

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Класичний фаховий коледж

(повна назва інституту/факультету)

Електронні інформаційні системи

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171Електроніка

(код та назва)

освітньо-професійної

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

програми Електронні інформаційні системи

(назва програми)

на тему: **Автоматична стабілізація температури в рідкопаливній технологічній печі**

Здобувача (ки) групи ЕІс3-91к

(шифр групи)

батькові)

Кошеля Артема Сергійовича

(прізвище, ім'я, по

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

Артем Кошель

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант¹⁾ _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є автоматична стабілізація температури в рідкопаливній технологічній печі.

Предмет дослідження є автоматична стабілізація температури через програмовані логічні контролери.

Обґрунтуванням актуальності теми є те що автоматична стабілізація температури в рідкопаливній технологічній печі являється необхідним технологічним процесом в сучасному світі.

Мета роботи полягає у вивченні типів, принципу роботи, та розробці автоматичної стабілізації температури в рідкопаливній технологічній печі.

Відповідно до мети, вирішувалися такі задачі:

- автоматична стабілізація температури;
- огляд рідкопаливних котлів.

У печі для повторного нагрівання термічна ефективність і рівномірний нагрів відіграють важливу роль у зниженні витрат енергії та мінімізації дефектів металу. Важливо підвищити ефективність печі за рахунок економії енергії та отримати високі виходи, менше небажаного укрупнення зерна та більшу однорідність продуктів, а також отримати кращі термомеханічні властивості сталі. Для досягнення цих вимог важливо застосувати повну автоматизацію та систему контролю в печі.

Робота викладена на 35 сторінках, у тому числі включає 8 рисунки, список цитованої літератури із 24 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АВТОМАТИКА, ТЕХНОЛОГІЯ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ.

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ПЕЧІ ПОВТОРНОГО НАГРІВУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ PROFIBUS	5
1.1 Печі повторного нагріву.....	5
1.2 Будова печі повторного нагріву	7
1.3 Система керування процесом печі для повторного нагріву PROFIBUS	10
РОЗДІЛ 2. ВАЖЛИВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ НАГРІВАЛЬНОЇ ПЕЧІ	13
2.1 Система моніторингу нагрівальної печі	13
2.2 Характеристики системи автоматизації нагрівальної печі	16
2.3 Моделювання печі повторного нагрівання	17
2.4 Керування печею на CFD моделі	21
РОЗДІЛ 3. КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНЕЮ ПЕЧЕЮ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА АМІАКУ	24
3.1 Будова та принцип дії печі	24
3.2 Контроль процесів.....	25
3.3 Робота керування пальником.....	26
3.4 Цифрові печі	27
3.5 Контролери тиску в печі.....	29
3.6 Універсальна система керування печами.....	30
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	33

ВСТУП

Піч повторного нагріву є одним із ключових пристроїв у стані гарячої прокатки. Він також споживає більшу частину енергії, необхідної для прокатки сталі. Піч для повторного нагрівання зазвичай використовується для нагрівання сталевих заготовок до температур прокатки, придатних для пластичної деформації сталі, а отже, для прокатки на стані гарячої прокатки.

Піч повторного нагріву є важливим обладнанням для гарячої прокатки сталі. Це серце будь-якого стану гарячої прокатки. Процес нагрівання в печі повторного нагрівання є безперервним процесом. Паливо, що використовується в цих печах, може бути пиловугільним, рідким або газоподібним паливом. Типи печей для повторного нагрівання, які використовуються на прокатних станах: піч із штовхачем, піч з крокуючими балками, піч з крокуючим подом, піч з роликівим подом і піч з обертовим подом.

Сталеву заготовку, що підлягає прокату, завантажують на вході в нагрівальну піч. Під час руху в печі для повторного нагрівання сталевий матеріал попередньо нагрівається, нагрівається та просочується, коли він проходить через зону попереднього нагрівання, нагрівання та замочування печі для повторного нагрівання. В кінці зони витримки печі сталевий заготовка вивантажується з печі ежектором для прокатки в прокатному стані. Температура нагрітого сталевих матеріалу під час вивантаження залежить від кількох факторів і може коливатися в діапазоні від 1100 до 1250 °C.

РОЗДІЛ 1

ПЕЧІ ПОВТОРНОГО НАГРІВУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ PROFIBUS

1.1 Печі повторного нагріву

Виробничий процес на прокатному стані потребує суворого контролю температури сталевих заготовок з печі для повторного нагріву, щоб відповідати вимогам до прокатки. Піч для повторного нагріву, яка нагріває сталеву заготовку до температури прокатки, може задовольняти ці вимоги на безперервній та надійній основі лише тоді, коли контроль температури та вихідної кількості добре скоординовані. Піч для повторного нагрівання переміщує холодний матеріал від сторони входу до сторони виходу, і під час її проходження через піч сталевий матеріал нагрівається теплом, що виділяється внаслідок згоряння палива.

Коли сталевий матеріал надходить у піч зі сторони входу, він спочатку нагрівається до температур у діапазоні від 750 °C до 850 °C у зоні попереднього нагріву вихлопними газами, що виходять з печі. Зони нагріву подають тепло безпосередньо до сталевих мас та зазвичай мають температуру в діапазоні від 950 °C до 1150 °C.

Нарешті, сталеві маси потрапляють в зону замочування, де вони нагріваються далі та поглинають тепло, щоб мати рівномірну температуру по всьому поперечному перерізу, щоб підготувати його до згортання. У зоні замочування підтримується температура в діапазоні від 1100 °C до 1250 °C для задоволення вимог процесу прокатки.

Температура завантаження сталевих заготовок може коливатися від температури навколишнього середовища до 800°C. Цільова температура на виході сталевих заготовок регулюється вимогами процесу прокатки, які залежать від швидкості прокатки, розміру заготовки та складу сталі. Аспекти якості сталі накладають обмеження на температурний градієнт і температуру поверхні сталевих заготовок.

Печі повторного нагрівання, які використовуються для нагрівання сталевих мас, зазвичай вважаються такими, що споживають високу енергію. Вони також викидають велику кількість забруднюючих речовин в атмосферу, оскільки процес, який використовується для виробництва тепла, є спалюванням палива. Процес повторного нагріву також має значний вплив на економіку та роботу прокатного стану.

Печі повторного нагріву зазвичай мають кілька зон залежно від потужності печі та сталеві маси, що нагрівається. Ці зони поділяються на три категорії, а саме зона попереднього нагріву, зони нагріву та зони замочування, як показано на рисунку 1.1. Крім зони попереднього нагріву, усі інші зони мають кілька пальників для задоволення потреби в енергії сталевий матеріал, що нагрівається.

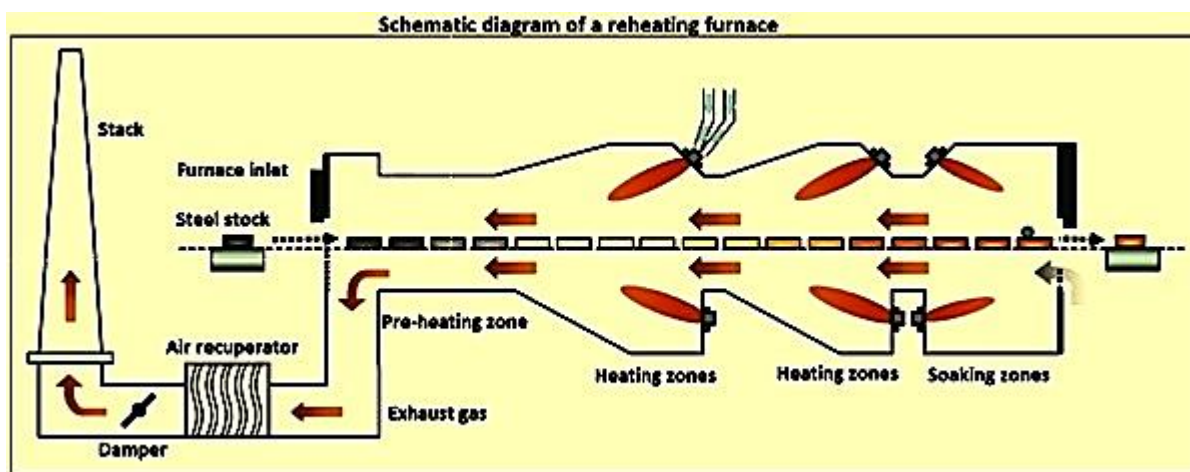


Рис. 1.1 Принципова схема печі повторного нагріву [3]

Теплова енергія передається сталевій масі під час її проходження через піч головним чином за допомогою конвекції та випромінювання від газів пальника та стінок печі, а також шляхом теплопровідності всередині сталеві маси. Теплова енергія передається сталевій масі за допомогою конвекції від гарячих газів пальника, які знаходяться в прямому контакті зі сталеві масою, а також за допомогою випромінювання від нагрітих стінок печі та нагрітої даху печі. Передача теплової енергії випромінюванням є найбільш ефективним

способом передачі теплової енергії. Радіаційна передача теплової енергії відбувається через корисну теплообмінну площу, створену шаром сталеві маси.

Нагрівальні печі мають високе енергоспоживання. Термін «питоме споживання енергії» означає кількість енергії, яка використовується для повторного нагрівання одиниці маси обробленого матеріалу. Питоме енергоспоживання є ключовим параметром продуктивності для печі повторного нагріву, і воно безпосередньо впливає на викиди вуглецю та експлуатаційні витрати. Тепловий ККД печі повторного нагріву - це відношення теплової енергії, що надходить до нагрітої сталеві маси, до теплової енергії, що подається в піч через пальники.

У печі для повторного нагрівання термічна ефективність і рівномірний нагрів відіграють важливу роль у зниженні витрат енергії та мінімізації дефектів металу. Важливо підвищити ефективність печі за рахунок економії енергії та отримати високі виходи, менше небажаного укрупнення зерна та більшу однорідність продуктів, а також отримати кращі термомеханічні властивості сталі. Для досягнення цих вимог важливо застосувати повну автоматизацію та систему контролю в печі. Розробка та оцінка системи автоматизації та керування нагрівальної печі потребують точного аналізу динаміки печі. Нагрівальна піч повинна мати ефективну систему автоматизації та управління для мінімізації витрат енергії на вироблене тепло.

1.2 Будова печі повторного нагріву

По-перше, піч для повторного нагрівання має бути оснащена основними приладами моніторингу, такими як термопари у відповідних місцях для вимірювання температур, оперативний аналізатор кисню для вимірювання процентного вмісту кисню у вихлопному газі, перетворювачі тиску для вимірювання тиску в печі, контрольні інструменти, такі як приводи змінної частоти в вентиляторах з примусовою тягою та індукованою тягою,

електромагнітні клапани в повітропроводах і паливопроводах, і шнековий живильник із двигуном і схема керування. Усі прилади та налаштування керування мають бути в замкнутому циклі. Зворотній зв'язок від контрольних приладів має бути отриманий схемою керування для контролю різних параметрів, необхідних для оптимізації ефективності печі.

Метою системи автоматизації та керування печі для повторного нагріву є досягнення попередньо визначеного температурного профілю сталеві заготовки, коли вона виходить із печі для прокатки, зводячи до мінімуму споживання енергії, необхідної для процесу нагріву сталі. Основні функції, які має виконувати базова система автоматизації та керування для печі повторного нагріву, зазвичай охоплюють щонайменше контроль температури для кожної зони, контроль потоку газу для кожної зони, контроль співвідношення газ-повітря для горіння для кожної зони, включаючи правильну кількість надлишку повітря, і контроль тиску в печі та тяги. Зазвичай керування піччю повторного нагріву реалізовано на дворівневій ієрархії,

Як правило, піч для повторного нагрівання розділена на 3 зони пальника до 8 зон пальника. Температуру сталеві маси в кожній зоні печі контролюють шляхом зміни температури зони, яка зазвичай вважається постійною в зоні. Температуру топки регулюють зміною витрати палива на пальники зони. Систему контролю температури печі повторного нагріву можна розділити на три частини на основі функцій. Перша частина — це система теплообміну печі повторного нагрівання, друга — система керування потоком палива через сервоклапан, а третя й остання частина — це PI (пропорційно-інтегральний) контролер.

Система автоматизації та керування нагрівальної печі має два типи керування, а саме послідовне керування та технологічне керування. Система послідовного керування контролює кінематику печі, маневри завантаження та завантаження та керування допоміжним обладнанням, таким як гідравліка, змащення, охолодження печі тощо. Система технологічного керування контролює всі ті, що пов'язані з приладами та регулюванням печі, наприклад

PID (пропорційний) інтегральна похідна) температурні петлі, перехресне регулювання повітря та паливо з точним керуванням співвідношенням повітря/паливо, тиском тощо.

Система автоматизації та керування для печі для повторного нагріву здійснюється на трьох рівнях, а саме рівень 0, який є керуванням увімкнення та вимкнення, рівень 1, який є системою на основі ПІД-контролера, та рівень 2, який це система на основі програмованого логічного контролера (ПЛК). Крім того, у віддаленому місці (офіс менеджера) є рівень 3 для моніторингу та планування виробництва.

Управління процесом зазвичай здійснюється за допомогою цифрової системи керування приладами, а стратегія рутинного керування реалізується через безперервний ПІД-регулятор. Кілька термопар розташовані на верхній і бічній стінках кожної контрольної секції печі відповідно для збору фактичної температури в кожній секції печі, а потім значення вибірки надсилаються до ПЛК, щоб реалізувати безперервне ПІД-регулювання через різницю між вимірянні значення та встановлене значення витрати газу та повітря, потім ступінь відкриття сопла пальника в кожній секції регулюється для контролю потоку газу та контролю температури.

Однак, оскільки невідомо про спалювання газу, якщо цей метод прийнятий, ефективність використання теплоносія буде дуже низькою, а споживання енергії дуже великим. Таким чином, запроваджено свого роду вдосконалений повний автоматичний контроль згоряння з обмеженням подвійної амплітуди, основний принцип якого полягає у здійсненні контролю за згорянням у верхній частині та нижній частині кожної секції протягом нормального робочого часу. Якщо необхідно, сигнал регулювання температури верхньої частини може розглядатися як налаштований контроль контуру обмеження амплітуди подвійного перетину, а значення визначення температури нижньої частини може використовуватися для моніторингу стану печі.

Цей основний і підпорядкований режим керування може краще координувати баланс горіння та подачі тепла між верхньою секцією та

нижньою секцією печі, щоб зробити згоряння верхньої та нижньої секції рівномірним. У той же час, він враховує спалювання палива, відіграючи хорошу роль в енергозбереженні. Для реалізації цієї функції управління використовується ПЛК та ПК (персональний комп'ютер).

1.3 Система керування процесом печі для повторного нагріву PROFIBUS

Система керування процесом печі для повторного нагріву є вдосконаленою системою, яка поєднується з сучасним комп'ютерним програмним забезпеченням і апаратними технологіями. Він використовує змінну операційну станцію, потужну платформу підтримки реляційної розподіленої бази даних, високонадійну станцію керування процесом із резервуванням великої ємності та розподілену підсистему управління вводом та виводом (введення та виведення) технології польової шини процесу PROFIBUS. Він розробив своєрідне повністю інтегроване автоматичне рішення та може забезпечити всі види програм автоматизації з однаковими технічними умовами.

Елементами, включеними в систему керування процесом, є уніфіковане програмне забезпечення для керування даними, зв'язку, конфігурації та програмування. Всі види технологій можуть бути інтегровані в загальну систему з глобальною базою даних на одному інтерфейсі з користувачами. Інженери та техніки можуть налаштовувати та програмувати на одній платформі для всіх типів програм. Система керування процесом полегшує інтеграцію ПЛК у розподілену систему керування (DCS), втілюючи в собі справжні характеристики комп'ютеризованого автоматичного керування. DCS і PLC корисні для надійної системи керування процесом печі повторного нагріву. Система управління приладами та електрична система керування можуть бути реалізовані за допомогою DCS та PLC. Система керування піччю для повторного нагрівання поділяється на систему керування PLC зони печі,

систему керування PLC для роликів і систему керування DCS для печі для повторного нагріву. Контролер приладу та електрика підключаються до сервера станції оператора (ОС) по Ethernet. Використовуючи DCS і PLC, технологія мережевої польової шини поєднує в собі систему керування процесом і технологічний комп'ютер, інтелектуальний прилад і систему приводу для реалізації інструменту та електричного керування в одній системі.

Для процесу керування нагрівальної печі система керування, яка є складним процесом передачі тепла та характеру, має кілька особливостей, таких як перешкоди, сильний зв'язок, велике чисте запізнювання тощо. Підрегулювання є комплексною системою керування через її зрілість, знайомство з техніків і операторів, часто використовується, широке застосування в комп'ютері DDC (канал даних дисплея), обладнання для керування даними та особливо складна система керування, а також перевірена практикою, оскільки вона адаптована до різних процесів промислового керування.

Основним обладнанням печі для повторного нагріву є обладнання для завантаження печі, обладнання для вивантаження печі, крокуюча система у випадку печі з крокуючими балками та печі з крокуючим подом, роликові столи передачі, система керування пальником та відстеження сталевий матеріал.

Вся система керування піччю повторного нагріву зазвичай налаштована з резервуванням подвійного ЦП (центрального процесора), резервного кільця промислової мережі Ethernet, шини PROFIBUS DP (децентралізовані периферійні пристрої) та ПЛК із структурою розподіленого вводу та виводу. На рисунку 1.2 показана типова детальна конфігурація.

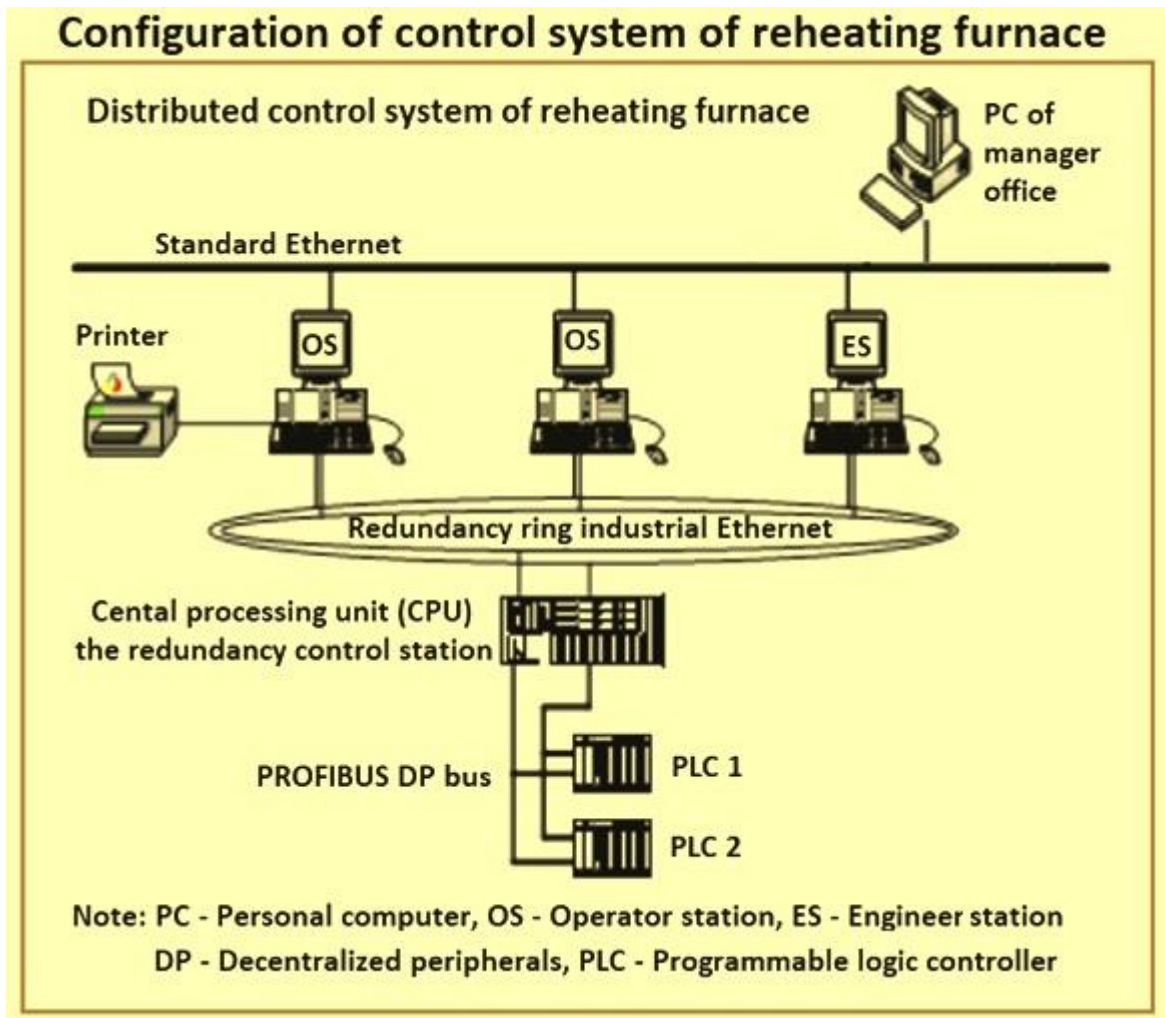


Рис.1. 2 Конфігурація системи керування нагрівальної печі [7]

Система керування процесом печі повторного нагрівання також потрібна для виконання функції відстеження матеріалу. Для цього потрібно, щоб система виконувала функцію передачі даних щодо даних вимірювання та зважування, виявлення, завантаження матеріалу в піч і вивантаження матеріалу з печі з процесами, що знаходяться внизу та вище за потоком.

Крім того, він повинен контролювати втрати накипу в печі для досягнення різних цілей печі для повторного нагріву, які включають високий вихід, низьке споживання палива та низькі викиди в навколишнє середовище, щоб досягти цих цілей в автоматичному режимі.

РОЗДІЛ 2

ВАЖЛИВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ НАГРІВАЛЬНОЇ ПЕЧІ

2.1 Система моніторингу нагрівальної печі

Апаратна конфігурація показує, що розподілена система керування нагрівальною піччю має дві чудові характеристики. Перший полягає в тому, що базовий рівень автоматизації приймає кільцеву структуру резервування, щоб підвищити надійність і стабільність системи, а другий полягає в тому, що інформаційний рівень приймає стандартну структуру Ethernet, щоб система мала можливість передачі даних великої ємності та зручну розширюваність.

Центральний процесор є ядром системи керування піччю для повторного нагрівання, яка разом із структурою розподіленого введення/виведення формує станцію керування системою резервування.

Система моніторингу використовує промисловий керуючий комп'ютер і одноколірний дисплей як станцію оператора (OS) та станцію інженера (ES). В ОС оператор відстежує та керує процесом через НМІ (людино-машинний інтерфейс). Операторські станції системи працюють в режимі онлайн і координації, вони повністю прозорі та повністю відмовостійкі та зазвичай замінюються одна одною. Цей режим робить цю систему перевагою в надійній роботі, прийнятному розподілі даних, високій швидкості роботи, дружньому людино-машинному інтерфейсі та зручності у використанні.

Ключовою системою керування піччю повторного нагріву є серія ПЛК. Існує три види комунікаційних мереж. Це мережа відображення внутрішньої пам'яті, мережа Ethernet і мережа PROFIBUS.

Зв'язок між опаленням, чорновим станом і чистовим станом зазвичай реалізується внутрішньою мережею відображення пам'яті. Зв'язок між внутрішнім ПЛК печі для повторного нагріву реалізується через

Ethernet. Зв'язок між ПЛК, ОС і ES здійснюється через Ethernet. Зв'язок між ПЛК і міжміською станцією реалізується за допомогою PROFIBUS.

Існує ряд ПЛК, які використовуються в печі повторного нагріву. Використовуються для роботи приладів, електроприладів, рекуператора повітря.

В ОС здійснюється меню функцій. Усі види параметрів виробничого процесу температури, тиску, потоку тощо можна контролювати за допомогою відповідного функціонального меню в ОС. Електроживлення всіх систем PLC у печі повторного нагріву здійснюється за допомогою ДБЖ (джерело безперебійного живлення).

Трирівнева структура мережевої системи (рівень 1, рівень 2 і рівень 3), що складається зі стандартної мережі Ethernet і польової шини PROFIBUS DP, забезпечує високу надійність, відсутність блокувань і високу швидкість передачі даних системи. Відмовостійка оптико-волоконна мережа з подвійним кільцем забезпечує більш ефективну польову антиперешкодну здатність і високу надійність передачі даних мережевої системи.

Система управління процесом повинна мати конфігурацію програмного забезпечення, яке використовує Microsoft Windows як програмне забезпечення операційної системи та має бути налаштовано на станції інженера як програмне забезпечення для керування комп'ютером нижнього положення та моніторингу комп'ютера верхнього положення.

Крім того, він повинен бути забезпечений програмним забезпеченням зв'язку Industry Ethernet і системним програмним забезпеченням резервування. Станція оператора повинна бути забезпечена комп'ютерним програмним забезпеченням моніторингу верхнього положення. Крім функцій, які можуть бути реалізовані звичайним програмним забезпеченням для моніторингу, можна буде додати інше програмне забезпечення з різними елементами керування та програмами для виконання більш складних функцій.

Для того, щоб оператори вчасно освоїли умови роботи всієї системи керування комп'ютером, точно контролювали стабільну роботу системи та

були зручними в роботі, система повинна встановити креслення блоку потоку системного процесу та інший потік процесу діаграми. Блок-схема технологічного процесу - це зображення технологічного процесу з промисловими контрольними параметрами, що наочно відображає стан виробничого процесу системи та забезпечує відображення вимірних значень точок виявлення системи.

Крім того, система також повинна встановити зображення циклу та централізований контроль над кожним циклом, який можна реалізувати на зображенні циклу, клацнувши детальну інформацію, включаючи встановлене значення, значення процесу, вихідне значення,

Аналогова величина призначена для відображення значення та накопичення потоку аналогової величини у формі централізації. Термометр призначений для відображення основних температурних параметрів системи. Функції системи управління повинні бути відповідно до програмного потоку зарядки та автоматичного запуску.

Система управління процесами може мати труднощі у своєму функціонуванні. Паливо для печі повторного нагріву часто може мати нестабільну теплоту згоряння, що призводить до труднощів у контролі температури.

Спосіб регулювання температури топки та витрати паливного газу, а також амплітуди подвійного перетину каскаду повітряного потоку полягає в обмеженні стабілізованого контрольного значення.

Детальна ідея полягає в прийнятті температури печі повторного нагріву як основного контуру, потоку паливного газу та потоку повітря як допоміжного контуру.

При цьому продуктивність температурного контуру печі повторного нагріву перетворюється на початкове задане значення витрати паливного газу та повітря.

2.2 Характеристики системи автоматизації нагрівальної печі

Оператори установки можуть підвищити загальну продуктивність печі для повторного нагріву за допомогою системи автоматизації та керування для печі для повторного нагріву. Удосконалена система оптимізації горіння покращує ті параметри, які можуть вплинути на якість сталевого прокату. Система автоматизації та керування нагрівальної печі дозволяє цілеспрямовано покращувати металургійні властивості, наприклад, підвищувати рівномірність температури або мінімізувати негативні ефекти, такі як знеуглерожування сталі або високий рівень утворення окалини.

Автоматизація та система контролю печі для повторного нагріву допомагає зменшити споживання палива, використовуючи такі стратегії нагріву, які мінімізують задані значення температури та водночас забезпечують необхідну кінцеву цільову температуру сталеві маси. В основі системи автоматизації та керування печі повторного нагріву зазвичай лежить складна математична модель, яка здатна моделювати криві нагрівання всередині печі для кожної завантаженої сталеві маси. Система автоматизації та керування нагрівальної печі показує загальну ефективність печі шляхом візуалізації діаграм теплового балансу. Він також надає тенденції споживання та викидів, які можна співвіднести з фактичними даними виробництва.

Система автоматизації та контролю печі повторного нагріву постійно контролює параметри історії нагріву кожної окремої заготовки сталеві заготовки. Система працює прогнозно, тобто робить узгоджені прогнози для оцінки розвитку шляху нагріву. На цій основі система автоматизації та керування нагрівальної печі постійно вибирає та змінює задані значення температури. У поєднанні з цифровими приладами система також оптимізує цифрову схему стрільби.

Система автоматизації та керування нагрівальної печі є високоефективною в оптимізації параметрів горіння під час таких подій, як раптові зупинки, час розігріву печі або зміни в продуктивній кампанії. Система

забезпечує належну повторюваність нагріву навіть для недосвідчених операторів, хоча навіть досвідчені співробітники отримують суттєву користь від математичної моделі керування під час тимчасових подій.

Система автоматизації та керування нагрівальної печі відстежує споживання та інші параметри печі, пов'язані з ефективністю, і зберігає тенденції з часом, щоб забезпечити оперативний моніторинг.

Система автоматизації та керування нагрівальної печі отримує зворотний зв'язок від пірометра чорнового стану. Ця функція адаптує математичну модель відповідно до вимірювань пірометра чорнового стану. Температура шматка, виміряна пірометром, порівнюється з очікуваною температурою та відповідно адаптує модель.

Система автоматизації та керування нагрівальної печі зазвичай має розширену функцію прогнозування «ефекту слідів від ковзання». Ця функція дозволяє контролювати «ефект слідів від ковзання» за допомогою спеціального алгоритму, який імітує ефект холодної точки, що створюється ковзанками з водяним охолодженням, і керувати різними параметрами автоматизації та системи спалювання відповідно до вимог процесу.

Система автоматизації та керування нагрівальною піччю зазвичай містить модель темпу. Модель прогнозує час, за який кожна заготовка сталевих маси всередині печі буде готова до вивантаження, щоб виконати вимоги щодо мінімального часу нагрівання та замочування кожної деталі всередині печі та отримати максимальну продуктивність.

2.3 Моделювання печі повторного нагрівання

У всіх видах операції гарячої прокатки піч повторного нагріву є критичним компонентом, що визначає якість кінцевого продукту. Отже, процес повторного нагріву потребує точного контролю температури сировини та її рівномірності протягом усього періоду нагріву. У той час як споживання енергії в печі повторного нагріву значною мірою залежить від умов виробництва,

таких як розмір запасу, сорт матеріалу та пропускна спроможність, а також покращений контроль над піччю, схема спалювання може призвести до непрямой економії енергії через покращення заданих температур печі. Однак багатозонна каскадна конструкція печей повторного нагріву та пов'язана з цим теплова інерція печі роблять завдання контролю температури печі дуже складним, особливо у випадках змін, наприклад, цільової температури повторного нагріву,

Загалом, концепція керування процесом для печі повторного нагріву завжди є складним питанням, оскільки її розвиток призводить до збільшення складності використовуваних конфігурацій керування. У нагрівальній печі необхідні чіткі підходи до проектування схеми регулювання температури. Найбільш поширеною стратегією є розробка діагональних ПД-регуляторів. Однак продуктивність цих контролерів не завжди є задовільною через існування великих затримок, що змінюються в часі, і високої взаємодії між контурами керування.

Температура нагнітання сталевий заготовки має бути не тільки в правильному діапазоні, але також має бути мінімізована різниця температур у тілі повторно нагрітої сталевий заготовки. Важко точно керувати процесом повторного нагрівання, оскільки неможливо отримати цю інформацію шляхом прямого вимірювання. Щоб вирішити цю проблему, моделі використовуються в печі повторного нагріву в системі керування процесом рівня 2. Це математичні моделі, які обчислюють температуру сталі в кожному вузлі двовимірної матриці, щоб можна було оцінити об'ємну температуру, а також розподіл температури. Ці моделі є серцем системи керування процесом печі повторного нагріву рівня 2.

Моделі, які використовуються для регулювання температури в печі для повторного нагріву, повинні мати цілі повторного нагріву сталевий маси відповідно до «оптимального циклу», заздалегідь визначеного для кожного типу матеріалу, який досягається для повного діапазону продуктивності печі включаючи переходи та затримки, та підвищити точність керування подачею

тепла до зон регулювання, використовуючи знання фактичних температур сталі. Завдяки моделям на рівні 2 управління можна зменшити споживання палива, зменшити утворення накипу, що безпосередньо впливає на врожайність і загальне підвищення продуктивності млина, а також точно контролювати цільову температуру на виході.

У цьому контексті в останні кілька десятиліть все більше уваги приділяється системам «розширеного управління процесами» (APC). Серед рішень APC прийнятий підхід часто ґрунтується на технології «передбачуваного керування моделлю» (MPC). Стратегії MPC, використовуючи знання моделей процесів, дозволяють перетворювати фізичні задачі управління в модельні з урахуванням економічних аспектів.

З іншого підходу, за останні кілька десятиліть були проведені значні дослідження математичного моделювання, заснованого на фізичних властивостях. Вперше була розроблена спрощена модель, враховуючи основні принципи. Однак ця модель не враховувала радіаційний теплообмін і складні явища, такі як турбулентності. Було введено іншу модель з меншою обчислювальною складністю, яка дійсна лише для стаціонарної роботи. Розроблено ще одну нову математичну модель, засновану на зонному методі радіаційного аналізу та поєднанні цієї моделі з CFD.

Ця модель була розширена до 3D-підходу. Хоча було проведено кілька досліджень фізичного моделювання, мало уваги приділено моделюванню чорного ящика. Оскільки невідомі перешкоди чітко впливають на піч повторного нагріву, моделювання чорного ящика видається кращим підходом для печі повторного нагріву. У деяких дослідженнях для печей повторного нагріву було прийнято авторегресійний метод моделювання з екзогенним терміном (ARX).

У сучасному сценарії популярні схеми контролю спираються на структуру стратегій MPC. Ці підходи, незважаючи на хорошу продуктивність MPC у регулюванні температури та обробці обмежень, не завжди практичні, якщо є невідповідності моделі та у випадках, коли є значні збої в установці,

тоді як для задовільної роботи потрібна велика кількість використаних налаштувань. необхідні параметри. Крім того, у деяких випадках важко врахувати ефекти зв'язку та взаємодію входів-виходів для печі повторного нагріву, щоб розробити належну оптимальну схему керування.

Було проведено низку досліджень щодо моделювання, імітації та контролю печі повторного нагріву, і досягнуто значного прогресу. Але застосування цих моделей для керування нагрівальною піччю в режимі реального часу все ще є проблемою через відсутність відповідної моделі (простої та дорогоцінної) для керуючого комп'ютера. Задля контролю оптимізації в режимі онлайн в одному з досліджень було розроблено серію дискретних моделей простору станів для різноманітних печей повторного нагріву, які використовуються для прокатки сталі.

Перевагами розроблених дискретних моделей простору станів є проста структура, швидкість обчислень, невеликі вимоги до пам'яті та легкість реалізації в цифровому комп'ютері.

В одному з досліджень розроблено нелінійну прогнозну модель управління для печі безперервного повторного нагріву сталевій маси. Базуючись на математичній моделі перших принципів, контролер визначає локальні температури печі, щоб сталева маса могла досягти бажаної кінцевої температури. Контролер підходить для нестационарних робочих ситуацій і досягнення визначених користувачем бажаних профілів температури сталевій маси. В алгоритмі керування нелінійна необмежена динамічна оптимізаційна задача розв'язується методом квазіньютонів. Конструкція контролера враховує той факт, що нагрівальна піч є безперервним виробничим процесом. Багаторічні результати вимірювань промислового застосування контролера демонструють його надійність і точність. На рисунку 2.1 показано нелінійну прогнозну модель управління нагрівальною печі.

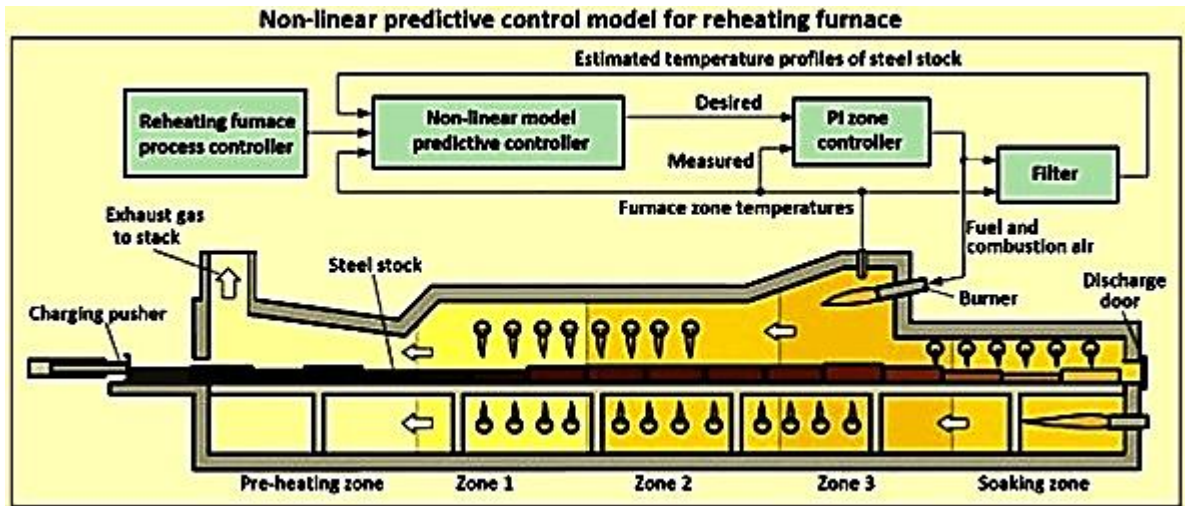


Рис. 2.1 Нелінійна прогнозована модель управління нагрівальної печі [8]

2.4 Керування печею на CFD моделі

З появою більш доступної обчислювальної потужності використання керування на основі моделі в нагрівальних печах стало широко поширеним. В даний час доступні три типи моделей печей. Перші типи моделей – це моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD), які є класом моделей, заснованих на фізичних законах, пов'язаних з потоком рідини, змішуванням, горінням і теплопередачею, які розв'язуються в щільно дискретизованій обчислювальній області реальної печі. детальна геометрія.

Ці моделі мають відносно високу точність, але за рахунок інтенсивних обчислень, через рух запасів всередині печі, а також процес завантаження та розвантаження, явища транспорту в печі для повторного нагріву є періодично тимчасовими. Отже, CFD, що використовується для моделювання, забезпечує більш відповідні результати в стаціонарному стані, при цьому відсутній для представлення перехідної поведінки процесу. На рисунку 2.2 показаний контур печі для повторного нагріву в усталеному режимі роботи.

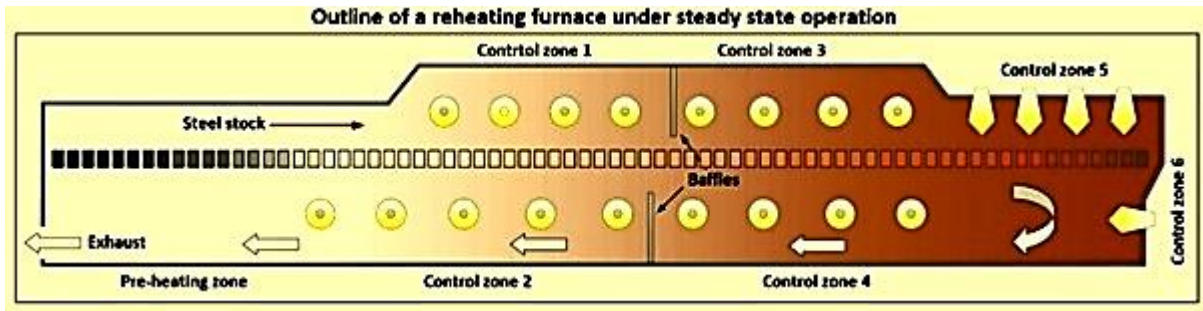


Рис. 2.2 Схема печі для повторного нагріву в усталеному режимі роботи [9]

Одне з досліджень моделювало рух запасу у віртуальний спосіб і повідомило, що геометрія печі, включаючи запас, не змінюється, а теплова енергія, що міститься в запасі, переміщується з одного положення в інше. Щоб подолати проблему великого часу обробки при CFD моделюванні, в іншому дослідженні було розроблено метод моделювання печей для повторного нагріву в усталеному стані, у якому маси моделюються як високов'язкі рідини.

Хоча можна досягти меншого часу розрахунку порівняно з перехідними або ітераційними підходами, відносно цей метод застосовується лише до періодичної перехідної операції повторного нагріву. Отже, CFD-моделі непридатні для моделювання теплової поведінки перехідного повторного нагріву сталі в реальному або майже реальному часі з різною геометрією запасу та нерівномірним плануванням партій.

Другий тип моделей - це напівемпіричні моделі, які не суворо дотримуються конкретних фізичних законів, але покладаються на дані вимірювань як вхідні дані моделі. Вони прагнуть досягти надзвичайно швидкого моделювання, але мають йти на компроміс щодо точності.

Ці моделі часто використовуються для наглядного контролю температури, який базується головним чином на обмеженій кількості вимірювань термопар, встановлених уздовж даху печі та топки. З огляду на те, що ці обмежені вимірювання термопар не можуть повністю представити температурну карту у великих контрольних зонах у печі, і що їхні відповіді не завжди репрезентативні для температури в контрольній зоні, такий підхід може спричинити неузгодженість у регулюванні температури. В

результаті, наглядний контроль температури повинен йти на компроміс щодо властивих неточностей як у вимірюваннях, так і в припущеннях моделювання. Ситуація може ще більше погіршитися через нестабільні потреби в нагріванні, оскільки в печі існує високодинамічна теплова поведінка, яку можна зафіксувати лише за допомогою вимірювань термопари із затримкою часу.

Третіми типами моделей є моделі «чорної скриньки», які не включають жодного конкретного фізичного закону, але зазвичай містять набори адаптивних ваг, тобто числові параметри, які налаштовуються алгоритмом навчання з навчальними даними.

Ці моделі здатні апроксимувати нелінійні функції своїх вхідних даних і включають клас статистичних моделей, відомих як штучні нейронні мережі (ШНМ). Однак на практиці застосування такого роду моделей обмежене наявністю навчальних даних. Крім того, математичні моделі, засновані на зональному методі, широко використовуються для печей повторного нагріву. Переваги зонної моделі полягають у її здатності точно відобразити теплообмін випромінюванням усередині камер високотемпературної печі з набагато меншими вимогами до дискретності для обчислювальної області.

Потік рідини, змішування та виділення тепла від згоряння палива можна отримати окремо від інших джерел, що робить загальний процес обчислення набагато ефективнішим. До цієї категорії належать зональні моделі (так звані зональні моделі).

Одне з досліджень досліджувало характеристики нагріву маси в печі повторного нагріву з крокуючими балками за допомогою спрощеної зонної моделі. Дослідження використовувало емпіричну кореляцію для розрахунку коефіцієнта конвекції на поверхнях запасу, таким чином уникаючи необхідності обчислювати обмін ентальпії через потоки продуктів згоряння.

РОЗДІЛ 3

КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНЕЮ ПЕЧЕЮ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА АМІАКУ

3.1 Будова та принцип дії печі

Піч - це промисловий пристрій, який використовується в багатьох хімічних процесах для передачі тепла. У піч сировина надходить через один кінець. Потім його нагрівають до необхідної температури у ретельно контрольований спосіб. У топці тепло забезпечується енергією, що виділяється в результаті згоряння пального газу. Тепло до технологічної рідини передається димовим газом, щоб нагріти її до необхідної температури. У печах теплообмін і контроль температури дуже важливі для їх ефективної та безпечної роботи. Це робиться за допомогою системи контрольованих-вимірювальних приладів і системи керування, яка підтримує різні змінні процесу в заданих межах. Система вимірює вихідні характеристики пристрою, яким керують.

Ці вимірювання надсилають зворотний зв'язок до вхідних приводів, які вносять корекції до бажаної продуктивності. У печі в більшості випадків найбільш контрольованими параметрами є температура і тиск.

Існує кілька варіантів систем керування в печі:

- теплова енергія отримується шихтою з належним тарифом, тут температура заряду на виході є контрольованою змінною;
- слід належним чином підтримувати ефективне спалювання палива, для правильного згоряння палива необхідно регулювати співвідношення повітря і палива;
- усі етапи роботи печі мають бути безпечними для запобігання вибуху чи пожежі.

Розглянемо піч у процесі виробництва аміаку. Початкові нагрівачі потрібні для нагрівання проміжного потоку, такого як повітря або природний газ, який, у свою чергу, нагріває іншу рідину або тверду речовину, наприклад

каталізатор реактора. Управління пусковим нагрівачем, що використовується в установці аміаку, показано за допомогою наступних P&ID. Система керування пусковим нагрівачем зображена на рисунку 3.1

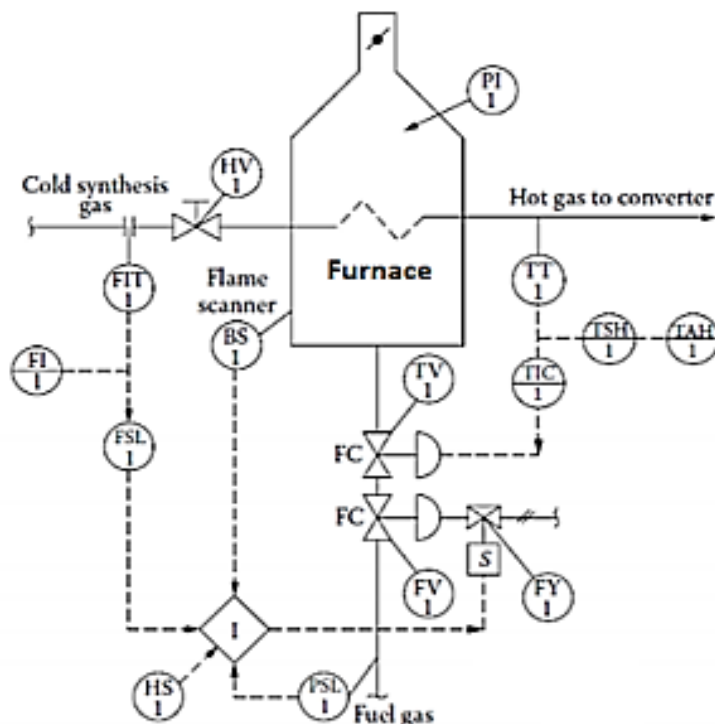


Рис. 3.1 Система керування пусковим нагрівачем [11]

3.2 Контроль процесів

Контроль процесу забезпечує належне споживання теплової енергії завантаженням. Температура заряду на виході є контрольованою змінною. Для цього використовується клапан регулювання температури, що не закривається контролювати та підтримувати цю температуру, маніпулюючи полум'ям пальника [4]

З метою забезпечення безпеки при роботі печі впроваджується контроль безпеки. Існує кілька потенційних джерел небезпеки, які включають:

- розрив труби спричиняє пожежу. Це відбувається через перегрів трубки, перегрів спричинений попаданням полум'я або втратою потоку живлення;

- неправильні процедури очищення, неправильне запалювання або втрата полум'я спричиняє вибух у топці.

Стандарт ANSI/ISA-84.01–1996 «Застосування інструментальних систем безпеки (SIS) для переробної промисловості» впроваджено для забезпечення безпеки роботи печі. Система безпеки та відключення SIS зазвичай розташована на ПЛК, який відокремлений від контрольного обладнання. Нормальною роботою печі керує контрольна апаратура. До таких систем також входить сканер полум'я. Що стосується процесорів і джерел живлення систем SIS на основі ПЛК, їх надійність підвищується за рахунок їх реалізації в резервованих конфігураціях. Безпека роботи печі забезпечується запобіжним низьким перемикачем потоку для вхідного потоку шихти та запобіжним низьким перемикачем тиску для вхідного паливного газу. Контроль спалювання палива під час роботи пускового нагрівача відіграє дуже важливу роль як у процесі, так і в контролі безпеки. Тут регулятор температури процесу встановлює спалювання паливного газу [5].

3.3 Робота керування пальником

Управління пальниками здійснюється шляхом регулювання співвідношення повітря і палива в них. Існує два способи регулювання співвідношення повітря і палива:

Існує техніка, яка називається балансуванням тиску, яка модулює потік повітря, а регулятор тиску використовується для забезпечення відповідного потоку палива. Потік палива завжди відповідає потоку повітря.

Інша техніка полягає в тому, щоб дозволити незалежне керування потоками повітря та палива. У цій системі реалізовано алгоритм для визначення потоків кожного, щоб вони могли функціонувати дещо незалежно один від одного. Ця система є більш гнучкою, універсальною та може виконувати широкий спектр вимог до процесу. Структурну схему системи керування пальником наведено на рисунку 3.2

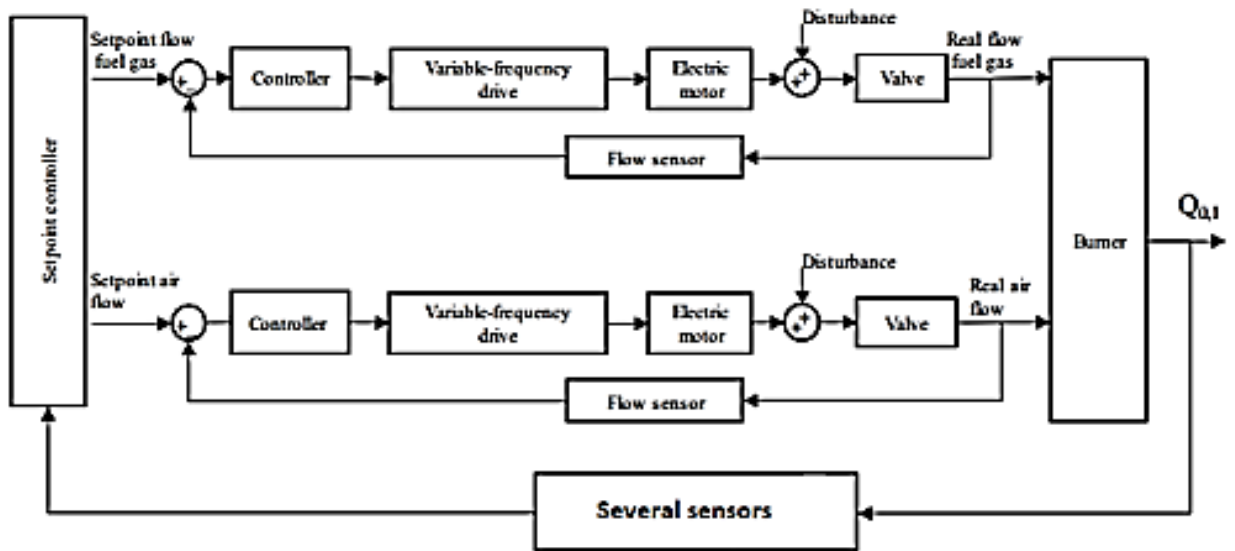
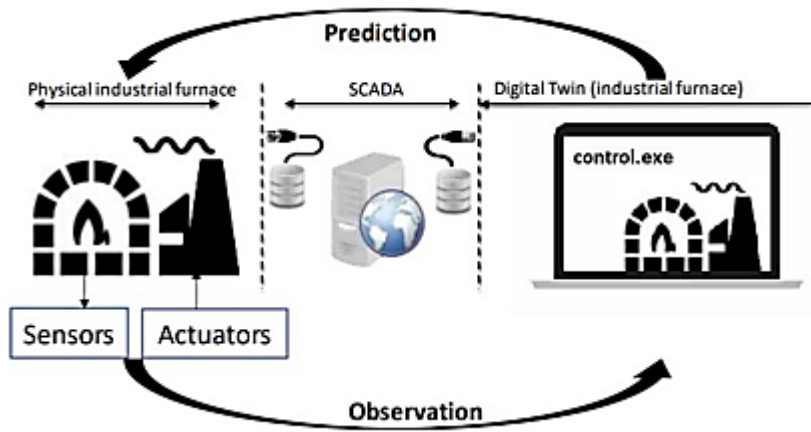


Рис. 3.2 Структурна схема системи керування пальником [8]

3.4 Цифрові печі

Цифровий двійник виробничого процесу передбачає збір усіх цифрових частин, взаємопов'язаних із відповідними згенерованими даними під час виробничого процесу. Техніка цифрового контролю, що представляє собою промислової печі, вимагає точного відтворення всіх фізичних компонентів у вдосконаленому комп'ютері. З точки зору моделювання, цифровий близнюк вважається нещодавно вдосконалим кроком, технологія моделювання через можливість розвитку фізичних систем у більш складних об'єктах шляхом додавання функцій програмного забезпечення в деякі частини, тобто приводів і датчиків, і забезпечення підключення через кіберфізичні системи [6].

Зв'язок між фізичною та віртуальною промисловою піччю здійснюється за допомогою диспетчерського керування та збору даних (SCADA). Система має дві фази, як показано на рисунку 3.3



3. 3 Промислова піч як цифровий двійник [55]

Перша фаза - це фаза спостереження. Вона включає в себе набір елементів, як правило, в основі індивідуальних і взаємозамінних карт вводу та виводу, які відповідають за фіксацію фізичних умов реального світу. Вони перетворюють ці умови в дані, які можна аналізувати в обчислювальній області [7]. Цей процес, що виконується системою збору даних, можна розділити на чотири етапи, представлені на рисунку 3.4.

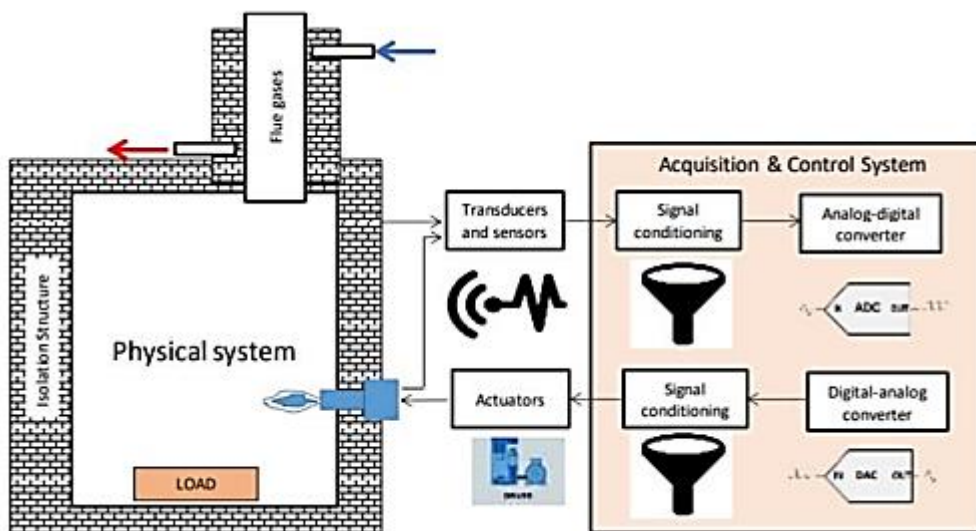


Рис. 3.4 Система збору даних []

Перший крок включає визначення фізичних властивостей, які описують стан фізичної системи, таких як тиск, потік або температура тощо.

Другий крок передбачає встановлення електронного обладнання, яке здатне фіксувати кожну матеріальну властивість, перетворюючи її на електричний сигнал. Електричний сигнал може бути в напрузі або в струмі. Це обладнання зазвичай потребує електричного збудження.

Третій крок готує процес електричного сигналу через етап кондиціонування сигналу перед початком процесу аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Деякі процеси кондиціонування включають фільтри для видалення шуму, щоб отримати потрібний точний сигнал. Крім того, іноді електричний сигнал потрібно посилити, щоб отримати кращий сигнал, що відповідає функціям АЦП.

Четвертий крок перетворює електричний сигнал у цифровий за допомогою пристрою АЦП. Комп'ютери розуміють цифровий сигнал, і ним можна легко ділитися та обмінюватися між ними. Подібним чином система збору даних і керування може генерувати сигнали для керування виконавчими механізмами, включеними в процес, як правило, приводами, що керують отвором або закривають технологічні клапани [8,9].

3.5. Контролери тиску в печі

Тиск у робочій камері печі підтримується і стабілізується регуляторами тиску печі. Манометр використовується в цих контролерах у топковій камері або повітроводі, а потік повітря регулюється для підтримки злегка позитивного тиску в топковій камері. Існують вентилятори та заслінки, які можуть регулювати потік повітря для вихідного димового газу або вхідного повітря для горіння. Для печі або духовки з природною тягою барометрична заслінка є недорогим варіантом. Регулятор тиску може бути автоматичним або ручним.

На панелі керування є ручка, яка використовується для регулювання тиску в ручній системі. Це може зробити оператор обладнання. В автоматичній системі є контур зворотного зв'язку, який постійно контролює та регулює тиск за допомогою електронної системи контролю.

Вихід контролера базується на пропорційній та інтегральній дії контролера на автоматичну ручну дію. ПЛК керує впускними лопатками ID Fans.

3.6 Універсальна система керування печами

Існують також деякі вдосконалені печі, які керуються з єдиної панелі керування, яка керує всіма електричними функціями печі. Система управління має чотири основні функціональні групи:

- контролери живлення;
- енерджайзери;
- контролери температури;
- калібрувати та тестувати на статус.

Промисловий ПЛК або програмований логічний контролер інтегрують різні функції. На пульті управління також розташовані витратоміри контролю витрати технологічного газу [12].

Від підключених ламп оператор може керувати режимом теплообміну в печі як кондукцією, випромінюванням або змішаним режимом. Існують різні режими, доступні для моделювання поведінки радіаційної, конвекційної або кондукційної печі. Ця функція робить його ідеальною універсальною піччю для лабораторних або виробничих застосувань.

Піч може працювати в змішаному режимі, увімкнувши будь-яку комбінацію верхньої та нижньої ламп. Цей режим поєднує характеристики конвекції, провідності та випромінювання тепла.

Увімкнувши верхні лампи, піч може працювати в режимі випромінювання. Цей режим підкреслює характеристики швидкої реакції радіаційних печей і зменшує характеристики провідності.

Піч може працювати як в кондукційному, так і в конвекційному режимах, використовуючи лише нижні лампи.

При подачі живлення від автоматичного вимикача установки завжди горить біла лампа. Контрольна лампочка горить, коли до систем печі подається живлення. Для запуску стрічки оператор натискає зелені елементи керування контролера двигуна, вентилятори шафи та системи охолодження, регулятори температури зони печі та будь-яке додаткове обладнання. Для вимкнення печі натискаються червоні кнопки управління.

У печах для термообробки, наприклад для нормалізації процесу, контроль температури для кожної пластини, завантаженої в піч, є досить важливим. Існує два різних фактори, що впливають на температуру відхилення:

- теплове навантаження належить печі, яке є характерним для печі;
- коли пластина завантажується всередину печі, теплове навантаження на пластину додається.

Щоб керувати цими двома різними динамічними характеристиками, система контролю температури використовує теплову модель для прогнозування часу перебування та нормалізації температури. Оскільки для виконання розрахунків теплова модель передбачає постійну температуру в печі, контроль температури використовує це значення як еталон. Таким чином, мета контролю температури полягає в тому, щоб підтримувати рівномірну температуру, контролюючи тривалість роботи пальників у певній зоні пальника.

Вимоги до системи керування можуть залежати від багатьох факторів, таких як реакція на командні сигнали, нечутливість до шуму вимірювання, варіації процесу та відхилення збурень навантаження. Проектування системи керування передбачає виконання різних аспектів, пов'язаних з динамікою процесу, насиченням приводу та характеристиками збурень. Контроль температури для нормалізаційної печі використовує ПД-регулятор, який маніпулює сигналом корисної потужності. Цей сигнал потужності подається на секвенсор для створення відповідної швидкості запалювання пальника.

ВИСНОВКИ

1. Після фіксації всіх параметрів моделі моделювання було повторено з різними налаштуваннями кроку за часом. Результати показали, що модель віртуальної печі здатна передбачити загальну теплову поведінку печі з розумною точністю. Навіть із апаратним забезпеченням персонального комп'ютера споживчого рівня розроблена модель показала досить багатообіцяючу обчислювальну ефективність, приблизно в 170 разів швидшу, ніж фактичний час роботи великомасштабних печей для повторного нагрівання, так що її потім успішно включено в популяційний генетичний алгоритм для мульти-об'єктивна оптимізація роботи печі повторного нагріву.

2. Це дослідження також показало, що розроблена модель здатна фіксувати нелінійну динаміку печі та має великий потенціал для безпосереднього включення в спеціальні алгоритми керування піччю.

3. Це дослідження також показало, що розроблена модель здатна фіксувати нелінійну динаміку печі та має великий потенціал для безпосереднього включення в спеціальні алгоритми керування піччю.

4. Як висновок, розроблена модель здатна фіксувати нелінійну динаміку печі та має великий потенціал для безпосереднього включення в спеціальні алгоритми керування піччю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки по виконанню курсовий роботи з ТАУ. КПТ, 2000.
2. Mevec D, Raninger P and Prevedel P 2019 Getting to Know your Own Induction Furnace: Basic Principles to Guarantee Meaningful Simulations Journal of heat treatment and materials 74(4) 267-76
3. Gireesha B J, Srinivasa C T and Shashikumar N S 2019 Entropy generation and heat transport analysis of Casson fluid flow with viscous and Joule heating in an inclined porous microchannel proceedings of the institution of mechanical engineers part e-journal of process mechanical engineering 233(5) 1173-84
4. Benoit M J, Han K B and Winkler S 2019 An assessment of the brazing performance of warm formed automotive heat exchangers International journal of advanced manufacturing technology 103(5-8) 1935-46
5. Kim D K and Sunderland P B 2019 Fire ember pyrometry using a color camera Fire safety journal 106 88-93
6. Zhou D and Cheng Sh 2019 Measurement study of the PCI process on the temperature distribution in raceway zone of blast furnace by using digital imaging techniques Energy 174 814-22
7. Zhang R, Cheng Yu and Li Ya 2019 Image-Based Flame Detection and Combustion Analysis for Blast Furnace Raceway IEEE Transactions on instrumentation and measurement 68(4) 1120-31
8. Abdykarim M, Berger J and Dutykh D 2019 Critical assessment of efficient numerical methods for a long-term simulation of heat and moisture transfer in porous materials International journal of thermal sciences 145
9. de Mello Luciano A, Moura L M and Mendes N 2019 A model for predicting heat, air and moisture transfer through fibrous materials International journal of thermal sciences 145
10. HodaSh N, Nassab S A G and Ebrahim J J 2019 Three dimensional numerical simulation of combustion and heat transfer in porous radiant burners international journal of thermal sciences 145

11. Bai X, Zheng Z and Nakayama A 2019 Heat transfer performance analysis on lattice core sandwich panel structures *International journal of heat and mass transfer* 143
12. Yadav D and Wang J 2019 Convective Heat Transport in a Heat Generating Porous Layer Saturated by a Non-Newtonian Nanofluid *Heat transfer engineering* 40(16) 1363-82
13. Sun Ch, Bai Bofeng and Lu W-Q 2019 Thermal Transport in Sheared Nanoparticle Suspensions: Effect of Temperature *Heat transfer engineering* 40(16) 1383-92
14. Bhagat A, Gijare H and Dongari N 2019 Modeling of a reaction control jet interacting with high-speed cross-flow in slip flow regime *Proceedings of the institution of mechanical engineers part g-journal of aerospace engineering* 233(13) 5029-44
15. Li F, Quay B and Wang P 2019 Transient thermal behaviors of a scaled turbine valve: Conjugate heat transfer simulation and experimental measurement *International journal of heat and mass transfer* 141 116-28
16. Shan L, Ma B and Li J 2019 Investigation of the evaporation heat transfer mechanism of a nonaxisymmetric droplet confined on a heated micropillar structure *International journal of heat and mass transfer* 141 191-203
17. Liao Y, Sun X and Sun B 2019 Transient gas-liquid-solid flow model with heat and mass transfer for hydrate reservoir drilling *International journal of heat and mass transfer* 141 476-86
18. Mevec D, Raninger P and Prevedel P 2019 Getting to Know your Own Induction Furnace: Basic Principles to Guarantee Meaningful Simulations *Journal of heat treatment and materials* 74(4) 267-76
19. Gireesha B J, Srinivasa C T and Shashikumar N S 2019 Entropy generation and heat transport analysis of Casson fluid flow with viscous and Joule heating in an inclined porous microchannel *proceedings of the institution of mechanical engineers part e-journal of process mechanical engineering* 233(5) 1173-84
20. Benoit M J, Han K B and Winkler S 2019 An assessment of the brazing

performance of warm formed automotive heat exchangers *International journal of advanced manufacturing technology* 103(5-8) 1935-46

21. Kim D K and Sunderland P B 2019 Fire ember pyrometry using a color camera *Fire safety journal* 106 88-93

22. Zhou D and Cheng Sh 2019 Measurement study of the PCI process on the temperature distribution in raceway zone of blast furnace by using digital imaging techniques *Energy* 174 814-22

23. Zhang R, Cheng Yu and Li Ya 2019 Image-Based Flame Detection and Combustion Analysis for Blast Furnace Raceway *IEEE Transactions on instrumentation and measurement* 68(4) 1120-31

24. Abdykarim M, Berger J and Dutykh D 2019 Critical assessment of efficient numerical methods for a long-term simulation of heat and moisture transfer in porous materials *International journal of thermal sciences* 145

25. de Mello Luciano A, Moura L M and Mendes N 2019 A model for predicting heat, air and moisture transfer through fibrous materials *International journal of thermal sciences* 145