (застосовується у звичайному виконанні).

У якості вторинного приладу було обрано Метран-900 (рис. 3.6), який обслуговуватиме всю систему автоматизації одного нагрівального колодязя, вінявляє собою більш зручний спосіб експлуатації ніж застарілі самописці Диск 250. Крім графічного перегляду на дисплеї реєстратора, передбачено роздрук даних у цифровому вигляді завдяки прямому підключенню принтера до приладу або передачі всієї інформації на ПК.



Рисунок 3.6 – Реєістратор Метран 900

Багатоканальні реєстратори МЕТРАН-900 призначені для збору та обробки інформації, що надходить від датчиків, які вимірюють різні параметри технологічних процесів і мають уніфіковані вихідні сигнали. Прилади застосовуються в системах контролю та автоматизації технологічних процесів в різних галузях промисловості.

Залежно від типу блоку комутації, що входить в комплект поставки, багатоканальні реєстратори МЕТРАН-900 призначені для обробки сигналів наступних датчиків :

– термоперетворювачів опору;

– термоелектричних перетворювачів типу ТВР ((А) , ТПР (В), ТПП(S), ТХА (К), ТХК (L), J; Т ', Е;

– датчиків з аналоговими струмовими сигналами 0-20, 0-5, 4-20 мА;

– датчиків з лінійним або квадратичним сигналом взаємної індуктивності 0-10 мГн.

Схема підключення реєістратора Метран 900 та блок К1204 наведена на рис. 3.7.

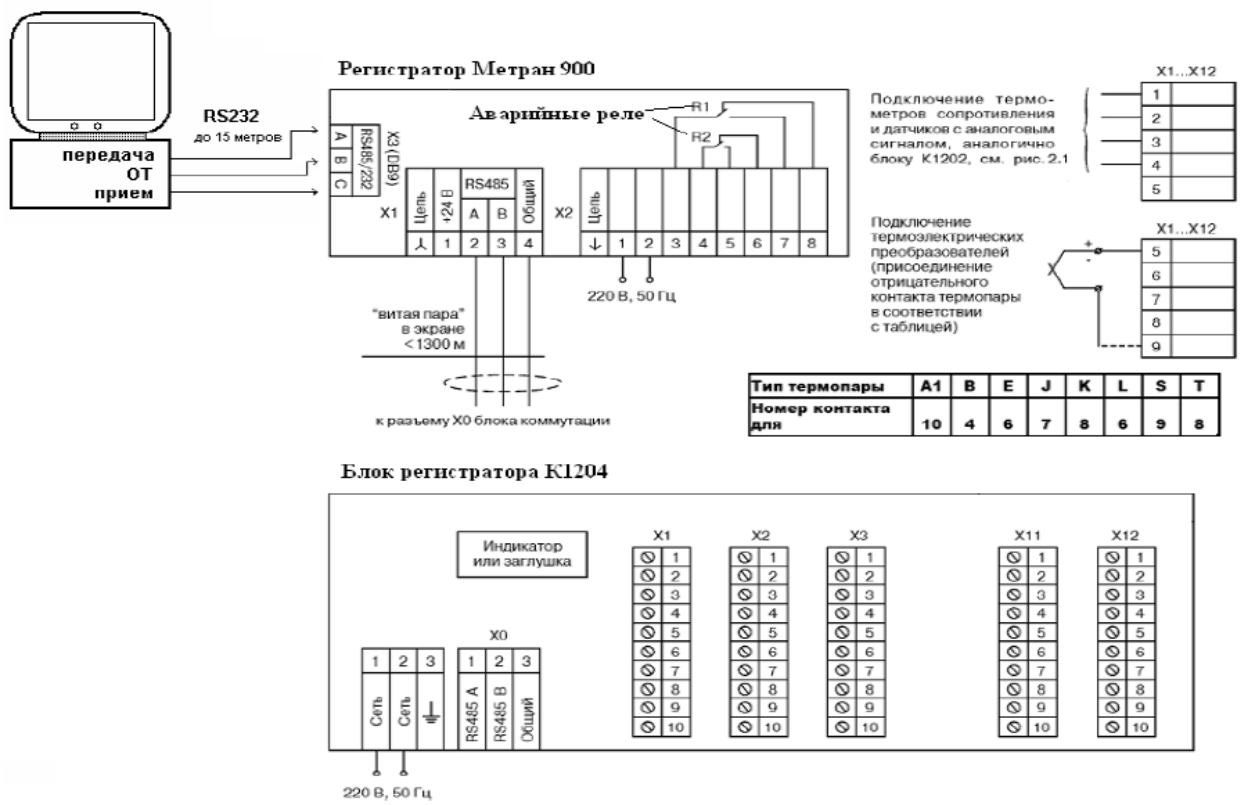


Рисунок 3.7 – Схема підключення реєістратора Метран 900 та блок К1204

Обробка інформації передбачає:

– реєстрацію та зберігання даних у власної електронної пам'яті приладу;

– візуалізацію отриманих даних на вбудованому дисплеї в цифровому та графічному вигляді;

– перетворення вхідних сигналів у цифровий сигнал RS232 абоRS485;

– видачу аварійного сигналу при порушенні встановлених діапазонів контрольованих параметрів;

– видачу на зовнішнє друкувальний пристрій зареєстрованих значень за необхідний інтервал часу.

Допустима похибка при використанні термопари ТПР(В) - 5,0 °

Для безперервного вимірювання технологічних параметрів у системах автоматичного контролю та керування застосовано вимірювальні перетворювачі серії САФІР-22М (рис. 3.8). Ці прилади забезпечують лінійне перетворення значень надлишкового тиску, а також витрати газу або повітря в уніфікований вихідний сигнал постійного струму. Клас точності датчиків визначається допустимою основною похибкою, яка становить ± 0,5 % або ± 1,0 %.



Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд Сапфір-22

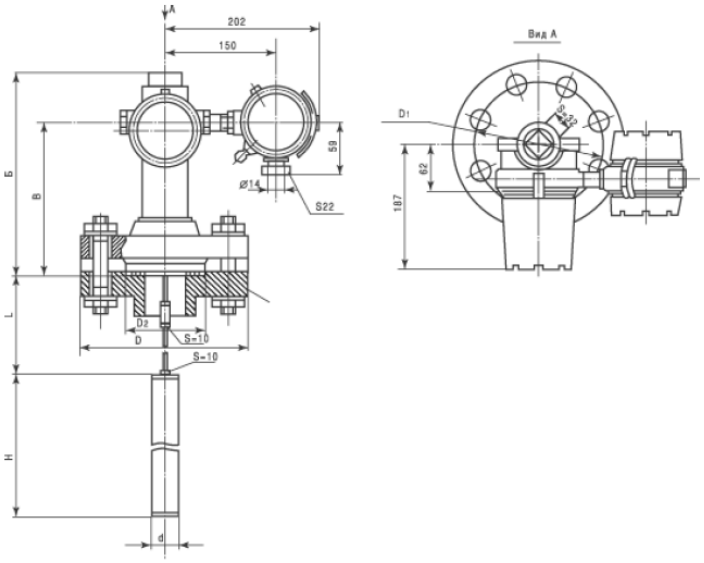


Рисунок 3.9 – Габаритні, установчі та приєднувальні розміри перетворювачів Сапфір-22

Як вторинний реєстраційний пристрій для обслуговування контурів автоматизації нагрівального колодязя обрано багатоканальний реєстратор Метран-900. Його впровадження забезпечує значно вищу ергономічність та зручність експлуатації порівняно із застарілими аналоговими самописцями серії «Диск-250». Окрім динамічної візуалізації графіків на рідкокристалічному дисплеї, архітектура приладу дозволяє виконувати прямий друк цифрових звітів за умови підключення принтера, а також передавати масиви даних на верхній рівень керування (персональний комп'ютер).

Автоматичний газоаналізатор АКВТ-01 (зокрема його популярні модифікації, такі як АКВТ-01-02) – це промисловий прилад, призначений для безперервного автоматичного вимірювання об'ємної частки кисню O_2) та оксиду вуглецю (CO) (або суми горючих газів H_2+CO) у відхідних димових газах паливовикористовуючих установок.

У металургії та теплоенергетиці (наприклад, на нагрівальних колодязях чи котлах) він є ключовим елементом контуру регулювання співвідношення «газ-повітря».



Рисунок 3.10 – Автоматичний газоаналізатор АКВТ-01

Параметри аналізованого середовища:

– температура димових газів: від 0 до +800°C в зоні встановлення;

– рапиленість потоку: до 2 –10 г/м³ (за наявності металокерамічного фільтра);

– тиск/розрідження в газоході: від -5000 до +5000 Па.

Як первинний вимірювальний пристрій у контурі застосовано вимірювальний перетворювач температури (поз. 1б). Сигнал від нього спрямовується на вхід блока ручного управління БРУ-107 (поз. 5д), вихід якого підключений до каналу модуля аналогових входів мікропроцесорного контролера (МПК).

Сигнал від датчика через БРУ-107 транслюється на аналоговий вхід МПК. Після розрахунку керуючого впливу ПІД-регулятором ПЛК, сигнал із модуля аналогових виходів повертається на БРУ-107. Блок функціонує в транзитному режимі («пропускає» сигнал без зміни величини) і передає його на електропневматичний перетворювач.

Оператор має можливість безпосередньо з передньої панелі БРУ-107 змінювати ступінь відкриття клапана подачі пари в збірник. Це дозволяє здійснювати пряме технологічне втручання, наприклад, для тривалого підтримання підвищеної температури в апараті в обхід автоматичного алгоритму ПЛК.

Блок ручного управління БРУ-107 призначений для інтеграції в локальні та комплексні АСУ ТП як станція ручного керування аналоговими виконавчими механізмами або як ручний задатчик аналогових сигналів із візуальною індикацією. Апаратною особливістю приладу є повна гальванічна ізоляція між вхідними/вихідними колами, лінією живлення та комунікаційними інтерфейсами.

Обчислювальна логіка пристрою базується на сучасному високоінтегрованому RISC-мікроконтролері, виготовленому за енергоефективною КМОН-технологією (CMOS). БРУ-107 забезпечує комутацію ланцюгів керування, вимірювання та відображення поточного значення фізичного параметра (температури, тиску, витрати тощо) на вбудованому 4-

розрядному цифровому дисплеї. Крім того, блок виконує функції технологічної сигналізації: на передній панелі розташовані світлодіодні індикатори для оперативного сповіщення про вихід параметра за встановлені критичні межі (мінімум/максимум).

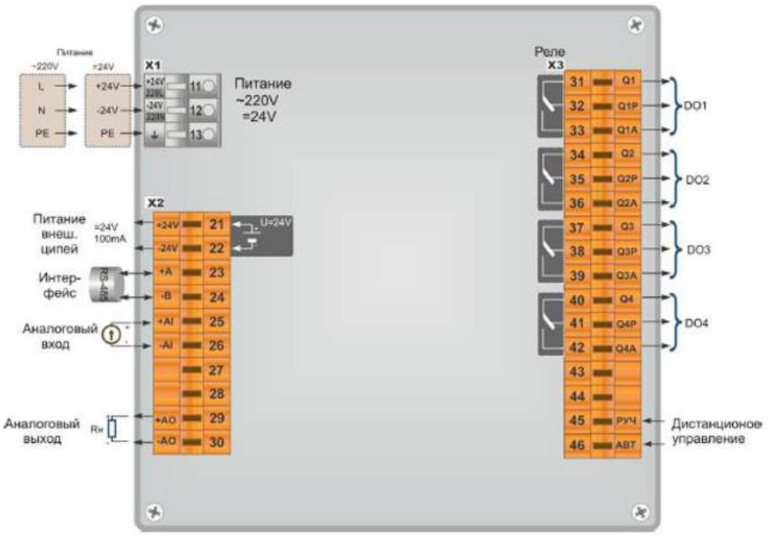


Рисунок 3.11 – Підключення БРУ-107

Підключення сигналів до БРУ-107 здійснюється за допомогою роз'ємів-клем з пружинними сполуками, які встановлюються на задній стінці приладу.

З огляду на те, що на підприємстві базовими є програмно-технічні комплекси виробництва «Мікрол» та Siemens, найбільш раціональним рішенням є вибір обладнання, що забезпечує максимальну сумісність з існуючою інфраструктурою. Це дозволяє мінімізувати фінансові витрати на модернізацію та розширення систем керування, а також суттєво скорочує час, необхідний інженерному персоналу для освоєння нової апаратної бази.

Попри високу надійність, контролери ТМ «Мікрол» мають певні обмеження, зокрема малу канальність та невеликий обсяг інтегрованої пам'яті. З іншого боку, обладнання Siemens вирізняється повною підтримкою відкритих промислових інтерфейсів (Ethernet, PROFIBUS, CANOpen, DeviceNet, INTERBUS), що полегшує вертикальну інтеграцію окремих технологічних дільниць у загальну інформаційну мережу підприємства. З метою оптимізації

кошторису проєкту за збереження високої продуктивності, доцільно використовувати ПЛК німецької компанії VIPA, які є повністю сумісними із системою команд Simatic S7-300 від Siemens.

Для реалізації системи автоматизації обрано модульний контролер VIPA 300C (System 300V) (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Модульний контролер VIPA 300C (System 300V)

У порівнянні з класичним сімейством Simatic S7-300, контролери VIPA демонструють такі переваги:

– можливість розміщення до 32 модулів розширення в одному шасі (без обов'язкового використання інтерфейсних стійок);

– здатність функціонувати без картки пам'яті MMC (завдяки достатньому обсягу вбудованої енергонезалежної пам'яті RAM/FLASH від 96 до 512 кБ);

– наявність універсального комбінованого інтерфейсу MP2I (MPI + PPI);

– значно вищі комунікаційні можливості за однотипної архітектури;

– зниження капітальних витрат на апаратне забезпечення на 20–30%.

Модулі розширення VIPA System 300V конструктивно та схемотехнічно ідентичні лінійці S7-300, що допускає їхнє пряме встановлення в одну стійку та взаємозаміну. Розробка прикладного програмного забезпечення може здійснюватися як у середовищі STEP 7 (Siemens), так і за допомогою

спеціалізованих пакетів WinPLC7 або WinNCS від VIPA. Гранична інформаційна місткість системи становить до 1024 дискретних та до 128 аналогових каналів введення-виведення.

Для автоматизації складних теплотехнічних процесів із високими вимогами до швидкодії обрано процесорний модуль CPU 315 DPM (лінійка 300S). Завдяки фірмовій технології SPEED7, ці процесори мають надкороткий цикл обробки даних, що робить їх одними з найшвидших у класі промислових контролерів середньої та великої потужності. Обрана модифікація має розвинену пам'ять обсягом 1 Мб (із можливістю апаратного розширення до 2 Мб) та підтримує мережеві протоколи MPI, PtP і PROFIBUS-DP через фізичні інтерфейси RS232, RS485 та RJ45. Прилад розрахований на живлення напругою 24 В постійного струму та стабільно функціонує в діапазоні температур від 0 °C до 60 °C.

Стабільне електроживлення процесорного блока та модулів навантаження забезпечується системним джерелом PS 307 із номінальним вихідним струмом 10 А. Блок живлення підключається до однофазної цехової мережі змінного струму (120/230 В, 50/60 Гц), видає стабілізовану напругу 24 В постійного струму та оснащений інтегрованим електронним захистом від коротких замикань і обривів у колах навантаження.

Модулі виведення дискретних сигналів призначені для перетворення внутрішніх логічних станів центрального процесора контролера у вихідні дискретні сигнали керування. До вихідних каналів цих модулів безпосередньо або через комутаційні апарати (реле, пускачі) підключаються виконавчі пристрої технологічного комплексу.

Для реалізації дискретного керування в системі обрано модуль SM 322 (модифікація 1BH10-0AA0), який функціонує в складі ПЛК VIPA System 300V / Simatic S7-300. Конструктивно прилад виконаний у пластиковому корпусі, на передній панелі якого розташовані зелені світлодіоди для індикації стану вихідних ланцюгів, червоний світлодіод аварійної сигналізації (Group Fault), а також закритий захисною кришкою роз'єм для встановлення фронтального

з'єднувача. Обраний модуль повністю задовольняє вимогам проєкту за такими технічними параметрами:

– кількість дискретних виходів – 16;
– номінальна напруга живлення – 24 В постійного струму;
– максимальний вихідний струм каналу – 4 А;
– допустима довжина сполучного кабелю – до 600 м.

Модулі введення аналогових сигналів здійснюють аналого-цифрове перетворення (АЦП) сигналів від первинних датчиків у цифрові коди, які згодом обробляються центральним процесором. До вхідних каналів можуть підключатися джерела уніфікованих сигналів струму чи напруги, а також термопари й термометри опору.

Для збору параметрів теплотехнічного процесу обрано 8-канальний модуль аналогового введення SM 331 (модифікація 7PF10-0AB0). Прилад живиться напругою 24 В, має інтегрований захист від неправильної полярності (переполюсовки) та підтримує безпосереднє підключення термоелектричних перетворювачів типу B (зокрема, високотемпературних термопар ТПР, задіяних у контурах печі), а також типів N, E, R, S, J, L, T, K. Враховуючи загальну інформаційну місткість контурів одного нагрівального колодязя, для забезпечення повноцінного моніторингу обґрунтовано використання 2 одиниць зазначених модулів.

Програмування логіки контролера серії 300S здійснюється за допомогою інструментальних пакетів WinPLC7 або Siemens STEP7 на мовах LAD, FBD або STL. У цьому проєкті створення прикладної програми виконано в середовищі WinPLC7 із використанням мови релейно-контактних схем (LAD), що забезпечує наочність і простоту відстеження логічних взаємозв'язків.

Програмний комплекс WinPLC7 є повнофункціональним інженерним середовищем, призначеним для конфігурування апаратної частини, написання коду, ведення символьних таблиць, налаштування промислової мережі PROFIBUS, а також діагностики контролерів VIPA. Наявність вбудованого

програмного емулятора ПЛК дозволяє здійснювати повну симуляцію і відналагодження алгоритмів без підключення до реального обладнання. Пакет також підтримує функції імпорту/експорту проєктів для платформи Simatic S7 та архівації даних на MMC-картку.

Технологічний алгоритм роботи прикладного програмного забезпечення:

Контур автоматичного відсікання та подачі палива (коксодоменної суміші) й повітря:

– реалізується часова затримка етапів зупинки – спочатку відсікається подача газу, а через 5 секунд перекривається повітряний тракт;

– блокування або дозування палива залежно від динаміки відхилення поточної температури в робочому просторі від заданої уставки;

– при підйомі кришки нагрівального колодязя автоматично вмикається звукове сповіщення персоналу.

Логіка програми передбачає миттєве захисне відсікання ліній енергоносіїв у разі зупинки дуттьового вентилятора, критичного падіння тиску повітря або змішаного газу в підвідних колекторах, а також при раптовому знеструмленні (відсутності електроживлення) системи.

Висновки. У третьому розділі виконано комплексне проєктування трирівневої вертикально-інтегрованої системи автоматизації рекуперативного нагрівального агрегату з чітким диференціюванням частоти опитування датчиків залежно від їхньої теплофізичної інерційності. На основі отриманого сімейства передавальних функцій та моделювання в середовищі MATLAB (Simulink) доведено параметричну нестаціонарність об'єкта, що обґрунтувало технічну необхідність застосування саме адаптивних мікропроцесорних систем керування для компенсації збурень. Для апаратної реалізації нижнього рівня системи підібрано сучасний комплекс технічних засобів (ТПР 0392, САФІР-22М, АКВТ-01, БРУ-107, Метран-900 і модульний контролер VIPA 300C (System 300V)), який повністю забезпечує прецизійне вимірювання, надійний протиаварійний захист та ергономічний контроль параметрів теплового балансу печі.

4 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

4.1 Функціональна схема автоматизації

Функціонально-блочна структура автоматичного контролю і управління (ФСА) визначає склад окремих вузлів системи та оснащення об’єкта управління необхідними приладами й засобами автоматизації.

У рамках розробки ФСА було розглянуто такі контури:

- контроль температури повітря;
- контроль калорійності палива;
- контроль тиску у газовому трубопроводі;
- контроль тиску у повітряному трубопроводі;
- контроль і регулювання температури робочого простору;
- контроль і регулювання тиску в робочому просторі;
- контроль і регулювання співвідношення газ-повітря;
- відсічення газу та повітря.

У першому і другому контурах здійснюється контроль температури повітря. Сигнал з термопар ТПР (позиції 1а, 2а) подається на клемно-блочні з’єднувачі (позиції 1б, 1в), де він розподіляється на багатоканальний пристрій Метран 900 (позиція 4е) та аналоговий вхід контролера.

У третьому контурі виконується регулювання температури робочого простору. Завданням системи автоматичного регулювання (САР) є вибір і підтримка режиму роботи, який забезпечить досягнення необхідної температури металу, враховуючи початковий температурний стан злитків і запобігання оплавленню поверхні при нагріванні, а також рівномірність нагріву.

Для цього використовується термопара типу ТПР 0392 (позиція 3а), що охоплює широкий температурний діапазон від 300 до 1600 ºС. Сигнал з цієї термопари надходить на клемно-блочний з’єднувач (позиція 3б), звідки розподіляється на реєстратор Метран 900 і аналоговий вхід контролера. Після

обробки у центральному процесорі, сигнал через модуль дискретного виходу керує пневморозподільниками (позиції 3д, 3ж) і мембранними виконавчими механізмами (позиції 3е, 3з), встановленими на повітряному та газовому трубопроводах.

Четвертий контур відповідає за регулювання співвідношення «газ-повітря» для забезпечення якісного спалювання палива. При недостатній кількості повітря відбувається неповне згорання, що призводить до викиду неоспалених газів в атмосферу, що є економічно і екологічно неприпустимим. Якщо повітря надлишкове, газ згорає повністю, але утворюються шкідливі оксиди азоту.

Для вимірювання первинним перетворювачем слугують діафрагми ДКС (позиції 4а, 4в). Сигнал з них надходить на датчики перепаду тиску САФІР 22М (позиції 3б, 4г), разом із сигналом газоаналізатора АКВТ-01 (позиція 4ж). Потім він подається на клемно-блочний з'єднувач (позиція 4д), де розподіляється між показуючим пристроєм Метран 900 і аналоговими входами контролера. Далі сигнал з модуля дискретного виходу подається на перемикач режиму БРУ-107(позиція 4з), пускач ПБР-3А (позиції 4к, 4р) та виконавчі механізми (позиції 4с, 4л). Також подається сигнал положення вихідного валу електричного виконавчого пристрою на датчик ДУП-М (позиції 4н, 4п).

П'ятий контур відповідає за регулювання тиску в робочому просторі. Необхідно контролювати тиск в колодязі, підтримуючи його в межах 6,5–7,0 Па, і при перевищенні заданих меж подавати керуючі сигнали.

Сигнал від датчика надлишкового тиску САФІР 22 (позиція 5а) надходить на клемно-блочний з'єднувач (позиція 5б) і розподіляється між пристроєм Метран 900 і аналоговим входом контролера. Потім з модуля дискретного виходу сигнал подається на перемикач режиму БРУ-107 (позиція 5д), пускач ПБР 3А (позиція 5ж) і виконавчий механізм (позиція 5з). Сигнал положення вихідного валу надходить на датчик положення ДУП-М (позиція 5к).

Контур відсічення газу і повітря відповідає за контроль і сигналізацію тиску в обох трубопроводах, щоб у разі аварійної ситуації, такої як падіння тиску газу або повітря, зупинка вентилятора або відключення електроживлення, була

можлива автоматична перекриття подачі газу і повітря для запобігання небезпеці.

4.2 Розробка принципової електричної схеми

Принципова електрична схема (ПЕС) є схемною реалізацією окремих контурів функціональної схеми автоматизації (ФСА). Вона визначає повний склад приладів та технічних засобів, задіяних у контурі, і слугує основою для розробки монтажно-комутаційних схем, а також схем зовнішніх з’єднань і підключень.

Структурно ПЕС контуру регулювання поділяється на дві підсистеми: збору (введення) даних з об’єкта керування та реалізації керуючого впливу.

Для контролю витрати газу застосовано контактний термоелектричний метод вимірювання на базі первинного перетворювача ТПР-0392 (термопара типу В). Сигнал від датчика надходить до вторинного показуючого пристрою Метран 900. До складу цього вимірювального комплексу входить безпаперовий реєстратор та відповідний блок комутації. Враховуючи специфіку технічних засобів, обрано блок комутації К 1204, вхідні канали якого адаптовані для обробки сигналів від термопар типу В.

Апаратна конфігурація програмованого логічного контролера (ПЛК) також підбиралася з урахуванням можливості безпосереднього підключення термоелектричних аналогових сигналів. Електроживлення модулів ПЛК напругою 24 В постійного струму забезпечується за допомогою блока живлення PS 307. Відповідно до алгоритму керування та стану віртуальних контактів регулятора, модуль дискретних виходів формує та видає керуючі сигнали на пневморозподілювачі, які безпосередньо змінюють положення виконавчих органів.

4.3 Розробка принципової електричної схеми живлення

Принципова схеми живлення є проектним матеріалом, який використовують не тільки при розробці робочих креслень, але й при експлуатації змонтованих об’єктів.

Серед приладів, реалізуючих системи регулювання, є такі що потребують напругу живлення 380 В та 220В. Живлення здійснюється безпосередньо від існуючої мережі. Для запобігання виходу приладів з ладу в результаті раптового підвищення напруги застосовуються пакетні вимикачі.

Для від’єднання електроприймачів і ліній для ремонтних робіт застосовуються пакетні вимикачі.

4.4 Розробка монтажної комутаційної схеми щита КВПіА

Монтажно-комутаційна схема (схема підключень) розробляється на основі принципових електричних схем та креслення загального вигляду щита автоматизації. Вона детально відображає комутаційні зв'язки між усіма внутрішніми елементами, вторинними приладами та допоміжними засобами автоматизації. З'єднання апаратури всередині щита реалізується як безпосередньою прокладкою дротів між контактами технічних засобів, так і через проміжні клемні колодки. Застосування клемних рядів забезпечує високу ремонтопридатність системи, суттєво полегшуючи подальше обслуговування, заміну або модернізацію окремих приладів.

Крім внутрішньощитового монтажу, дана схема визначає інтерфейси взаємодії обладнання, розташованого на панелі керування, із зовнішніми датчиками та виконавчими механізмами, що встановлені безпосередньо на технологічному об'єкті. Графічний документ є основним вихідним матеріалом для виконання монтажних, електричних і трубних проводок у межах проектованого щита.

Комутаційне креслення виконане адресним методом, який наочно ідентифікує взаємозв’язки між такими пристроями внутрішньощитового монтажу:

– дистанційні покажчики положення типу ДУП-М;

– багатоканальний відеографічний реєстратор Метран-900 у комплекті з блоком комутації К-1204;

– програмований логічний контролер (ПЛК) із модулями введення-виведення;

– ручний задатчик сигналів (наприклад, РЗД-12);

– перемикачі режимів управління (автоматичний/ручний);

– імпульсні блоки живлення серії БП1-24 (напругою 24 В постійного струму);

– клемно-блочні з’єднувачі.

Для підключення зовнішніх кабельних трас, що йдуть від печі, на нижньому або бокових профілях щита передбачено встановлення ввідних клемних колодок. Через окрему групу силових клем на загальну внутрішню шину живлення щита також заводиться напруга промислової електромережі 220 В змінного струму.

4.5 Зовнішній вид шафи та вид внутрішній панелі

Шафи та щити систем автоматизації є уніфікованими конструктивними елементами, призначеними для розміщення технічних засобів, модулів введення-виведення та програмно-технічних комплексів. Вони забезпечують централізований збір, обробку й аналіз вимірювальної інформації, реалізацію алгоритмів керування, а також візуалізацію даних для оперативного персоналу.

Для даної системи керування нагрівальним колодязем було обрано малогабаритну підлогову шафу типу ЩШ-3Д із задніми дверима, яка має такі

базові технічні характеристики:

- висота конструкції — 2200 мм;
- ширина — 800 мм;
- глибина — 600 мм;
- ступінь захисту оболонки — IP31 (згідно з ГОСТ 14254 / IEC 60529).

Конструктивне виконання та просторове компонування шафи ЩШ-3Д адаптовані до важких умов експлуатації в промислових цехах металургійного виробництва. Зважаючи на високу концентрацію струмопровідного пилу, вологи та теплове випромінювання у приміщенні, програмований логічний контролер (ПЛК) VIPA та імпульсні блоки живлення встановлюються всередині шафи на монтажній панелі. Таке закрите розміщення захищає чутливу мікропроцесорну техніку від механічного забруднення та випадкових пошкоджень.

На фасадній (передній) панелі шафи, що виконує роль операторського підрівня, інтегровано пристрої інтерфейсу «людина-машина» (HMI): відеографічний реєстратор Метран-900, блоки дистанційного покажчика положення ДУП-М, ручний задатчик аналогових сигналів та перемикачі режимів керування («Ручний/Автомат»). На внутрішніх бокових стінках (профілях) шафи впорядковано змонтовано клемні колодки та клемно-блочні з’єднувачі, що оптимізує розведення внутрішніх та зовнішніх кабельних трас. Під час розробки креслення загального вигляду щита було суворо враховано габаритні та установчі розміри всіх приладів, а також регламентні відстані між ними для забезпечення ефективного природного відведення тепла.

4.6 Розробка схеми зовнішніх з’єднань системи автоматичного регулювання витрати природного газу

Схема зовнішніх з’єднань електричних і трубних проводок – це креслення, на якому умовно у вигляді ліній зв’язку показуються електричні дроти й кабелі,

що прокладаються поза щитами між окремими приладами та засобами автоматизації.

Окрім електричних ліній, на цьому документі детально відображаються трубні проводки (імпульсні, командні, живильні та дренажні трубопроводи), які забезпечують подачу стисненого повітря до пневматичних приводів або передачу тиску середовища до датчиків типу САФІР. Для кожного кабелю та труби на схемі обов'язково зазначається унікальне маркування, специфікація (матеріал, переріз, довжина) та спосіб промислової прокладки, наприклад, у металевих лотках, захисних коробах чи кабельних каналах. Графічний документ також чітко фіксує точки підключення проводок до клемних колодок шаф автоматизації (ЩШ-3Д) та сполучних коробок, встановлених безпосередньо поблизу нагрівального колодязя. Ця схема є одним із найважливіших робочих документів, на основі якого безпосередньо виконуються монтажно-налагоджувальні роботи на об'єкті, а також здійснюється подальша експлуатація та пошук несправностей у лініях зв'язку системи.

4.7 Замовна специфікація обладнання

На основі наданого технічного опису побудови функціональної схеми автоматизації в табл. 3.3 наведено структуровану специфікацію та систематизований технічний опис роботи контурів автоматичного контролю та регулювання.

Ця специфікація містить вичерпний перелік первинних вимірювальних перетворювачів, вторинних реєстраторів, контролерного обладнання та виконавчих механізмів, із зазначенням їхніх позиційних позначень згідно з ФСА. Систематизований опис логіки взаємодії елементів дозволяє чітко простежити шлях проходження сигналів від моменту фіксації змін технологічного параметра до реалізації керуючого впливу в кожному з п'яти контурів терміної печі.

Таблиця 3.3 – Структурована специфікація обладнання

Позиційне позначення	Найменування обладнання	Тип	Призначення в системі
1а, 2а, 3а	Первинний перетворювач температури (термопара)	ТПР 0392	Вимірювання температури повітря та робочого простору (від 300 до 1600 ºС)
1б, 1в, 3б, 4д, 5б	Клемно-блочний з’єднувач	-	Крос-комутація, розподіл сигналів на реєстратор та контролер
4е (та інші)	Вторинний багатоканальний пристрій / реєстратор	Метран 900	Локальне відображення, реєстрація та контроль параметрів
4а, 4в	Звужуючий пристрій (діафрагма)	ДКС	Первинний перетворювач витрати газу та повітря (за перепадом тиску)
3б, 4г	Датчик перепаду тиску	САФІР 22М	Вимірювання витрати палива/повітря за перепадом тиску на діафрагмах
4ж	Газоаналізатор	АКВТ-01	Контроль складу димових газів (оптимізація спалювання)
5а	Датчик надлишкового тиску	САФІР 22	Контроль тиску в робочому просторі печі (утримання 6,5–7,0 Па)
3д, 3ж	Пневморозподілювач	-	Керування потоками стисненого повітря на виконавчі механізми

3е, 3з	Виконавчий механізм	Мембранний (МВМ)	Зміна витрати повітря та газу через пневмопривод
4з, 5д	Блок ручного управління (перемикач режиму)	БРУ-107	Перемикання між автоматичним та ручним режимами керування
4к, 4р, 5ж	Пускач безконтактний реверсивний	ПБР-3А	Комутація живлення електричних виконавчих механізмів
4с, 4л, 5з	Електричний виконавчий механізм	МЕО (або аналог)	Регулювання положення заслінок/клапанів газу, повітря та димових газів
4н, 4п, 5к	Блок дистанційного покажчика положення	ДУП-М	Зворотний зв'язок за положенням вихідного валу виконавчого механізму
1б	Програмований логічний контролер (ПЛК)		Центральний процесор, модулі аналогового входу та дискретного виходу

Висновки. В даному розділі розроблені структурна, функціональна схеми, принципова електрична схема живлення, монтажна комутаційна схема щита КВПіА схеми САР термічної печі камерного типу.

Також у межах проєкту виконано ретельний вибір і технічне обґрунтування сучасного комплексу засобів автоматизації нижнього та середнього рівнів, зокрема мікропроцесорного контролера VIPA 300C та сумісних сигнальних модулів. На основі аналізу математичної моделі та отриманих у середовищі MATLAB Simulink перехідних характеристик об'єкта було доведено параметричну нестаціонарність процесу нагрівання, що підтвердило доцільність застосування адаптивних алгоритмів керування.

5 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Розрахунок параметрів наближеним методом

При цьому методі враховується середньогрупові інтенсивності відмов елементів системи та досвід експлуатації аналогічних виробів (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Вхідні данні

Термопара	Метран	Контролер	Панель оператора	Реле
0,1	0,9	0,7	0,9	4,3

– розраховується загальна сумарна інтенсивність відмов всієї системи автоматичного регулювання (САР):

–

$$\lambda'_{\text{заг}} = k * \sum_{i=1}^{m} \lambda_{oi} * n_i = 2{,}5 * 10^{-6}(0{,}1 + 0{,}9 + 0{,}7 + 0{,}9 + 4{,}3 * 2)$$
$$= 2{,}5 * 11{,}2 * 10^{-6} = 28 * 10^{-6}\ [1/\text{год}] \qquad (5.1)$$

де k – узагальнений коефіцієнт, який враховує призначення САР;

λ_{oi} – середня інтенсивність відмов відповідної групи;

m – кількість груп;

n_i – кількість елементів у групі. і n

– розраховується наробіток на відмову:

$$T'_0 = \frac{1}{\lambda'_{\text{заг}}} = \frac{1}{28 \cdot 10^{-6}} = 35714{,}2\ [\text{год}]; \qquad (5.2)$$

– розраховується імовірність безвідмовної роботи САР:

$$P'(t) = e^{-\lambda_{заг}} = e^{-\frac{t}{T_0}} = e^{-\frac{35000}{35714,2}} = 0,98 \qquad (5.3)$$

Таблиця 5.2 – Результати розрахунків параметрів надійності наближеним методом

Назва і типи елементів	Середнє значення інтенсивності відмов $\lambda_a \cdot 10^{-6}$, 1/год	Узагальнений коефіцієнт, К	Сумарна інтенсивність відмов, $\lambda_{заг} \cdot 10^{-6}$, 1/год
Первинний перетворювач	0,1	2,5	$28 \cdot 10^{-6}$
Вторийнний прилад	0,9		
Котролер	0,7		
Пульт оператора	0,9		
Реле	$4,3 \cdot 2$		

Таблиця 5.3 – Дані для побудови графіку залежності P’(t)

t, год	0	$0,5T_0^1$	T_0^1	$1,5T_0^1$	$2T_0^1$	$2,5T_0^1$	$3T_0^1$	$3,5T_0^1$	$4T_0^1$
P’(t)	1	0,60	0,37	0,22	0,13	0,083	0,05	0,03	0,018

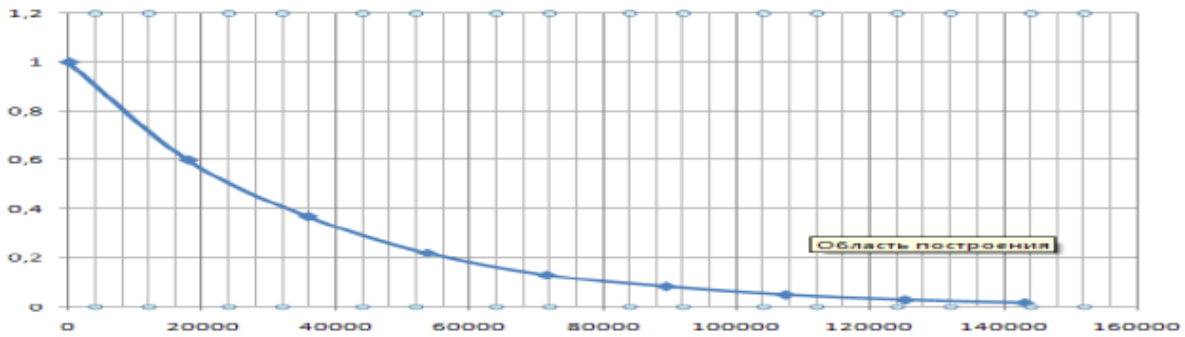


Рисунок 5.1 – Графік залежності P’(t)

5.2 Повний розрахунок параметрів надійності

Для визначення коефіцієнтів навантаження елементів роблять розрахунки режимів роботи схеми або приймають рекомендовані коефіцієнти згідно статистичним даним. Вплив дестабілізуючих чинників враховуються за поправними коефіцієнтами, які визначаються конкретними умовами експлуатації та технічними параметрами.

Алгоритм розрахунку наступний:

– визначається кількість груп елементів (m) системи та кількість елементів у кожній групі (n_j), які мають однакові коефіцієнти навантаження K_i та однакові інтенсивності відмов.

a = 0,66.

Таблиця 5.4 – Коефіцієнти навантаження

$K_{\lambda 1}$	$K_{\lambda 2}$	$K_{\lambda 3}$
1,04	2,5	1,1

– розраховується комплексний поправочний коефіцієнт:

$$К_{\lambda} = К_{\lambda 1} \cdot К_{\lambda 2} \cdot К_{\lambda 3} = 1{,}04 \cdot 2{,}5 \cdot 1{,}1 = 2{,}86; \quad (5.4)$$

– розраховується загальна інтенсивність відмов:

$$\lambda''_{\text{заг}} = К \cdot K_{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^{m} \lambda_{oi} \cdot n_j \frac{1}{\text{год}}, \quad (5.5)$$

$$\lambda''_{\text{заг}} = 9 \cdot 2{,}5 \cdot 2{,}86 \cdot 0{,}66(0{,}1 + 0{,}9 + 0{,}7 + 0{,}9 + 4{,}3 \cdot 2)$$

$$= 437{,}621 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{\text{год}}\right]$$

– розраховується наробіток на відмову:

$$T_0'' = \frac{1}{\lambda''_{заг}} = 2285 \text{ [год]}; \quad (5.6)$$

– розраховується вірогідність безвідмовної роботи САР :

$$P''(t) = e^{-\lambda''_{заг}} = e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (5.7)$$

Таблиця 5.5 – Дані і результати розрахунків параметрів надійності точним методом

Назва і типи елементів	Середнє значення інтенсивності відмов $\lambda_a \cdot 10^{-6}$, 1/год	Комплексний поправочний коефіцієнт, K_λ	Сумарна інтенсивність відмов, $\lambda_{заг} \cdot 10^{-6}$, 1/год	Напрацювання на відмову, T_0'', год
Первинний перетворювач	0,1	2,5	$28 \cdot 10^{-6}$	2285
Вторийнний прилад	0,9			
Котролер	0,7			
Пульт оператора	0,9			
Реле	$4{,}3 \cdot 2$			

Таблиця 5.6 – Дані для побудови графіку залежності P’’(t)

t, год	0	$0{,}5T_0^1$	T_0^1	$1{,}5T_0^1$	$2T_0^1$	$2{,}5T_0^1$	$3T_0^1$	$3{,}5T_0^1$	$4T_0^1$
P’(t)	1	0,60	0,37	0,22	0,13	0,083	0,05	0,03	0,018

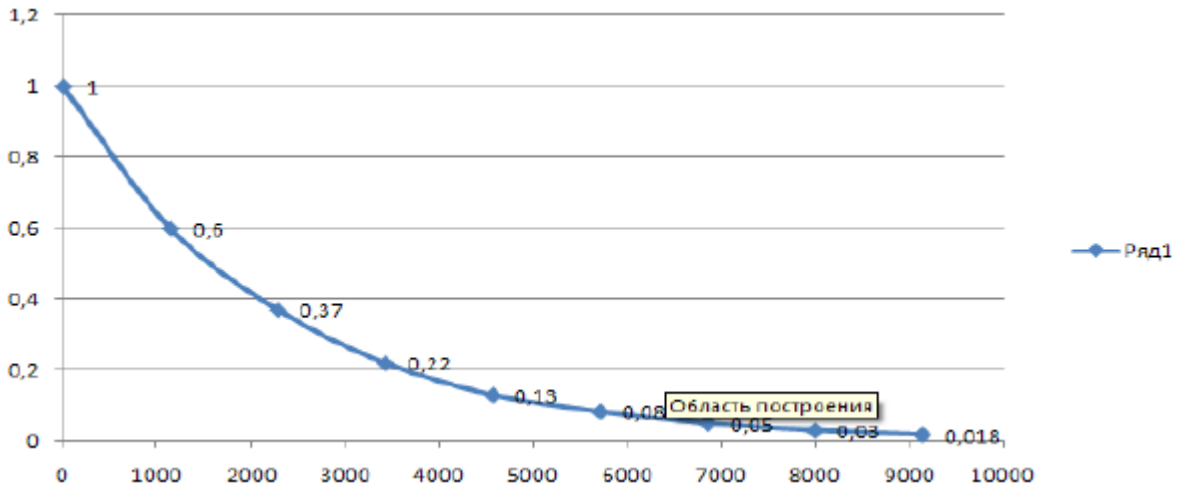


Рисунок 5.2 – Графік залежності P’’(t)

З графіків видно, що розрахунок параметрів надійності, який зроблений з урахуванням режиму роботи елементів і впливом дестабілізуючих чинників є точнішим, ніж розрахунок параметрів наближеним методом. При цьому ймовірність безвідмовної роботи САР значно зменшується з плином часу при точному розрахунку [12].

Гарантійний термін роботи САР :

$$\mathrm{T_г} = \frac{\mathrm{T_0}}{4 \cdot \mathrm{К_{ДН}} \cdot \mathrm{М}}, \qquad (5.8)$$

де $\mathrm{К_{ДН}}$ – кількість днів роботи в місяць;

М – кількість місяців роботи за рік.

$$\mathrm{T_г} = \frac{2285}{4 \cdot 31 \cdot 12} = 1{,}5\ [\text{рік}]$$

Середнє значення тривалості відновлення САР, якщо потрібне повне відновлення:

$$\mathrm{T_в} = \sum_{j=1}^{q} T_{Bj} \cdot m_j, [\text{год}]; \qquad (5.9)$$

де q – кількість груп елементів, які мають однакову тривалість відновлення;

T_{Bj} – середнє значення тривалості відновлення, година;

m_j – кількість елементів в групі.

$$T_в = 0,8 \cdot 6 = 4,8 \text{ год.}$$

Таблиця 5.7 – Дані для розрахунку тривалості відновлення

Назва і типи елементів	Середнє значення тривалості відновлення T_{Bj}, год	Кількість елементів у групі, m_j
Перемикачі	0,78	6

Коефіцієнт готовності :

$$К_г = \frac{1}{1 + \lambda_{заг} \cdot T_в} = 0,99981 \qquad (5.10)$$

У створенні та експлуатації автоматичних систем важливо забезпечити їхню надійність, але це часто є складною задачею. Способи підвищення надійності можуть бути різноманітними і вимагають широких наукових знань, інженерного досвіду та технічної майстерності. Підвищення надійності може бути досягнуте за допомогою використання простих і стабільних схем, вибору якісних елементів та розробки зручних у використанні конструкцій. Також важливо використовувати агрегати з високою надійністю та елементи, які працюють при знижених навантаженнях. Всі ці заходи дозволяють забезпечити мінімальну необхідну надійність системи та підвищити її продуктивність та тривалість служби.

Способи підвищення надійності автоматичних систем дуже різноманітні і вимагають від осіб, що створюють системи, як широких наукових і теоретичних знань, так і інженерного мистецтва, великого досвіду і т. д.

При розробці схеми і конструкції мають також бути передбачені заходи, що дозволяють підвищити надійність системи при експлуатації, а саме: блокова конструкція системи, використання стандартних і уніфікованих вузлів і блоків, зручність перевірок і обслуговування та ін.

Висновки. Отже, при проектуванні надійності нерезервованої системи використовуються кілька основних методів:

– вибір простих і стабільних схем, які також мають можливість підвищення надійності під час експлуатації;

– використання якісних і перспективних елементів, а також налаштування режимів роботи елементів для зниження електричного навантаження;

– розробка конструкції системи та приладів, що мінімізують навантаження на систему і елементи, і забезпечують зручність обслуговування.

Крім того, використання агрегатів з високою надійністю, які працюють на принципах природи, таких як швидкохідні агрегати без механічних передач, або деталі, які працюють при низькому навантаженні, також сприяє підвищенню надійності системи.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

6.1 Небезпечні та шкідливи фактори виробництва

Відповідно до нормативно-технічної документації, потенційні загрози у виробничому середовищі класифікують на чотири основні групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. На території проектованого прокатного цеху найбільший негативний вплив на персонал мають фізичні небезпечні та шкідливі виробничі фактори (НШВФ). До них належать: рухомі машини, агрегати та їхні конструкційні елементи; надмірне інфрачервоне (теплове) випромінювання; температурні коливання повітря робочої зони у літній період; а також підвищені концентрації пилу й газів.

Особливе місце в структурі НШВФ належить акустичному навантаженню. Основними джерелами виробничого шуму на досліджуваній дільниці є:

– механічні вузли рухомого устаткування та допоміжних транспортних систем (механічне походження шуму);

– пальникові пристрої нагрівальних печей, які працюють на газоподібному паливі (аеродинамічне та термічне походження шуму).

Спектральний склад акустичних коливань дозволяє ідентифікувати природу їхнього виникнення та визначити діапазони, які становлять найбільшу небезпеку для організму працюючих. За частотним розподілом (спектром) виробничий шум поділяють на три ключові діапазони: низькочастотний (до 300 Гц), середньочастотний (300 – 800 Гц) та високочастотний (понад 800 Гц На основі інструментальних замірів встановлено, що інтегральний рівень звукового тиску на території цеху становить 84 дБ, що перевищує гранично допустимий рівень (ГДР) на 4 дБ (згідно з санітарними нормами, ГДР становить 80 дБ).

Систематичний вплив виробничого шуму зазначеної інтенсивності та тривалості призводить до передчасної втоми, перенапруження центральної нервової системи, зниження гостроти слуху (розвитку професійної

приглухуватості), а також негативно позначається на загальних фізіологічних функціях організму. Додатково, серед психофізіологічних факторів ризику на робочих місцях зафіксовано фізичні перевантаження (важкість праці) операторів. Зведений перелік основних чинників та параметрів виробничого процесу наведено нижче в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Оцінка чинників виробничого та трудового процесу

Чинники виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі і небезпечні умови (перевищення/ ступінь)	Тривалість дії чинників за зміну, %
Шкідливі хімічні речовини, мг/м³:				
1 клас небезпеки: Ангідрид хромовий; Нікелю оксиди	0,01	0,016	1,6 р. (I ст.)	88
2 клас небезпеки: Марганець оксиди (MnO2)	0,05	0,054	1,08 р. (I ст.)	88
3–4 класи небезпеки: Кремнію діоксид	0,3	0,35	1,2 р. (I ст.)	88
Азоту діоксид (NO2)	1	1,65	1,65 р. (I ст.)	88
Вуглецю оксид (CO)	2	2,53	1,27 р. (I ст.)	88
Пил переважно фіброгенної дії, мг/м³:				
Кремнію діоксид (2,19%)	4	2,49	— (в нормі)	88
Акустичні чинники:				
Вібрація (загальна), дБ	92	95	+3 дБ (I ст.)	88
Шум, дБА	80	84	+4 дБА (I ст.)	88
Інфразвук, дБ	85	—	—	—
Ультразвук, дБ	—	—	—	—
Неіонізуючі випромінювання:				
радіочастотний діапазон, В/м	—	—	—	—
діапазон промислової частоти, кВ/м	—	—	—	—

Мікроклімат у приміщенні:				
температура повітря, °С	13…26	41	+15 °С (II ст.)	88
швидкість руху повітря, м/с	0,6	0,3	—	88
відносна вологість повітря, %	75	41	—	88
інфрачервоне випромінювання, Вт/м²	140	2200	+2060 Вт/м² (III ст.)	88

Джерелом підвищеного інфрачервоного випромінювання є:

– випромінювання від пальників печі, випромінювання з завантажувального вікна, становлять 2200 Вт/ м².

Інфрачервоне випромінювання впливає на функціональний стан людини, його нервову і серцево-судинну системи [27].

6.2 Організація пожежної безпеки

Аналізуючи специфіку проектованої ділянки термообробки, виробниче приміщення за класифікацією вибухопожежонебезпеки віднесено до класу В-IIа за вибухонебезпечністю та до класу П-IIа за пожежонебезпекою. Ця категорія вказує на те, що за нормального технологічного режиму експлуатації пряма загроза виникнення небезпечних станів відсутня, проте аварійні ситуації, розгерметизація або технічні несправності обладнання можуть призвести до формування вибухо- чи пожежонебезпечного середовища через накопичення горючого пилу чи волокон. З метою забезпечення надійного пожежо- та вибухозахисту всі технологічні процеси нагріву й обробки реалізуються виключно всередині герметично закритих апаратів та печей, конструкція яких унеможливлює потрапляння небезпечних речовин у робочу зону приміщення. Крім того, у проекті передбачено комплексні інженерні заходи захисту від

проявів атмосферного та статичного заземлення, що запобігає появі іскрення, а все встановлене електрообладнання, включаючи комутаційні апарати, датчики та шафи керування контролерами, обрано у спеціальному вибухозахищеному та пожежобезпечному виконанні з відповідним індексом оболонки.

Особлива увага приділена захисту силових електричних мереж від струмів короткого замикання та перевантажень, які є одними з головних джерел займання в промислових умовах. Для миттєвої локалізації таких аварійних режимів у силових шафах встановлюються сучасні швидкодіючі автоматичні вимикачі та пристрої захисного вимкнення. На випадок виникнення локального осередку займання безпосередньо на ділянці термообробки передбачено первинні засоби пожежогасіння, серед яких ефективно використовуються вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-5, призначені для гасіння електроустановок під напругою, хімічні пінні вогнегасники ОХП-10, а також пересувні порошкові установки ПГП-50 для локалізації великих площ пожежі. Додатково приміщення оснащене автоматичною системою пожежної сигналізації, яка інтегрована в загальну схему автоматизації на базі промислового контролера та забезпечує миттєве знеструмлення печей у разі спрацювання датчиків задимлення чи критичного підвищення температури в цеху.

Для забезпечення безпеки персоналу та організації чітких логістичних потоків внутрішнє планування відділення виконано із суворим дотриманням геометричних параметрів проходів та проїздів. Відповідно до чинних нормативних вимог, внутрішні проходи між обладнанням мають чисту ширину не менше ніж 1,5 метра, а транспортні проїзди становлять щонайменше 2,5 метра, що повністю виключає перетин зустрічних людських потоків та гарантує вільне переміщення вантажопідйомної техніки. Згідно з жорсткими вимогами будівельних норм ДБН В.1.1-7:2016, для безпечної евакуації людей у разі пожежі або іншої надзвичайної ситуації передбачено два незалежні запасні евакуаційні виходи, які обладнані легкодоступними дверима з системою відкривання «антипаніка» і ведуть безпосередньо назовні або в безпечну зону. Протяжність,

ширина коридорів та геометричні параметри дверних отворів на шляхах евакуації повністю відповідають розрахунковому часу евакуації персоналу, а самі маршрути руху чітко означені світловими покажчиками зеленого кольору із автономним живленням, які залишаються активними навіть у разі повного знеструмлення підприємства.

Межі вогнестійкості будівельних конструкцій і максимальні межі поширення вогню по них визначаємо з наводимо в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Межі вогнестійкості

<table>
<tr><td colspan="3">Ступінь вогнестійкості будівель</td><td>II</td></tr>
<tr><td rowspan="8">Мініма льні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (над межею) і максимальні межі розповсюдження вогню по них (під межею)</td><td rowspan="3">Стіни</td><td>Несучі і сходові клітки</td><td>2/0</td></tr>
<tr><td>Самонесучі</td><td>1/0</td></tr>
<tr><td>Зовнішні, несучі (з навісних панелей)</td><td>0,25/0</td></tr>
<tr><td colspan="2">Внутрішня несуча (перегородка)</td><td>0,25/0</td></tr>
<tr><td colspan="2">Колони</td><td>2/0</td></tr>
<tr><td colspan="2">Сходові майданчики, ступені, балки і марші сход. кліток</td><td>1/0</td></tr>
<tr><td colspan="2">Плити, настили (з утеплювачем) і ін. несучі конструкції</td><td>0,75/0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Елементи покрівель</td><td>Плити, настили (з утеплювачем і прогони)</td><td>0,25/0</td></tr>
<tr><td>Балки, ферми, арки і рами</td><td>0,25/0</td></tr>
</table>

Для пожежогасіння передбачено розрахункові витрати води на зовнішнє та внутрішнє гасіння, а також первинний комплект засобів пожежогасіння, що включає порошкові та вуглекислотні вогнегасники, ящики з піском, ломи, відра, лопати та пожежну установку УВП-400.

Для захисту від блискавок використовуються ізольовані від будівель блискавкоприймачі стрижневого або тросового типу, які мають відповідний заземлювач і регулярно піддаються перевірці. Улаштування блискавкозахисту виконуються згідно з нормативними вимогами, зокрема
щодо опору заземлювача, який не повинен перевищувати 10 Ом.

6.3 Електробезпека

Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), за ступенем небезпеки ураження електричним струмом приміщення термічного цеху віднесено до категорії особливо небезпечних. Такий статус обумовлений специфікою виробничого середовища, зокрема наявністю залізобетонної струмопровідної підлоги, а також високою ймовірністю одночасного дотику людини до заземлених металоконструкцій будівлі з одного боку та до металевих корпусів технологічного електрообладнання з іншого.

Електропостачання цеху термічної обробки здійснюється від трифазної чотирипровідної мережі змінною напругою 220/380 В із частотою 50 Гц та глухозаземленою нейтраллю трансформатора. Така конфігурація мережі є універсальною, оскільки дозволяє одночасно використовувати як лінійну напругу 380 В для живлення потужних силових споживачів, таких як нагрівальні елементи й електроприводи печей, так і фазну напругу 220 В для кіл керування, освітлення та допоміжних пристроїв.

З метою мінімізації ризиків та забезпечення надійного захисту персоналу від дії електричного струму в умовах термічного виробництва впроваджено комплекс взаємопов'язаних технічних заходів. Основним бар'єром є забезпечення повної недоступності струмопровідних частин, що досягається встановленням суцільних або сітчастих захисних огороджень у місцях можливого випадкового наближення чи дотику. Сама конструкція всього обраного обладнання має закрите та пилозахищене виконання, що запобігає потраплянню струмопровідного пилу всередину корпусів. Для контролю стану

діелектричних властивостей системи проводиться регулярний плановий моніторинг і вимірювання опору ізоляції кабельних ліній та обмоток.

Оскільки в цеху експлуатується мережа з глухозаземленою нейтраллю напругою до 1000 В, базовим методом захисту при замиканні на відкриті провідні частини є захисне занулення, яке доповнюється обов'язковим заземленням усіх металевих конструктивних елементів, що не несуть струму, але можуть опинитися під напругою в разі пошкодження робочої ізоляції. При цьому всі неструмопровідні деталі мають чітко видимі ззовні заземлювальні провідники, приєднані до загального контуру, опір якого згідно з нормами ПУЕ не перевищує 4 Ом. Для додаткового зниження напруги дотику в зоні обслуговування печей реалізовано вирівнювання потенціалів шляхом укладання металевих сіток у підлогу та облаштування спеціальних ізолювальних майданчиків.

Для захисту від однофазних замикань на корпус, коли струму короткого замикання може бути недостатньо для миттєвого спрацювання лінійних автоматів, у колах живлення застосовуються високочутливі пристрої захисного вимкнення (ПЗВ). Завдяки низькому порогу спрацювання в межах від 10 до 30 мА, ці пристрої ефективно реагують як на прямі струми замикання на землю, так і на незначні струми витоку, що виникають при деградації ізоляції. Висока швидкодія ПЗВ, яка становить усього 0,1–0,2 секунди, гарантує практично миттєве знеструмлення аварійної ділянки ще до моменту розвитку тяжких наслідків. Усі зазначені технічні рішення працюють у поєднанні з обов'язковим використанням сертифікованих індивідуальних засобів захисту, що забезпечує повну відповідність умов праці сучасним стандартам безпеки.

6.4 Захист від шуму і вібрації

Для робочої зони промислових майданчиків гранично допустимий рівень звукового тиску чітко регламентований нормативними документами і не

повинен перевищувати 80–90 дБА залежно від важкості праці. Оскільки практично все діюче технологічне обладнання термічного цеху є потенційним джерелом підвищеного шуму та вібрації, у проекті передбачено комплекс методів боротьби з цими шкідливими виробничими факторами безпосередньо у джерелі їх виникнення та на шляхах поширення.

З метою зниження механічного шуму впроваджено систему регулярного технічного обслуговування для контролю зносу деталей, що зазнають тертя, таких як шестерні, втулки та роликові опори. Найбільш гучні вузли та приводні механізми печей ізолюються за допомогою спеціальних звукопоглинальних кожухів. Для захисту безпосередньо на робочому місці оператора-терміста конструкція стін стаціонарного поста управління виконана із застосуванням звукоізолюючих сендвіч-панелей типу ЗІПС. Ці панелі мають багатошарову структуру, що комбінує щільні гіпсоволокнисті листи та легкі поглинальні шари з мінеральної вати або штапельного скловолокна, що дозволяє ефективно гасити звукові хвилі та знижувати загальний рівень шуму в кабіні до безпечних значень. Оглядові вікна поста оператора виконані у вигляді трикамерних герметичних склопакетів, які гарантують високі акустичні характеристики та водночас забезпечують безперервний візуальний контроль за ходом технологічного процесу.

Для локалізації та гасіння динамічних коливань, які викликають шкідливу вібрацію, кожен силовий апарат і агрегат встановлюється на індивідуальний залізобетонний фундамент, віброізольований від суміжних будівельних конструкцій цеху. Додатково застосовуються методи пасивної віброізоляції, що зменшують передачу механічних коливань від джерела до фундаменту та підлоги. Як ефективний засіб індивідуального захисту від за залишкової вібрації, що може передаватися працівникам через нижні кінцівки, обслуговуючий персонал забезпечується спеціальним взуттям на товстій амортизуючій гумовій підошві.

Висновки. На основі детального аналізу небезпечних та шкідливих виробничих аспектів процесу нагріву у камерній печі було обґрунтовано та

розроблено комплексні технічні рішення для їх повного усунення або суттєвого зменшення впливу на обслуговуючий персонал. У розділі належним чином розглянуто питання електробезпеки, захисту від теплового випромінювання, зниження рівнів шуму та вібрації, а також заходи пожежної безпеки, які повністю відповідають чинному законодавству України та вимогам профільних ДСТУ і ДБН.

Додаткові речення для розширення висновків: Впровадження запропонованих засобів автоматичного моніторингу та захисного блокування на базі контролера VIPA 300 дозволяє звести до мінімуму ймовірність виникнення аварійних ситуацій через людський фактор. Створення ізольованого поста керування із сучасними звуко- та теплоізоляційними властивостями забезпечує комфортні та безпечні умови праці для оператора-терміста протягом усієї робочої зміни. Спроектована система евакуаційних шляхів та первинних засобів пожежогасіння гарантує високу готовність підрозділу до локалізації можливих надзвичайних ситуацій. Таким чином, розроблений комплекс організаційно-технічних заходів робить проектований об'єкт повністю відповідним сучасним стандартам охорони праці та промислової санітарії.

7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

Сучасний етап розвитку промислового виробництва та металургійного комплексу вимагає не лише впровадження інноваційних високотехнологічних рішень, а й детального аналізу їхньої фінансової доцільності. Перехід до використання адаптивних мікропроцесорних систем керування теплотехнічними агрегатами нерозривно пов'язаний із капітальними інвестиціями в апаратне та програмне забезпечення середнього й нижнього рівнів автоматизації.

Метою даного розділу є комплексне техніко-економічне обґрунтування доцільності модернізації системи автоматичного регулювання рекуперативного нагрівального колодязя. Економічний ефект від реалізації запропонованих інженерних рішень досягається завдяки прецизійній стабілізації температурного поля, оптимізації витрати паливно-енергетичних ресурсів, зменшенню угару металу, а також мінімізації аварійних простоїв обладнання за рахунок надійного функціонування контурів протиаварійного захисту. Розрахунок основних техніко-економічних показників дозволить оцінити обсяг необхідних капіталовкладень, визначити термін їх окупності та довести фінансову спроможність і вигідність розробленого проєкту в умовах реального виробництва.

Для реалізації проекту знадобиться капіталовкладення у сумі 165 000 грн.

Таблиця 7.1 – Розрахунок собівартості продукції

Витрати	Сума, грн.
Придбання технічних засобів	79420
Придбання ЗІП (запасні частини, інструменти, приладдя)	51060
Програмне забезпечення	18300
Заробітна плата	10000
Експлуатація ЕОМ	8200
Втрати від браку	247500
Підсумок	412480

Під витратами на технічні засоби розуміється придбання первинних перетворювачів,вторинних приладів,промислового контролеру та виконавчих пристроїв ,з комплектом ЗІП.

Під витратами на програмне забезпечення розуміється придбання ПЗ Win PLC7 для PC , мови LAD/STL/FBD,для програмування,діагностики та відладки, кабель зв'язку PLC VIPA—>PC «Green Cable», PLC VIPA—>PC «MPI-PPI(RS232) интерфейс», OP-Manadger.

З впровадженням нової системи ми бачимо, що втрати зменшилися на 1% = 247500 грн.

Розрахунки впровадження нової системи автоматизації дозволяють говорити про їх економічну обґрунтованість та доцільність.

Таблиця 7.2 – Економічна ефективність від впровадження системи автоматизації

Витрати / прибуток	Діюча система керування ТП	Спроектована система керування ТП
Витрата палива	10 000 000 $м^3$/рік 4 833 333 грн.	9 100 000 $м^3$/ рік4 398 000 грн.
Виробництво якісного металу	22 050 т	22 275 т
Брак продукції	2%	1%
Ціна металу за 1 т	1100 грн.	
Прибуток від реалізації продукції	24 002 5000 грн.	24 502 500 грн.
Прибуток з урахуванням витрат	19 421 667 грн.	20 104 500 грн.
Різниця (економічний ефект)	628 833 грн.	

Серед ключових техніко-економічних показників, що визначають ефективність модернізації та функціонування системи автоматизації, визначальне місце належить рентабельності. Цей показник інтегрально

відображає рівень прибутковості та доходності підприємства. Економічна сутність рентабельної роботи виробничого комплексу полягає у досягненні стійкого перевищення грошових надходжень (доходу) над сукупними витратами на впровадження та експлуатацію нової системи керування.

Розрахунок рівня рентабельності спроєктованої системи автоматичного керування (R) виконується за базовим співвідношенням чистого прибутку до загальної виручки від реалізації продукції:

$$\text{Рентабелбність} = \frac{\text{Прибуток}}{\text{Виручка}} \cdot 100\% = \frac{24002500}{24502500} = 100\% = 82\ \% \quad (7.1)$$

Висновки. Високе розрахункове значення рентабельності (82 %) свідчить про глибоку економічну доцільність впровадження адаптивної системи керування нагрівальним колодязем. Порівняльний аналіз базового та модернізованого варіантів дозволяє виділити такі переваги спроєктованої АСР:

– комплексна економія матеріальних, енергетичних та паливних ресурсів (зниження витрат коксодоменної суміші);

– зростання продуктивності праці технологічного персоналу;

– мінімізація втрат від хімічного недопалу та зниження рівня браку продукції на 1%;

– впровадження новітніх адаптивних мікропроцесорних технологій (технологія SPEED7);

– оптимізація структури виробничої програми цеху;

– стабільне зростання чистого прибутку підприємства.

Завдяки отриманню значного річного економічного ефекту, капітальні вкладення у модернізацію КВПіА окупаються у стислі терміни. Розрахунковий термін окупності системи становить 1,5 року, що повністю задовольняє сучасним критеріям інвестиційної привабливості промислових проєктів.

ВИСНОВКИ

При виконанні кваліфікаційної роботи здійснено розробку системи автоматизації процесом нагріву злитків у термічній печі камерного типу із нерухомим подом.

Представлена характеристика термічної печі із нерухомим подом та описаний технологічний процес нагріву злитків. Розглянуто існуючий рівень автоматизації з виявленням недоліків діючої системи. Розроблена функціональна схема автоматизації термічної печі із нерухомим подом, вибрані технічні засоби автоматизації та приведені розрахунки регулюючого органу та виконавчого механізму. Проведено вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня СА. Обрано програмне середовище WinPLC7 та розроблено алгоритм сигналізації та протиаварійного захисту технічного обладнання. За існуючим алгоритмом створено програмний код. Розроблені принципова електрична, монтажна комутаційна схеми, схема зовнішніх з’єднань і спроектовано приладову шафу КВПіА. У розділі охорони праці проведений аналіз небезпечних та шкідливих факторів на території термічного цеху, розроблені заходи щодо їх запобігання. При розрахунку надійності системи автоматизації визначений гарантійний термін роботи САР, який складає 1,5 року.

Математичне моделювання теплотехнічного агрегату, виконане в середовищі MATLAB Simulink, підтвердило суттєву параметричну нестаціонарність об'єкта під впливом аеродинамічних та експлуатаційних чинників. Це повністю обґрунтувало доцільність переходу від стандартних лінійних регуляторів до адаптивної мікропроцесорної системи керування на базі високошвидкісного ПЛК VIPA 300C з архітектурою SPEED7. Інтеграція сучасних інтелектуальних приладів нижнього рівня, таких як газоаналізатор АКВТ-01 та вимірювальні перетворювачі САФІР-22М, дозволила побудувати високоточний замкнений контур оптимізації співвідношення «газ-повітря». Завдяки цьому забезпечено стехіометричне спалювання палива, що мінімізує утворення шкідливих оксидів азоту та захищає навколишнє середовище від

токсичних викидів. Спроєктоване конструктивне оформлення апаратури в шафі типу ЩШ-3Д гарантує стабільне функціонування мікропроцесорних модулів у важких умовах підвищеної запиленості й теплового випромінювання металургійного цеху. Організаційні та технічні заходи з охорони праці дозволили компенсувати негативний вплив виробничого шуму і вібрації, покращивши загальну безпеку життєдіяльності робочої зони. У підсумку, розроблений комплекс інженерних рішень повністю задовольняє суворим вимогам технологічного регламенту, забезпечуючи прецизійну стабілізацію температурного поля, суттєве енергозбереження та надійне протиаварійне блокування всього теплотехнічного комплексу.

Після розрахунку техніко-економічних показників було виявлено що впровадження системи обійдеться у 412 480 грн. З впровадженням нової системи втрати від браку зменшилися на 1%, що забезпечує економію у розмірі 247 500 грн. Строк окупності системи складає близько 1,5 року.

Отже, впровадження розробленої системи автоматизації є глибоко доцільним, оскільки воно дозволяє повністю виключити людський чинник при прийнятті критично важливих рішень у контурах протиаварійного захисту печі. Автоматичний моніторинг складу димових газів і прецизійне регулювання теплового режиму забезпечують стабільну якість нагріву злитків, що мінімізує вихід бракованої продукції та підвищує загальну продуктивність прокатного стану. Крім того, перехід до автоматизованого керування оптимізує витрати дорогих енергоносіїв, суттєво знижуючи собівартість готового металу і забезпечуючи підприємству довгострокові конкурентні переваги.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

21. Автоматизированные системы управления технологическими процессами: справочник/ Под ред. Тимофеева Б.Б. Киев : Техника, 1983. 351 с.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

33. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації: методичні вказівки до курсового проекту для студентів спеціальності 151 «Автоматизація так комп’ютерно-інтегровані технології» / ред. А. М. Ніколаєнко. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 34 с.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

47. K. Volchanska; A. Yerofieieva; O. Barishenko; A. Vlasov; M. Ivchenko; A. Yeremenko (2025). Study of the cascade system model for waste heat recovery from the flue gases of the electric arc furnace DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101437.

48. Емпіріко-теотетичні методи дослідження систем управління. URL: http://examen.od.ua/upravlen/page117.html (дата звернення 22.04.26).

49. Інформаційні технології в металургії. URL: it.edu.ua/news/16-05- 2022-informatsijni-tekhnologiji-v-metalurgiji-ta-mashinobuduvanni-itmm-2022 (дата звернення 22.04.26).

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

51. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.03.2024).

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