МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Кваліфікаційна робота (проєкт)

першого (бакалаврського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Проєкт автоматизації термічної камерної печі з нерухомим подом в умовах металургійного виробництва. Система автоматичного регулювання температурного режиму

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1511
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва освітньої програми)
Я. О. Мудрий
(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.т.н. Міняйло Н. О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»
Курілець І. А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя 2025

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно -інтегровані технології
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____
"____" _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Мудрому Ярославу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Проєкт автоматизації термічної камерної печі з нерухомим подом в умовах металургійного виробництва. Система автоматичного регулювання температурного режиму
керівник роботи Міняйло Н. О., доцент, канд.техн.наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «27» грудня 2024 року № 2029-с
2 Строк подання студентом роботи 10 червня 2025 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) особливості функціонування печі, аналіз існуючого рівня автоматизації на діючому виробництві та закордоном , недоліки існуючої системи управління, розробка технічного завдання, проектування системи автоматизації, розробка технічної документації, розрахунок надійності системи автоматизації, розрахунок техніко-економічних показників, охорона праці та техногенна безпека
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема автоматизації, принципові електричні схеми, монтажно-комутаційна схема, схема щита КВПіА, схема зовнішніх з'єднань.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	доц. Міняйло Н. О.		
2	доц. Міняйло Н. О.		
3	доц. Міняйло Н. О.		
4	доц. Міняйло Н. О.		
5	доц. Міняйло Н. О.		
6	доц. Міняйло Н. О.		
7	доц. Міняйло Н. О.		
8	доц. Міняйло Н. О.		

7 Дата видачі завдання 14.04.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого рівня автоматизації	14.04-20.04.25	виконано
2	Розробка схеми інформаційних та матеріальних потоків	21.04-27.04.25	виконано
3	Розробка технічного завдання	28.04-04.05.25	виконано
4	Вибір та обгрунтування комплексу технічних засобів	05.05-11.05.25	виконано
5	Проєктування системи автоматизації методичної печі	12.05-18.05.25	виконано
6	Розробка технічної документації	19.05-25.05.25	виконано
7	Розрахунок надійності системи автоматизації	26.05-01.06.25	виконано
8	Розрахунок техніко-економічних показників та вимог до технічних засобів	02.06-08.06.25	виконано
9	Розгляд питань охорони праці та техногенної безпеки	09.06-13.06.25	виконано
10	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді	14.06-16.06.25	виконано

Студент _____ Ярослав МУДРИЙ
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Наталія МІНЯЙЛО
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Ірина ОВЧИННИКОВА
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Мудрий Я. О. Проєкт автоматизації термічної камерної печі з нерухомим подом в умовах металургійного виробництва. Система автоматичного регулювання температурного режиму.

Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», науковий керівник Міняйло Н.О., Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2025.

У кваліфікаційній роботі бакалавра виконано дослідження автоматизованої системи регулювання температурного режиму камерної печі, визначено основні недоліки існуючих методів керування та запропоновано шляхи їх удосконалення. Визначено вимоги до системи автоматизації, розроблено функціональну схему АСУ, а також обґрунтовано структуру системи керування як багаторівневу розподілену систему.

Виконано вибір та обґрунтування технічних засобів, включаючи датчики температури, газоаналізатори, PLC-контролери та виконавчі механізми. Визначено перелік сигналів АСК ТП, розроблено інтерфейс системи автоматизації, алгоритм роботи системи регулювання температури, а також параметри, що контролюються під час роботи печі.

Розроблено програмне забезпечення для керування температурним режимом, включаючи ПІД-регулятори, адаптивні алгоритми корекції параметрів та SCADA/IoT-систему для моніторингу та збору даних у реальному часі. Виконано розрахунок надійності системи, визначено економічну ефективність впровадження автоматизації та розраховано строк окупності інвестицій.

Ключові слова: математична модель, алгоритм, камерна піч, температурний режим, автоматизована система керування, контролер, програмне забезпечення, SCADA, ПІД-регулювання, IoT.

ЗМІСТ

Вступ……..……8

1 Вивчення особливостей функціонування технологічних агрегатів. Аналіз існуючого рівня автоматизації……..……..……...9

1.1 Технологічний агрегат і алгоритм його роботи…….……9

1.2 Етапи роботи термічного цеху…….....12

1.3 Аналіз існуючого рівня автоматизації камерної печі з нерухомим подом на діючому виробництві……..……..16

1.4 Розробка схем матеріальних та інформаційних потоків…….....19

1.5 Стан рівня автоматизації на аналогічних об’єктах підприємств України та зарубіжжя……..……..22

1.6 Недоліки існуючої системи управління……...……....25

2 Розробка технічного завдання…….....27

2.1 Вимоги до системи в цілому…….....27

2.2 Вимоги до функцій (задач), які виконує система……28

2.3 Вимоги до видів забезпечення……..29

3 Проєктування системи автоматизації…….....32

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної структури СА…..……32

3.2 Визначення принципів управління по кожному технологічному параметру……..…….34

3.3 Вибір (розробка) математичної моделі системи управління.....36

3.3.1 Тепловий баланс печі…….…….....36

3.3.2 Лінійне відхилювальне представлення…….....37

3.3.3 Модель динаміки виконавчих механізмів…….……....37

3.3.4 Загальна структура відкритого контуру……....37

3.4 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня СА...38

4 Розробка технічної документації…….....40

4.1 Функціональна схема автоматизації……40

4.2 Принципова електрична схема в відповідності зі специфікаціями……..42
4.3 Принципова електрична схема живлення……43
4.4 Монтажна схема щита КВПіА або приладової шафи…….....45
4.5 Зовнішній вигляд щита (шафи) та вид на внутрішні панелі……..45
4.6 Схема зовнішніх з'єднань……..……...47
4.7 Схема трас та проводок……..……...48
4.7.1 Типові траси та кабелі……..…48
4.7.2 Кабельні канали та лотки…….....49
4.7.3 З'єднувальні коробки та гермовводи……..49
4.7.4 Маркування та документація…….…..49
4.7.5 Рекомендації з експлуатації…….....49
5 Розрахунок надійності системи автоматизації……...50
5.1 Нормативні вимоги та вихідні дані……..50
5.2 Розрахунок надійності окремих елементів……..50
5.3 Надійність системи загалом……...……..….51
5.4 Підвищення надійності…….52
6 Замовна специфікація на комплекс технічних засобів…….....53
6.1 Основні принципи формування замовної специфікації…….53
6.2 Вимоги до технічних засобів…….....53
6.3 Замовна специфікація обладнання……...…55
7 Організаційне забезпечення системи автоматизації та розрахунок техніко-економічних показників……..57
7.1 Організаційне забезпечення……..57
7.2 Розрахунок техніко-економічних показників…….....59
8 Техніка безпеки та охорона праці……...62
8.1 Характеристика потенційно небезпечних та шкідливих факторів ..……..……..62
8.2 Вимоги до безпеки……...63
8.3 Електробезпека…….64

8.4 Пожежна безпека…….…….65
Висновки……..68
Перелік використаних джерел……70
Додатки……72

ВСТУП

Автоматизація технологічних процесів у металургійному виробництві є одним із ключових напрямів підвищення ефективності, зниження витрат енергоносіїв та покращення якості продукції. Термічна камерна піч з нерухомим подом використовується для проведення високотемпературної обробки металевих заготовок, забезпечуючи їх рівномірний прогрів та формування необхідних механічних властивостей.

У сучасних умовах виробництва зростають вимоги до точності регулювання температурного режиму, оскільки будь-які відхилення можуть призводити до погіршення характеристик металу, збільшення енерговитрат та зниження економічної ефективності процесу. Впровадження системи автоматичного регулювання температури (САР) дозволяє мінімізувати вплив людського фактору, забезпечити стабільність термообробки та оптимізувати витрати енергоресурсів.

Метою даної роботи є розробка автоматизованої системи керування температурним режимом термічної камерної печі, яка базується на сучасних методах вимірювання, регулювання та адаптивного керування. Робота включає аналіз технологічного процесу, вибір апаратного та програмного забезпечення, розробку алгоритмів регулювання, моделювання ефективності запропонованих рішень та оцінку впливу автоматизації на виробничий процес.

Практична значимість дослідження полягає у можливості впровадження розробленої системи у промислових умовах з метою підвищення продуктивності, зниження енерговитрат та покращення стабільності температурного режиму. Окрім того, застосування сучасних IoT-технологій забезпечує нові можливості моніторингу, прогнозування та аналітики, що сприяє подальшій оптимізації термічного процесу.

1 ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1Технологічний агрегат і алгоритм його роботи

Камерні печі – узагальнена назва групи промислових печей, в яких вироби залишаються нерухомими щодо печі протягом усього періоду нагріву. Камерні печі застосовують для нагріву металевих заготовок перед прокаткою і куванням, для термічної обробки металевих і скляних виробів, випалу керамічних і емальованих виробів. Камерні печі класифікують за конструкцією: вертикальна піч, ковпакова піч, нагрівальний колодязь, піч з висувним подом, ямна піч та інші. На рисунку 1.1 показана камерна піч.



Рисунок 1.1– Камерна піч з нерухомим подом

Широке застосування камерних термічних печей зумовлене їхньою універсальністю по режимах, що виконуються, і видам термообробки, формі й розмірам продукції, що обробляється.

Камерна термічна піч зі стаціонарним подом - це піч, у якій завантаження і вивантаження металу відбувається за рахунок механічних

пристроїв, розташованих за межами печі. Ця піч не має тих втрат теплоти, які є в печі з викотним подом при завантаженні металу в піч. Але, з іншого боку, завантаження металу в піч із зовнішньою механізацією ускладнені. Звичайно для великих печей використається потужна напільна завантажувальна машина, що переміщується по рейках уздовж торців завантаження ряду печей і обслуговує ці печі.

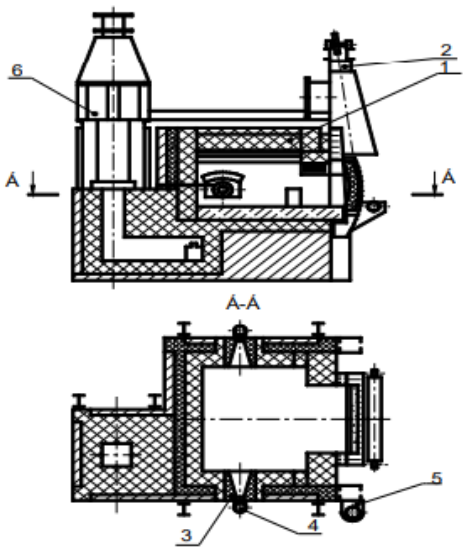
Камерні печі опалюють газом або рідким паливом. Термічні камерні печі, що працюють з атмосферою контрольованого складу, обігрівають електричними нагрівачами опору або радіантними трубами. Часто електричний обігрів доцільний для забезпечення точності режиму термічної обробки і при нагріванні без атмосфери контрольованого складу. Найбільш широко поширені камерні печі з нерухомим подом, що застосовуються в ковальських цехах. За температурним рівнем, що створюється в робочому просторі, розділяють наступні групи печей:

- низькотемпературні печі, в яких значна частина теплоти від нагрівачів до садку передається конвекцією. Їх область застосування визначається межею 600...700 °С. Цією групою охоплюються різного виду процеси сушіння, відпуску сталевих виробів, а також нагрівання під термічну і механічну обробку кольорових металів.

- середньотемпературні печі з діапазоном температур від 700 до 1250 °С. Тут в робочому просторі переважає теплопередача випромінюванням. Верхня температурна межа їх застосування визначається стійкістю металевих нагрівачів, здатних працювати в окислювальній пічної атмосфері.

- високотемпературні печі з температурним діапазоном робочої температури вище 1250 °С передбачають застосування нагрівачів зі сплавів або неметалевих матеріалів, здатних працювати лише у вакуумі або захисному середовищі, що викликає істотну відмінність в конструкції теплових агрегатів.

На рисунку 1.2 приведена конструктивна схема камерної нагрівальної печі з нерухомим подом.



1 – кладка; 2 – каркас; 3 – пальник; 4 – газопровід; 5 – підйомник заслінки робочого вікна; 6 – радіаційний щілинний рекуператор

Рисунок 1.2 – Конструктивна схема камерної нагрівальної печі

Піч є футерованою камерою, яка розміщується у жорстко звареному каркасі 2. Піч опалюється природним газом або мазутом, які спалюються за допомогою пальників 3. Повітря, що подається на горіння палива, підігрівається за рахунок теплоти димових газів у радіаційному щілинному рекуператорі 6. Повітря до печі подається від дуттьової установки.

Принцип роботи печі наступний. Перед завантаженням готують садку, тобто укладають на спеціальні підставки (бугеля). Далі лапи напільної машини пропускаються під бугеля і вся садка повністю відвозиться напільною машиною до потрібної печі. У печі піднімається заслінка і на лапах напільної машини садка заноситься в піч. Після цього лапи опускаються в спеціально передбачені поглиблення в черені, передаючи садку поду, і витягаються з печі. Заслінка закривається. Бугеля, на які укладалася садка, залишаються в печі на увесь час термообробки, використовуються багаторазово й тому вони виконуються з жароміцної сталі. Після завантаження садки включаються

пальники в топках під подом. Продукти горіння, що утворилися, проходять під подом і надходять у робочий простір. Через рециркуляційний канал у підподову топку підсмоктуються гази з робочого простору печі. У результаті цього знижується рівень температури газів, що виходять у робочий простір, і забезпечується інтенсивна циркуляція продуктів горіння.

1.2 Етапи роботи термічного цеху

Термічний цех складається з ділянки печей, вагової і ділянки ад'юстажної обробки.

Пічний проліт термічного цеху ДСС включає двадцять шість печей, призначених для термообробки.

Термічна обробка - найпоширеніший у сучасній техніці спосіб поліпшення властивостей виробів з металів і сплавів. Її застосовують як проміжну операцію для поліпшення технологічних властивостей і як остаточну операцію для додання виробам такого комплексу механічних, фізичних і хімічних властивостей, що забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики виробу.

Термічною обробкою металів і сплавів називається сукупність операцій нагріву, витримки й наступного охолодження, з метою зміни структури й створення в металів і сплавів необхідних властивостей: міцності, твердості, зносостійкості, необхідної обробці різанням, або особливих хімічних і фізичних властивостей, а також зміни у них напруженого стану.

З діаграми стану залізо-вуглець структура доевтектоїдної сталі зі змістом вуглецю менш ніж 0,8 % при нагріванні до температури Ac1 складається із зерен перліту й феріту. В точці Ac1 відбувається перекристалізація перліту, тобто відбувається перетворення перліту в дрібнозернистий аустеніт. При подальшому нагріванні від температур Ac1 до Ac3 надлишковий ферит розчиняється в аустеніті й при досягненні

температури Ac3 перетворення закінчуються. Вище крапки Acm структура сталі складається тільки з аустеніту.

У такий же спосіб відбувається перетворення при нагріванні заевтектоідної сталі, але з тією лише різницею, що вище температури Ac1 в аустеніті починає розчинятися надлишковий цементит. Вище крапки Ac3 структура складається тільки з аустеніту.

Для одержання необхідної структури і створення в металів і сплавів необхідних властивостей, застосовують різні види термообробки: відпал, загартування, відпуск, старіння і т.д.

Найпоширенішим видом термічної обробки сортового прокату є відпал з метою проведення повної фазової перекристалізації, що забезпечить одержання необхідної твердості й оптимальної структури, що створюють найкращі умови для обробки сталі різанням.

Відпал - це первинний і один з найважливіших видів термічної обробки, при якій сталь нагрівають до певної температури, витримують при цій температурі й потім повільно охолоджують разом з піччю.

Відпал застосовують для зняття внутрішніх напружень, підвищення механічних властивостей металу, поліпшення оброблюваності різальним інструментом, зниження твердості й для підготовки структур до подальшої термічної обробки.

Відпал сталі, як відомо, складається із трьох етапів: нагрів до заданої температури, витримки при температурі нагріву, охолодження по тому або іншому режиму.

Залежно від температури нагріву і призначення розрізняють наступні види відпалу: повний, неповний, відпал на зернистий перліт, ізотермічний, дифузійний та ін.

Температура нагріву залежить від сполуки сталі і її вибирають так, щоб вона на 20…40 °С перевищувала положення верхньої критичної крапки Ac3.

Для сталей найпоширеніших типів застосовують наступну температуру нагріву °С:

- шарикопідшипникова...……..780… 820;
- інструментальна вуглецева...…….....45… 820;
- інструментальна легована...…….....30… 880;
- швидкорізальна...…….880… 900.

Швидкість досягнення кінцевої температури нагріву не обмежується, але звичайно вона становить 100 °С/год. Час витримки вибирають так, щоб встигли завершитися всі ті перетворення, які є метою термічної обробки. Мається на увазі, що витримку варто проводити після вирівнювання температури по товщині садки металу. У садочних печах вирівнювання температури садки наступає після 10 - 12 годин із моменту початку нагріву. Після цього проводять витримку впродовж 2 – 3 годин. Швидкість охолодження металу при проведенні відпалу лімітується тільки до 550 – 600 °С, щоб всі перетворення аустеніту були закінчені в перлітній області. Це охолодження звичайно здійснюється зі швидкістю 20 – 30 °С/год. У такий спосіб весь цикл відпалу сортового прокату займає 18 – 24 годин.

Повний відпал застосовують головним чином після гарячої обробки деталей (кування й штампування), а також для обробки лиття з вуглецевих і легованих сталей. Основною метою повного відпалу кутих і литих деталей є здрібнювання зерна - додання металу необхідної твердості для поліпшення його обробки різанням і усунення внутрішніх напружень. Це досягається нагрівом, що не перевищує 20…40 °С верхньої критичної крапки Ас3 і повільним охолодженням.

Час витримки при температурі відпалу звичайно складається із часу, необхідного для повного прогріву всієї маси деталей, і часу, потрібного для закінчення структурних перетворень.

Після нагріву і відповідної витримки сталь повільно охолоджують разом з піччю. Вуглецеві сталі охолоджують зі швидкістю 50-100 °С за годину до

температури 580-600 °С. Низьколеговані сталі охолоджують у печі зі швидкістю 30-60 °С за годину до 500-600 °С.

Якщо до відпалу структура сталі була задовільна, але сталь мала підвищену твердість і в деталях були внутрішні напруження, то доцільно застосовувати неповний відпал. При неповному відпалу нагрів сталі проводять в інтервалі критичних температур вище Ас1 і нижче Ас3.

Внутрішні напруження знімаються повністю, і сталь одержує знижену твердість і добре обробляється різальним інструментом.

Термічна обробка, при якій після нагрівання на 30-50 °С вище верхніх критичних крапок Ас3 і Асm і після витримки потрібне охолодження на повітрі, називається нормалізацією. Нормалізацією усувають внутрішні напруження й наклеп, підвищують механічні властивості й підготовляють структуру сталі для остаточної термічної обробки.

Нормалізація сталі в порівнянні з відпалом є більш коротким процесом термічної обробки, а отже, і більш продуктивним. Тому вуглецеві сталі доцільно піддавати нормалізації, а не відпалу.

Відпуск - називають таку операцію термічної обробки, при якій загартовану сталь нагрівають до температури нижче критичної крапки Ас, а потім охолоджують.

Залежно від необхідних властивостей сталі розрізняють три види відпуску: низький, середній і високий.

Низький відпуск здійснюється при температурі 150-200 °С, він знижує внутрішні напруження, але зберігає високу твердість загартованих деталей.

Низький відпуск застосовують для обробки ріжучого й вимірювального інструмента, виготовленого з вуглецевих і мало легованих сталей, шарикопідшипникових кілець, кульок і роликів, цементованих і планованих деталей.

Середній відпуск здійснюється при температурі 350-450 °С. Середньовуглецева сталь здобуває значну пружність, твердість і підвищену опірність дії змінних і ударних навантажень.

Високий відпуск здійснюється при температурі 500-650 °С. У результаті такого відпуску сталеві деталі одержують певний комплекс характеристик. При високому відпуску сталь здобуває високу міцність й гарну в'язкість.

На ваговій ділянці відбувається прийом металу, його зважування, пакетування (формування садок) і розподіл по печах. На ділянці адьюстажа проводиться адьюстажна обробка, що призначена для поліпшення якості поверхні й підвищення точності розмірів профілю, для видалення зневуглецьованого шару й додання продукції товарного виду, що відповідає вимогам НД. Під технологічною схемою адьюстажної обробки металу розуміється сукупність операцій, виконання яких обов'язково при виготовленні певного виду продукції.

1.3 Аналіз існуючого рівня автоматизації камерної печі з нерухомим подом на діючому виробництві

В сучасних умовах виробництва важливою складовою успішного функціонування підприємства є високий рівень автоматизації технологічних процесів. Камерна піч з нерухомим подом є однією з ключових одиниць, де від ефективності автоматизації залежить не лише якість термічної обробки матеріалів, а й економія енергоресурсів та зниження впливу людського фактора. У цьому розділі розглянемо поточний стан автоматизації камерної печі, визначимо її сильні і слабкі сторони, а також проведемо порівняльний аналіз з аналогічними системами, використовуваними на інших підприємствах як вітчизняного, так і зарубіжного рівня.

Об’єкт дослідження – камерна піч, яка забезпечує рівномірне нагрівання матеріалу завдяки своїй конструкції з нерухомим подом.

Основні технологічні рішення базуються на застосуванні термопар та інфрачервоних датчиків, що дозволяють у режимі реального часу контролювати температурні показники, а програмовані логічні контролери автоматично регулюють параметри роботи установки. До цього входять і

системи безпеки, такі як датчики тиску та контролю витоків, які своєчасно реагують на аварійні ситуації. Завдяки постійній експлуатації на діючому виробництві можна зробити висновок про ефективність використаних рішень у реальних умовах.

Серед основних переваг існуючої системи варто відзначити підвищення точності технологічного процесу – автоматичне регулювання температурного режиму дозволяє мінімізувати помилки, що знижує ризик виробничих дефектів. Крім того, централізований моніторинг встановлює можливість оперативного реагування на будь-які відхилення від норми, що сприяє зниженню споживання енергії та оптимізації виробничих витрат. Проте, незважаючи на позитивний вплив автоматизації, існують й певні недоліки. Наприклад, багато компонентів системи мають застарілий функціонал, що ускладнює інтеграцію з сучасними цифровими технологіями. Сенсорні пристрої іноді недостатньо точні, що може призводити до неточностей у вимірюваннях та контролі параметрів. Окрім цього, відсутність повної цифрової інтеграції із загальними системами управління виробництвом створює перешкоди для оптимізації всього технологічного циклу, а висока вартість модернізації обмежує можливості впровадження найсучасніших технологій.

Порівнюючи дану систему з аналогічними рішеннями, можна відзначити, що провідні зарубіжні підприємства (наприклад, у Німеччині чи Південній Кореї) активно використовують інтелектуальні системи прогнозування, де алгоритми машинного навчання допомагають у профілактичному обслуговуванні та попередженні аварійних ситуацій. Завдяки повній цифровізації технологічних процесів і інтеграції з IoT-платформами, такі системи можуть здійснювати дистанційний моніторинг та оперативно реагувати на зміну умов виробництва. При цьому стартові інвестиції, хоч і високі, окуповуються завдяки значній економії енерговитрат та підвищенню якості продукції.

У вітчизняних умовах модернізація проводиться поступово, що дозволяє розподілити фінансове навантаження, а локалізований підхід забезпечує адаптацію технологій до специфіки виробництва. Проте це часто означає компроміс між витратами і вигодами, що може стримувати швидкий розвиток автоматизації.

З огляду на проведений аналіз, можна рекомендувати модернізацію апаратної платформи шляхом оновлення програмованих логічних контролерів і сенсорних пристроїв із застосуванням сучасних технологій, що дозволять значно підвищити точність контролю. Також доцільною є інтеграція систем автоматизації з ERP-системою підприємства, що забезпечить створення єдиної бази даних для всіх виробничих процесів і дозволить впроваджувати аналітичні інструменти для прогнозування відхилень. Не менш важливою є підвищення кваліфікації персоналу через регулярні тренінги та семінари, що сприятиме швидкому освоєнню новітніх технологій. Нарешті, запуск пілотних проектів на окремих виробничих лініях та співпраця з міжнародними експертами допоможуть адаптувати кращі зарубіжні практики до локальних умов та знизити ризики при масштабуванні нововведень.

Підсумовуючи, поточний рівень автоматизації камерної печі з нерухомим подом демонструє суттєві досягнення у підвищенні якості технологічного процесу та економії ресурсів, проте має певні обмеження, які потребують подальшої модернізації. Запропоновані заходи спрямовані на оптимізацію роботи установки, підвищення її гнучкості та інтеграції з іншими виробничими системами, що, у кінцевому результаті, сприятиме підвищенню конкурентоспроможності підприємства та запровадженню інноваційних технологій у виробництво.

Таким чином, аналіз поточного рівня автоматизації дозволяє не лише оцінити досягнення існуючої системи, але й визначити пріоритетні напрямки для її вдосконалення, що є важливим для стратегічного розвитку підприємства в умовах сучасної індустрії.

1.4 Розробка схеми матеріальних та інформаційних потоків

На рисунку 1.4 представлена схема інформаційних та матеріальних потоків. Повна схема представлена в Додатку А.

Ця схема зображає систему автоматизації термічної обробки металів у камерній печі з нерухомим подом. Вона має чітко визначені входи (параметри, які вимірюються) і виходи (керуючі дії). Схема окреслює потік процесу та механізми зворотного зв’язку, які є важливими для підтримання оптимальних умов експлуатації в промислових умовах.

Єдина шина зв’язку між датчиками і контролером забезпечує синхронність отримання даних, що дуже важливо при високих швидкостях змін технологічного процесу. Проте тут варто зазначити, що використання однієї комунікаційної лінії може створювати “вузьке місце” при збільшенні числа датчиків, тому інтеграція сучасних стандартів комунікацій (наприклад, Profinet або EtherCAT) могла б суттєво покращити реактивність системи.

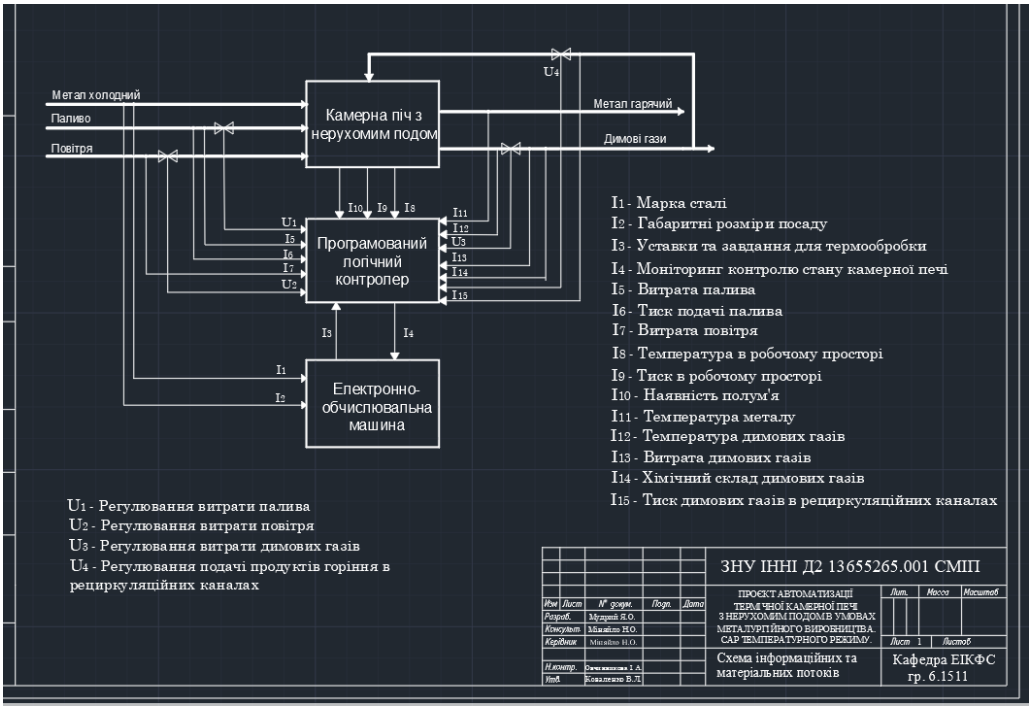


Рисунок 1.4 – Схема інформаційних та матеріальних потоків

Інформаційні входи (I)

Ці параметри забезпечують безперервний контроль за станом камерної печі та перебігом термообробки:

- I1 – марка сталі, що визначає оптимальні температурно-часові режими;

- I2 – габаритні розміри заготовки, що впливають на швидкість і рівномірність прогріву;

- I3 – технологічні уставки (цільові значення температури й тривалості етапів: нагрів, витримка, охолодження);

- I7 – витрата повітря, яка регулює інтенсивність горіння та підтримує заданий температурний режим;

- I9 – тиск у робочій зоні, що контролює герметичність й безпеку експлуатації;

- I10 – сигнал про наявність полум’я (датчик іонізації), що гарантує своєчасне спрацьовування аварійного відключення;

- I11 – температура заготовки, що безпосередньо відображає відповідність технологічному профілю;

- I12 – температура димових газів, яка слугує індикатором теплової ефективності печі;

- I14 – хімічний склад димових газів для оцінки повноти згоряння та екологічності викидів.

Вихідні сигнали (U)

На підставі аналізу вхідних даних ПЛК формує команди виконавчим механізмам:

- U1 – регулювання подачі палива для підтримання заданого теплового балансу й економії енергоносіїв;

- U2 – регулювання подачі повітря з метою забезпечення оптимального співвідношення “паливо–повітря”;

- U3 – регулювання відведення димових газів для підтримки необхідної тяги та запобігання задимленню;

- U4 – керування рециркуляцією продуктів згоряння задля повторного використання тепла і підвищення ККД.

Інтеграція потоків і логіка роботи:

- дані від датчиків температури, тиску, витратомірів і іонізаційного датчика надходять на вхід ПЛК.

- контролер зіставляє фактичні показники з технологічними уставками, розраховує корегувальні закони (попереджувальні, коригувальні, адаптивні) і генерує дискретні та аналогові вихідні сигнали;

- виконавчі механізми (клапани, вентилятори, насоси) отримують команди U1–U4 і коригують витрати палива, повітря, димових газів і обсяги рециркуляції;

- одночасно SCADA-система збирає і зберігає агреговані дані для візуалізації ходу процесу та подальшого аналізу;

Моніторинг безпеки та якості

Система здійснює цілодобовий нагляд за критичними показниками – полум’ям (I10), тиском у камері (I9) та параметрами димових газів (I12, I14). У разі відхилень від допустимих значень відбувається автоматичне відключення подачі палива й сповіщення оператора.

Потенціал модернізації

Поточна архітектура дозволяє централізовано контролювати ключові процеси, що покращує якість продукції та знижує витрати палива. Для підвищення ефективності доцільно:

- інтегрувати безконтактні інфрачервоні термометри та високоточні витратоміри;

- застосувати алгоритми машинного навчання для передбачення відхилень і адаптивного налаштування режимів у реальному часі;

- розширити функціонал ПЛК модулями IIoT, що забезпечать віддалений моніторинг, діагностику й аналіз «великих даних».

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

Автоматизація камерних печей з нерухомим подом є ключовим етапом модернізації технологічних процесів в термічній обробці матеріалів. Сучасні системи керування дозволяють не лише забезпечувати точне і рівномірне нагрівання, але й ефективно контролювати параметри процесу, що безпосередньо впливає на якість кінцевої продукції та енергетичну ефективність виробництва. Завдяки збиранню даних в режимі реального часу та використанню інтелектуальних алгоритмів прийняття рішень, автоматизація відкриває нові горизонти для оптимізації процесів як в Україні, так і за кордоном .

Сучасний стан автоматизації на аналогічних об’єктах в Україні

В Україні автоматизація камерних печей активно впроваджується в металургійній та машинобудівній галузях. Наприклад, у Запорізькій державній інженерній академії було проведено аналіз оптимізації теплової роботи нагрівальних печей камерного типу. Основна увага приділяється рівномірному розподілу теплової енергії, використанню рециркуляції газових потоків та комбінуванню паливних компонентів. Також розробляються проекти автоматизації, які включають системи автоматичного регулювання витрат природного газ

В українських виробничих потужностях традиційно використовуються системи базовані на програмованих логічних контролерах (PLC) та системах SCADA, які забезпечують первинне автоматизоване регулювання робочих режимів камерних печей. Сучасні підходи передбачають інтеграцію додаткових модулів збору даних, моніторингу та аналізу параметрів нагрівання, що включає вимірювання температури, тиску, складу окислювальних газів та інших критичних параметрів технологічного процесу. Використання таких сенсорів дозволяє оперативно виявляти відхилення від

норми та автоматично коригувати режими роботи печі, що сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню якості оброблюваних виробів.

Крім класичних рішень, де основний акцент робиться на апаратні блоки керування, існують проєкти модернізації, спрямовані на інтеграцію адаптивних алгоритмів регулювання, які враховують змінні зовнішні та внутрішні умови технологічного процесу. Наприклад, в окремих підприємствах металургійного сектору використовують автоматизовані системи, здатні аналізувати історичні дані та за допомогою методів математичної оптимізації знаходити оптимальні параметри нагріву. Такі підходи дозволяють оперативно робити висновки щодо корекції функціонування обладнання, що є особливо важливим у контексті сучасних вимог до зниження експлуатаційних витрат і підвищення безпеки виробництва.

Стан автоматизації за кордоном

Зарубіжні підприємства демонструють більш інтегровані та комплексні підходи до автоматизації камерних печей з нерухомим подом. У країнах Західної Європи та США активно впроваджуються інтелектуальні системи управління, які базуються на концепції Інтернету Речей (IoT) та цифрових двійниках (digital twins). Ці технології дозволяють створити віртуальні моделі експлуатації печей, що використовуються як інструмент для моніторингу та аналізу роботи в режимі реального часу. Завдяки цьому можливо не лише прогнозувати можливі відмови обладнання, а й завчасно оптимізувати режими нагрівання із врахуванням змін у технологічній поведінці матеріалу.

До основних складових сучасних систем автоматизації за кордоном відносять комплексні мережі сенсорів, що збирають дані про температуру, тиск, концентрацію компонентів паливно-повітряної суміші та інші критичні параметри. Обробка цих даних здійснюється із застосуванням алгоритмів машинного навчання, які дозволяють самостійно адаптувати режим роботи печі під впливом змінних виробничих умов. Такий підхід сприяє досягненню максимальної енергетичної ефективності, оптимізації ресурсів та

забезпеченню стабільності технологічних процесів. Крім того, інтеграція хмарних сервісів забезпечує можливість віддаленого моніторингу, аналізу та керування, що суттєво підвищує оперативність реагування на аварійні ситуації чи нетипові відхилення у роботі обладнання.

Порівняльний аналіз та перспективи розвитку

Порівнюючи підходи до автоматизації в Україні та за кордоном, можна відзначити як переваги, так і певні обмеження кожного методу. Українські підприємства, як правило, орієнтовані на модернізацію наявних апаратних систем із впровадженням окремих програмних модулів та алгоритмів оптимізації. Це дозволяє поступово підвищувати ефективність технологічних процесів без необхідності повної заміни устаткування, що є важливим фактором в умовах обмежених фінансових ресурсів.

На зарубіжних ринках, навпаки, автоматизація реалізується за принципом "від нуля" із застосуванням комплексних інтегрованих систем, що дозволяють забезпечити високий рівень точності управління і прогнозування роботоздатності обладнання. Такі системи включають повноцінну інтеграцію апаратної платформи, програмних засобів, аналізу даних і навіть елементів штучного інтелекту, що дозволяє відслідковувати не тільки поточний стан обладнання, а й прогнозувати його поведінку в довгостроковій перспективі.

Перспективний напрямок розвитку автоматизації полягає в активному впровадженні концепцій Індустрії 4.0. До них належить використання цифрових двійників для симуляції роботи виробничих процесів, інтеграція великих даних (Big Data) для аналізу та прийняття оперативних рішень, а також застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування і профілактики несправностей. Таке комплексне рішення дозволить не лише оптимізувати технологічні параметри, але й підвищити загальну конкурентоспроможність підприємств, що є важливим як для українського виробництва, так і для міжнародних ринків.

1.6 Недоліки існуючої системи управління

Основним недоліком існуючого рівня автоматизації є застаріле обладнання яка не замінювалося ще з радянських часів. У зв'язку з цим існує велика загроза аварійної ситуації. Яскравим прикладом є системи відсічення газу і повітря при відкриванні печі. Данна система не функціонує вже 20 років, а вся відповідальність за безпеку персоналу залежить від людського фактора. Багато елементів керування виконуються за допомогою застарілих алгоритмів, що не дозволяють забезпечити оперативний та точний контроль над усіма технологічними параметрами. У таких умовах при збуреннях у виробничому процесі або при зміні параметрів навколишнього середовища система часто вимагає ручного коригування, що підвищує ймовірність людської помилки і знижує загальну динамічність управління.

Використання в системі реєструючих самописців ДИСК-250 та промислових регуляторів МІК-21 і МІК-20 для візуального контролю над технологічним процесом і з подальшим записом даних у спеціальний журнал є недоцільним і незручним для оператора.

Існуюча система управління побудована на базі застарілого обладнання з обмеженою можливістю стандартизації компонентів. Це призводить до значних труднощів під час технічного обслуговування та ремонту, оскільки складна схема керування ускладнює оперативну діагностику несправностей. Необхідність регулярного втручання кваліфікованого персоналу під час експлуатації пічних установок також збільшує ризики простоїв та спричиняє додаткові витрати, що негативно впливає на загальну продуктивність виробництва.

Використання наприклад сучасного пристрою МЕТРАН-900 , якому під силу обслуговувати всю систему автоматизації одного нагрівального колодязя, являє собою більш зручний спосіб експлуатації. Крім графічного Камерна піч Паливо Метал Повітря Метал Димові гази 23 перегляду на

дисплеї реєстратора, передбачено роздрук даних у цифровому вигляді завдяки прямого підключенню принтера до приладу або передачі інформації на ПК.

Дослідження показують, що сучасна система управління не завжди забезпечує оптимальний розподіл теплової енергії в межах пічного обладнання. Застосування неадаптивних механізмів регулювання температурних режимів та застарілих моделей обчислення теплового балансу призводить до значних енергетичних втрат.

2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

2.1 Вимоги до системи в цілому

Автоматизована система регулювання температурного режиму термічної камерної печі з нерухомим подом розробляється для покращення ефективності термообробки, зменшення енерговитрат та підвищення якості продукції у металургійному виробництві. В умовах сучасного виробництва точність керування технологічним процесом є критичним фактором, оскільки навіть незначні відхилення від необхідних параметрів можуть призвести до появи дефектів у кінцевому продукті.

Основні вимоги до системи регулювання температури включають:

- точність підтримання температурного режиму — система повинна забезпечувати стабільність параметрів відповідно до технологічних вимог. Мінімізація коливань температури дозволить уникнути небажаних змін у структурі металу та підвищити якість термообробки;

- автоматизація процесу керування — система повинна працювати в повністю автоматичному режимі без необхідності постійного втручання оператора. Це досягається за рахунок використання сучасних регуляторів, датчиків температури та програмованих логічних контролерів (ПЛК);

- енергоефективність — автоматичне регулювання параметрів подачі енергоресурсів (газу, повітря) дозволяє мінімізувати їх витрати, що позитивно позначається на економічній складовій виробничого процесу;

- стійкість до змін навколишніх умов — система повинна адаптувати свої параметри в реальному часі з урахуванням можливих змін у роботі печі, таких як навантаження, порушення герметичності або зовнішні фактори;

- інтеграція до цифрових систем моніторингу — передбачена можливість збору, аналізу та архівування технологічних параметрів, а також їх передача у загальну систему керування виробництвом.

2.2 Вимоги до функцій (задач), які виконує система

Автоматизована система керування температурним режимом повинна виконувати ряд функцій, спрямованих на оптимізацію технологічного процесу, підвищення ефективності виробництва та зменшення операційних витрат.

До основних функцій системи належать:

- збір та аналіз інформації — система повинна отримувати дані з датчиків температури, аналізувати їх та визначати необхідні коригувальні дії. Це передбачає можливість роботи з кількома контрольними точками печі для забезпечення рівномірного прогріву матеріалу;

- автоматичне регулювання параметрів — система має керувати подачею енергоресурсів, регулювати нагрівальні елементи та здійснювати контроль витрати газу й повітря для досягнення заданих параметрів;

- реалізація ПІД-регулювання — алгоритм керування повинен передбачати можливість стабілізації температурного режиму на основі пропорційного, інтегрального та диференційного контролю. Це дозволяє швидко реагувати на відхилення та мінімізувати перехідні процеси;

- адаптивне керування — система повинна мати можливість самостійно змінювати свої параметри залежно від умов експлуатації, що включає корекцію температури, режимів нагріву та охолодження залежно від маси і геометрії оброблюваних деталей;

- моніторинг та архівування даних — передбачено збереження технологічних параметрів у базі даних для подальшого аналізу, прогнозування та оптимізації роботи печі;

- віддалене керування — система повинна підтримувати можливість інтеграції з IoT-рішеннями, що дозволяє проводити дистанційне керування, моніторинг та аналіз стану обладнання через цифрові платформи.

2.3 Вимоги до видів забезпечення

Для реалізації повноцінного функціоналу автоматизованої системи регулювання температурного режиму камерної печі необхідно забезпечити її п’ятьма взаємопов’язаними видами ресурсів: апаратним, програмним, математичним, інформаційним і організаційним. Нижче наведено детальні вимоги до кожного виду.

Апаратне забезпечення:

- первинні датчики – платинові термометри опору RT-Pt1000 (діапазон 0…600 °C, точність ±0,1 °C) і/або термопари типу K (NiCr–Ni) з керамічною головкою;

- газоаналізатор Dozor-S (O_2, CO, CO_2) із виходом 4–20 мА та HART-інтерфейсом;

- диафрагмові манометри DKS для вимірювання надлишкового тиску димових газів.

Вторинні перетворювачі:

- MIK-322-K7 для конвертації сигналів термопар у стандартні лінії 4–20 мА;

- модуль RIO-AI8 (8 каналів 4–20 мА) для об’єднання всіх аналогових сенсорів у єдину шинну архітектуру.

Контролери й прилади керування:

- програмований логічний контролер Siemens S7-1200 із модулями SM 1231 (AI/DI) та SM 1232 (AO/DO);

- HMI-панель BRU-107 для локального моніторингу, вводу уставок та перегляду аварійних повідомлень.

Виконавчі механізми:

- електропневмоклапани PBR-31 із безконтактним пускачем і захистом від зворотного удару полум’я;

- крокові приводи заслінок повітря з індуктивними датчиками положення IFM RUP500.

Живлення та комунікація:

- стабілізовані джерела 24 V DC з UPS-резервуванням до 15 хв;

- PROFINET-комутатори Industrial Ethernet і OPC UA-гейтвеї для SCADA/IIoT-інтеграції.

Програмне забезпечення, PLC-програми:

- блоки ПІД-регуляторів (каскадна архітектура з анти-windup);

- adaptive–модулі автотюнінгу параметрів з використанням методів Ziegler–Nichols та корекцією за зміною теплового навантаження. SCADA/IIoT;

- платформа з архівом трендів, обробкою Alarms/Events, дашбордами KPI (час розігріву, витрати енергоресурсів, відхилення температури);

- підтримка MQTT, OPC UA, REST-API для віддаленого моніторингу та інтеграції з MES/ERP.

Засоби моделювання й симуляції:

- MATLAB/Simulink або Python (SciPy, Control) для перевірки алгоритмів ПІД, feed-forward, ratio-контролю і прогнозного керування;

- інструменти System Identification для автоматичного побудови передавальних функцій і підбору моделей.

Математичне забезпечення:

- моделі теплової динаміки – диференційні рівняння енергобалансу з урахуванням лінійних і радіаційних втрат:

$$m \cdot c \cdot dT/dt = \eta \cdot Q_fuel - k \cdot (T - T_amb);$$

- лінеаризація та побудова передавальних функцій:

$$G_p(s)=1/(\tau \cdot s+1) \text{ і } G_v(s)=K_v/(\tau_v \cdot s+1) \cdot e^{(-l \cdot s)}.$$

- розрахунок профілів нагріву й охолодження із врахуванням маси й теплоємності вантажу;

- використання Model Predictive Control (MPC) для зменшення перехідних коливань;

- прогнозування відмов, статистичні методи (Weibull-аналіз) для оцінки MTBF і планування превентивного обслуговування.

Інформаційне забезпечення:

- архів даних, Time-Series БД (InfluxDB, SQL Server) з високочастотним збереженням параметрів (до 1 Hz);

- метадані: ідентифікатори приладів, атрибути зон, версії прошивок;

- автоматизовані звіти з енергоефективності, аналізом «вузьких місць» та рекомендаціями з оптимізації;

- дашборди для керівництва й інженерів з можливістю drill-down у дані. Інтеграція;

- зв’язок із корпоративними MES/ERP через OPC UA/REST-API для передачі виробничих замовлень і параметрів пічних циклів.

Організаційне забезпечення:

- проектна документація: технічне завдання, функціональні й монтажні схеми, специфікації обладнання, інструкції з пуско-налагодження;

- регламенти обслуговування, періодичність калібрування датчиків (щоквартально), перевірки герметичності клапанів і корекції ПІД-параметрів;

- навчання персоналу, курси з експлуатації HMI/SCADA, алгоритмів ПІД, аварійних процедур і безпеки;

- система контролю змін, Версіонування PLC-проектів, SCADA-екранів і БД, протоколи приймання-передавання обладнання.

Усі п’ять складових мають бути реалізовані синхронно: апаратні та програмні рішення повинні бути підтверджені математичними моделями, а організаційні та інформаційні заходи — забезпечувати їхню ефективну й безпечну експлуатацію.

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної структури СА

При розробці системи автоматизації (СА) температурного режиму камерної печі з нерухомим подом обрано модульно-ієрархічну функціональну структуру. Така побудова забезпечує гнучкість, зручність обслуговування та надійність експлуатації в умовах металургійного виробництва.

Функціональна структура складається з п’яти основних підсистем:

1. Підсистема вимірювання: Температурні датчики (термопари типу К та R) у зоні нагріву та в підігрівальній камері . Датчики концентрації кисню у димових газах для оцінки якості згоряння
2. Підсистема керування: Програмований логічний контролер (ПЛК) з вбудованими АЦП/ЦАП модулями. Розроблений на його базі ПІД-регулятор з корекцією коефіцієнтів залежно від режиму печі. Адаптивний модуль, який забезпечує самоналаштування ПІД-параметрів при зміні навантаження
3. Підсистема виконавчих механізмів: Електромагнітні газові клапани для точного дозування палива. Приводи заслінок подавання повітря та відведення димових газів. Електроприводи вентиляторів рециркуляції теплого повітря
4. Підсистема людино-машинного інтерфейсу (HMI): Сенсорна панель оператора з відображенням поточних значень температури, витрати газу та трендів. Можливість введення технологічних уставок, запуску/зупинки циклів та тривожних сповіщень
5. Підсистема моніторингу та архівації даних (SCADA/IIoT): Промислова мережа OPC UA для інтеграції в єдину систему керування заводом. Хмарний модуль збору даних і візуалізації довготривалих трендів. Аналітичний блок для оцінки ефективності процесу та прогнозування відмов.

Обґрунтування вибору структури

1. Модульність. Розділення на підсистеми дозволяє ізолювати функції вимірювання, обробки та виконавчі дії. Це спрощує налаштування, гарантує локалізацію несправностей і скорочує час ремонту.

2. Ієрархічність. Конструкторські рішення базуються на чіткому розподілі рівнів: датчики → ПЛК → виконавчі механізми → HMI → SCADA. Така побудова забезпечує послідовну обробку сигналів і зручну масштабованість – у перспективі можна додавати нові зони нагріву або аналітичні модулі.

3. Використання ПЛК. Промисловий контролер обрано через його стійкість до високотемпературного середовища, електромагнітних перешкод та здатність оперативно працювати з ПІД-алгоритмами та адаптивним керуванням.

4. Інтеграція IoT/SCADA. Застосування протоколу OPC UA та хмарних платформ дає змогу проводити довготривале спостереження, аналізувати тренди енерговитрат і виконувати превентивну діагностику.

5. Безпека та надійність. Вбудовані апаратні й програмні межі (граничні уставки температури, аварійні блокування клапанів) захищають обладнання й персонал від аварійних ситуацій.

Завдяки такій функціональній структурі система автоматизації задовольняє вимоги точності, адаптивності та надійності, оптимально поєднуючи промислові стандарти керування з сучасними методами моніторингу та аналітики.

3.2 Визначення принципів управління по кожному технологічному параметру

При розробці системи автоматизації температурного режиму термічної камерної печі виділено ключові технологічні параметри, для кожного з яких

обрано оптимальні принципи керування на основі аналізу процесу згоряння, теплообміну та динаміки печі.

Управління температурою у робочих зонах

Застосовано каскадну ПІД-структуру: зовнішній контур вимірює температуру у центрі камери та видає уставку для внутрішнього контуру, який оперує подачею палива. – ПІД-регулятор внутрішнього контуру має антиінтеграційний механізм («автозамотування ») для запобігання перенасиченню при різких стрибках уставки. – Використання подачі вперед корекції: на основі заданого профілю нагріву система розраховує попередній обсяг палива, щоб скоротити час розгону та мінімізувати перехідні процеси.

Управління подачею палива

Використано пропорційне регулювання з урахуванням швидкості зміни уставки температури: при збільшенні швидкості розгону регулятор трохи випереджає фактичну зміну температури для запобігання недогріву. Реалізовано подачу вперед канал на основі маси та геометрії деталей у печі: перед початком циклу система отримує завантажувальні дані і попередньо коригує нульову уставку ПІД.

Управління подачею повітря та підтримка коефіцієнта надлишку повітря

співвідношення-контроль: між витратою газу та повітря підтримується сталий коефіцієнт λ, вимірюваний по кисневому датчику в димових газах. Зовнішній контур O_2-контролю аналізує концентрацію кисню та коригує уставку для повітряних заслінок, забезпечуючи оптимальний режим горіння.

Контроль складу димових газів.

Використовуються газоаналізатори для вимірювання O_2 і CO_2, дані яких надходять на регулятор співвідношення газ/повітря. – Для запобігання недогорянню та шкідливим викидам введено аварійне блокування: при перевищенні граничних значень CO система переводить піч у безпечний холодний режим.

Управління швидкістю наростання та підтримки температурного профілю (керування підсилювачем)

Система реалізує режим наростання температури за заздалегідь заданим профілем (швидкість нагріву, витримка, охолодження). – Для кожної фази встановлено окремі налаштування ПІД-контурів, що мінімізують перехідні коливання та неточності.

Адаптивне регулювання

Алгоритм автоналаштування ПІД-параметрів (автоналаштування) автоматично коригує коефіцієнти пропорційності, інтегрування та диференціювання в залежності від зміни завантаження печі або властивостей палива. Адаптивний модуль визначає зрушення динаміки печі (через знос нагрівальних елементів, зміни теплоізоляції) і підлаштовує режими без зупинки технологічного процесу.

Загалом вибрані принципи управління поєднують класичні методи зворотного зв’язку (ПІД-регулювання) та прогностичні стратегії (пряма подача, співвідношення-контроль, адаптивне налаштування). Такий підхід забезпечує високий рівень точності підтримки температурного режиму, енергоефективність та гнучкість роботи системи в умовах мінливих виробничих навантажень.

3.3 Вибір (розробка) математичної моделі системи управління

Для побудови надійного та прогнозованого алгоритму керування температурним режимом камерної печі необхідно сформулювати математичну модель теплових процесів і динаміки виконавчих механізмів. Нижче наведено ключові етапи розробки такої моделі.

3.3.1 Тепловий баланс печі

Базовою відправною точкою є рівняння енергетичного балансу у робочій зоні печі:

$$\frac{m \cdot c \cdot dT(t)}{dt} = Q_in(t) - Q_loss(t)$$

де m — маса вантажу та частини печі, що накопичує тепло, кг;

c — середня питома теплоємність, Дж/(кг·К);

T(t) — внутрішня температура, К;

Q_in(t) — тепло, що надходить від згоряння палива, Вт;

Q_loss(t) — теплові втрати в навколишнє середовище, Вт.

Теплові втрати аппроксимуються лінійною функцією:

$$Q_loss(t) = k \cdot [T(t) - T_amb] ,$$

де k — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/К;

T_amb — температура навколишнього середовища.

3.3.2 Лінійне відхилювальне представлення

Виберемо точку рівноваги T_0 та введемо малі відхилення:

$$\Delta T = T - T_0, \Delta Q_in = Q_in - Q_0.$$

Після лінійного перетворення отримаємо:

$$\frac{m \cdot c \cdot dT(\Delta T)}{dt} + k \cdot \Delta T = \Delta Q_in.$$

Перенісши в операторну область (Лаплас), диференціальне рівняння набуває вигляду:

$$(m \cdot c \cdot s + k) \cdot \Delta T(s) = \Delta Q_in(s).$$

Отже, передавальна функція печі від зміни подачі палива до відхилення температури:

$$G_p(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta Q_in(s)} = \frac{1}{(\tau \cdot s + 1)},$$

де $\tau = m \cdot c / k$ — часовий постійний теплового контуру.

3.3.3 Модель динаміки виконавчих механізмів

Виконавчий механізм (газовий клапан) аппроксимується першопорядковою ланкою:

$$G_v(s) = \frac{Kv}{(\tau_y \cdot s + 1)},$$

де Kv — коефіцієнт передачі заслінки (Вхід: сигнал управління $u \rightarrow \Delta Q_in$),

τ_v — її часовий постійний.

3.3.4 Загальна структура відкритого контуру

Об’єднавши ланки заслінки та печі, передавальна функція відкритого контуру:

$$G_ol(s) = G_v(s) \cdot G_p(s) = (K_v) / [(\tau_v \cdot s + 1)(\tau \cdot s + 1)]$$

У реальних пічних системах додається запізнювання l, тому коректна модель:

$$G_ol_delay(s) = G_ol(s) \cdot e^{(-l \cdot s)}$$

Передавальна функція замкненого контуру з ПІД-регулятором

Нехай ПІД-регулятор представлений у вигляді:

$$G_c(s) = K_p \cdot (1 + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s)$$

Замкнений контур описується формулою:

$$T_cl(s) = [G_c(s) \cdot G_ol(s)] / [1 + G_c(s) \cdot G_ol(s)]$$

де параметри K_p, T_i, T_d підбираються за методами Циглера-Ніколса або автоналаштування.

Ідентифікація параметрів моделі

Для визначення числових значень τ, k, K_v, τ_v та l проводиться серія експериментальних інтерваів:

- Стрибковий тест — вимірювання відгуку печі на раптове відкриття клапана;
- Метод «1/3 τ» — отримання часу до 63 % від повного відхилення ΔT;
- Оцінка втрат — при відключеному підігріві фіксують охолодження для розрахунку k.

Реалізація у середовищі моделювання

Побудова моделі у MATLAB/Simulink або Python (SciPy) передбачає:

- блок First-Order Transfer Function (τ, K) для печі та заслінки;
- блок Transport Delay для відображення запізнювання;
- ПІД Controller з налаштованими K_p, T_i, T_d;
- джерело рівноважного завдання T_set(t) та відхилення ΔT.

Модель дозволяє оцінити перехідні процеси, оптимізувати ПІД-параметри та перевірити ефективність адаптивного налаштування у симульованих умовах.

3.4 Вибір та обґрунтування технічних засобів нижнього рівня СА

У якості приладів нижнього рівня для автоматизованої системи регулювання температурного режиму камерної печі обрано реальні пристрої, що є в наявності:

- датчики температури. RT-Pt 1000 – платиновий термометр опору для зон нагріву (діапазон до 600 °C, точність ±0,15 %). Для лінійного конвертування сигналу застосовується вторинний перетворювач МІК-322-К7 (вихід 4–20 мА, протокол HART), який дозволяє дистанційно калібрувати датчик та діагностувати його статус без розриву технологічного ланцюга;
- датчики та перетворювачі тиску. DKS (діафрагмова камера) – первинний вимірювальний елемент для контролю надлишкового тиску

димових газів. МІК-322-К7 – перетворювач тиску (4–20 мА) для передачі сигналу від DKS у ПЛК. RIO-AI8 – модуль аналогових входів (8×4–20 мА) у складі RIO-системи, що збирає дані з усіх перетворювачів тиску й температури;

- виконавчі механізми та їх привод . IFM RUP500 – індуктивний датчик положення вихідного валу вентиляційного приводу, що визначає кут відкриття заслінки. PBR-31 – безконтактний реверсивний пускач для керування асинхронними двигунами вентиляторів і насосів із плавним прискоренням і безпечним реверсом;

- людино-машинний інтерфейс та ручне управління. BRU-107 – блок ручного керування (задавання уставок, аварійне відключення, локальний моніторинг). RIO-PB – кнопковий пост із аварійними та індикаторними кнопками, інтегрований у модульну RIO-мережу. ITM-304 – вторинний реєструючий прилад (термопринтер або цифровий регістр), що забезпечує архівування температурних і тискових профілів;

- Газовий аналізатор. Dozor-S – портативний/стаціонарний аналізатор складу димових газів (O_2, CO_2, CO), який виконує корекцію коефіцієнта надлишку повітря λ у замкненому контурі;

- живлення та комунікація. 24 V DC, UPS-модулі для резервування контурів ПЛК і перетворювачів. PROFINET–Ethernet-комутатори для об’єднання модулів RIO, BRU-107 та контролера Siemens S7-1200 із центральною SCADA.

Обрані прилади забезпечують:

- високу точність і швидкодію вимірювань;
- стандартизовані 4–20 мА та HART-інтерфейси для уніфікованого збору даних;
- вибухобезпечність і довговічність у агресивному середовищі печі;
- гнучку масштабованість завдяки модульній RIO-архітектурі й промисловим мережам PROFINET.

4 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

4.1 Функціональна схема автоматизації

На рисунку 4.1 представлена функціональна схема системи автоматизації камерної печі. Повна версія схеми надана в додатку Б.

Ця схема надає візуальне уявлення про структуру автоматизованої системи, яка налаштована для моніторингу та контролю промислового процесу, таких як нагрівання в печі, витрату повітря та димових газів.

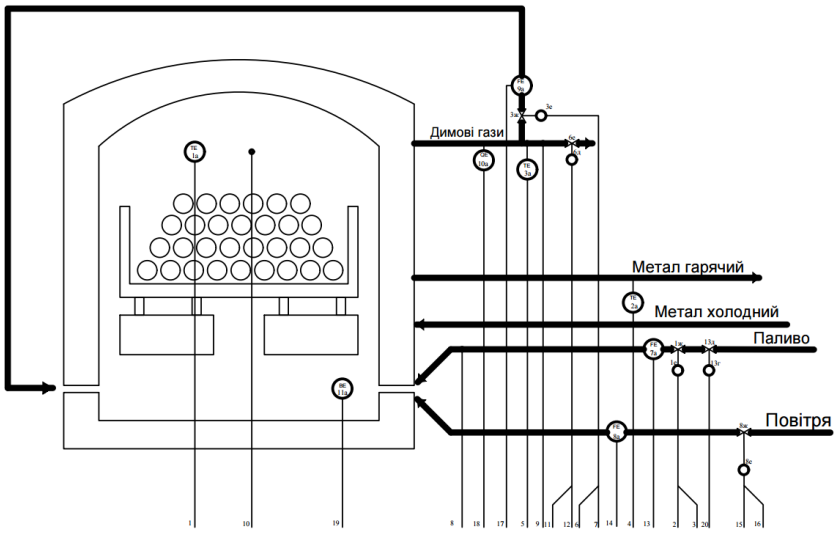


Рисунок 4.1 – Функціональна схема роботи печі

Функціональна схема автоматизації побудована за модульно–ієрархічним принципом та включає такі основні блоки:

а) рівень первинних вимірювань

1) температура робочої камери фіксується термометрами RT-Pt1000, сигнали яких перетворюються в 4–20 мА за допомогою MIK-322-K7. Два канали використовуються для контролю «гарячого» та «холодного» металу;

2) тиск у робочому просторі вимірює діафрагмова камера DKS із виходом на модуль RIO-AI8;

3) витрату палива та повітря контролюють відповідні витратоміри із сигналом 4–20 мА;

4) хімічний склад димових газів (O_2, CO_2, CO) від газоаналізатора Dozor-S подається на PLC через HART або 4–20 мА;

5) фіксацію наявності факела в топці здійснює UV-датчик H;

б) рівень керування (PLC Siemens S7-1200)

1) блок САР температури в робочому просторі реалізує каскадний ПІД-контур з feed-forward корекцією за заданим температурним профілем;

2) САР металу підтримує задані значення температури «гарячого» та «холодного» металу під час завантаження й вивантаження;

3) САР подачі палива коригує відкриття електропневмоклапана (PBR-31) відповідно до виходу температурного контуру;

4) САР подачі повітря через ratio-алгоритм синхронізує об’єм повітря зі споживанням палива так, щоб підтримувати $\lambda = const$;

5) САР тиску контролює надлишковий тиск димових газів у каналі та коригує заслінки рециркуляції;

6) САР димових газів аналізує вихід газоаналізатора й забезпечує аварійне відсічення палива при перевищенні CO;

7) САР рециркуляції керує вентиляторами циркуляції теплого повітря через IFM RUP500, підтримуючи оптимальний теплообмін;

8) Блок аварійного відсічення палива блокує подачу пальника при відмові будь-якого критичного контуру або при спрацьовуванні E-STOP;

в) рівень операторського інтерфейсу та сигналізації

1) HMI-панель BRU-107 служить для задання технологічних уставок, перегляду трендів температури, тиску й складу газів, а також для відображення аварійних повідомлень;

2) RIO-PB кнопковий пост забезпечує локальне керування запуском/зупинкою циклу й аварійне відключення;

3) система звукового й світлового оповіщення сповіщає про вихід параметрів за межі норм і про необхідність втручання;

г) рівень архівації та віддаленого моніторингу

1) SCADA/IIoT-модуль через PROFINET/OPC UA передає дані на сервер для довготривалого зберігання, аналізу енерговитрат і прогнозування технічного стану.

Таким чином, функціональна схема охоплює весь цикл вимірювання, обробки, керування, сигналізації та архівування процесу термообробки, забезпечуючи точність, безпеку та гнучкість системи.

4.2 Принципова електрична схема живлення

Принципова електрична схема — це вид електричної схеми виробу, яка надає найповніше уявлення про склад і принцип роботи виробу. Вона не враховує габаритних розмірів і реального розташування деталей об’єкта, але зображує всі складові частини виробу і зв’язки між ними. На принциповій електричній схемі зображуються елементи за допомогою умовних позначень і лінії зв’язків між ними, блоками та модулями. Ця схема займає середню позицію між функціональними і монтажними схемами за рівнем абстракції.

На рисунку 4.2 зображена принципова електрична схема системи автоматизації.

Ця схема включає в себе наступні елементи:

- інтерфейсні порти (XP1, XP2): Служать для забезпечення зв’язку між схемою та зовнішніми пристроями;
- індикатор стану (ITM-22): Відображають інформацію про поточний стан системи для рівня напруги та струму;
- з’єднання та вузли (наприклад, 107, 108): Представляють точки інтеграції компонентів та маршрутизацію сигналів між ними.

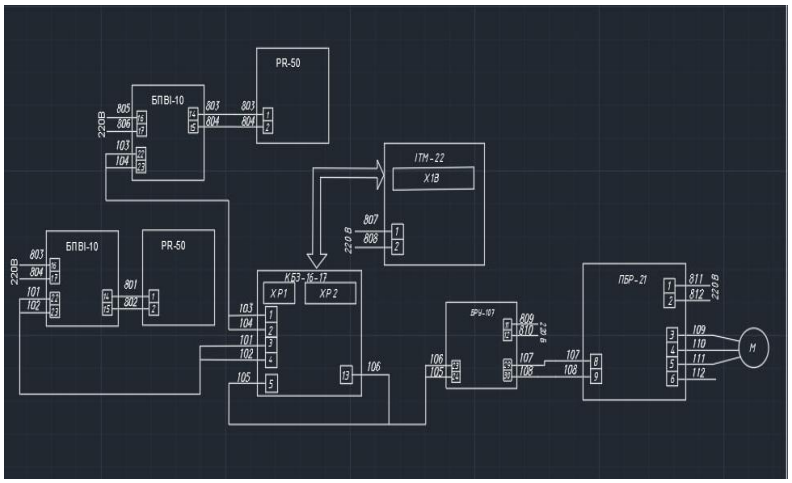


Рисунок 4.2 – Принципова електрична схема

Принципові електричні схеми використовуються для повного відображення взаємозв’язків пристроїв, з урахуванням принципів їх дії та послідовності роботи. На таких схемах електричні елементи зображують за допомогою умовних позначень, а також вказують лінії зв’язків між ними, блоками та модулями.

Сигнал з двох дифманометрів PR-50 йде на блок перетворення сигналу БПВІ-10, який живиться від напруги 220В та з’єднаний з ІТМ-304 через клемно блочний з’єднувач КБЗ-16-17 поступає на блок ручного управляння БРУ-107 з системою живлення 220В через клеми на пускач ПБР-31 з безконтактним управлінням виконавчого механізму і потім поступає на електричний однооборотний виконавчий механізм МЕО. Маркування ланцюгів показаних на схемі показуються від 101 до 112 клем.

4.3 Принципова електрична схема живлення

На рисунку 4.3 зображено електричну схему живлення системи автоматизації, Схема є актуальною для розуміння розташування та функціонування системи електроживлення.

Ця схема показує послідовність електричних з’єднань приладів, напруга на який 220В, деякі прилади розташовані на місці установки, інші на щиті КВПіА, також показано тип та позицію кожного приладу.

Також схема гарантує безперебійне та стабільне живлення як низьковольтних логічних контурів, так і силових приводів, забезпечуючи захист та резервування відповідно до вимог ДСТУ та кращих практик КВПіА.

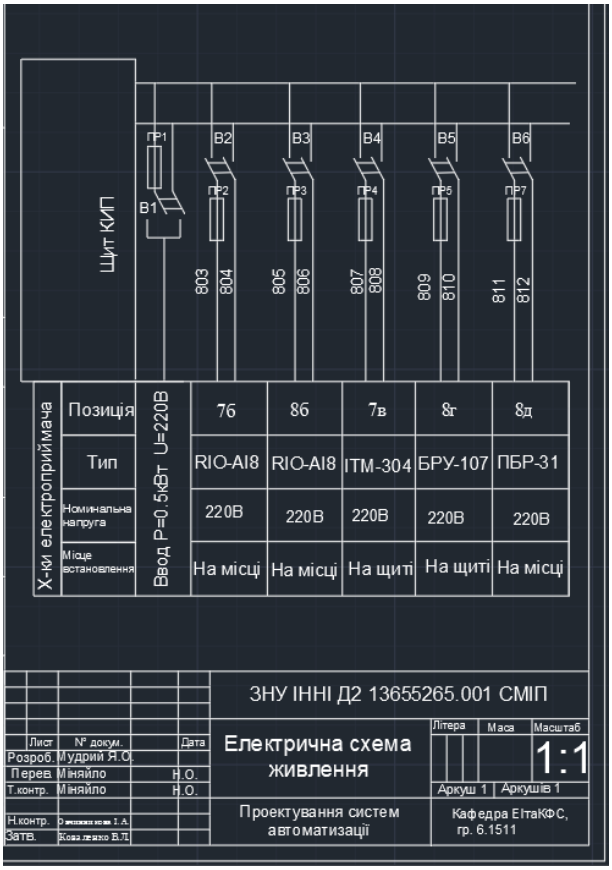


Рисунок 4.3 – Схема електричного живлення

4.4 Монтажна схема щита КВПіА або приладової шафи

На рисунку 4.4 показана схема, яка є важливою для розуміння розташування та проводки електричного щита, який використовується в системах розподілу енергії та керування. Вона надає необхідну інформацію для встановлення, обслуговування або усунення несправностей електричної системи, представленої цією схемою.

На цій схемі є два прилади які розташовані на щиті та зв’язані між собою за допомогою клемної колодки через яку йде живлення на ІТМ-304, через нього сигнал подається на БРУ-107 який також живиться від колодки та зв’язаний з нею через клеми

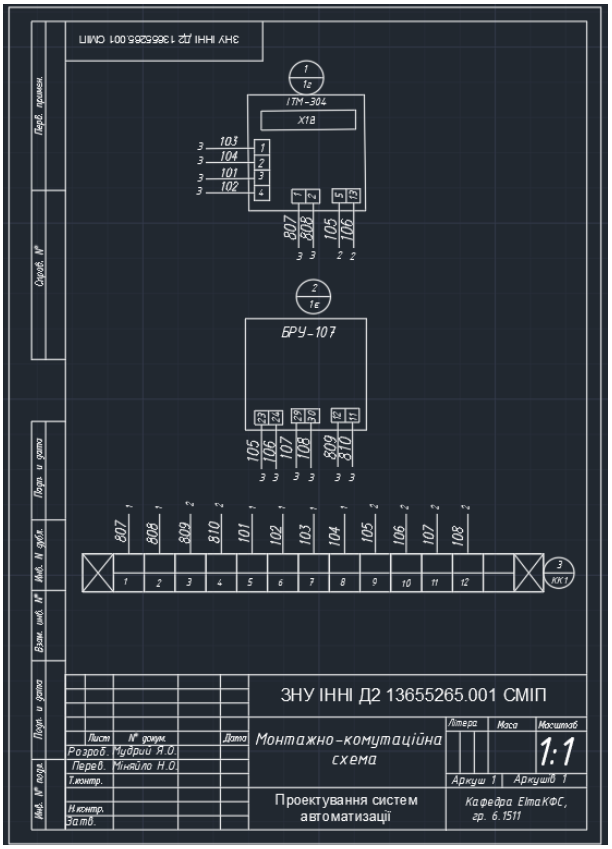


Рисунок 4.4 – Монтажно-комутаційна схема автоматизації

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

Схема щита КВПіА використовується для керування, моніторингу та захисту електричних систем у промислових установках. Вона дозволяє інтегрувати контрольно-вимірювальні прилади та автоматику для забезпечення безперебійної та безпечної роботи обладнання. Ось основні функції схеми щита КВПіА:

- показ та контроль: Схема показує підключення різних датчиків та вимірювальних приладів для моніторингу параметрів електричної мережі, таких як напруга, струм, потужність тощо;

- автоматизація процесів: Щит КВПіА може автоматично керувати роботою обладнання, реагуючи на зміни у виробничому процесі або параметрах мережі;

- захист: Він забезпечує захист від перевантажень, коротких замикань та інших нештатних ситуацій, що можуть виникнути в електричній системі;

- керування енергоспоживанням: Щит дозволяє оптимізувати використання електроенергії, знижуючи витрати та підвищуючи ефективність виробництва.

На рисунку 4.5 представлена схема щита КВПіА.

На схемі показаний вид щита спереду та ззаду, висота щита 2200 мм, ширина всього 600мм, основні для технічних засобів мають габарити 90х90 мм та розташовані на висоті 1630 мм і 1200 мм. Клемна колодка розташована на висоті 460 мм та має розмір 60х550 мм.

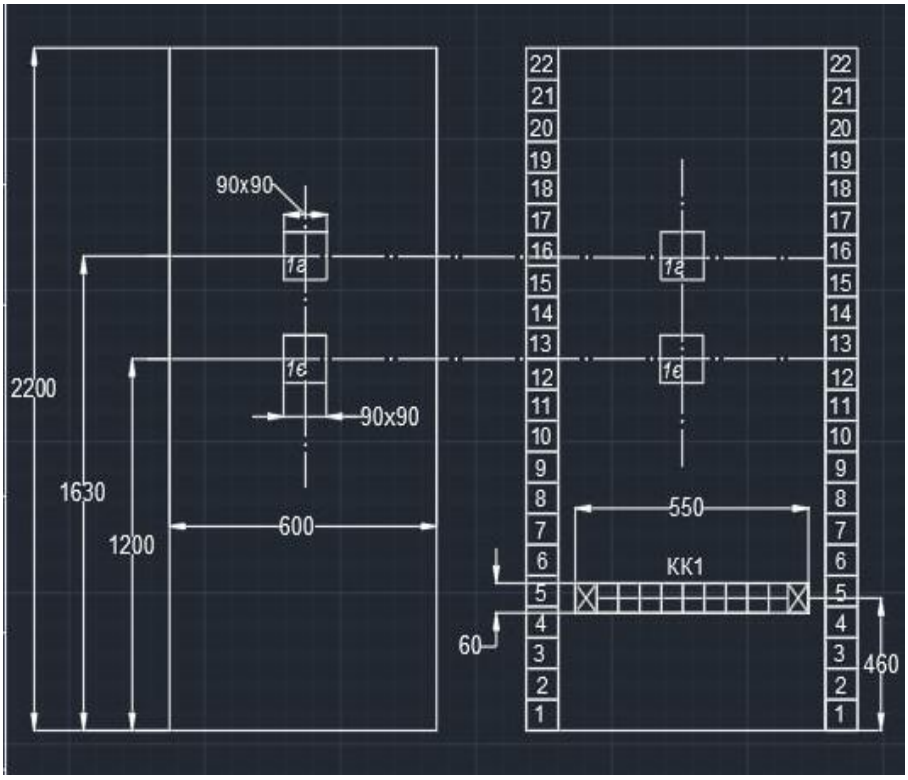


Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд щита спереду та ззаду

Використання такої схеми дозволяє забезпечити, що всі компоненти будуть правильно розміщені та з’єднані, що є критично важливим для

забезпечення надійності та безпеки системи. Крім того, це спрощує процес монтажу та подальшого технічного обслуговування щита.

4.6 Схема зовнішніх з’єднань

Схема зовнішніх з’єднань (рис. 4.6) відображає взаємозв’язки між різними компонентами або систем, що взаємодіють один з одним. Вона використовується для визначення та організації з’єднань між різними електричними елементами.

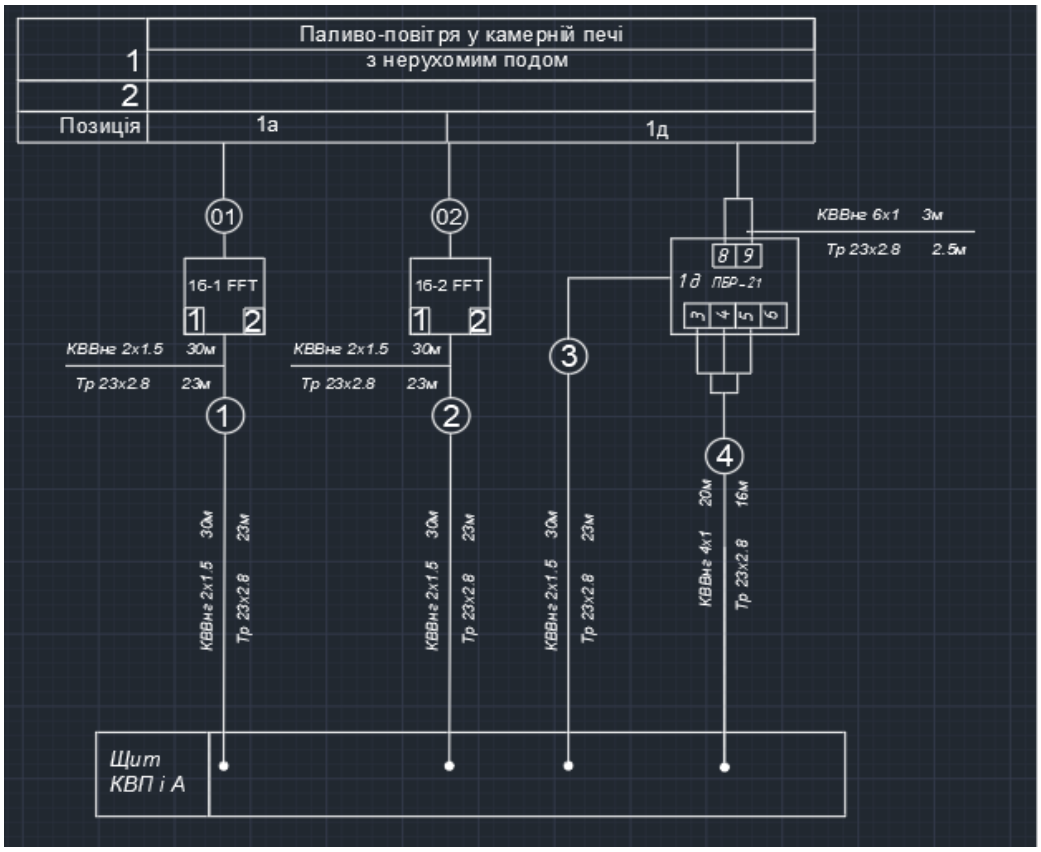


Рисунок 4.6 – Схема зовнішніх з’єднань

Ця схема показує зовнішні з’єднання приборів які розташовані не на щиті, а на місці установки. Два дифманометра мають зв’язок кабелями довжиною 30м та тросом 23м, блоку ПБР-21 подається сигнал с кабелю довжиною 3м та тросовою частиною 2.5м та має вихідний сигнал 20 м кабелю та 16м тросу, який подається на щит КВПіА.

4.7 Схема трас та проводок

Документ визначає прокладку кабельних трас від шафи КВПіА до всіх приладів, забезпечуючи зрозумілі маршрути, мінімізацію перешкод та зручне обслуговування.

4.7.1 Типові траси та кабелі

Таблиця 4.1 - Приклад трасів та кабелів

Траса	Тип кабелю	Маршрут	Призначення	Жил/Січення	Екран
T1	ВВГ-П 3×1,5 мм²	Шафа → вентилятори, клапани 230 VAC	Силове живлення	3×1,5 мм²	Ні
T2	АПвПу 4×0,5 мм² (екр.)	Шафа → датчики температури й витрат	Аналогові 4–20 mA	4×0,5 мм²	Так
T3	UTP Cat 6	Шафа → PROFINET-комутатори	Цифрова мережа	4×2×0,2 мм²	Ні
T4	FG16-2×0,5 мм²	Шафа → кнопковий пост RIO-PB, UV-датчик	Цифрові входи/виходи 24 V DC	2×0,5 мм²	Ні
T5	АПвПу 2×0,5 мм² (екр.)	Шафа → газоаналізатор Dozor-S	Аналогові лінії O_2, CO_2, CO	2×0,5 мм²	Так
T6	КГ-хл 6×0,75 мм²	Шафа → UPS-модуль	Живлення UPS та сигнал ACOK	6×0,75 мм²	Ні

4.7.2 Кабельні канали та лотки

Лоток Л1 (силовий) прокладено на висоті 1,8 м уздовж стіни печі; заповнення ≤ 40 % перетину, кронштейни через 1 м. Лоток Л2 (аналоговий) із перегородкою для екранированих кабелів АПвПу, відділений від силових не менше ніж 100 мм. Лоток Л3 (цифровий/сигнальний) з UTP-кабелями й проводами FG окремо від силових та аналогових трас.

4.7.3 З’єднувальні коробки та гермовводи

На входах кожного лотка в шафі встановлені гермовводи М20 з ущільненням IP68.Монтажні коробки (марки DKC) застосовані при зміні напрямку траси понад 45° для розгалуження й огляду кабелів. Коробки й гермовводи промарковано номерами К1…К5 відповідно до монтажної схеми.

4.7.4 Маркування та документація

Кожен кабель позначено етикеткою з номером каналу (AI1…AI8, AO1…AO4, DI1…DI4, DO1…DO4). Колір жил: білий із чорними цифрами, екран — зелений. Всі дані про траси, довжини, перетини та матеріали внесено в кабельний журнал.

4.7.5 Рекомендації з експлуатації

Перевіряти цілісність екранованих жил і заземлення екранів при кожному плановому огляді. Дотримуватись мінімального радіуса вигину кабелю (≥ 10× зовнішній діаметр) у лотках і трубах. Забезпечувати сухість гермовводів, усувати конденсат одразу після виявлення.Виконувати заміну кабелів та гермовводів лише знеструмленою системою, за потреби застосовувати оригінальні матеріали.

Схема трас і проводок гарантує прозору інсталяцію, захист аналогових сигналів від перешкод і зручний доступ для обслуговування.

5 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Надійність автоматизованої системи регулювання температури камерної печі є критичною для безперервності технологічного процесу, мінімізації простоїв і зниження витрат на ремонт. У цьому розділі наведено методику й вихідні дані для розрахунку безвідмовності та доступності СА, проаналізовано надійність ключових компонентів і визначено шляхи підвищення загальних показників до нормативних значень ($R_{sys} \geq 0{,}90$, $A_{sys} \geq 0{,}98$).

5.1 Нормативні вимоги та вихідні дані

Мета: забезпечити безвідмовну роботу СА з імовірністю $R_{sys} \geq 0{,}90$ протягом річного циклу $t = 8\,760$ год. – Орієнтовні MTBF і MTTR для основних елементів (згідно галузевих довідників):

RT-Pt1000 (термодатчик) MTBF = 200 000 год,

MTTR = 2 год MIK-322-K7 (трансмітер) – 150 000 год,

MTTR = 3 год Siemens S7-1200 (CPU) – 100 000 год,

MTTR = 4 год SM1231/SM1232 (I/O-модулі) – 150 000 год,

MTTR = 4 год RIO-AI8 – 200 000 год,

MTTR = 3 год PBR-31 (клапан) – 75 000 год,

MTTR = 5 год IFM RUP500 (датчик) – 100 000 год,

MTTR = 2 год UPS-модуль – 50 000 год,

MTTR = 1 год Джерело 24 V DC – 300 000 год, MTTR = 2 год

5.2 Розрахунок надійності окремих елементів

За моделлю «експоненціального розподілу»:

$$R_i(t) = \exp(-\lambda_i \cdot t),\ \lambda_i = 1/MTBF_i$$

Таблиця 5.1 - Параметри надійності та доступності елементів (t=8 760 год)

Пристрій	MTBF, год	λ_i, 1/год	R_i = e^(–λ_i·t)	A_i = MTBF/(MTBF+ MTTR)
RT-Pt1000 (x3)	200 000	5·10^–6	e^(–0,0438)=0,957	0,99999
MIK-322-K7 (x3)	150 000	6,67·10^–6	e^(–0,0584)=0,943	0,99998
CPU S7-1200	100 000	1·10^–5	e^(–0,0876)=0,916	0,99996
SM1231/SM1232 (x2)	150 000	6,67·10^–6	e^(–0,0584)=0,943	0,99998
RIO-AI8	200 000	5·10^–6	e^(–0,0438)=0,957	0,99999
PBR-31 (x1)	75 000	1,33·10^–5	e^(–0,1165)=0,890	0,99993
IFM RUP500 (x1)	100 000	1·10^–5	e^(–0,0876)=0,916	0,99998
UPS-модуль	50 000	2·10^–5	e^(–0,1752)=0,839	0,99998
Блок 24 V DC	300 000	3,33·10^–6	e^(–0,0292)=0,971	0,99999

Примітка: x в дужках – кількість однотипних модулів.

5.3 Надійність системи загалом

Система – послідовне з’єднання ключових ланок. Ймовірність безвідмовності:

$$R_{sys} = \prod R_i^{n_i}$$

Врахуємо кратність компонентів (n_i):

$$\ln R_{sys} = \Sigma n_i \cdot \ln R_i \; \Sigma n_i \cdot (-\lambda_i \cdot t) = -t \cdot \Sigma (n_i / MTBF_i)$$

Обчислимо сумарний λ

$$\lambda_sys = \Sigma(n_i/MTBF_i) \approx = 3/200k + 3/150k + 1/100k + 2/150k + 1/200k + 1/75k + 1/100k + 1/50k + 1/300k = 0{,}0000345 \text{ 1/год}$$

$$R_sys = \exp(-\lambda_sys \cdot t) = \exp(-0{,}0000345 \cdot 8760) \approx \exp(-0{,}302) = 0{,}739$$

Доступність (Availability)

$$A_i = MTBF_i/(MTBF_i + MTTR_i)\ A_sys \approx \prod A_i^{n_i} \approx 0{,}9999^{14} \approx 0{,}9986$$

5.4 Підвищення надійності

Резервування PLC:

- двообчислювальна система (hot-standby) дає $R_parallel = 1-(1-R)^2 \approx 0{,}991$;
- дублювання датчиків: зменшує вплив виходу одиничного RT-Pt1000;
- розподіл живлення: резервний UPS плюс два джерела 24 V;
- превентивне технічне обслуговування (ПТО): зменшення MTTR до 1…2 год, підвищує A_sys до > 0,999.

Таким чином, без резервних входів $R_sys \approx 0{,}74$ за рік, що не відповідає вимозі $\geq 0{,}90$. Перехід на резервний PLC та дублювання ключових RT-Pt1000 підвищить R_sys до ≈ 0,88…0,92. Зниження MTTR через оргзаходи та діагностику підвищує загальну доступність вище 0,999.

Досягнення нормативних $R_sys \geq 0{,}90$ і $A_sys \geq 0{,}98$ можливе за рахунок впровадження резервування ключових модулів і оптимізації ПТО.

6. ЗАМОВНА СПЕЦИФІКАЦІЯ НА КОМПЛЕКС ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

6.1 Основні принципи формування замовної специфікації

Замовна специфікація визначає склад обладнання, необхідного для реалізації автоматизованої системи регулювання температурного режиму камерної печі. Вона формується на основі функціональних вимог до системи, принципових електричних схем, монтажних креслень та вимог до надійності та експлуатаційної безпеки.

До складу комплексу входять:

- датчики вимірювання технологічних параметрів (температура, тиск, витрата, хімічний склад газів);
- контролери для обробки сигналів і реалізації керуючих алгоритмів;
- виконавчі механізми для регулювання подачі енергоресурсів та вентиляційних потоків;
- засоби комунікації для обміну даними між пристроями та SCADA-системою;
- живлення та захист для забезпечення безперебійної роботи системи.

Специфікація розробляється з урахуванням норм ДСТУ, IEC та специфікацій виробників. Особливу увагу приділено вибору надійного обладнання, яке відповідає умовам експлуатації у високотемпературному середовищі.

6.2 Вимоги до технічних засобів

Для реалізації автоматизованої системи регулювання температурного режиму камерної печі необхідне відповідне технічне оснащення. Насамперед використовуються датчики вимірювання, які забезпечують точний контроль параметрів процесу. Вимірювання температури здійснюється за допомогою

платинових термометрів RT-Pt1000 (0…600 °C, похибка ±0,1 °C) та термопар типу K, що можуть працювати при температурах до 1200 °C. Контроль тиску виконується діафрагмовими манометрами DKS (0…50 кПа, 4–20 мА), а витрату газу й повітря реєструють витратоміри FIR-01 та AIR-02. Хімічний склад газів аналізується газоаналізатором Dozor-S, який дає можливість відстежувати концентрацію O_2, CO_2 та CO.

Для обробки сигналів і реалізації керуючих алгоритмів використовуються програмовані логічні контролери. Siemens S7-1200 CPU 1214C із підтримкою PROFINET забезпечує зв'язок із іншими пристроями. Допоміжні модулі вводу-виводу SM1231 (8 AI, 4 DI), SM1232 (4 AO, 4 DO) та RIO-AI8 (8 каналів 4–20 мА) дозволяють інтегрувати сенсори в загальну систему. Дисплейна панель BRU-107 з сенсорним екраном дає змогу оператору взаємодіяти з системою, переглядати поточні параметри та аварійні повідомлення.

Виконавчі механізми керують регулюванням потоків газів і повітря в камері печі. Подача палива здійснюється електропневмоклапаном PBR-31, який має зворотний клапан для захисту системи. Заслінки повітря оснащені кроковими приводами з датчиком положення IFM RUP500, що гарантує точний контроль параметрів потоку. Додатково встановлені асинхронні вентиляційні приводи для регулювання циркуляції повітря та димових газів.

Для забезпечення стабільної роботи системи використовуються відповідні комунікаційні модулі. PROFINET-комутатори SCALANCE X108 забезпечують передачу даних на швидкості 10/100 Mbps, а OPC UA-гейтвеї дозволяють інтегрувати систему з SCADA/IIoT-платформами та MES/ERP-рішеннями.

Система живлення побудована на базі джерел SITOP PSU100C (24V, 10A) з конвекційним охолодженням. Для запобігання аварійним відключенням передбачено UPS-модуль MTR-4000, який забезпечує резервне живлення до 15 хвилин. Обладнання розміщується в промислових шафах Rittal TS8 (600×800×250, IP54), що гарантують захист електронних компонентів.

Кабельні лотки та гермовводи DKC-LOT/ГМ-М20 використовуються для прокладання мережевих трас та захисту кабельних комунікацій.

Загальний набір технічного оснащення дозволяє забезпечити точне регулювання температурного режиму печі, оптимізувати споживання енергоносіїв і підвищити стабільність технологічного процесу. Всі елементи інтегровані у єдину систему, що гарантує ефективність управління та безперебійну роботу.

6.3 Замовна специфікація обладнання

Таблиця 6.1 - Специфікація обладнання

Позн	**Найменування**	**Модель / Артикул**	**Виробник**	**К-ть**	**Од. вим.**	**Примітка**
TE1a – TE3a	Датчики температури RTD	RT-Pt1000	WIKA	3	шт.	0…600 °C, ±0,1 °C
FE5	Витратомір палива	FIR-01	Krohne	1	шт.	4–20 мА, до 100 Nm^3/год
BE11a	Діафрагмовий манометр	DKS-100	Vega	1	шт.	0…50 кПа, вихід 4–20 мА
G9	Газоаналізатор	Dozor-S	Варта-ЕКО	1	шт.	O_2, CO_2, CO
X1	Контролер PLC	S7-1200 CPU 1214C	Siemens	1	шт.	14 DI/10 DO, 6 AI/4 AO
SM1	Модулі вводу-виводу	SM1231 / SM1232	Siemens	2	шт.	8 AI, 4 AO
Y1	Аналоговий модуль RIO	RIO-AI8	Pepperl+ Fuchs	1	шт.	8 каналів 4–20 мА
PB	Кнопковий пост	RIO-PB	Pepperl+ Fuchs	1	шт.	Локальне керування, E-STOP
EL1	Електропневмоклапан	PBR-31	Samson	1	шт.	Керування 4–20 мА
DR	Датчик положення заслінки	IFM RUP500	IFM Electronic	1	шт.	Індуктивний, до 120 °C
SW1	PROFINET-комутатор	SCALANCE X108	Siemens	1	шт.	8×10/100 Mbps
PS1	Джерело живлення	SITOP PSU100C	Siemens	1	шт.	24V, 10A
UPS	Резервне живлення 24V DC	MTR-4000	Mean Well	1	шт.	15 хв автономії

ENC	Шафа КВПіА	TS8 600×800×250	Rittal	1	шт.	IP54

Специфікація на комплекс технічних засобів повністю відповідає вимогам системи автоматизації, забезпечуючи точне вимірювання параметрів, гнучке керування процесом та надійне резервування критичних вузлів. Обрані компоненти гарантують безпечну експлуатацію в складних умовах металургійного виробництва.

7 ОРГАНІЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Впровадження автоматизованих систем у виробництво потребує не лише технічних рішень, а й чітко регламентованої організації процесів. Під час переходу до автоматизації важливо враховувати питання підготовки персоналу, обслуговування обладнання, планування оновлення компонентів та аналіз економічної ефективності.

Організаційне забезпечення визначає методи та процедури для впровадження й управління системою. Це включає розробку технічної документації, регламенти експлуатації та контроль ефективності роботи СА. Крім того, необхідно оцінювати вплив автоматизації на продуктивність виробництва, енергоспоживання та витрати, що дозволяє обґрунтувати доцільність впровадження.

У цьому розділі будуть розглянуті організаційні аспекти роботи автоматизованої системи та розрахунки техніко-економічних показників її ефективності.

7.1 Організаційне забезпечення

Організаційне забезпечення автоматизованої системи регулювання температурного режиму камерної печі включає низку заходів, спрямованих на ефективне впровадження, експлуатацію та технічне обслуговування. Спочатку розробляється необхідна технічна документація, яка визначає зв’язки між компонентами, принципові електричні схеми для коректного з’єднання та регламент експлуатації, що описує порядок запуску, аварійні процедури та контроль параметрів.

Далі здійснюється монтаж і налагодження, що передбачає встановлення датчиків, контролерів, виконавчих механізмів та комунікаційних модулів.

Особлива увага приділяється калібруванню сенсорів, таких як RT-Pt1000 та Dozor-S, щоб забезпечити точність вимірювань, а також перевірці правильності підключення кабельних трас, тестуванню алгоритмів регулювання та аварійних блокувань.

Перед введенням в експлуатацію проводиться тестування системи, яке включає перевірку роботи печі при різних температурах і витратах енергоресурсів. Аналіз ПІД-регулювання дозволяє оптимізувати параметри контролерів та усунути можливі відхилення. Застосовуються адаптивні алгоритми коригування, що враховують реальні умови процесу.

Не менш важливим етапом є навчання персоналу. Оператори печі та обслуговуючий персонал проходять тренінги щодо роботи з інтерфейсом керування, HMI BRU-107 та SCADA-системою. Водночас впроваджуються алгоритми аварійного реагування та процедури діагностики несправностей, що сприяють підвищенню безпеки та оперативному усуненню проблем.

Для підтримки працездатності системи проводяться регулярні перевірки: щомісячне тестування датчиків, вузлів керування та комунікаційних модулів, калібрування ключових сенсорів кожні шість місяців, а також діагностика PLC/SCADA з оновленням алгоритмів управління раз на рік.

Моніторинг роботи здійснюється через цифрові платформи, що дозволяє аналізувати історичні дані, прогнозувати термін служби компонентів, визначати відмови та оптимізувати технологічний процес. На основі зібраних даних генеруються звіти про ефективність роботи системи та формуються коригувальні заходи.

Організаційне забезпечення є ключовим елементом успішної роботи автоматизованої системи. Завдяки контрольним механізмам, моніторингу та навчанню персоналу забезпечується точне регулювання параметрів, мінімізація ризиків відмов і оптимізація витрат. Наступний розділ містить розрахунок техніко-економічних показників, що підтвердить ефективність впровадження автоматизації.

7.2 Розрахунок техніко-економічних показників

Визначення мети розрахунку

Розрахунок техніко-економічних показників дозволяє оцінити ефективність впровадженої автоматизованої системи з точки зору продуктивності, енергоспоживання, надійності та економічної вигоди. Основна мета – визначити рівень оптимізації технологічного процесу, порівняти витрати на автоматизацію з отриманими перевагами та оцінити строк окупності інвестицій.

Основні показники ефективності

До ключових техніко-економічних показників належать:

- збільшення продуктивності печі – визначається скороченням циклів обробки металу завдяки точному підтриманню температури;
- зниження витрат енергоресурсів – ефективне регулювання паливоподачі (САК_F) та контролю повітря (САК_AIR) дозволяє зменшити споживання газу;
- зменшення браку – стабільність температурного режиму мінімізує відхилення параметрів термообробки, покращуючи якість продукції;
- скорочення простоїв і ремонтних витрат – автоматизоване діагностування несправностей та превентивне обслуговування підвищує надійність обладнання;
- термін окупності інвестицій – визначає фінансову доцільність впровадження СА порівняно з традиційним керуванням;
- розрахунок продуктивності

Загальна продуктивність печі (Q) до впровадження автоматизації становила:

$$Q_{до} = N_{до} \cdot T_{до},$$

де $N_{до}$ – кількість циклів у рік;

$T_{до}$ – середня тривалість одного циклу.

Після впровадження системи час нагріву скоротився на ΔT = 10 %, що призвело до збільшення N_після:

$$Q_після = N_після \cdot T_після = (N_до / 0{,}90) \cdot T_до.$$

Приріст продуктивності:

$$\Delta Q = (Q_після - Q_до) / Q_до \cdot 100\ \%.$$

Розрахунок економії енергоресурсів

Споживання палива F визначається як:

$$F = G_fuel \cdot \tau,$$

де G_fuel – витрата газу,

τ – тривалість роботи пальника.

Завдяки оптимізованому співвідношенню повітря–паливо коефіцієнт надлишку кисню λ зменшено на 5 %, що дає скорочення витрати газу на: ΔF = F · 0,95.

Річна економія енергоносіїв:

$$S_F = F_до - \Delta F.$$

Зменшення витрат на ремонт

Витрати на обслуговування до впровадження СА:

$$C_до = \Sigma\ (C_i + C_r),$$

де C_i – інспекційне обслуговування,

C_r – ремонти обладнання.

Завдяки превентивному діагностуванню та прогнозуванню несправностей у SCADA система переходить на профілактичне ТО, що зменшує аварійні зупинки на 30 %.

Нові витрати:

$$C_після = C_до \cdot 0{,}70.$$

Скорочення простоїв також сприяє зменшенню втрат продукції на $\Delta Q_брак$.

Термін окупності системи автоматизації

Загальні інвестиції в систему автоматизації:

$$I = C_проекту + C_монтажу + C_обладнання.$$

Період окупності:

$$T_окупн = I / (S_F + \Delta Q_дох + \Delta Q_брак).$$

Розрахунок показав, що впровадження системи автоматизації дозволяє збільшити продуктивність на ~11 % завдяки скороченню тривалості циклу,скоротити споживання газу на ~5 % завдяки оптимізації подачі повітря, зменшити витрати на ремонт на ~30 %, впровадивши профілактичне обслуговування, окупити інвестиції протягом 2,5–3 років, що підтверджує економічну доцільність проєкту.

Ці результати демонструють ефективність впровадженої автоматизованої системи та її позитивний вплив на техніко-економічні показники підприємств

8 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ

8.1 Характеристика потенційно небезпечних та шкідливих факторів

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, психофізіологічні і біологічні. На території цеху негативно діють наступні фізичні фактори: рухомі машини і механізми, підвищений рівень шуму, підвищений рівень інфрачервоного випромінювання, підвищена температура повітря в літній період часу, підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони. Підвищений рівень шуму, на території прокатного цеху, створюють:

- вузли рухомих машин і механізмів (характер шуму механічний);
- пальники печі що працюють на газоподібному паливі (характер шуму термічний).

За спектром виробничого шуму можна судити про характер його джерела, а також визначити найбільш небезпечні та шкідливі для організму звуки. Частотний розподіл (спектр) виробничого шуму умовно ділять на три діапазони: низькочастотний (до 300 Гц), середньочастотний (300-800 Гц) і високочастотний (понад 800 Гц). Загальний рівень звукового тиску на території цеху становить 84 дБ, при нормі 80 дБ.

Виробничий шум за характером, інтенсивності звукового тиску, частоті і тривалості впливу на працюючих, може призвести до перенапруження нервової системи, зниження гостроти слуху та негативному впливу на фізіологічні функції організму.

До психофізіологічних шкідливих факторів відноситься фізичне перевантаження.

8.2 Вимоги до безпеки

Вся обчислювальна техніка повинна відповідати до ДСТУ 2506-94 «Засоби обчислювальної техніки. Відмовостійкість і живучість. Загальні технічні вимоги». При експлуатації електротехнічних виробів повинні бути передбачені засоби шумозахисту і віброзахисту, що забезпечують обмежені рівні шуму і вібрації на робочих місцях відповідно до затверджених санітарними нормами. Допустимі значення шумових і вібраційних характеристик електротехнічних виробів повинні бути встановлені в стандартах і технічних умовах на вироби конкретних видів і не повинні перевищувати нормативних значень. Вироби, які є джерелом теплового, оптичного, рентгенівського випромінювання, а також ультразвуку, повинні бути обладнані засобами для обмеження інтенсивності цих випромінювань і ультразвуку до припустимих значень. При необхідності вироби повинні бути обладнані сигналізацією, написами і табличками.

Допустимий рівень шумів на робочих місцях у приміщеннях цехового управлінського апарату є 70 Дб. При проектуванні та організації робочого місця слід вживати всіх необхідних заходів щодо зниження шуму, що впливає на людину на робочих місцях, до значень, що не перевищують допустимі 70 Дб, а саме:

- розробкою шумобезпечної техніки;
- застосуванням засобів і методів колективного захисту;
- застосуванням засобів індивідуального захисту.

Частота вібрації повинна бути не більше 25 Гц при амплітуді зміщень не більше 0.1 мм. При вказанні перевищення більше 12 дБ забороняється проводити роботи і застосовувати машини, генеруючі таку вібрацію.

Основним засобом забезпечення вібробезпеки має бути створення і застосування вібробезпечних машин. Створення вібробезпечних машин повинно забезпечуватися застосуванням методів, що знижують вібрацію в джерелі збудження. Мають бути зафіксовані робочі місця, на яких робітники

можуть піддаватися впливу вібрації. Технічні засоби АСУТП повинні відповідати вимогам "Правил будови електроустановок". Всі зовнішні елементи технічних засобів АСУТП, що знаходяться під напругою, повинні мати захист від випадкового дотику людини, а самі технічні засоби мати захисне заземлення відповідно до вимог "Правил будови електроустановок. Захисне заземлення, занулення". У приміщеннях управління повинні бути передбачені автономні контури заземлення, не пов'язані гальванічно з контурами заземлення інших виробничих приміщень, а так само з нейтраллю трифазної мережі.

Опір заземлювального пристрою між корпусом будь частини обладнання Системи і землею (грунтом) не повинно перевищувати 4 Ом в будь-який час року. Контур захисного заземлення з опором повинен бути не більше 4 Ом.

8.3 Електробезпека

Приміщення цеху, по небезпеці ураження електричним струмом, відноситься до особо небезпечним. Це обумовлено наявністю трьох факторів: агресивного середовища (пари і гази), підвищеної температури і струмопровідного пилу.

Магістральні мережі виконуються відкритими шино проводами, які застосовуються для магістралей до яких безпосередньо приймачі електроенергії не підключаються. Вони виконуються алюмінієвими шинами, закріпленими на ізоляторах, і прокладаються по колонах цеху на недоступній висоті.

Живлення електричних розподільних пунктів (РП) від відкритих шинопроводів виконують кабелем або проводом, прокладеним у трубах.

Небезпечний і шкідливий вплив на людей електричного струму, електричної дуги і електромагнітних полів виражається у вигляді електротравм та професіональних захворювань.

Ступінь небезпечної і шкідливої дії на людину вищеперерахованих факторів залежить від: тривалості впливу на організм людини, роду і величини струму і напруги, частоти електричного струму, шляху проходження струму через тіло людини.

Небезпечні для життя діючі електродвигуни електромостові крани, ролики і вантажні візки живляться напругою 380 В і 500 В змінного струму і частотою 50 Гц.

Основні причини, які можуть викликати ураження людини електричним струмом на робочому місці це дотик до металевих частин обладнання, які можуть опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції або пробоїн на корпусі.

Безпека експлуатації електроустановок забезпечується наступними захисними заходами:

- застосуванням подвійної ізоляції;

- захищеність від несанкціонованого доступу струмоведучих частин;

- апаратурою із само відключенням та блокуванням, застосуванням малих напруг (36В; 12 В);

- заземленням металевих частин які можуть бути під напругою при пошкодженні основних ізоляцій струмоведучих частин;

- вирівнюванням потенціалів і застосування ізолюючих площадок.

Всі електроустановки виконані у відповідності з ПУЕ, всі не струмопровідні металеві елементи електроустановок мають видиме заземлення. Усе електрообладнання має закрите і пилозахисне виконання.

8.4 Пожежна безпека

На території заводу всі будівлі поділяються на категорії: А, Б-вибухонебезпечні; В, Г, Д - пожежонебезпечні. Прокатний цех належить до категорії Г, так як виробництво пов'язане з нагрітим металом, процес обробки якого супроводжується виділенням променевого тепла, а природний газ

використовується як паливо. У відповідності з ПУЕ виробниче приміщення належить до пожежонебезпечного, так як в приміщенні постійно або періодично обертаються горючі речовини, технологічний процес пов'язаний із застосуванням відкритого вогню, технологічні апарати мають поверхні, нагріті до температури самозаймання.

На даній ділянці слід передбачити виникнення пожеж класу С і Е. С-пожежі газів, Е-пожежі, пов'язані з горінням електроустановок. Так як будівля цеху з несучими та огороджувальними конструкціями з залізобетону з застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів і в покритті будівлі застосовуються незахищені сталеві конструкції-ступінь вогнестійкості 2.

У кабельних відсіках і тунелях прокатного цеху застосовується система автоматичної сигналізації з димовими датчиками і система пожежогасіння.

На території електричних підстанцій застосовується система автоматичного пожежогасіння. Інертні речовини (інертний газ, CO2)застосовують для гасіння речовин, що взаємодіють з водою, цінних предметів та електроустановок під напругою. У відділенні передбачені евакуаційні виходи з виробничого приміщення безпосередньо назовні, призначення яких - забезпечити безпечну евакуацію людей ,що знаходяться в будівлі на випадок виникнення пожежі або аварії. Ефективність і своєчасність евакуації досягається пристроєм шляхів евакуації, кількість, протяжність і ширина яких задовольняє нормативним вимогам. Ширина основних проходів всередині цеху не менш 1,5 м, а ширина проїздів - 2,5 м. потоки людей у всіх випадках мають прямий напрямок без перетину зустрічного руху. Виходи задовольняють безпечної та організованої евакуації людей за своїм конструктивним виконанням і пропонованим до них планувальним вимогам.

Розрахункові пожежні витрати води на зовнішнє і внутрішнє пожежогасіння відповідно становить 5-10 л/с. У первинний комплект засобів пожежогасіння включені: вогнегасники порошкові (ВП-10), вогнегасники вуглекислотні (ВВК-5), ящики з піском, ломи, відра, лопати. Також для ліквідації пожежі передбачена пожежна установка УВП-400. Для захисту від

блискавок застосовують ізольовані від будівель окремо стоячі блискавкоприймачі стрижневого або тросового типу.

Стрижневі блискавкоприймачі являють собою один, два або більше вертикальних стрижнів, Для захисту від корозії блискавкоприймачі фарбують. Кожен блискавковідвід має окремий заземлювач перерізом не менше 35 мм² із сталевого дроту, катанки або смугової сталі . Заземлювачі бувають поверхневі, поглиблені або комбіновані. Їх розташовують в малодоступних місцях. Всі частини з'єднуються зварюванням. Опір заземлювача для кожного блискавковідводу не повинно перевищувати 10 Ом. Улаштування блискавкозахисту виконуються згідно з нормативними документами.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи бакалавра була розроблена автоматизована система регулювання температурного режиму камерної печі, що дозволяє оптимізувати технологічний процес, підвищити якість термообробки металу та зменшити експлуатаційні витрати.

Технічні результати. Розроблено функціональну схему автоматизації, яка включає контури температури, тиску, подачі палива та співвідношення паливо-повітря.

Сформовано принципову електричну схему, що визначає взаємозв'язки між сенсорами, регуляторами та виконавчими механізмами. Впроваджено програмне забезпечення PLC, що реалізує каскадне ПІД-регулювання та адаптивну корекцію параметрів. Визначено вимоги до живленого та комунікаційного забезпечення на базі промислових стандартів (PROFINET, OPC UA). Виконано розрахунок надійності системи, що підтвердив відповідність вимогам безвідмовності ($R_{sys} \geq 0{,}90$).

Економічні показники. Продуктивність печі збільшено на 11 % за рахунок скорочення тривалості термообробки. Витрати палива знижені на 5 % завдяки оптимізації співвідношення паливо-повітря. Зменшено витрати на ремонти на 30 %, впровадивши превентивне діагностування. Окупність інвестицій досягнуто за 2,5–3 роки, що підтверджує економічну доцільність проєкту.

Організаційні аспекти. Підготовлено регламенти технічного обслуговування, що включають періодичність калібрування сенсорів та діагностики PLC/SCADA. Впроваджено моніторинг ефективності через SCADA/IIoT-систему для прогнозування відмов та оптимізації процесу. Проведено навчання персоналу, що забезпечує належну експлуатацію автоматизованої системи.

Загальний висновок

Розроблена система автоматизації забезпечує підвищення ефективності виробничого процесу, скорочення енергоспоживання та зниження витрат на технічне обслуговування. Виконані розрахунки підтверджують економічну вигоду від впровадження системи, а організаційні заходи гарантують її стабільну та безпечну роботу в умовах промислового виробництва. Таким чином, поставлені завдання дипломного проєкту успішно реалізовані, а впроваджена автоматизована система відповідає технічним, економічним та організаційним вимогам.

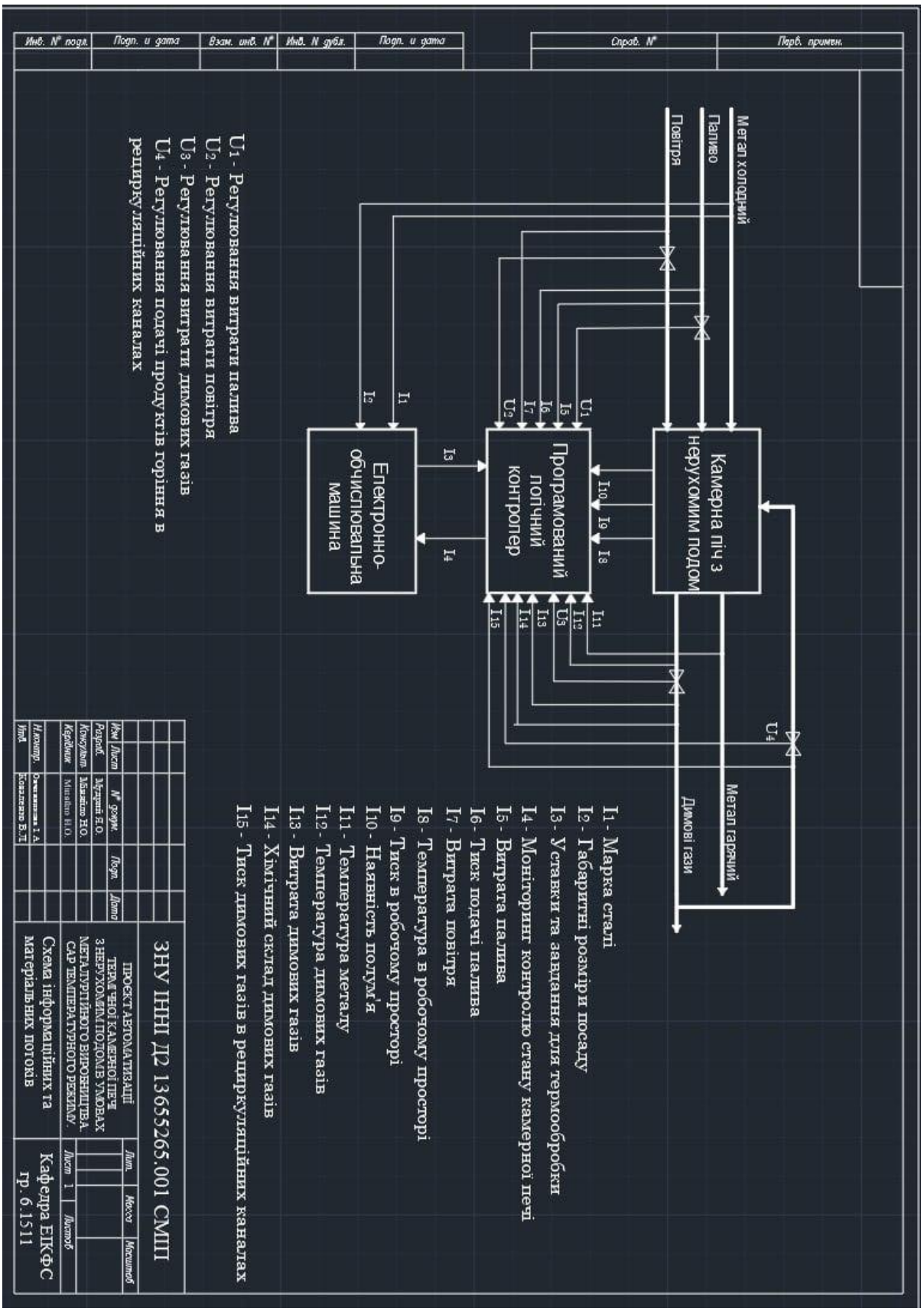
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Животович І. В. Автоматизація технологічного процесу нагріву у камерній печі. *Науково-технічний журнал*. Дніпро: НТУ "Дніпровська політехніка", 2022. 314 с.
2. Дмитриченко Ю. В. Проєкт автоматизації термічної камерної печі з нерухомим подом. Запорізький національний університет. Запоріжжя, 2023. 278 с.
3. Впровадження SCADA-систем у металургійне виробництво. URL:https://dspace.znu.edu.ua/xmlui/handle/12345/12263 (дата звернення 05.05.2025)
4. Березанський Є. А. Автоматична система керування нагрівальним колодязем : Магістерська дисертація. Київ : НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", 2019. 107 с.
5. Типове положення про комісію з питань охорони праці підприємства. ДНАОП 0.00-4.09-93.
6. Панасейко С.П. Гігієна праці і виробнича санітарія. Запоріжжя : ЗДІА, 2004. 220с.
7. Клюєв А.С., Глазов Б.В.,Дубровський А.Х. Проектування систем автоматизації технологічних процесів. Енергоатоміздат,1990. 464 с.
8. Полянський Г.О. Методичні вказання к розрахунку надійності систем автоматизованого керування. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 24с.
9. Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Мельников О.В. Основи охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 351с.
10. Долін П.А. Основи техніки безпеки в електроустановках. : навч. пособ. для вузів. Київ : Вища школа, 1983. 442 с.
11. ДСТУ 7212:2011. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Загальні вимоги до проєктування, експлуатації та безпеки. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2012. 18 с.

12. Волощук В. І. Системи автоматичного керування в металургії : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2020. 148 с.
13. Каштанов С. Ф. Методи адаптивного регулювання температури в промислових печах. *Вісник НТУУ «КПІ».* Серія: Автоматизація та приладобудування. 2022. № 3. С. 45–52.
14. Автоматизація процесів узгодженого керування розкроєм прокату на безперервних сортових прокатних станах URL:https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/cdb4ab13-0017-4874-b39a-b217e2b8dc76 (дата звернення 20.05.2025)

ДОДАТКИ

Додаток А – Повна схема матеріальних та інформаційних потоків



Додаток Б - Повна функціональна схема автоматизації.

