

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра автоматизації виробничих процесів

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

« ____ » _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Розробка та дослідження системи керування температурою у
випалювальній машині типу ОК – 324»**

**«Development and research of the temperature control system in the
firing machine type ОК - 324»**

Виконав здобувач вищої освіти ІІ курсу
групи АК-21М (1,4)

151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

_____ Грязнов М.О.

« ____ » _____ 2022 р.

Керівник роботи

д.т.н., професор

_____ Мацуй А.М.

« ____ » _____ 2022 р.

Рецензент

_____ 2022 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ.....

1 Призначення та область застосування системи керування температурою у випалювальній машині.....

1.1 Короткі відомості про виробництво залізорудних окатишів

1.2 Загальна характеристика технологічного процесу виготовлення окатишів.....

1.3 Аналіз систем автоматизації, управління та контролю технологічних процесів виготовлення окатишів.....

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу.....

2.1 Огляд існуючих рішень керування температурою у випалювальній машині.....

2.2 Вимоги до автоматизованої системи керування в цілому.....

2.3 Вимоги до функцій, які виконуються системою.....

2.4 Вимоги до видів забезпечення.....

2.5 Обґрунтування структури АСК ТП з підсистемою керування температурою у випалювальній машині.....

3 Склад системи керування температурою у випалювальній машині.....

3.1 Розробка функціональних та структурних схем підсистем керування температурою у випалювальній машині.....

3.2 Вибір датчиків, первинних перетворювачів та виконавчих пристроїв.....

3.3 Вибір та обґрунтування промислового контролера та модулів введення-виведення.....

3.4 Інформаційне забезпечення АСК ТП.....

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу.....

4.1 Ідентифікація процесів температурної обробки окатишів в технологічних зонах випалювальної машини.....

4.2 Обґрунтування використання методів теорії керування з прогнозуючими моделями для керування параметрів при виготовленні окатишів.....

4.3 Розробка алгоритму вимірювання висоти шару окатишів.....

4.4 Комп'ютерне моделювання підсистем керування температурою у випалювальній машині, реалізованих на базі принципу комбінованого керування та типових регуляторів.....

4.5 Комп'ютерне моделювання підсистем керування температурою у випалювальній машині, реалізованих на основі методів теорії керування з прогнозуючими моделями.....

4.6 Порівняння енергетичної ефективності розроблених систем.....

Висновок.....

Література.....

Додаток А. Охорона праці.....

ВСТУП

Випалювання окатишів – це одна з самих важливих і складних стадій виробництва окатишів. Основною метою випалювання є отримання окатишів з оптимальними металургійними властивостями: максимальне видалення сірки і надання їм міцності, що забезпечує їх транспортування, перевантаження і виплавляння в доменних печах.

В процесі випалювання окатиші проходять зону сушіння, зону підігріву, зону випалювання, зону рекуперації і зону охолодження. В кожній зоні підтримується певний температурний і газовий режим.

Зона випалювання, як об'єкт автоматизації, є самою складною і важливою зоною при випалюванні залізородних окатишів. Керування технологічним об'єктом полягає у внесенні таких керуючих діянь, які компенсують збурення і тим самим, забезпечують досягнення мети керування технологічним об'єктом керування в складних технологічних умовах.

Таким чином, питання розробки системи керування температурним режимом процесу випалювання є актуальним прикладним завданням, сприяє зменшенню енерговитрат під час виробництва. Тому завданням магістерської роботи є створення системи керування температурою у випалювальній машині в умовах фабрики огрудкування.

Тільки модернізація, перехід на сучасні технології, концентрація капіталу та інтеграція виробництва дозволять українській металургії залишатися конкурентоспроможною на світовому ринку.

Автоматизація технологічних процесів є одним з вирішальних факторів підвищення продуктивності і покращення умов праці, а також підвищення якості продукції.

Мета і завдання випускної кваліфікаційної роботи. Метою роботи є підвищення рівня автоматизації технологічного процесу виготовлення окатишів,

допомогтися зниження витрат енергії. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести порівняльний аналіз, обґрунтувати вибір датчиків;
- розробити структурну та функціональну схеми систем автоматичного керування;
- вибрати та обґрунтувати структури системи управління та комплексу технічних засобів;
- перевірити систему на працездатність.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес виготовлення окатишів.

Предмет дослідження. Система керування температурою у випалювальній машині.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у роботі використовувались методи оптимізації, математичного описування об'єктів автоматизації і операційного обчислення, підвищення точності засобів вимірювання оптимізації (для забезпечення найкращого вибору вимірювальних пристроїв), прогнозуючі моделі.

Розрахункова частина досліджень проводилися на сучасних персональних комп'ютерах шляхом використання пакетів прикладних програм.

1 Призначення та область застосування системи керування температурою у випалювальній машині

1.1 Короткі відомості про виробництво залізорудних окатишів

Фабрика огрудкування Полтавського гірничо-збагачувального комбінату побудована за проектом інституту «Механообрчермет» в 1968 році. При проектуванні промислової фабрики був врахований досвід експлуатації досвідної фабрики огрудкування того ж комбінату. Пусково-налагоджувальні роботи по освоєнню технології виробництва офлюсованих окатишів були закінчені до кінця 1969 року. В процесі експлуатації фабрики здійснені заходи щодо вдосконалення устаткування і технології, які дозволили підвищити продуктивність устаткування і поліпшити якість окатишів.

Фабрика огрудкування є самостійним структурним виробничо-господарським підрозділом ПрАТ «Полтавський ГЗК». Основним завданням фабрики є виконання плану по виробництву і відвантаженню окатишів встановленої якості відповідно до затвердженого графіка, стандартів, що діють, і технічних умов при найменших витратах трудових, матеріальних, енергетичних і фінансових ресурсів.

Фабрика огрудкування проводить випуск обпалених залізорудних окатишів. Основні складові окатишів: концентрат залізорудний, вапняк, бентоніт.

Питомі норми витрати концентрату, вапняку, бентоніту на тонну окатишів визначаються згідно технологічної карти виробництва окатишів. У технологічній карті враховується якість концентрату (зміст заліза, SiO_2), що поставляється, а також вид окатишів з певною основністю.

Фабрика огрудкування має безперервний цикл виробництва. Згідно технічній документації з експлуатації опалювальної машини (ОК 324/336), через кожні два тижні виробництва машину треба зупиняти на 12 годин, для

проведення планово – попереджувальних ремонтів. Крім того, кожні півроку виконуються середні ремонти комплексу устаткування ОК 324/336 із заміною кладки горна (вогнестійка цегла), час зупинки машини два тижня. Один раз в три роки відбувається капітальний ремонт машини – повна заміна вогнестійкої цегли (ремонт зводу), час зупинки три тижні.

1.2 Загальна характеристика технологічного процесу виготовлення окатишів

Цех огрудування окатишів ПрАТ «ПГЗК» складається з складу сирих матеріалів, корпусу підготовки шихти, приготування сирих окатишів, випалювання окатишів та склад готової продукції. Виробнича структура фабрики, основних технологічних дільниць та ремонтних служб представлена на рисунку 1.

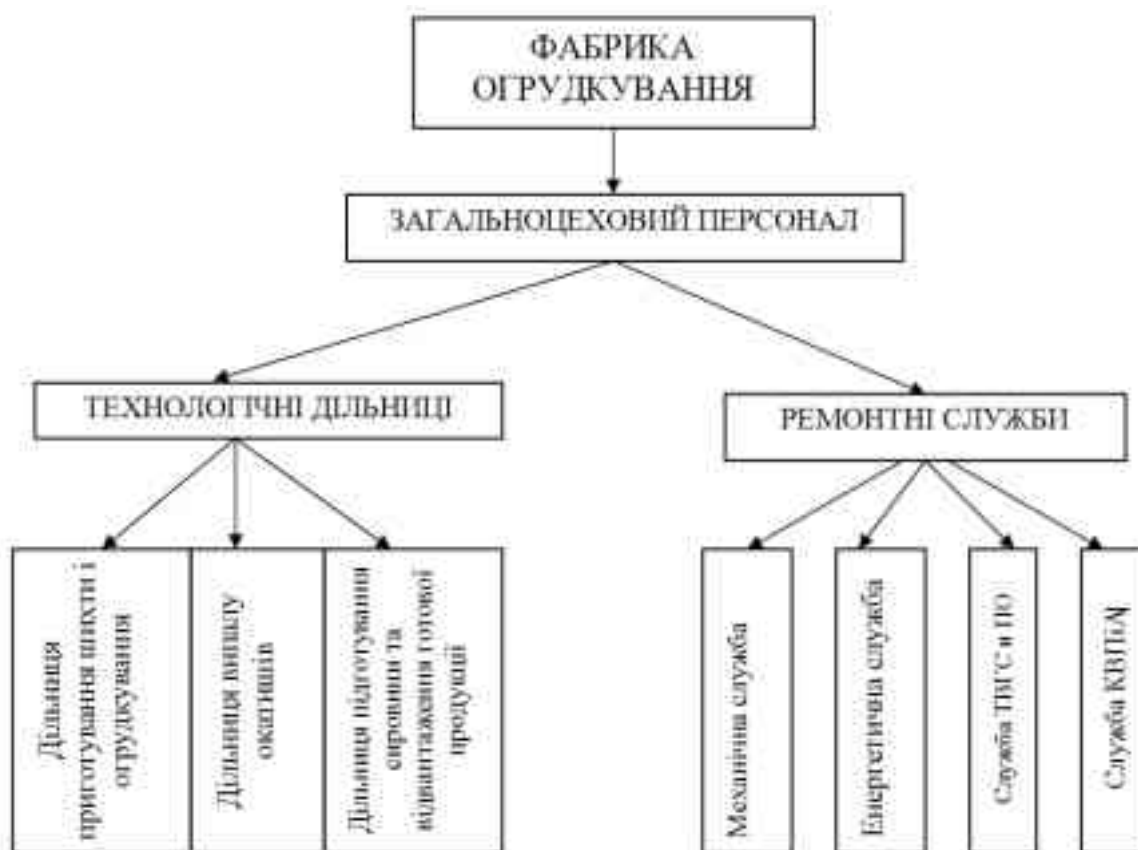


Рисунок 1.1 – Виробнича структура ПрАТ «ПГЗК»

Далі більш детально розглянемо зміст основних технологічних операцій, їх послідовність та залежність один від одного (рис.1.2).

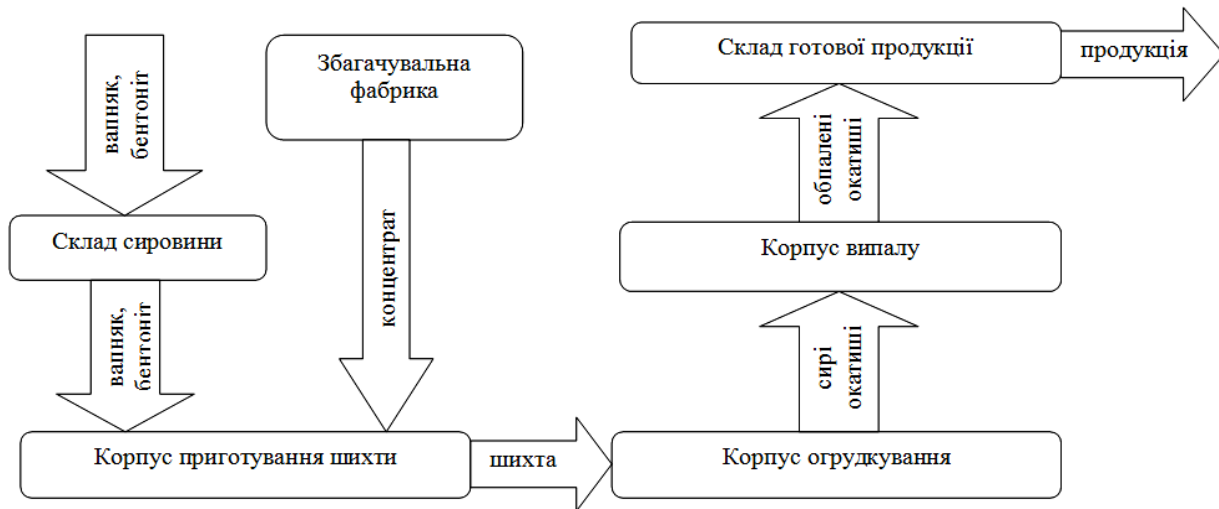


Рисунок 1.2 – Технологічний процес виробництва окатишів

1. Спочатку відбувається постачання вапняку та бентоніту на склад сировини. Склад сировини є відкритим майданчиком розмірами 156х46 метрів з поглибленням на 69 метрів з розвантажувальною траншеєю, обладнаною трьома консольно-козловими кранами, розділену перегородкою на два відділення: для вапняку та бентоніту, а також майданчик розмірами 36х32 метри для підлогового складування матеріалу.

2. Далі на ділянку приготування шихти поступають всі компоненти шихти для отримання окатишів: залізорудний концентрат, вапняк, бентоніт, зворотні відходи. Матеріали, що поступають в цех, повинні відповідати за якістю технічним умовам, мати паспорти з вказівкою якості і ваги кожної партії. Для отримання контролю за якістю сировини, що поступає на склад, ділянка технічного контролю зобов'язана піддати випробуванню кожну партію сировини згідно карті випробування. Хімічні аналізи складових шихти передаються операторові ділянки та служать майстрові зміни і дозувальнику підставою для коректування дозування компонентів. Тепер більш детально зупинимося на компонентах.

Концентрат – це основний складник шихти, системою конвеєрів подається зі складу збагачувальної фабрики витратні бункери (об'ємом 100 м³ кожен)

ділянки приготування шихти. Заповнення витратних бункерів концентратом проводиться за допомогою реверсивних пересувних конвеєрів. Якість концентрату задається технологічною картою.

Вапняк – додається в шихту як флюсувальна добавка. Вапняк прибуває в піввагонах партіями до 4000 тонн і розвантажується на естакаді складу сирих матеріалів. З-під естакади вапняк кранами грейферів формується в штабель, а потім в самохідні бункери. Далі на ділянці приготування шихти підготовка вапняку, для подальшого використання, здійснюється в дві стадії: а) подрібнення початкового матеріалу в молоткових дробарках до фракції 20 мм; б) подрібнення роздрібнюваного вапняку в кульових млинах сухого подрібнення до фракції 0,071мм.

Бентоніт – застосовується як добавка, що зв'язує, в шихті для поліпшення якості сирих окатишів і інтенсифікації сушки при термообробці. Вагони з бентонітом на складі сирих матеріалів розвантажується аналогічно вапняку. До складу комплексу підготовки бентоніту входить: відкритий склад, вузол підготовки, корпус сушки і критий склад. Бентоніт зі штабелю відкритого складу краном грейфера завантажується в самохідний бункер, а потім системою конвеєрів завантажується в вузол підготовки. Далі краном подається в стаціонарний бункер і системою конвеєрів завантажується в сушильний барабан корпусу сушки. Висушений бентоніт подається в закритий склад, а потім поступає в початкові бункери кульових млинів для подальшого подрібнення.

Тепер зупинимось більш детально на обладнанні корпусу приготування шихти. Ділянка об'єднує в одному комплексі:

- а) корпуси дроблення і сушки бентоніту з обслуговуючими їх самохідними бункерами та системою конвеєрів;
- б) відділення подрібнення сирих матеріалів у складі 5-ти установок подрібнення (система млинів);
- в) відділення приготування шихти з комплексом бункерів, дозаторів, конвеєрів, пневмотранспортом, ваговимірювачів і змішувачів на 2-х паралельних

потоках шихти. Слід відзначити, що в цеху передбачено автоматичне дозування всіх компонентів шихти, яка забезпечує стабілізацію дозування.

Загалом, правильно складена, ретельно дозована шихта, стабілізує процес огрудкування, від чого поліпшується якість сирих окатишів, збільшується продуктивність огрудкувачів та випалювальної машини. Склад шихти визначається розрахунком, виходячи з хімічного складу компонентів і заданого хімічного складу випалених окатишів. Основне завдання процесу отримання шихти полягає в правильному і точному дозуванні її компонентів.

3. Приготована шихта поступає в корпус огрудкування. Спочатку шихта системою конвеєрів подається у витратні бункери і за допомогою стрічкових дозаторів подається на чашеві огрудкувачі. Готові сирі окатиші вивантажуються на збірні конвеєри напівсекцій і потім загальним збірним конвеєром подаються на випалювальну машину.

Якість сирих окатишів залежить від однорідності шихти, вологості і рівномірному розподілу вапняку та бентоніту по всій масі шихти, від часу обливання шихти в чашовому огрудкувачі, від змісту та якості добавок. Однорідність шихти досягається при правильному дозуванні складових шихти і їх ретельному перемішуванні. При огрудкуванні однорідної шихти всі окатиші утворюються з однаковою швидкістю, набувають однакових розмірів і властивостей, при цьому вихід придатного класу максимальний.

Якщо дозування і перемішування шихти незадовільне, то окатиші виходять різної форми, в них міститься багато дрібних фрагментів, що погіршує умови випалювання і знижує продуктивність випалювальної машини.

4. Після огрудкування сирі окатиші поступають на ділянку випалювання у машину ОК-324. Випалювальна машина ОК-324 призначена для термічної обробки окатишів із залізорудних концентратів з метою набуття ним необхідних фізико-хімічних і механічних властивостей. Машина є тепловим агрегатом конвеєрного типу з безперервним процесом завантаження, термообробки і розвантаження окатишів.

Сирі окатиші, з відділення огрудкування стрічковим конвеєром, після зважування на конвеєрних вагах, подаються на човниковий укладальник завантажувального пристрою, де потік окатишів рівномірно розподіляється на широкий тихохідний проміжний конвеєр. З нього окатиші розвантажуються на роликовий гуркіт-укладальник, з якого поступають на візки обпалювальної машини. Для захисту обпалювальних візків машини на них укладається донна і бортова постіль з випаленого некондиційного окатишу. Сирі окатиші, укладені на ліжко, просуваючись на обпалювальних візках машини з певною швидкістю, через відповідні технологічні зони, піддаються сушці, підігріву, високотемпературному випаленню і охолодженню.

Випалені окатиші від випалювальної машини стрічковими конвеєрами прямують в перевантажувальний вузол на грохочення. Грохот класифікує окатиші по гранулометричному складу на чотири фракції: 0-6 мм, 6-10 мм, 10-16 мм і понад 16мм. Частина окатишів після грохоту величиною 10-16 мм системою конвеєрів прямує на опалювальну машину для використання як захисне ліжко. Фракція 0-6 мм представляє собою зворотні відходи та подаються в корпус шихти для подрібнення та додавання в суміш. Кондиційні окатиші фракцією 6-10 мм прямують на склад готової продукції, де за допомогою штабелеукладчика закладаються в штабель.

Далі, наведемо деякі технічні характеристики випалювальної машини ОК-324 (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики випалювальної машини ОК-324

№ п/п	Найменування	Розмірність	Значення
1.	Площа активних технологічних зон	м ²	324
2.	Робоча площа продуву.	м ²	336
3.	Загальна довжина робочої поверхні.	м	84
4.	Робоча ширина машини.	м	4
5.	Потужність по готовим окатишам, до	т/год	259,2

6.	Площа по зонах:	м ²	
6.1.	Сушки 1		60
6.2.	Сушки 2		18
6.3.	Підігріву		24
6.4.	Випалювання 1		36
6.5.	Випалювання 2		48
6.6.	Рекуперації		24
6.7.	Охолодження 1		60
6.8.	Охолодження 2		66
7.	Швидкість руху випалювальних візків	м/хв.	0.72...2.52
8.	Висота слою сирих окатишів, до	мм	400
9.	Висота слою донної постілі.	мм	100
10.	Кількість випалювальних горілок пристроїв	шт.	18
11.	Максимальна розрахункова температура теплоносія над шаром окатишів по зонах:	°C	
11.1.	Сушки 1		80
11.2.	Сушки 2		350
11.3.	Підігріву		600 ÷ 800
11.4.	Випалювання 1		1000 ÷ 1200
11.5.	Випалювання 2		1300
11.6.	Рекуперації		900
11.7.	Охолодження 1		1020 ÷ 910
11.8.	Охолодження 2		440 ÷ 120
12.	Потужність електроприводу.	кВт	22
13.	Маса машини із електроустаткуванням /без запчастин/.	т	2614

Що собою представляє дана випалювальна машина: це тепловий агрегат конвеєрного типу з безперервним процесом завантаження, термообробки та розвантаження окатишів.

Машина має механічну та теплову частини, які змонтовані на каркасі.

Механічна частина складається з: 142 випалювальних візків, які утворюють конвеєр; замкнутих напрямляючими, по яких рухаються

випалювальні візки; приводу з привідними зірочками; розвантажувального пристрою.

Теплова частина машини включає у себе: горн з форкамерами та інжекційними горілочними пристроями, кожухи горну, переточний колектор, газоповітряні камери та ущільнення.

Колосникове поле випалювальних візків, які розташовані між горном зверху та газоповітряними камерами знизу, які утворюють робочу площу, яка дорівнює 336 м². У відповідності з технологічним призначенням, робоча площа машини у довжину поділяється на зони: сушки 1 та сушки 2; підігріву; випалювання 1 та 2; рекуперації; та охолодження 1 та 2.

Процес, який проходять у шарах окатишів складаються з двох різних видів процесів – низькотемпературного (склад шихти та формування сирих окатишів) та високотемпературного (ущільнення окатишів). Ці процеси взаємопов'язані, тому що властивості готового продукту визначаються складом шихти та якістю сирих окатишів.

В процесі термообробки сирих окатишів відбувається цілий ряд фізико-хімічних перетворень:

- 1) Видалення вологи;
- 2) Розклад карбонатів;
- 3) Десульфакція;
- 4) Окислення магнетиту; твердофазні реакції; утворення рідкої фази;
- 5) Рекристалізація рудної фази;
- 6) Утворення кінцевої структури при охолодженні вже випалених окатишів.

Розглянемо призначення кожної технологічної зони окремо:

Видалення вологи.

Зони сушіння на конвеєрній машині необхідні для підготовки окатишів до високотемпературного випалювання. У процесі сушіння по шарах залізорудних окатишів відбувається перерозподіл вологи по висоті шару. У першу чергу нагрівається поверхня окатишів, що контактує з газом-теплоносієм. При цьому

відбувається часткове переміщення води в рідкому стані від більш гарячого до менш нагрітого шару окатишів. У результаті в окремих зонах шару окатишів спостерігається їх перезволоження. Цьому сприяє і конденсація вологи з газу. Переміщення вологи в рідкому вигляді від одних окатишів до інших або в обсязі одного окатиша від поверхні до центру послаблює міцність зв'язку між частинками, що призводить до зниження міцності структури, а в деяких випадках до повного руйнування окатишів.

Перезволоження окатишів має місце на початку сушки. На якість випалених окатишів істотно впливає режим сушіння. При збільшенні інтенсивності сушіння можливе різке зниження міцності окатишів, аж до руйнування. Саме цей фактор визначає критичну температуру та швидкість сушіння.

Підвищення термічної стійкості окатишів дозволяє підвищити початкову температуру сушильних газів і, отже, інтенсифікувати процес сушіння.

Розкладання карбонатів.

У шихті для виробництва окатишів флюсувальним компонентом є вапняк.

Карбонати кальцію і магнію, що входять до складу вапняку, при нагріванні розкладаються з реакцій:



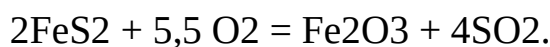
Початок розкладу карбонатів відбувається в інтервалі 660-770 ° С. Вміст двоокису вуглецю в продуктах горіння, над шаром окатишів становить близько 10%. Тоді при тиску газу 1 атмосфери парціальний тиск двоокису вуглецю складе в середньому 0,1 ат, пружність дисоціації CaCO_3 буде відбуватися при 771°С.

При зменшенні концентрації двоокису вуглецю в газі (наприклад: при збільшенні надлишку повітря при горінні) температура початку розкладання вапняку знижується. При тиску двоокису вуглецю в газі 0,05 ат ця температура дорівнює 736 ° С, при 0,01 ат - 662 ° С.

Десульфурация.

У рудах більшості типів, сірка знаходиться у вигляді хімічних сполук із залізом. Найбільш часто зустрічаються сполуками сірки є пірит і піротин.

При низьких температурах, менше 600-700°C горіння піриту здійснюється з реакції:



Проте лише невелика кількість виділяється при цьому сірки видаляється з випалюваного шару окатишів.

Окислення магнетиту.

В основному окатишів виготовляють з магнетитового концентрату. При окислювально-зміцнюючому випалюванні має місце окислення магнетиту до гематиту. Цей процес має важливе значення для властивостей кінцевого продукту. Перетворення магнетиту в гематит супроводжується з помітним виділенням тепла:



Реакція окислення і інші явища, що мають місце при випалюванні окатишів, можуть лімітувати або швидкістю хімічної реакції (реакцією на кордоні фаз) або швидкістю транспортування реагентів (у газовій або твердій фазі), або швидкістю теплообміну.

Окислення магнетиту в окатишах починається при 300 ° С, найбільшим ступенем окислення відрізняються окатиші, випалені при температурі 1000-1150°C. З підвищенням температури випалювання, вище 1200 ° С окислення окатишів знижується.

Твердофазні реакції.

У процесі нагрівання і випалення окатишів помітний розвиток набуває хімічні реакції між твердими компонентами окатишів. Ці реакції певним чином впливають на протікання процесів зміцнення твердими. Для твердими певне значення мають реакції, що протікають між окисом кальцію і магнезію, кремнеземом і оксидами заліза.

При випалі твердими в шихті знаходяться наступні основні матеріали, які можуть контактувати один з одним і між якими можливі хіміко-мінералогічні впливи: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , SiO_2 , CaO . Продуктами їх взаємодії є три типи з'єднання: силікати кальцію (CaSiO_4), силікати заліза (FeSiO_4) і ферит кальцію (CaOFe_2O_3), $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ і $\text{CaO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$. Температури початку утворення цих сполук становлять відповідно 500-600, 970 і 400 ° С.

Для офлюсованих твердими важливе значення має взаємодія між окисом кальцію і оксидами заліза. Повне протікання цієї реакції забезпечує відсутність вільної вапна і підвищує стійкість твердими проти руйнування при зберіганні.

Створення розплаву.

До моменту початку плавлення у звичайних умовах випалювання окатишів вже повністю завершені сушка, дегідратація, декарбонізації і твердофазні реакції. В ході окислення і реакцій між твердими фазами утворюються речовини, температура плавлення яких значно нижча, ніж температура плавлення компонентів вихідної шихти. Так, якщо температура плавлення гематиту (Fe_2O_3) складає 1565 ° С, магнетиту (Fe_3O_4) -1597 ° С, кварцу-1713 ° С, CaO -2585 ° С, то плавлення фаяліта (FeSiO_4) відбувається вже при 1205°С, а одноколькового фериту (CaFe_2O_3) - при 1200 ° С.

Знову утворилися в ході спікання легкоплавкі речовини, плавляться першими, розчиняючи в собі масу шихти. При випалюванні окатишів розвиток рідких фаз прагнуть обмежити, щоб не допустити спікання окатишів в грона.

Рекристалізація.

Провідною причиною зміцнення окатишів висувається рекристалізація зерен гематиту. Створення розплаву істотно не збільшує міцність окатишів. При вивченні властивостей окатишів поняття рекристалізації і зміцнення тісно пов'язані.

У металургії під терміном «рекристалізації» розуміють процес повторної кристалізації, яка відбувається у твердому тілі.

Зона сушіння.

У зоні сушіння відбувається основне зневоднення сирих окатишів і підготовка їх до подальшої обробки. Для випаровування вологи в зони подається теплоносії.

З метою запобігання деформації і руйнування гранул, що виникають при конденсації, передбачені дві сушки з протилежним напрямком теплоносія:

- зона сушіння I,
- зона сушіння II.

У зону сушіння I теплоносії з температурою 300-350°C подається з димососів Д15000-12-1 (Д1), із зони охолодження через газоповітряні камери проходячи через шар окатишів, вони нагріваються і підсушуються знизу, температура розігрітого газу, що подається в зону сушіння II - 250-350°C. Відпрацьовані гази зони сушіння I, пройшовши вологу очистку в скруберах - краплевловлювача з трубами Вентурі, димососи ДН26*2-0,62 (Д5) викидаються в димову трубу.

Для часткового підвищення температур вологих газів, що відходять з шарів у зоні сушіння I і запобігання конденсації вологи на стінках кожуха передбачена подача теплоносія з температурою 350°C, з ковпака зони сушіння II. Горн сушіння I працює під розрідженням 30-100Па.

У зону сушіння II, розташовану над камерами, теплоносії подається з колектора відпрацьованих газів температурою 250-350°C.

Просмоктуванням теплоносія через шар окатишів висушуються верхні горизонти шару. Сумарна ефективність сушіння окатишів в зонах сушіння I і II складають 60-80%.

У ковпаку зони сушіння II підтримують розрідження 10-50Па, шляхом регулювання подачі і відсмоктування через шар газів.

Із зони сушки II відпрацьовані гази після мокрої газоочистки у скрубера-краплевловлювача з трубами Вентурі димососів Д27,5*2 (Д2) скидаються в димову трубу.

Зона підігріву.

Зона підігріву призначена для підготовки до високотемпературного нагріву 600÷800°C окатишів в зонах випалювання, прогріву верхньої частини шару до 600°C, завершення сушіння нижніх горизонтів шару. Розрідження у горні 10-70Па.

Випалювальні зони.

У випалювальних зонах, окатиші обробляють високотемпературними продуктами згоряння природного газу і вторинним теплоносієм із зони охолодження I просмоктуванням через шар. Природний газ спалюють 9-тьма парами інжекційних пальників, розташованими над кожною вакуум-камерою зон підігріву, випалення I і II по обидва боки машини.

Зони обладнані спеціальними камерами - форкамерами. Процес горіння у форкамерах сприяє вирівнюванню температурних полів і рівномірності випалювання по всій ширині випалювальних візків. Для спалювання газу на інжекційні пальники вентилятором ВДН-12, 5 подається первинне повітря.

Для отримання необхідної для випалювання окатишів кількості і температури теплоносія над шаром окатишів при мінімальній витраті палива в ці форкамери із зони охолодження I, через припливний колектор і опускні патрубки подається теплоносій з температурою 880 С°.

Для зниження витрат природного газу на термообробку окатишів, збільшення продуктивності машини та покращення якісних показників готових окатишів до складу шихти огрудкування вводиться 0,5-1,0% твердого палива.

До кінця зони вигорання вуглецю в складі окатишів верхнього та середнього горизонтів шару практично повністю завершується.

Зона рекуперації.

У неопалювальній зоні рекуперації закінчуються процеси випалювання окатишів і формування міцності в нижніх горизонтах шару окатишів шляхом переносу тепла повітрям з верхніх ділянок шару. Зона рекуперації розташовується над вакуум-камерами.

В якості теплоносія в зоні використовується перетічне повітря з охолодження І з температурою 800-920°C.

У зоні завершується вигорання вугілля в складі окатишів. Температура газів під шаром - $400 \pm 50^{\circ}\text{C}$.

Зона охолодження.

Зони охолодження розташовані над вакуум-камерами. Для охолодження застосовується нереверсивна схема подачі охолоджуючого повітря по всій довжині зони, яка розділена на підзони: охолодження І, ІІ. Поділ здійснено за принципом споживання одержуваного теплоносія і забезпечення достатніх швидкостей фільтрації повітря через шар.

У зоні І починається поступове охолодження окатишів холодним повітрям, що відходить із зони охолодження І і нагрітій до температури 800-920°C повітря надходить у колектор прямого перетікання і використовується як теплоносій для розведення продуктів спалювання природного газу в зонах підігріву, випалення І і ІІ, а також у зоні рекуперації.

Зона охолодження ІІ призначена для охолодження шару окатишів до температури менше 120°C, для чого атмосферне повітря вентилятором ВДН 25*2 подається в зону через повітряні камери і проходячи через шар окатишів знизу вгору охолоджує їх. Нагріте у шарі повітря, подається в зону сушіння І.

Також, розглянемо параметри газоповітряних сумішей, які використовуються для випалювання окатишів:

Для випалу залізорудних окатишів на випалювальній машині ОК-324 використовують природний газ, склад і характеристика якого наведена в табл.1.2.

Таблиця 1.2 – Характеристика природного газу згоряння

Показники	Зазначення	Розмірність	Значення
метан	CH ₄	% об'єму	92,0
етан	C ₂ H ₆	% об'єму	2,5-29
пропан	C ₃ H ₈	% об'єму	0,75-0,8
бутан	C ₄ H ₁₀	% об'єму	0,23-0,26
пентан	C ₅ H ₁₂	% об'єму	2,5-3,4
азот	N ₂	% об'єму	0,36-0,40
двоокис вуглецю	CO ₂	% об'єму	0,36-0,40
сірководень та меркаптани		мг/нм ³	60-80
Теплота згоряння природного газу	Q _н	ккал/нм ³	8400

Випалені окатиші з випалювальної машини подаються на склад готової продукції конвеєром. Склад представляє собою підлоговий майданчик розмірами 324х32 метри, обладнаний екскаваторами для усереднення окатишів і завантаження вагонів, конвеєрами та штабелеукладчиком.

1.3 Аналіз систем автоматизації, управління та контролю технологічних процесів виготовлення окатишів

В цеху огрудкування ПрАТ «ПГЗК» використовується декілька основних систем автоматизації технологічних процесів, які безумовно залежать від сфери їх застосування.

У відділі підготовки шихти до випалювання, та змішування необхідних компонентів, використовується система автоматичного керування, яка забезпечує постійну та надійну роботу млинів, які змішують всі компоненти (вапняк, бентоніт, концентрат) для отримання шихти. Використання цієї системи дозволяє отримувати шихту постійної якості, та утримувати процес без втручання людини.

У відділі огрудкування шихти до форми окатишів, використовується автоматизована система конвеєрної подачі шихти до барабанів-огрудкувачів, зволоження шихти у барабанах та вивезення кондиційних окатишів до цеху випалювання.

У самому ж цеху випалювання окатишів налагоджене безперервне та автоматичне виробництво, яке передбачає постійну подачу окатишів до випалювальної машини ОК-324, та розвантаження вже випалених, та охолоджених окатишів до складів. Також, на даному етапі виробництва використовується система слідкування, яка дає змогу слідкувати за роботою цілої фабрики огрудкування, тобто відстежувати у реальному часі всі необхідні для контролю дані (температура у зонах сушки/підігріву/випалювання, тиску в тих же зонах, витрати горючого газу, ваги, висоти шару окатишів і т.ін.).

Всі дані зберігаються протягом одного місяця на головному сервері, тобто у будь-який момент часу, можна переглянути будь-який параметр на ФОГ з точністю до 5-ти секунд (це обумовлено періодом знімання інформації в 5 сек.).

Автоматизована система керування технологічними процесами, розроблена для Полтавського ГЗК, являє собою ряд систем автоматизації випалювальної машини ОК-324 на базі мікропроцесорної техніки.

У них входять наступні підсистеми, які складаються з одного завдання або комплексу завдань:

1. Підсистема контролю та керування завантаженням випалювальної машини:
 - стабілізація висоти донною постелі;
 - регулювання висоти шару окатишів.
2. Підсистема контролю та керування газоповітряним режимом процесу випалювання;
 - регулювання тиску гарячого повітря в зоні підігріву;
 - стабілізація тиску в горні;
 - стабілізація тиску в ковпаку "нульової" вакуум-камери;
 - стабілізація тиску в ковпаку зони сушіння 1;

- стабілізація тиску в газоповітряній вакуум-камері № 2;
- стабілізація тиску в ковпаку зони сушіння 2.

3. Підсистема контролю та керування температурним режимом процесу випалювання:

- регулювання температури в ковпаку зони сушіння 1;
- регулювання температури на вході в димососі Д1;
- регулювання температури в горновому просторі під провідними пальниками;
- регулювання витрати газу у ведені пальники;
- регулювання температури в ковпаку зони сушіння 2;
- регулювання температури на вході в димосос Д3;
- регулювання температур середніх у газоповітряних вакуум-камерах;
- регулювання температури в ковпаку зони охолодження 2;
- регулювання температури в газопроводі після зони охолодження 2;
- регулювання витрати газу у ГППП № 1-5.

4. Підсистема раціонального керування теплотехнічним режимом процесу випалювання окатишів.

5. Підсистема контролю та захисту випалювального агрегату від перегріву:

- дії при короткочасних зупинках випалювальної машини;
- дії при запланованому тривалій зупинці випалювальної машини;
- дії при аварійній зупинці випалювальної машини;
- дії при припиненні подачі сирих окатишів.

6. Підсистема обліку питомих витрат енергоресурсів:

- розрахунок питомої витрати електроенергії;
- розрахунок питомої витрати природного газу;
- видача даних у формі рапорту;
- задача розрахунку та контролю пористості шару сирих окатишів.

7. Підсистема керування допоміжним устаткуванням:

- регулювання тиску повітря на поздовжнє ущільнення випалювальної машини;

- регулювання маси окатишів у бункері донної постелі;
- регулювання маси окатишів у бункері готової продукції.

8. Підсистема автоматизації процесів огрудкування:

- розрахунок середньої крупності і вологості окатишів;
- розрахунок навантажень на огрудкувачі;
- контроль і керування подачею сировини;
- контроль і керування крупністю окатишів.

9. Підсистема контролю технологічних параметрів.

Перераховані вище підсистеми розподіляється по мікропроцесорних комплексах з урахуванням завантаженості оперативної пам'яті і засобів.

Технологічні параметри, що входять у ці підсистеми і завдання, контролюються. Частина параметрів регулюється, розрахунок і видачу керуючих впливів виконують контролери, розташовані на нижньому рівні керування.

Застосування контролерів збільшує надійність систем автоматизації, особливо при відмові ЕОМ.

Оперативний персонал не повинен втручатися в роботу МПК коли він знаходиться в працездатному стані.

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу

2.1 Огляд існуючих рішень керування температурою у випалювальній машині

Підсистема контролю та управління процесом подачі горючого газу до горілок в випалювальних камерах входить до складу автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСК ТП) фабрики огрудкування (ФОГ) і призначена для стабілізації витрати горючого газу. Підсистема повинна виконувати наступні задачі:

- стабілізація витрати горючого газу;
- регулювання співвідношення швидкість машини – температура;
- регулювання співвідношення висота шару – температура;
- регулювання співвідношення температура – швидкість машини;
- корегування витрат горючого газу в залежності від зміни будь-якого із розглянутих вище співвідношень;
- контроль температури по технологічних зонах;
- контроль рівня окатишів у випалювальних візках;
- візуалізація ходу технологічного процесу та контроль стану основного обладнання.

Підсистема контролю та управління процесом подачі горючого газу до горілок у випалювальних камерах повинна бути побудована за ієрархічним принципом і складатися з рівнів:

- Перший рівень підсистеми складають датчики та виконуючі пристрої.
- Другий рівень системи повинен бути реалізований на базі промислових логічних контролерів та виконувати функції стабілізації витрати горючого газу; визначення рівня окатишів у випалювальних візках, визначення температури по

технологічних зонах.

При реалізації інформаційних та керуючих функцій на кожному рівні автоматизації система повинна бути децентралізованою.

Компоненти підсистеми повинні забезпечувати можливість передачі інформації в умовах наявності електромагнітних полів і перешкод на відстані від 3 км зі швидкістю 100 Мб/с.

Для інформаційного обміну між компонентами системи необхідно забезпечити можливість стикування з інтерфейсами обладнання, що використовується, включаючи датчики та виконуючі механізми.

Режим функціонування підсистеми контролю та управління процесом подачі горючого газу до горілок у випалювальних камерах – безперервний.

При нормальній роботі підсистеми повинні перевірятися канали зв'язку нижнього і верхнього рівня, а також пристрої дискретного виходу в каналах керування технологічним процесом.

В системі повинна бути передбачена можливість модернізації без зміни структури технічного та програмного забезпечення.

2.2 Вимоги до системи керування в цілому

Вимоги до чисельності та кваліфікації персоналу.

Чисельність персоналу визначається рекомендаціями заводів-виробників комплексу технічних засобів (КТЗ). Персонал підсистеми контролю і управління повинен пройти навчання на відповідних курсах.

Вимоги до показників призначення.

Ступінь пристосовуваності підсистеми до змін процесів і методів управління повинен забезпечувати реалізацію керуючих функцій під впливом збурюючих факторів: коливань фізико-хімічних властивостей матеріалів за основними переділами в межах ТУ і коливань напруги живлення в межах ГОСТ 13109 «Електрична енергія».

Підсистема повинна забезпечувати можливість модернізації. Довірча ймовірність реалізації керуючих та інформаційних функцій системи, при якій зберігається її цільове призначення, за 1000 годин повинна бути не менше 0,9.

Вимоги до надійності.

Вимоги до надійності відносяться до відмов регулюючих контролерів, інтерфейсних каналів зв'язку між ними, засобів зв'язку оператора-технолога з системою, окрім пристроїв друку.

Комплекс технічних засобів повинен мати середній час напрацювання на відмову:

- при реалізації керуючих функцій – не менше 1000 годин;
- при реалізації інформаційних функцій – не менше 4000 годин.

Для підсистеми в якості показника довговічності приймаємо середній термін служби не менш 10 років.

Середній час відновлення будь-якої частини системи після відмови – не більше 1 години.

Вимоги до надійності окремих технічних засобів системи повинні відповідати вимогам, наведеним в технічній документації на ці засоби.

Вимоги до безпеки.

Вимоги до безпеки засобів обчислювальної техніки, що використовуються в підсистемі контролю та управління процесом подачі горючого газу до горілок в випалювальних камерах АСК ТП ФОГ, повинні відповідати ГОСТ 25861-83 та ГОСТ 20397-82.

Зовнішні елементи технічних засобів, що знаходяться під напругою, повинні мати захист від випадкового дотику, а самі засоби повинні мати захисне заземлення у відповідності до вимог ГОСТ 12.1.030-81.

Технічні засоби системи повинні бути встановлені таким чином, щоб забезпечити їх безпечну експлуатацію та технічне обслуговування.

Монтаж, експлуатація, обслуговування і ремонт технічних засобів підсистеми повинні виконуватися у відповідності з «Правилами техніки безпеки

при експлуатації електроустановок», ГОСТ 12.3.032-84 і «Правилами улаштування електроустановок».

Вимоги безпеки повинні бути встановлені спеціальними розділами посадових інструкцій та «Інструкцій з експлуатації АСК ТП ФОГ» і мати посилання на інструкції з експлуатації технічних засобів».

Рівні електромагнітних випромінювань не повинні перевищувати значень, встановлених ГОСТ 12.1.006-84.

Рівні шуму та звукової потужності в місцях розташування персоналу АСК ТП не повинні перевищувати значень, встановлених ГОСТ 12.1.003-83 та санітарними нормами.

Рівні освітленості робочих місць персоналу АСК ТП повинні відповідати характеру і умовам праці. На робочих місцях повинен бути передбачений захист від осліплюючого світу та усунення відблисків.

Вимоги до ергономіки і технічної естетики.

Загальні ергономічні вимоги до мнемосхем повинні відповідати вимогам ГОСТ 21480-76, до моніторів, призначених для відображення візуальної інформації – ГОСТ 29.05.006-85, до пультів оператора-технолога – ГОСТ 23000-76.

Загальні ергономічні вимоги, що регламентують організацію робочого місця оператора-технолога, взаємне розташування засобів відображення інформації, органів керування і засобів зв'язку в межах робочого місця повинні відповідати вимогам ГОСТ 22269-76.

Вимоги до експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і зберігання компонентів системи.

Умови експлуатації, при яких повинно забезпечуватися використання технічних засобів АСК ТП із заданими технічними показниками повинні відповідати умовам, вказаним в технічній документації на ці засоби.

Площі розміщення технічних засобів системи повинні відповідати площам, вказаним в технічній документації на них.

Припустимі кліматичні умови роботи обчислювальної техніки повинні бути в межах:

- температура оточуючого повітря від 10 до 35 °С;
- відносна вологість при 30 °С від 40 до 80%;
- атмосферний тиск до 107 кПа.

Частота вібрації в зоні розташування засобів обчислювальної техніки не більше 25 Гц амплітудою до 0,1 мм.

За стійкістю до ударних впливів технічні засоби повинні відповідати вимогам ГОСТ 21552-84.

В операторський приміщеннях потрібно передбачити кондиціонування повітря. Кратність обміну повітря не менше двох в годину. Концентрація корозійно-активних речовин в повітрі не повинна перевищувати гранично допустимих норм згідно СНіП 11-12-77 і ГОСТ 9.303-84.

Вимоги до захисту інформації від несанкціонованого доступу.

В АСК ТП повинні бути передбачені програмні та технічні міри захисту від неправильних дій персоналу, що призводять до аварійного стану технологічного обладнання, системи управління, а також від випадкових змін та руйнування інформації й програм.

Вимоги до захисту інформації при аваріях.

У випадку відмов технічних засобів (в тому числі і при втраті живлення) повинна зберігатися на пристроях довготривалого зберігання про техніко-економічні показники ділянки дозування компонентів шихти.

Повинні фіксуватися в твердій копії факти виходів технологічних параметрів за встановлені межі; події включення або відключення обладнання; досягнення контрольованих рівнів; змін, що вносяться оператором-технологом в технологічний процес і систему з прив'язкою цих подій до астрономічного часу.

Вимоги до захисту від зовнішніх впливів.

Рівень індустриальних радіоперешкод, що створюються під час роботи

АСК ТП, а також при її включенні та відключенні, не повинен перевищувати величин, встановлених ГОСТ 23450-79.

За стійкістю до зовнішніх збурюючих факторів середовища використання АСКТП повинна задовольняти вимогам ГОСТ 12997-84 для промислових приборів і засобів автоматизації, ГОСТ 17516-72 – для виробів електротехніки в частині впливу механічних факторів зовнішнього середовища і ГОСТ 21552-84 для засобів обчислювальної техніки.

2.3 Вимоги до функцій, які виконуються системою

Підсистема контролю та керування процесом подачі горючого газу до горілок у випалювальних камерах АСК ТП ФОГ повинна виконувати наступні функції.

1. Функції контролю:

- контроль подачі горючого газу до зони сушки;
- контроль подачі горючого газу до зони підігріву;
- контроль подачі горючого газу до зони випалювання;
- контроль температурного режиму в зоні охолодження;
- контроль рівня окатишів у випалювальних візках;
- контроль швидкості подачі випалювальних візків до технологічних зон випалювання;
- контроль витрати шихти;
- контроль тиску у технологічних зонах випалювання;
- контроль стану основного технологічного обладнання.

2. Функції керування:

- розрахунок керуючих впливів;
- завдання керуючих впливів;
- визначення раціонального режиму ведення технологічного процесу.

3. Інформаційні функції:

- збір та обробка технологічної інформації;
- контроль та сигналізація відхилень;
- контроль та сигналізація аварійних режимів;
- відображення інформації;
- документування;
- розрахунок та аналіз узагальнених показників стану об'єкту.

4. Допоміжні функції:

- забезпечення пульта оператора-технолога;
- забезпечення безпеки керування.

Перелік (кількість сигналів) параметрів, що вимірюються, наведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Перелік каналів вхідної інформації системи

№ з/п	Найменування параметру	Кількість
1	Температура в зоні сушки	1000
2	Температура в зоні підігріву	1000
3	Температура в зоні випалювання	1000
4	Температура в зоні охолодження	1000
5	Тиск в ГПК по технологічних зонах	1000
6	Висота шару окатишів на випалювальних візках	1000
7	Швидкість подачі випалювальних візків до технологічних зон випалювання	1000

Вимоги до швидкодії

Періодичність та максимальний час реалізації задач керування наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вимоги до задач системи управління

№ з/п	Найменування задачі	Часовий регламент	
		Періодичність, с	Час рішення, с
1	Температура в зоні сушки	5	не більше 0,25
2	Температура в зоні підігріву	5	не більше 0,25
3	Температура в зоні випалювання	5	не більше 0,25
4	Температура в зоні охолодження	5	не більше 0,25
5	Тиск в ГПК по технологічних зонах	5	не більше 0,25
6	Висота шару окатишів на випалювальних візках	5	не більше 0,25
7	Швидкість подачі випалювальних візків до технологічних зон випалювання	5	не більше 0,25

2.4 Вимоги до видів забезпечення

Вимоги до математичного забезпечення.

Математичні методи, що будуть використовуватися в системі, повинні забезпечувати ефективне виконання функцій автоматизованої системи контролю та управління процесом подачі горючого газу до технологічних зон випалювання. Математичні моделі процесів дозування повинні бути використовуваними для усталених режимів. При доведенні технологічних об'єктів до регламентного режиму роботи та при виведенні їх з режиму моделі не повинні використовуватися.

Алгоритми обробки технологічних змінних повинні використовуватися на верхньому рівні АСК ТП.

Прикладні алгоритми повинні створюватися методами структурування. Для цього в системі повинні бути розроблені спеціальні засоби, що забезпечують структурування прикладних алгоритмів в системі спеціалістами з автоматизації технологічних процесів.

Вимоги до інформаційного забезпечення.

Інформаційне забезпечення (ІЗ) повинно бути достатнім для виконання всіх визначених в системі задач з урахуванням вимог до їх виконання. ІЗ повинно використовувати принцип однократності введення і багаторазового

використання інформації, і не володіти збитковістю.

Сигнали та коди ІЗ, що використовуються для зв'язку комплексу технічних засобів системи, повинні відповідати вимогам ГОСТ 26.013-81, ГОСТ 26.010-80, ГОСТ 19768-74, ГОСТ 27465-87, ГОСТ 27463-87.

ІЗ системи повинно включати структури параметричного налаштування, в тому числі:

- словники змісту повідомлень в діагностичному зведенні;
- опис конфігурацій підсистем зв'язку з об'єктом;
- опис відображень груп змінних процесу;
- структури об'єктних модулів технологічних задач;
- опис змінних, що підлягають інформаційному обміну з прилеглими обчислювальними комплексами (компонентами системи).

Крім того, інформаційне забезпечення повинно містити:

- системні коди технологічних і проміжних (розрахункових) змінних процесу для їх ідентифікації при зовнішньому представленні в документах і відеокдрах, або при завданні їх з пульту оператора-технолога.
- описові (пояснюючі) тексти змінних для покращення їх ідентифікації, якщо це потрібно.

Структура ІЗ повинна забезпечувати найбільш швидкий доступ до інформаційних елементів. Системні коди повинні бути зручними для ідентифікації змінних, їх доцільно подавати у буквено-цифровому вигляді, де букви повинні вказувати на фізичний зміст змінних, а цифрова частина коду – повинна бути близькою до нумерації джерел інформації, прийнятих в технологічному процесі.

Якщо значення змінної передається з одного обчислювального комплексу в інший, то в обох цих комплексах ця змінна повинна мати однакові інформаційні структури – системний код, коментарі, формат представлення, масштабні коефіцієнти тощо.

Динамічними структурами ІЗ є аналогові та логічні змінні процесу, які

можуть змінитися в результаті обробки алгоритмів технологічних задач інформаційних обмінів між обчислювальними комплексами, дій персоналу з ведення процесу. Організація вказаних структур ІЗ та доступ до них повинні бути стандартизовані для всіх компонентів системи.

Визначені в системах структури ІЗ повинні бути достатніми для отриманні необхідних вихідних документів: діагностичного зведення, оперативних відображень груп змінних та візуалізації технологічного процесу на моніторах технологічних працівників за допомогою SCADA-систем.

Захист даних від втрат при аваріях та збоях електроживлення системи повинен забезпечуватися за допомогою зберігання їх в зовнішній пам'яті (на жорстких магнітних дисках або магнітних носіях) і можливістю використання при відновленні системи.

Вимоги до програмного забезпечення.

Програмне забезпечення автоматизованої системи контролю і управління процесом подачі горючого газу до технологічних зон випалювання повинно виконуватися на основі мов програмування у відповідності зі стандартом МЕК 3111.

Програмне забезпечення (ПЗ) повинно мати модульний принцип для забезпечення зручності наладки і відбивати принцип декомпозиції АСК ТП на ієрархічні рівні. Алгоритми стабілізації та керування окремими технологічними параметрами повинні бути реалізовані у вигляді ПЗ контролерів локальних систем управління (ЛСУ). Програмне забезпечення серверів АСК ТП повинно реалізовувати алгоритми розрахунку раціонального співвідношення мас компонентів, що дозуються, ведення архіву та протоколювання даних. ПЗ робочих станцій оперативного та обслуговуючого персоналу повинно виконувати функції візуалізації роботи і параметрів основного технологічного обладнання, діагностику основних несправностей системи і обладнання, підготовку архівних графіків, статистичної інформації та змінних рапортів. Зв'язок серверів з контролерами локальних систем управління повинен

здійснюватися за допомогою технології OPC.

Вимоги до технічного забезпечення.

Технічне забезпечення (ТЗ) автоматизованої системи контролю і управління процесом подачі горючого газу до технологічних зон випалювання повинно забезпечувати виконання функцій, описаних вище.

Технічні засоби, що входять до складу ТЗ системи, повинні бути інформаційно сумісні один з одним.

ТЗ системи повинно забезпечувати можливість нарощування (розширення), а також можливість взаємної заміни технічних засобів, що входять до його складу.

Технічні засоби, що входять до складу АСК ТП, повинні мати наступні експлуатаційні характеристики:

- строк служби – не менш 10 років;
- можливість безперервної цілодобової роботи;
- можливість роботи в закритих приміщеннях з системою кондиціювання повітря.

Найповніше відповідають цим вимогам наступні технічні засоби:

- другий рівень системи – промислові логічні контролери з розподіленою системою введення-виведення, засобів людино-машинного інтерфейсу;
- третій рівень системи – індустріальні ПК з розвинутою архітектурою та широкою номенклатурою пристроїв зв'язку з об'єктом (ПЗО);
- керування електроприводами основного технологічного обладнання повинно здійснюватися перетворювачами частоти, зв'язаними промисловою мережею з промисловими контролерами.

Технічні засоби, що входять до складу ТЗ, повинні серійно випускатися промисловістю. Розробка спеціальних технічних засобів не передбачається.

Індустріальні ПК, що використовуються в системі, повинні мати зовнішню дискову пам'ять для зберігання історії технологічного процесу та проміжних результатів.

Вимірювальні датчики технологічних процесів повинні мати уніфіковані струмові вихідні сигнали. Для вимірювання окремих параметрів, засоби контролю для яких не випускаються в Україні, повинна бути передбачена можливість їх придбання за імпортом.

Вимоги до метрологічного забезпечення.

Компонентами вимірювальних і обчислювальних каналів АСК ТП є засоби вимірювання автоматизації і засоби обчислювальної техніки з їх програмною підтримкою. Метрологічні характеристики засобів вимірювань визначаються умовами і нормами заводів-виробників. В зв'язку з цим засоби вимірювань для метрологічною сумісності з засобами обчислювальної техніки повинні мати такі метрологічні характеристики, які у сукупності з характеристиками засобів обчислювальної техніки та програмних засобів задовольняють точності контролю вимірювальних каналів та точності регулювання керуючих каналів, визначених вимогами.

Вимоги до організаційного забезпечення.

Персонал АСК ТП повинен забезпечувати можливість обслуговування засобів обчислювальної техніки та локальної автоматики системи із розрахунку її цілодобової трьохзмінної роботи, виконання профілактичного та поточного ремонтів, участь у функціонуванні інформаційного, математичного та програмного забезпечення системи.

Обслуговування засобів обчислювальної техніки здійснюється службою ОЦ, а засобів локальної автоматики – службами АСК ТП та КВПіА.

Технічне обслуговування і ремонт промислових контролерів здійснюється персоналом, що пройшов спеціальну підготовку на курсах. Технічне обслуговування, ремонт засобів обчислювальної техніки, математичного та програмного забезпечення системи виконується інженерно-технічними працівниками, що пройшли курси підвищення кваліфікації по вивченню індустріальних ПК, спеціалізованих мов програмування, SCADA-систем та OPC-технології.

Персонал АСК ТП поділяється на експлуатаційний та ремонтний. Режим роботи експлуатаційного персоналу – безперервний трьохзмінний, ремонтного – однозмінний при п'ятиденному робочому тижні.

2.5 Обґрунтування структури АСК ТП з підсистемою керування температурою у випалювальній машині

Показники на фабриці випалювання окатишів залежать від багатьох факторів, які мають вплив на технологічний процес сушки, підігріву, та звісно випалювання окатишів.

Для того, щоб правильно змодельовати систему автоматичного керування температурним режимом по технологічних зонах цеху огрудкування та в частковому порядку, зони випалювання окатишів, необхідно врахувати такі основні показники:

- висота шару окатишів;
- швидкість руху випалювальних візків;
- тиск у газоповітряних камерах відповідно до технологічних зонах цеху випалювання окатишів;
- витрата газоповітряної суміші.

Для кожної зони необхідно визначитись із параметрами, які впливають на технологічну зону, тому що, наприклад, у зоні сушки окатишів, не враховується витрата газоповітряної суміші, а сушка проходить шляхом подачі гарячого повітря із зон підігріву та випалювання.

Отже, для зони сушки окатишів, керування температурою буде здійснюватися за каналом температура – висота шару окатишів, швидкість випалювальної машини, тиск у газоповітряній камері над зоною сушки.

Для зони підігріву, керування температурою буде здійснюватися за каналом температура – висота шару окатишів, швидкість випалювальної

машини, тиск у газоповітряній камері над зоною підігріву; витрата газоповітряної суміші.

Для зони випалювання, керування температурою буде здійснюватися за каналом температура – висота шару окатишів, швидкість випалювальної машини, тиск у газоповітряній камері над зоною випалювання; витрата газоповітряної суміші.

3 Склад системи керування температурою у випалювальній машині

3.1 Розробка функціональних та структурних схем підсистем керування температурою у випалювальній машині

Для математичного моделювання буде використаний пакет програм MatLab, в якому, за допомогою утиліти ident, можна буде змодельовати процес, згідно отриманих практично даних з підприємства та описати його отриманими передаточними функціями.

Отже, далі необхідно розглянути структурну схему системи автоматичного керування температурою в зоні сушки. Розглянемо рисунок 3.1.

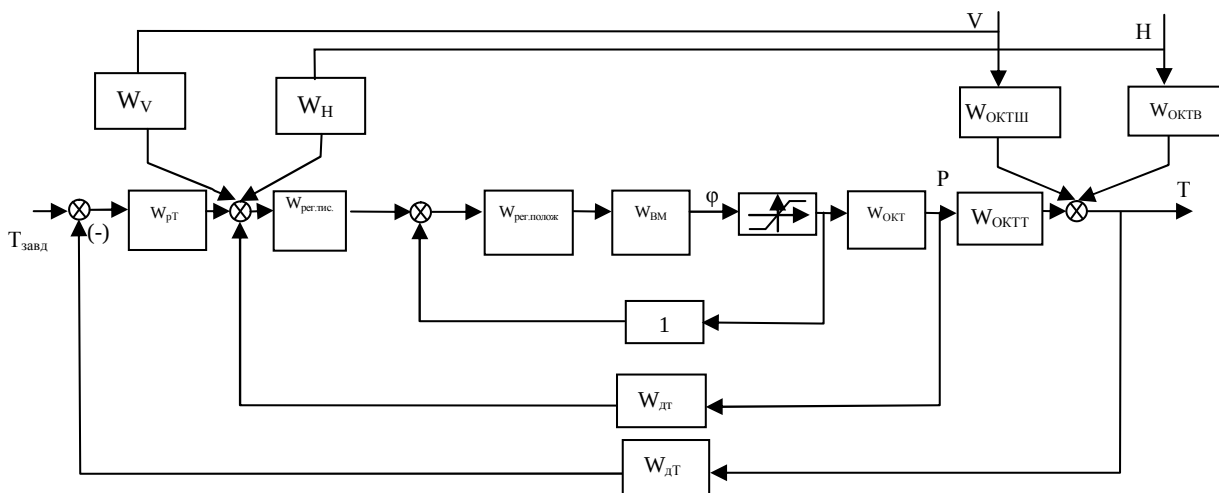
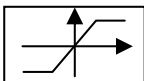


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи автоматичного керування температурою в зоні сушки

W_V – Сигнал компенсації збурення за швидкістю переміщення випалювальних візків; W_H – сигнал компенсації збурення за висотою шару окатишів; $W_{рт}$ – передаточна функція регулятора температури; $W_{рег.тис.}$ – передаточна функція регулятора тиску; $W_{рег.полож}$ – передаточна функція регулятора положення; $W_{ВМ}$ – передаточна функція виконавчого механізму;  – нелінійний елемент з характеристикою типу «обмеження»; $W_{ОКТ}$ – передаточна функція об'єкту керування тиском; $W_{ОКТТ}$ – передаточна функція об'єкту керування температурою за тиском; $W_{дт}$ – передаточна функція датчика температури; $W_{дт}$ – передаточна

функція датчика тиску; $W_{\text{ОКТВ}}$ – передаточна функція сигналу збурення об’єкту керування температурою за висотою шару окатишів; $W_{\text{ОКТШ}}$ – передаточна функція сигналу збурення об’єкту керування температурою за висотою швидкістю переміщення випалювальних візків;

Регулювання температури в зоні сушки.

Гарячі гази, які подаються в зону сушки, шляхом перекачування їх із зон випалювання та підігріву димосмоками 2 та 3. При цьому, температура гарячого повітря становить близько 310°C . Для того, щоб правильно та своєчасно регулювати температуру $T_{\text{завд}}$ в зоні сушки, використовують метод управління температурою, за каналом температура-тиск P . Питома температура в зоні сушки становить близько 60°C .

При зміні тиску або розрідження повітря у зоні сушки, змінюється температура в зоні сушки окатишів. Тиск P у зоні сушки окатишів підтримується шляхом зміни проценту відкриття регулюючого органу (направляючий апарат димосмоку) за сигналом датчика тиску в зоні $D_{\text{т}}$.

Будь-які зміни в температурному режимі фіксуються датчиком температури $D_{\text{т}}$.

В якості виконавчої апаратури в системі регулювання температури в зоні підігріву використовується заслінка з виконавчим механізмом. Виконавчий механізм має постійну швидкість переміщення і малу інерційність, тому може бути апроксимований інтегруючою ланкою, формула (3.1.)

$$W_{\text{ем1}} = \frac{\eta(p)}{u(p)} = \frac{1}{p}. \quad (3.1)$$

Регулюючим органом є направляючий апарат з «мертвим ходом» та обмеженою пропускною здатністю, який може бути описаний нелінійним елементом з насиченням (рисунк 3.2).

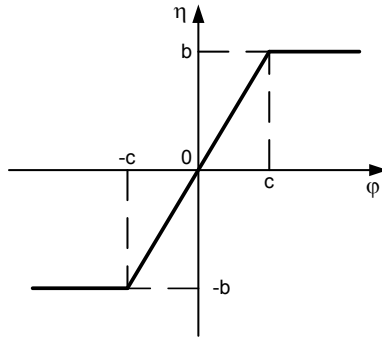


Рисунок 3.2 – Нелінійна характеристика із зоною насичення

Математично характеристика направляючого апарату має вигляд

$$\eta = \begin{cases} -b & \text{при } \varphi < -c; \\ k \cdot \varphi & \text{при } -c \leq \varphi \leq c; \\ b & \text{при } \varphi > c, \end{cases} \quad (3.2)$$

де k – коефіцієнт підсилення, $k = 1$.

Для формування псевдозмінної швидкості виконавчого механізму використовується імпульсний режим керування, коли ВМ включається на час, тривалість якого залежить від величини керуючого впливу $u(p)$. В такому режимі керуючий пристрій КП виконує функції релейного елемента із зоною нечутливості, або трьохпозиційного реле (рисунок 3.3).

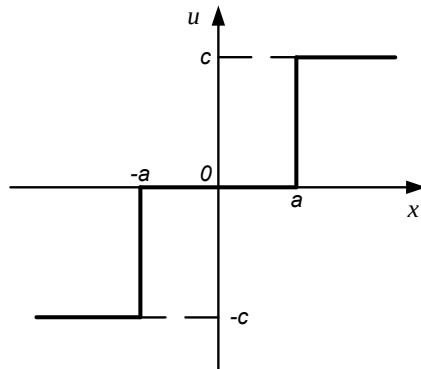


Рисунок 3.3 – Нелінійна характеристика із релейного елемента із зоною нечутливості

Математично відповідна нелінійність описується наступним чином

$$u = \begin{cases} -c & \text{при } x < -a; \\ 0 & \text{при } -a \leq x \leq a; \\ c & \text{при } x > a. \end{cases} \quad (3.3)$$

Виконавчий механізм МЕО має аналоговий вихід для дистанційного керування положенням регулюючого органу, який може бути використаний для реалізації зворотного зв'язку за положенням.

Для реалізації зворотного зв'язку за тиском використовується п'єзорезистивний датчик тиску Aplisens APR-2000, який в динамічному відношенні є пропорційною ланкою. Для датчика, що вимірює значення тиску в першій зоні сушки $K_{dm} = 0,2$ мА/мПа.

Також, необхідно врахувати, що на систему постійно діє збурення за декількома каналами: температура-швидкість руху випалювальних візків; температура-висота шару окатишів. Тобто, функції $W_{октв}$ та $W_{октш}$ – це сигнали збурення. Для того, щоб компенсувати збурення, яке відбувається під впливом цих сигналів, потрібно ввести компенсаційні сигнали відповідно. В даному випадку, це будуть сигнали W_v та W_H .

Отримаємо наступну функціональну схему, враховуючи всі перераховані сигнали, та впливи на систему автоматичного керування, на рисунку 3.4.

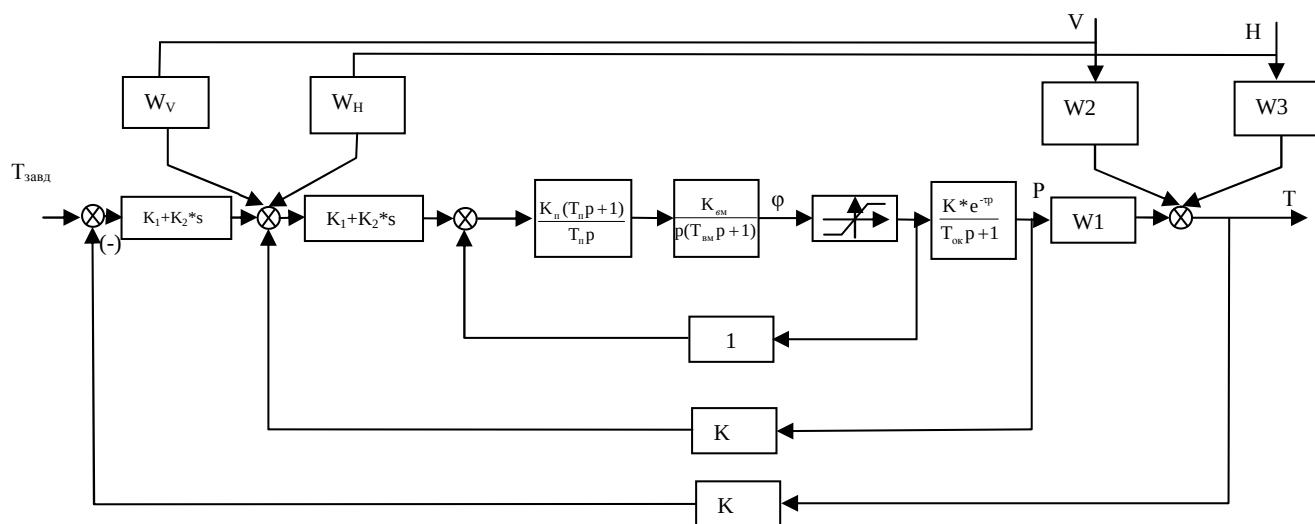


Рисунок 3.4 – Функціональна схема системи автоматичного керування температурою в зоні сушки

Де:

$$W1(p) = K \frac{1 + Tz * s}{(1 + Tp1 * s)(1 + Tp2 * s)(1 + Tp3 * s)} * e^{-Td * s}; \text{ із параметрами } K = 6; Tp1 =$$

3839.6с; Tp2 = 15.198с; Tp3 = 0.0053415с; Td = 146.54с; Tz = 17.062с;

$$W_2(p) = K \frac{1 + T_z * s}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)} * e^{-T_d * s};$$

із параметрами $K = -4.2356$; $T_{p1} =$

3259.3с ; $T_{p2} = 36.711\text{с}$; $T_{p3} = 190.5\text{с}$; $T_d = 14.117\text{с}$; $T_z = 90.028\text{с}$;

$$W_3(p) = K \frac{1 + T_z * s}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)} * e^{-T_d * s};$$

із параметрами $K = -2.5137\text{с}$;

$T_{p1} = 170.7\text{с}$; $T_{p2} = 170.68\text{с}$; $T_{p3} = 7.904\text{с}$; $T_d = 5.0952\text{с}$; $T_z = -20.423\text{с}$;

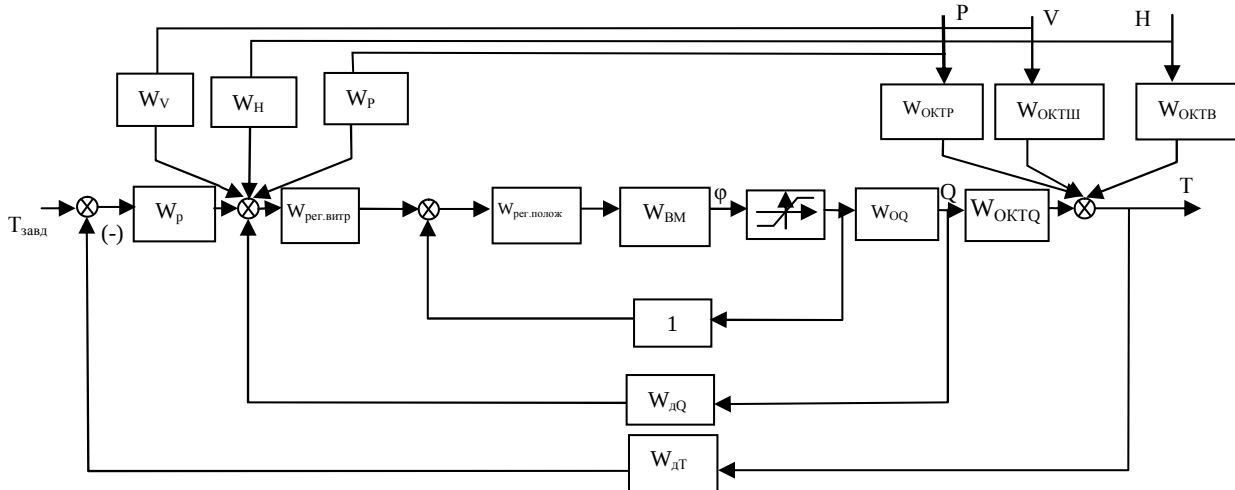
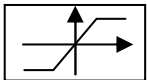


Рисунок 3.5 – Структурна схема системи автоматичного керування температурою в зоні випалювання

W_V – сигнал компенсації збурення за швидкістю переміщення випалювальних візків; W_H – сигнал компенсації збурення за висотою шару окатишів; W_P – сигнал компенсації збурення за висотою за тиском; $W_{рт}$ – передаточна функція регулятора температури; $W_{рег.витр.}$ – передаточна функція регулятора витрати горючої газоповітряної суміші; $W_{рег.полож}$ – передаточна функція регулятора положення; $W_{ВМ}$ – передаточна функція виконуючого механізму;  – нелінійний елемент з характеристикою типу «обмеження»; $W_{оQ}$ – передаточна функція об'єкту керування витратою газоповітряної суміші; $W_{ОКТQ}$ – передаточна функція об'єкту керування температурою за витратою газоповітряної суміші; $W_{дТ}$ – передаточна функція датчика температури; $W_{дQ}$ – Передаточна функція датчика витрати газоповітряної суміші; $W_{ОКТВ}$ – передаточна функція сигналу збурення об'єкту керування температурою за висотою шару обкотишів; $W_{ОУТШ}$ – передаточна функція сигналу збурення

об'єкту керування температурою за висотою швидкістю переміщення випалювальних візків; $W_{\text{ОКТР}}$ – передаточна функція сигналу збурення об'єкту керування температурою за тиском;

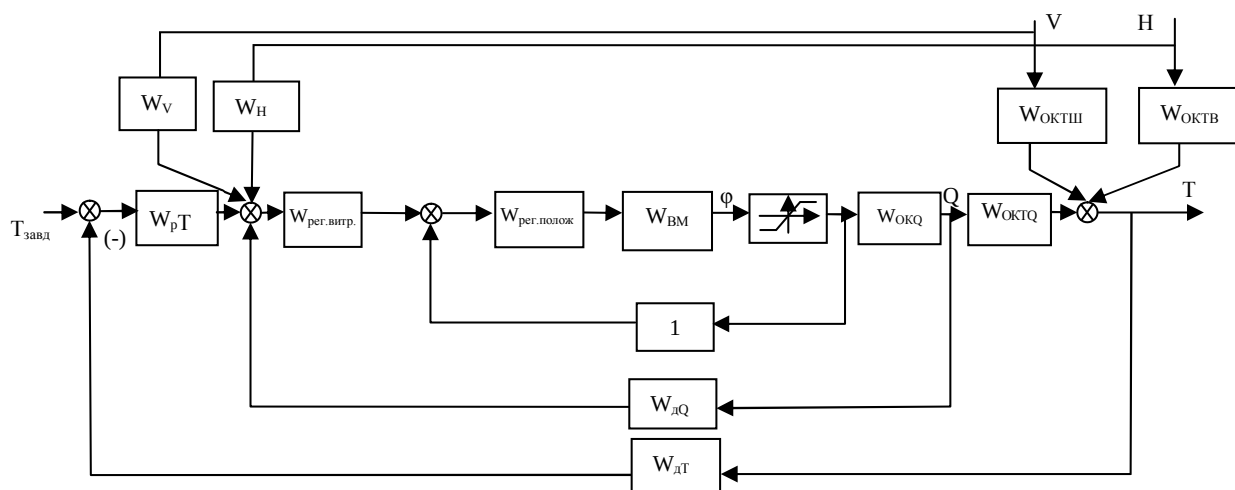
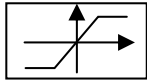


Рисунок 3.6 – Структурна схема системи автоматичного керування температурою в зоні підігріву

W_V – Сигнал компенсації збурення за швидкістю переміщення випалювальних візків; W_H – сигнал компенсації збурення за висотою шару окатишів; $W_{рТ}$ – передаточна функція регулятора температури; $W_{рег.витр.}$ – передаточна функція регулятора витрати горючої газоповітряної суміші; $W_{рег.полож}$ – передаточна функція регулятора положення; $W_{ВМ}$ – передаточна функція виконуючого механізму;  – нелінійний елемент з характеристикою типу «обмеження»; $W_{ОКQ}$ – передаточна функція об'єкту керування витратою газоповітряної суміші; $W_{ОКТQ}$ – передаточна функція об'єкту керування температурою за витратою газоповітряної суміші; $W_{дТ}$ – передаточна функція датчика температури; $W_{дQ}$ – Передаточна функція датчика витрати газоповітряної суміші; $W_{ОКТВ}$ – передаточна функція сигналу збурення об'єкту керування температурою за висотою шару окатишів; $W_{ОКТШ}$ – передаточна функція сигналу збурення об'єкту керування температурою за висотою швидкістю переміщення випалювальних візків;

Регулювання температури в зоні підігріву/випалювання.

Температурний режим в зоні підігріву/випалювання окатишів регулюється шляхом зміни подачі кількості Q горючої газоповітряної суміші до форкамер зони підігріву. Приблизна температура в зоні підігріву окатишів до їх подальшого випалювання становить 870°C , температура ж в зоні випалювання окатишів становить $1050\text{-}1250^{\circ}\text{C}$.

Будь-які зміни в температурному режимі фіксуються датчиком температури D_T , який змінює сигнал завдання $T_{\text{завд}}$, після чого відбувається відкриття або ж закриття клапану подачі газоповітряної суміші.

Також, необхідно врахувати, що на систему постійно діє збурення за декількома каналами: температура-швидкість руху випалювальних візків; температура-висота шару окатишів; температура-тиск в зоні підігріву. Тобто, функції $W_{\text{ОКТВ}}$ та $W_{\text{ОКТШ}}$, $W_{\text{ОКТР}}$ – це сигнали збурення. Для того, щоб компенсувати збурення, яке відбувається під впливом цих сигналів, потрібно ввести компенсаційні сигнали відповідно. В даному випадку, це будуть сигнали W_V, W_H та W_P .

Отримаємо наступну функціональну схему, враховуючи всі перераховані сигнали, та впливи на систему автоматичного керування, на рисунку 3.7.

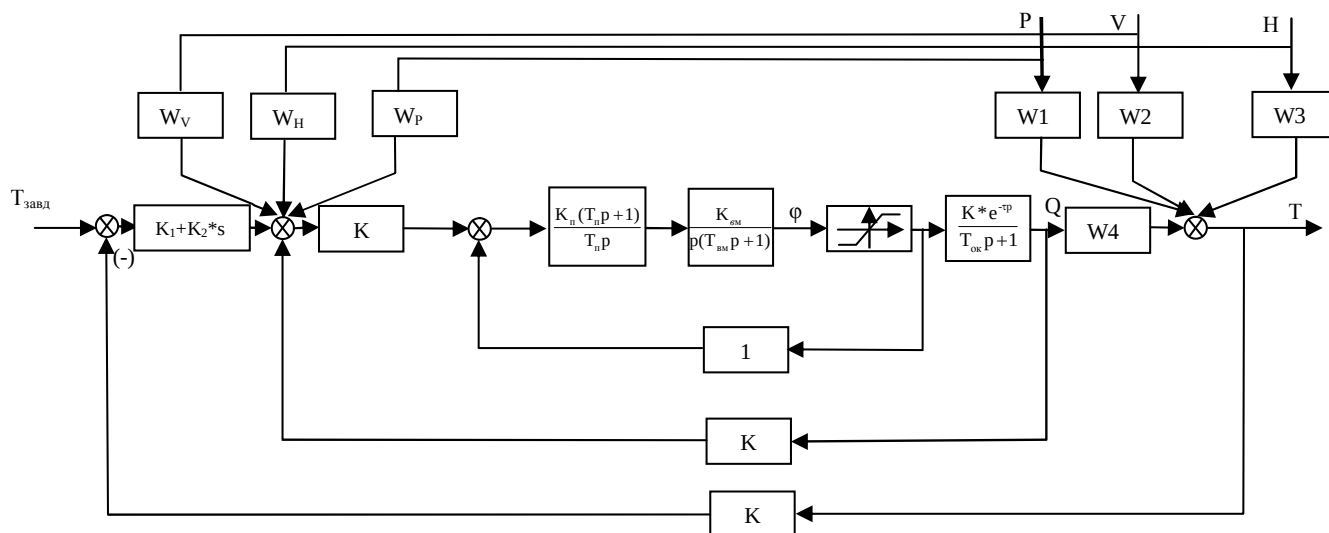


Рисунок 3.7 – Функціональна схема системи автоматичного керування температурою в зоні випалювання

Де передаточні функції для зони випалювання:

$$W1(p) = K \frac{K}{(1 + Tp1 * s)(1 + Tp2 * s)(1 + Tp3 * s)};$$

De: $K = 0.306$; $Tp1 = 45.782c$; $Tp2 = 45.728c$; $Tp3 = 15.487c$;

$$W2(p) = K \frac{K}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)};$$

De: K = -0.3821; Tr1 = 11.48c; Tr2 = 0.0013537c; Tr3 = 11.308c;

$$W3(p) = K \frac{K}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)};$$

Де: K = -8.0354; Tr1 = 2.2763с; Tr2 = 0.0018096с; Tr3 = 13.706с;

$$W4(p) = K \frac{K}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)};$$

De: K = -0.83097; Tr1 = 70199c; Tr2 = 0.001c; Tr3 = 0.0028093c;

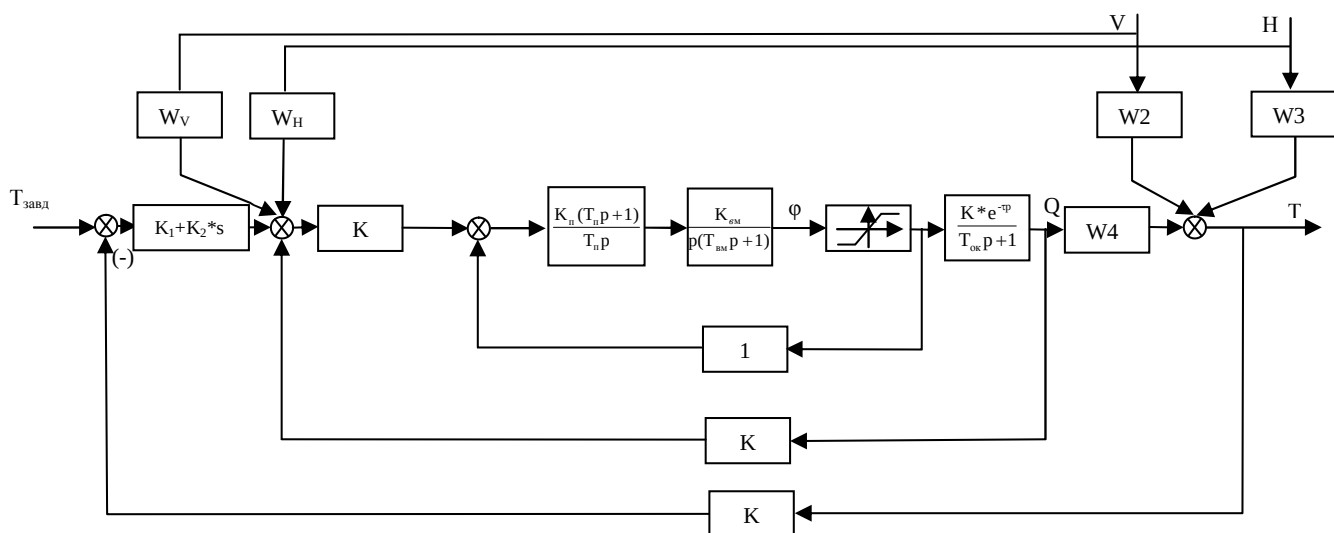


Рисунок 3.8 – Функціональна схема системи автоматичного керування температурою в зоні підігріву

Де передаточні функції для зони підігріву:

$$W1(p) = K \frac{K}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)};$$

Де: $K = 0.265$; $T_{p1} = 16.262c$; $T_{p1} = 13.654c$;

$$W2(p) = K \frac{K}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)};$$

Де: $K = 1.7733$; $T_{p1} = 914.1c$; $T_{p1} = 14.687c$;

$$W3(p) = K \frac{K}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)};$$

Де: $K = -0.060406$; $T_{p1} = 0.0019195c$; $T_{p1} = 0.001c$;

3.2 Вибір датчиків, первинних перетворювачів та виконавчих пристроїв

Вибір датчика температури

Термопари широко застосовують для вимірювання температури різних об'єктів, а також в автоматизованих системах управління і контролю. Вимірювання температур за допомогою термопар отримало широке поширення через надійність конструкції датчика, можливості працювати в широкому діапазоні температур і дешевизну. Широкому застосуванню термопари зобов'язані в першу чергу своїй простоті, зручності монтажу, можливості вимірювання локальної температури. Вони більш лінійні, ніж інші датчики, а їх нелінійність на сьогоднішній день добре вивчена і описана у спеціальній літературі. До числа переваг термопар відносяться також мала інерційність, можливість вимірювання малих різниць температур.

Термопари незамінні при вимірюванні високих температур (до 2200°C) в агресивних середовищах. Термопари можуть забезпечувати високу точність вимірювання температури на рівні $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Вони виробляють на виході термоЕРС в діапазоні від мікр вольт до мілівольт, однак вимагають стабільного підсилення для подальшої обробки.

Для даної задачі вимірювання температури в зоні випалювання обкотишів, буде використаний такий тип термопари: ТВР. Це термопари, які мають:

- можливість тривалого застосування при температурах до 2200°C в неокислених середовищах;
- стійкість в аргоні, гелії, сухому водні і азоті.

Термопари з термоелектродами зі сплаву платини з 10% родію щодо електрода з чистої платини можуть використовуватися як стандартні для встановлення номінальних статичних характеристик термопар методом порівняння.

Недолік - погана відтворюваність термоЕРС, яка примушує групувати термоелектродні пари по групах з номінальними статичними характеристиками А-1, А-2, А-3.

Датчик вимірювання витрати газоповітряної суміші

Мікромостові датчики витрати газу компанії Honeywell виконані з використанням передової технології мікромашинінга. Датчики не мають рухомих частин. Вихідна напруга датчика знаходиться в лінійній залежності від швидкості (об'єму в одиницю часу) потоку газу, що проходить через його вимірювальну камеру. Принцип дії приладів заснований на механізмі передачі теплоти потоком повітря (газу), що проходить над поверхнею чутливого елемента датчика. Необхідний напрям і розподіл потоку газу над поверхнею чутливого елемента забезпечує строго певна внутрішня геометрія вимірювальної камери датчика. Компактний зовнішній дизайн корпусу зі стандартним кроком виводів дозволяє легко розміщувати датчик на друкованій платі. Мікромостовий чутливий елемент, що є основою датчика, складається з нагрівального елемента і двох терморезистивних мостів Уїнстона. Тонкоплівкові термочутливі елементи першого мікромоста розташовані строго симетрично щодо нагрівача з метою вимірювання не тільки швидкості потоку повітря, але і його спрямування. Ці резистори термічно ізольовані від нагрівача шляхом витравлювання канавок в несучому кристалі, що утворюють повітряний зазор. Лазерна підгонка опорів терморезисторів мосту гарантує повну взаємозамінність датчика при виході з ладу відповідним типом без подальшого калібрування. Малі розміри чутливого елемента і високоефективна термоізоляція вимірювального мікромоста і нагрівача забезпечують дуже швидкий час відгуку приладу і гарну чутливість. Другий мікромост призначений для створення ланцюга зворотного зв'язку управління нагрівальним елементом з метою підтримання його постійної температури. Для точного вимірювання витрати газу необхідна підтримка постійної температури нагрівача близько $+160^{\circ}\text{C}$ відносно температури потоку

вимірюваного газу, охолоджуючого нагрівач. У лінійці датчиків витрати газу існують прилади як з вбудованими ланцюгами управління нагрівачем, так і з зовнішніми. Всі датчики витрати газу Honeywell мають аналоговий вихід по напрузі. Існують моделі з міллівольтовим виходом ($0\div30\text{мВ}$) і стандартним ($1\div5\text{В}$). Останні мають вбудований інструментальний підсилювач.

Первинний перетворювач тиску

В даній роботі буде використаний датчик тиску Aplisens APC-2000, який по своїм функціонально-технічним показникам повністю відповідає вимогам.

Призначення даного датчику полягає у вимірюванні тиску, вакуум метричного тиску, а також абсолютного тиску газу, пару та рідини. Вимірювальним елементом є п'єзорезистивна кремнієва монолітна структура, яка вбудована в приймач тиску, який відокремлений від вимірюваного середовища розділювальною мембраною, та заповнений спеціальною манометричною рідиною.

Є декілька варіантів виконання штуцерів. Основні з них: вхідний отвір на діаметром на 5 мм, діаметром на 12 мм, та на 25 мм. В нашому випадку був обраний варіант CM30x2, який найбільш точно відповідає вимогам розроблюваної системи автоматичного керування. (сильна запиленість, агресивна середовище і т.п.).

В алюмінієвому корпусі даного датчику знаходиться мікропроцесорний підсилювач, який формує вихідний уніфікований сигнал.

Зв'язок користувача із перетворювачем датчику відбувається шляхом використання протоколу HART. Цей протокол дає змогу користувачу використовувати комунікатор, деякі пристрої, які підтримують даний комунікатор, а також, звісно, персональний комп'ютер.

Обмін даними із перетворювачем дозволяє здійснювати такі процедури та функції:

- ідентифікація перетворювача;
- конфігурацію вихідних параметрів (одиниць вимірювання початку та кінця вимірюваного діапазону, постійної часу демпфірування, характеристики перетворення);
- відлік вимірюваної в даний момент часу величини тиску, вихідного струму та рівня вихідного сигналу у відсотках;
- завдання значення вихідного струму;
- калібрування перетворювача по відношенню до зразкового тиску.

Загальний діапазон вимірювання тиску 0...100МПа, мінімальна ширина вимірюваного діапазону 1 Мпа, можливе перевантаження 120 МПа.

Датчик контролю швидкості

Датчик контролю швидкості (ДКШ) призначений в першу чергу для контролю зупинки або зниження швидкості обертання (руху) різних пристроїв, таких, як, конвеєри, транспортери, барабани. Може застосовуватися для виявлення аварійного прослизання стрічки на транспортері.

ДКШ являє собою індуктивний датчик зі схемою контролю частоти імпульсів впливу і бінарним виходом.

Контрольований об'єкт обертається безпосередньо або за допомогою сполученого з ним металевого об'єкту впливає на чутливий елемент датчика з частотою, пропорційною частоті обертання. При нормальній частоті обертання на виході датчика і на навантаженні є напруга, а при зменшенні частоти обертання нижче заданої величини (мінімальне значення частоти встановлюється потенціометром) вихідна напруга падає.

Від виробника датчик поставляється без заданого налаштування спрацювання. Замовник має можливість налаштування на потрібну порогову частоту на місці експлуатації за допомогою вбудованого потенціометру. Діапазон обраного датчику швидкості руху випалювальних візків становить від 2 до 50 Гц, що загалом відповідає усім вимогам, поставленим при розробці

системи автоматичного керування температурним режимом випалювання окатишів.

Виконавчий механізм

Виконавчі механізми електричні прямоходні МЕР виробництва НВП "Сибір-Мехатроніка" призначені для забезпечення поступального переміщення елементів машин, механізмів, конструкцій.

Об'єкти застосування виконавчих механізмів електричних прямоходних МЕР: трубопровідна арматура (шибера, клапани, засувки та ін), ворота розпашні, розсувні, підйомні; дозатори, електричні преси, пробійники та багато іншого. МЕР можуть застосовуватися в різних галузях промисловості замість пневмо - і гідроциліндрів.

Для виконання даної системи автоматичного керування будуть використані регульовані клапани.

Позитивні сторони виконавчих механізмів електричних прямоходних МЕР:

- непогані масогабаритні показники: так, виконавчий механізм МЕР з номінальним зусиллям 5Н має масу всього 27 кг, це полегшує монтаж і обслуговування МЕР на об'єкті та дозволяє у багатьох випадках обійтися без вантажопідйомних механізмів;

- широкі можливості компоновальні;

- робоче положення виконавчого механізму МЕР у просторі може бути будь-яким;

- можливість шарнірної установки виконавчих механізмів МЕР: на підставці з шарнірним закріпленням кінця штока на робочому органі дозволяє реалізувати як прямолінійне, так і криволінійний переміщення робочого органу;

- зручність налагодження;

- можливість і зручність налаштування зони робочих переміщень штока виконавчих механізмів МЕР;

- економічність застосування виконавчих механізмів МЕР;
- застосування виконавчих механізмів електричних прямоходних МЕР замість пневмоциліндрів в цілому ряді виробництв дозволяє знизити експлуатаційні витрати, а так само виключити витрати на застосування компресорних станцій, підготовку повітря.

Склад виконавчих механізмів електричних прямоходних МЕР:

- трифазний асинхронний електродвигун;
- гвинтова передача;
- редуктор;
- вузол ручного приводу;
- блок кінцевих вимикачів;
- датчик положення з уніфікованим струмовим виходом;

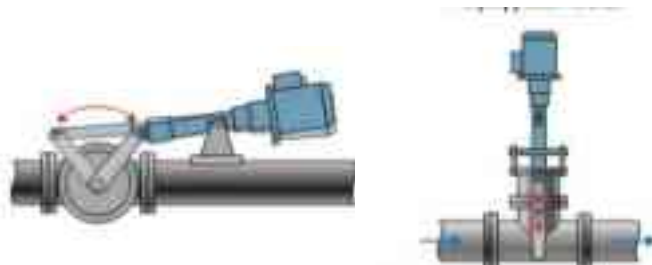


Рисунок 3.9 – Приклади вигляду виконавчих механізмів МЕР

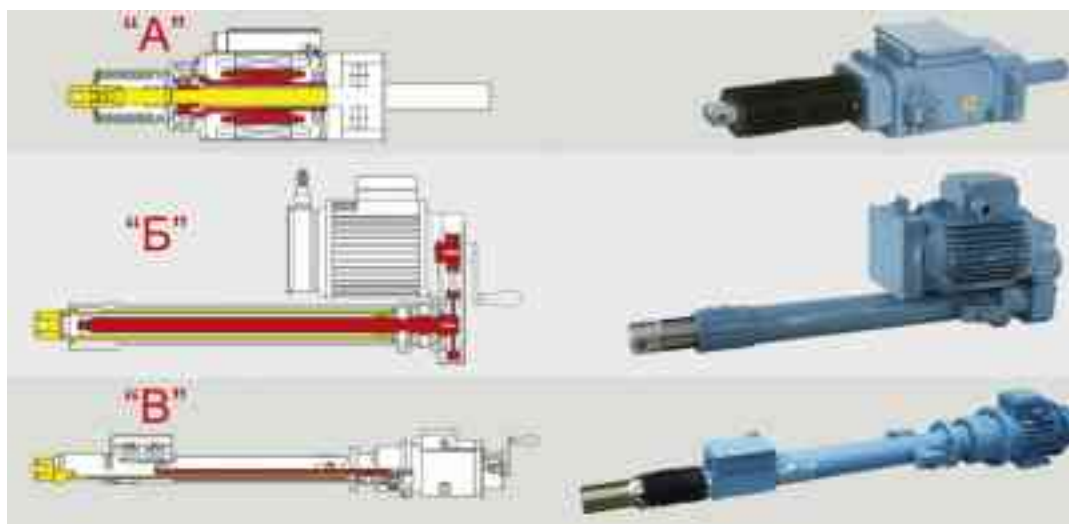


Рисунок 3.10 – Основні конструктивні виконання механізмів електричних прямоходних МЕР

Принцип дії виконавчих механізмів електричних прямоходних МЕР:

У МЕР виконання "А" при подачі прямої напруги на електродвигун ротор електродвигуна та скріплена з ним через редуктор гайка гвинтовий передачі приходять в обертання, при цьому гвинт, закріплений своїм кінцем на робочому органі, здійснює поступальний рух. Блок радіально-упорних підшипників сприймає осьові зусилля, які виникають.

У МЕР виконання «Б» при подачі напруги на електродвигун, ротор електродвигуна через редуктор або зубчасто-пасову передачу приводить в обертання гвинт гвинтової пари. При цьому гайка разом зі штоком, в якому вона встановлена, рухається поступально, переміщаючи робочий орган.

У МЕР виконання "В" ротор електродвигуна, через редуктор, приводить в обертання гвинт гвинтової пари. При цьому гайка разом зі штоком, в якому вона встановлена, рухається поступально, переміщуючи робочий орган.

Для обмеження ходу штока МЕР використовуються кінцеві вимикачі. Налаштування кінцевих вимикачів дозволяє зменшити робочий хід на 80 мм від номінального значення робочого ходу з кожного боку (мінімальне та максимальне положення штока).

Ручний привід дозволяє при відсутності електроживлення переміщати робочий орган вручну поворотом рукоятки. При роботі електродвигуна рукоятка ручного приводу нерухома. Передбачений захист від раптової подачі напруги на електродвигун в режимі роботи ручним приводом.

Виводи від електродвигуна, кінцевих вимикачів і датчика положення, підключені до клемника або штепсельних роз'ємів, розташованих в коробці виводів. На внутрішній стороні кришки коробки виводів закріплена пластина зі схемою внутрішніх з'єднань усіх елементів МЕР.

Для захисту гвинтової передачі від зовнішніх впливів, у механізмах виконання "А" використовуються гумові гофри, у МЕР виконаннях "Б" і "В" сальники. Механічні упори обмежують переміщення штока МЕР при його втягування або висуненні.

Датчик положення формує струмовий сигнал, пропорційний переміщенню штока виконавчого механізму. Цей сигнал може бути використаний як для індикації, так і для замикання зворотного зв'язку в системі автоматичного регулювання.

Всі ці техніко-функціональні особливості пристроїв МЕП повністю відповідають запитам розроблюваної системи автоматичного керування температурним режимом випалювання окатишів.

3.3 Вибір та обґрунтування промислового контролера та модулів введення-виведення

На основі вимог до технічного забезпечення автоматизованої системи контролю та керування температурним режимом випалювання окатишів в умовах фабрики огрудкування ПрАТ «ПГЗК» на другому рівні системи доцільно використати промисловий логічний контролер TSX Premium фірми Schneider Electric. Перевагами серії контролерів TSX Premium є висока обчислювальна потужність, висока надійність, можливість створення розподіленої системи введення-виведення та широкий вибір мережних архітектур при відносно невеликій (у порівнянні з продуктами виробників-конкурентів відповідного класу) вартості.

Промисловий контролер TSX Premium є модульним, має вбудовані астрономічні часи, можливість розширення розміру пам'яті та можливість встановлення комунікаційного модуля. Крім цього він має вбудовані аналогові входи-виходи та розрахункові канали.

Обране шасі TSX P57 204M для контролера має наступні показники:

- кількість шасі (16 слотів);
- дискретні входи/виходи системи (1024 каналів, модулі на 8, 16, 32, 64 канали);

- підключення до польових шин (не більше 4 модулів, 62 відомих пристрою на шину, або PC-карта у слоті процесору, 127 відомих пристрої);
- мережеві підключення (модулі Ethernet TCP/IP, ModBus Plus, Fipway);
- пам'ять на збереження даних (16 Мб);
- пам'ять, інтегрована ОЗУ (160 кб);
- блок живлення (100...240 В змінного струму).

Розглянемо деякі параметри блоку дискретних входів/виходів TSX DEY 64D2K:

- 64 ізольованих каналів;
- підключення за допомогою 20-контактних роз'ємів HE10;
- сумісність із системою Telefast 2;
- сумісність із системою Tego;
- живлення – 24 В.

Далі, потрібно більш детально ознайомитися із модулем аналогових входів TSX AEY 1614:

- тип модуля – багатодіапазонний;
- кількість каналів – 16 каналів;
- ізоляція – між каналами – 100В;
- час зчитування – 70 м/с (швидке сканування);
- підключення – два 25-контактних роз'єми SUB-D.

Далі, потрібно більш детально ознайомитися із модулем аналогових виходів TSX ASY 800:

- тип модуля – виходи з загальною точкою;
- кількість каналів – 8 каналів;
- ізоляція – між каналами загальна точка;
- час зчитування – надшвидке сканування;
- швидкодія – 5 мс;
- підключення – 25-контактний роз'єм SUB-D.

Далі, розглянемо модуль підключення ЦПУ TSX P57 2637М з мережевою підтримкою:

- інтерфейс – 10BASE-T/1000BASETX (RJ45);
- метод доступу – CSMA-CD;
- швидкість підключення – 10/100 Мбіт/с;
- фізична середа – вита пара, волоконно-оптичний кабель;
- конфігурація – не більш ніж 64 пристрої;
- сервіси – сканування входів/виходів (64 пристрої);
- формат модулю – процесор двійної шини.

3.4 Інформаційне забезпечення АСУ

До складу інформаційного забезпечення автоматизованої системи контролю та керування газоповітряним режимом випалювання окатишів входять наступні типи входних і вихідних сигналів та даних (табл.3.1):

- дискретні входні сигнали 24 В постійної напруги додатної логіки;
- аналогові входні сигнали;
- дискретні вихідні сигнали 24 В постійної напруги додатної логіки з максимально припустимим струмом 0,1 А.

Оскільки всі дискретні входні сигнали системи надходять на входний модуль TSX P57 204М, що встановлений в 2 позицію на шасі контролера TSX Premium , то системні адреси відповідних сигналів будуть мати вигляд %IWN, де N – це номер за порядком в табл. 3.2.

Таблиця 3.1 – Перелік вимірюваних входних/вихідних сигналів системи

	Зона сушки	Зона підігріву	Зона випалювання
Вхідний сигнал	Значення температури	Значення температури	Значення температури
	Значення швидкості руху випалювальних візків	Значення швидкості руху випалювальних	Значення швидкості руху випалювальних

		візків	візків
	Значення висоти шару окатишів	Значення висоти шару окатишів	Значення висоти шару окатишів
	Значення тиску у газоповітряній камері	Значення тиску у газоповітряній камері	Значення тиску у газоповітряній камері
		Витрата газоповітряної суміші	Витрата газоповітряної суміші
Вихідний сигнал	Сигнал керування температурним режимом	Сигнал керування температурним режимом	Сигнал керування температурним режимом

Загальна кількість вхідних сигналів: 10 (Сигнал швидкості руху випалювальних візків та сигнал висоти шару окатишів є сигнали однакові для всіх зон, тому рахуються тільки раз);

Загальна кількість вихідних сигналів: 3.

Таблиця 3.2 – Перелік вимірюваних аналогових сигнали системи

№ з/п	Найменування	Системна адреса	Тип датчика, вид сигналу
1	Тиск в зоні сушки 1	%IW4.0	Aplisens APC-2000, 4-20 мА
2	Тиск в зоні сушки 2	%IW4.1	Aplisens APC-2000, 4-20 мА
3	Тиск в зоні підігріву 1	%IW4.2	Aplisens APC-2000, 4-20 мА
4	Тиск в зоні підігріву 2	%IW4.3	Aplisens APC-2000, 4-20 мА
5	Тиск в зоні випалювання 1	%IW4.4	Aplisens APC-2000, 4-20 мА
6	Тиск в зоні випалювання 2	%IW4.5	Aplisens APC-2000, 4-20 мА
7	Температура в зоні сушки 1	%IW4.6	ETI-2003, 4-20 мА
8	Температура в зоні сушки 2	%IW4.7	ETI-2003, 4-20 мА
9	Температура в зоні підігріву 1	%IW4.8	ETI-2003, 4-20 мА
10	Температура в зоні підігріву 2	%IW4.9	ETI-2003, 4-20 мА
11	Температура в зоні випалювання 1	%IW4.10	ETI-2003, 4-20 мА
12	Температура в зоні випалювання 2	%IW4.11	ETI-2003, 4-20 мА
13	Витрата газоповітряної суміші у зоні підігріву	%IW4.12	Honeywell AWM 310W 4-20 мА
14	Витрата газоповітряної суміші у зоні випалювання	%IW4.13	Honeywell AWM 310W 4-20 мА
15	Швидкість переміщення випалювальних візків	%IW4.14	Promsat ДКС 4-20 мА

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу

4.1 Ідентифікація процесів температурної обробки окатишів в технологічних зонах випалювальної машини

Згідно зібраних експериментальних даних, були побудовані математичні моделі.

В свою чергу, використавши прикладний пакет програм MatLab, були розраховані передаточні функції даних моделей. Далі, розглянемо більш детально методику створення та вивчення математичних моделей по каналах:

- температура в зоні сушки (вхідні величини – швидкість руху випалювальних візків, тиск у зоні сушки, висота шару окатишів; вихідна величина – температура в зоні сушки);

- температура в зоні випалювання 1 (вхідні величини – швидкість руху випалювальних візків, тиск у зоні випалювання 1, висота шару окатишів, кількість газоповітряної суміші; вихідна величина – температура у зоні випалювання 1);

- температура в зоні випалювання 2 (вхідні величини – швидкість руху випалювальних візків, тиск у зоні випалювання 2, висота шару окатишів, кількість газоповітряної суміші; вихідна величина – температура у зоні випалювання 2);

- температура в зоні підігріву (вхідні величини – швидкість руху випалювальних візків, висота шару окатишів, кількість газоповітряної суміші; вихідна величина – температура у зоні підігріву);

- тиск у зоні охолодження 1 (вхідні величини – швидкість руху випалювальних візків, висота шару окатишів; вихідна величина – тиск у зоні охолодження 1);

- тиск у зоні охолодження 2 (вхідні величини – швидкість руху випалювальних візків, висота шару окатишів; вихідна величина – тиск у зоні охолодження 2);

- тиск у зоні підігріву (вхідні величини – швидкість руху випалювальних візків, висота шару окатишів; вихідна величина – тиск у зоні підігріву);

Отже, в пакеті програм MatLab, спочатку були введені всі дані, які були отримані раніше на підприємстві. Всі масиви даних (швидкість руху випалювальних візків, висота шару окатишів, тиск по технологічних зонах випалювання/сушки, температура по технологічних зонах випалювання/сушки) були об'єднані та приведені до форми змінних у MatLab (рис.4.1.-4.2).

	1	2	3	4
1	2.1100	444	-47	
2	2.1100	436	-49	
3	2.1100	440	-48	
4	2.0700	434	-52	
5	2.0800	431	-52	
6	2.0700	423	-52	
7	2.0800	430	-52	
8	2.1000	420	-47	
9	2.1100	422	-46	
10	2.1100	430	-46	
11	2.1100	432	-48	
12	2.0900	427	-51	
13	2.0700	419	-54	
14	2.0700	421	-52	
15	2.0700	424	-48	
16	2.1100	428	-49	
17	2.1100	440	-46	
18	2.1100	442	-44	
19	2.1100	445	-47	
20	2.0900	439	-47	
21	2.0700	454	-47	
22	2.1000	450	-46	
23	2.0700	456	-47	
24	2.0900	446	-45	
25	2.1100	451	-47	
26	2.1400	436	-46	

Рисунок 4.1 – Масив даних, отриманих на підприємстві, методом зчитування інформації із SCADA-системи реального часу.

Name	Value	Min	Max
P3DZ	<4-D idproc>		
ans	0	0	0
temp1	<1000x1 double>	297	308
temp2	<1000x1 double>	278	304
yh_dan1	<1000x3 double>	-61	489
yh_dan2	<1000x3 double>	-63	478

Рисунок 4.2 – Перетворення масивів даних до вигляду змінних

Далі, для того, щоб отримати математичну модель по відповідних каналах, потрібно використати інструмент ident в системі MatLab (рис.4.3).

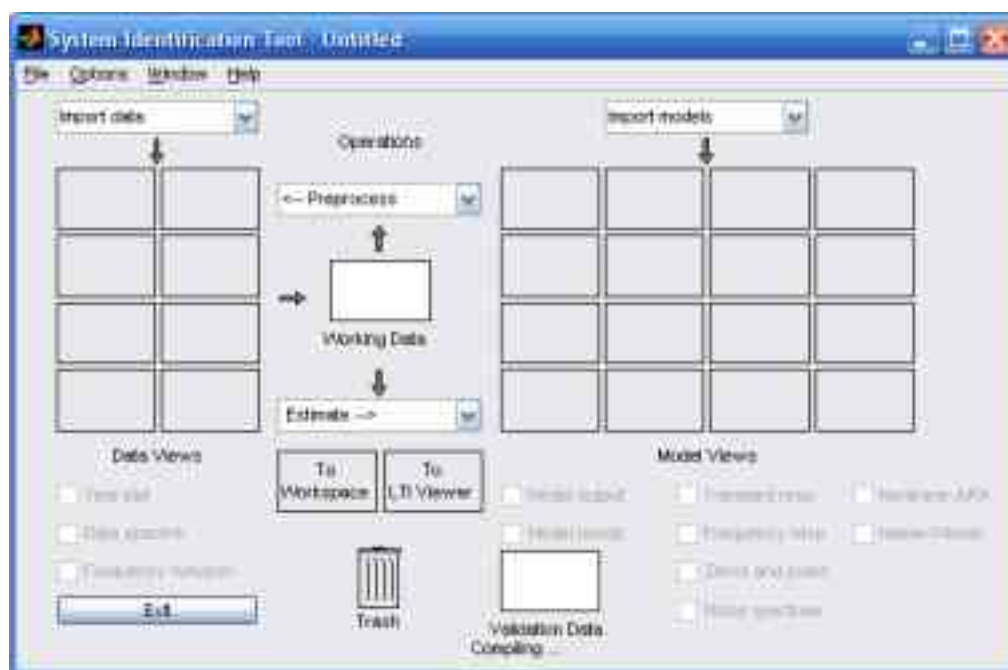


Рисунок 4.3 – Утиліта Ident

В даній утиліті потрібно внести вхідні дані, які необхідно змоделювати, шляхом перетаскування змінних із головного вінка MatLab, до вікна утиліти Ident (рис.4.4).

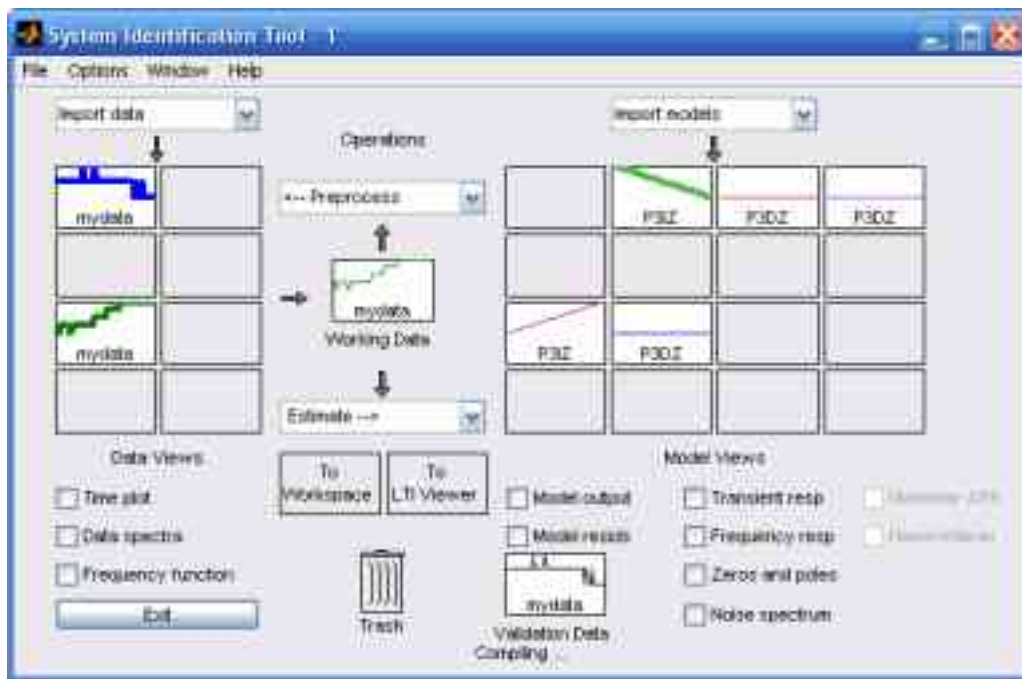


Рисунок 4.4 – Заповнена та готова до математичного моделювання система утиліти Ident.

Для того, щоб отримати найбільш точну передаточну функцію, яка б найбільш точно характеризувала перехідний процес, потрібно шляхом підбору знайти оптимальне рішення (рис.4.5-4.6):



Рисунок 4.5 – Вікно налаштування вигляду та типу передаточної функції

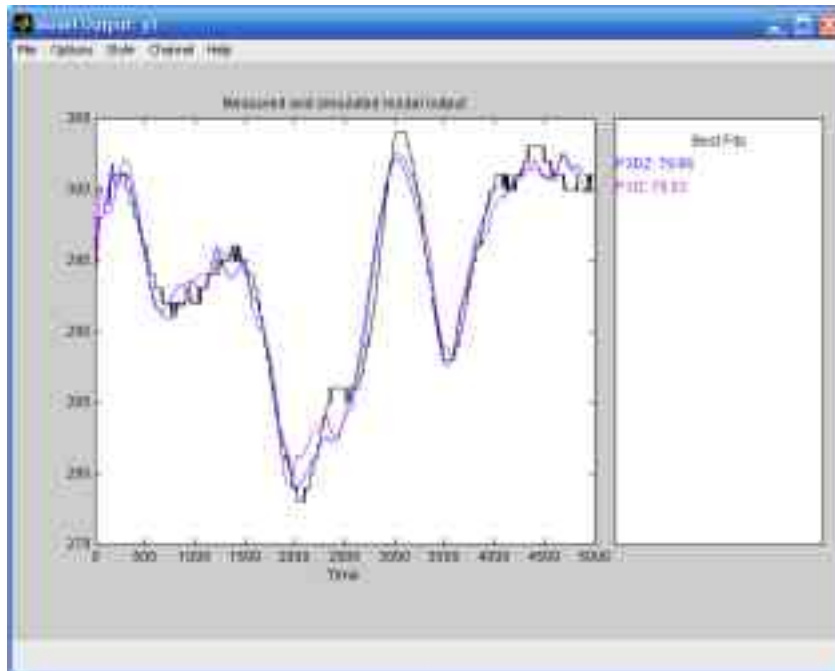


Рисунок 4.6 – Графік відповідності передаточних функцій до графіку перехідного процесу

Тобто, на даному графіку, можна чітко визначити, що передаточна функція, R3DZ має 79,66 відсотків відповідності, що задовольняє вимогам розроблюваної системи.

Далі, необхідно визначити точну формулу даної передаточної функції (рис.4.7):



Рисунок 4.8 –Точний опис отриманої передаточної функції

Тобто, для каналу контролю температури у зоні сушки, по зміні швидкості руху випалювальних візків, та зміні висоти шару окатишів, а також зміні тиску у зоні сушки, були отримані наступні передаточні функції:

$$W1(p) = K \frac{1 + T_z * s}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)} * e^{-T_d * s};$$

де $K = 6$; $T_{p1} = 3839.6\text{с}$; $T_{p2} = 15.198\text{с}$; $T_{p3} = 0.0053415\text{с}$; $T_d = 146.54\text{с}$; $T_z = 17.062\text{с}$.

$$W2(p) = K \frac{1 + T_z * s}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)} * e^{-T_d * s};$$

де $K = -4.2356$; $T_{p1} = 3259.3\text{с}$; $T_{p2} = 36.711\text{с}$; $T_{p3} = 190.5\text{с}$; $T_d = 14.117\text{с}$; $T_z = 90.028\text{с}$.

$$W3(p) = K \frac{1 + T_z * s}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)} * e^{-T_d * s};$$

де $K = -2.5137$; $T_{p1} = 170.7$; $T_{p2} = 170.68$; $T_{p3} = 7.904$; $T_d = 5.0952$; $T_z = -20.423$

Далі, розглянемо всі інші канали контролю температури та тиску.

Для каналу контролю температури у зоні випалювання 1 по зміні швидкості руху випалювальних візків, та зміні висоти шару окатишів, а також зміні тиску у зоні випалювання 1, був отриманий графік оптимальних рішень (рис. 4.9).

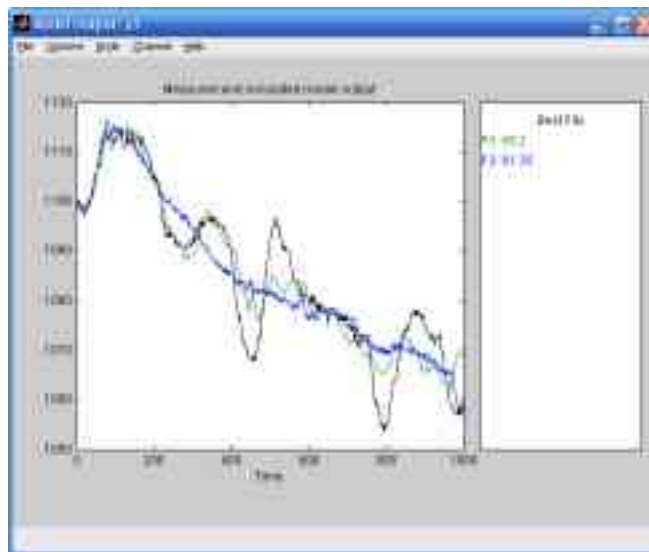


Рисунок 4.9 – Графік відповідності передаточних функцій до графіку перехідного процесу по каналу контролю температури у зоні випалювання 1

Формули передаточної функції РЗ:

$$W1(p) = K \frac{K}{(1 + Tr1 * s)(1 + Tr2 * s)(1 + Tr3 * s)};$$

де $K = 0.306$; $Tr1 = 45.782c$; $Tr2 = 45.728c$; $Tr3 = 15.487c$;

$$W2(p) = K \frac{K}{(1 + Tr1 * s)(1 + Tr2 * s)(1 + Tr3 * s)};$$

де $K = -0.3821$; $Tr1 = 11.48c$; $Tr2 = 0.0013537c$; $Tr3 = 11.308c$;

$$W3(p) = K \frac{K}{(1 + Tr1 * s)(1 + Tr2 * s)(1 + Tr3 * s)};$$

де $K = -8.0354$; $Tr1 = 2.2763c$; $Tr2 = 0.0018096c$; $Tr3 = 13.706c$;

$$W4(p) = K \frac{K}{(1 + Tr1 * s)(1 + Tr2 * s)(1 + Tr3 * s)};$$

де $K = -0.83097$; $Tr1 = 70199c$; $Tr2 = 0.001c$; $Tr3 = 0.0028093c$;

Для каналу контролю температури у зоні випалювання 2 по зміні швидкості руху випалювальних візків, та зміні висоти шару окатишів, а також зміні тиску у зоні випалювання 2, був отриманий графік оптимальних рішень (рис.4.10).

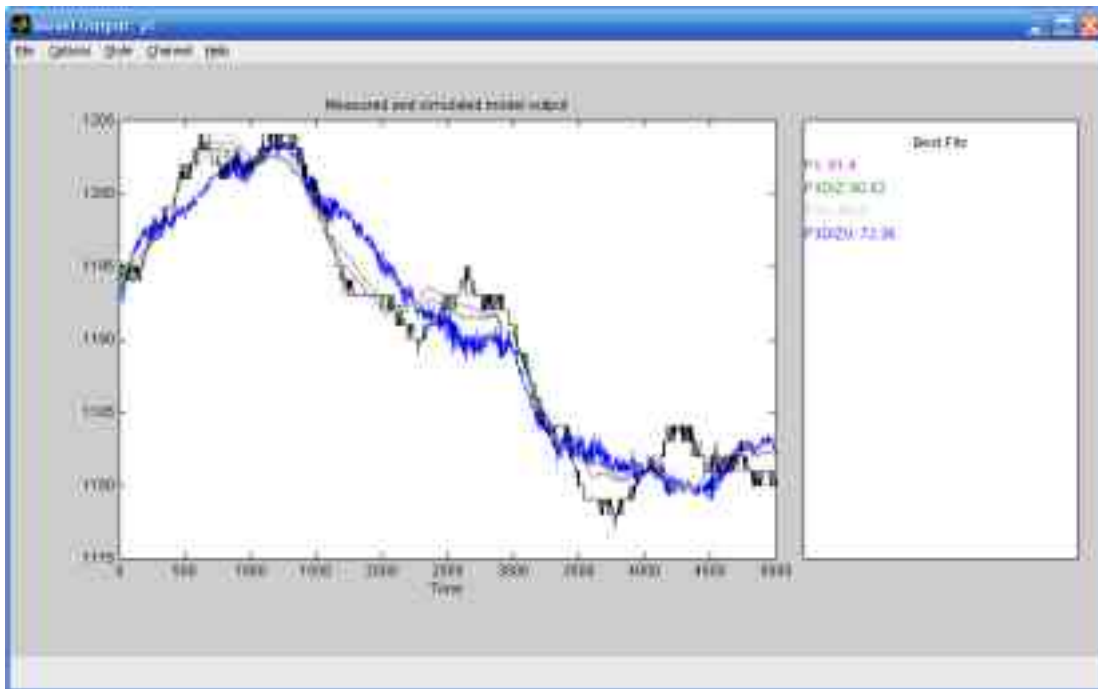


Рисунок 4.10 – Графік відповідності передаточних функцій до графіку перехідного процесу по каналу контролю температури у зоні випалювання 2

Формули передаточної функції P1:

$$W1(p) = \frac{K}{1 + T_{p1} * s};$$

де $K = -47.876$; $T_{p1} = 482.53c$

$$W2(p) = \frac{K}{1 + T_{p1} * s};$$

де $K = 3.0737$; $T_{p1} = 12486c$

$$W3(p) = \frac{K}{1 + T_{p1} * s};$$

де $K = 6.8173$; $T_{p1} = 392.06c$

Для каналу контролю температури у зоні підігріву по зміні швидкості руху випалювальних візків, та зміні висоти шару окатишів, був отриманий графік оптимальних рішень (рис.4.11).

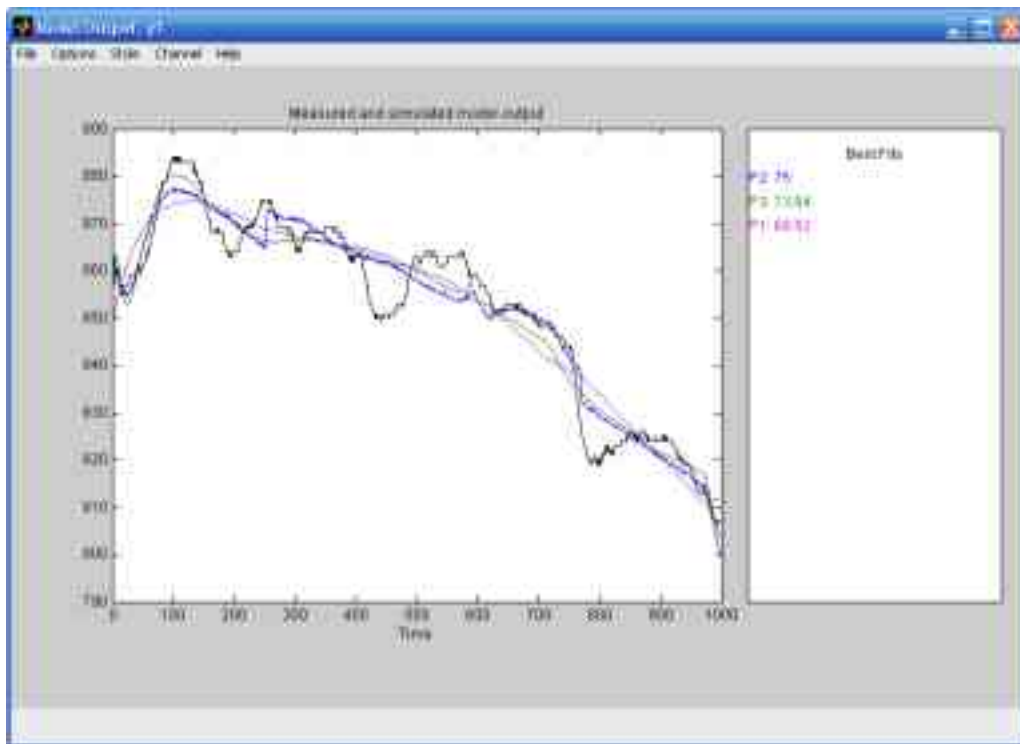


Рисунок 4.11 – Графік відповідності передаточних функцій до графіку перехідного процесу по каналу контролю температури у зоні підігріву

Формули передаточної функції P2:

$$W1(p) = K \frac{K}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)};$$

де $K = 0.265$; $T_{p1} = 16.262c$; $T_{p2} = 13.654c$;

$$W2(p) = K \frac{K}{(1 + Tr1 * s)(1 + Tr2 * s)};$$

де $K = 1.7733$; $Tr1 = 914.1c$; $Tr2 = 14.687c$;

$$W3(p) = K \frac{K}{(1 + Tr1 * s)(1 + Tr2 * s)};$$

де $K = -0.060406c$; $Tr1 = 0.0019195c$; $Tr2 = 0.001c$;

Для каналу контролю температури у зоні охолодження 1 по зміні швидкості руху випалювальних візків, та зміні висоти шару окатишів, був отриманий графік оптимальних рішень (рис.4.12).

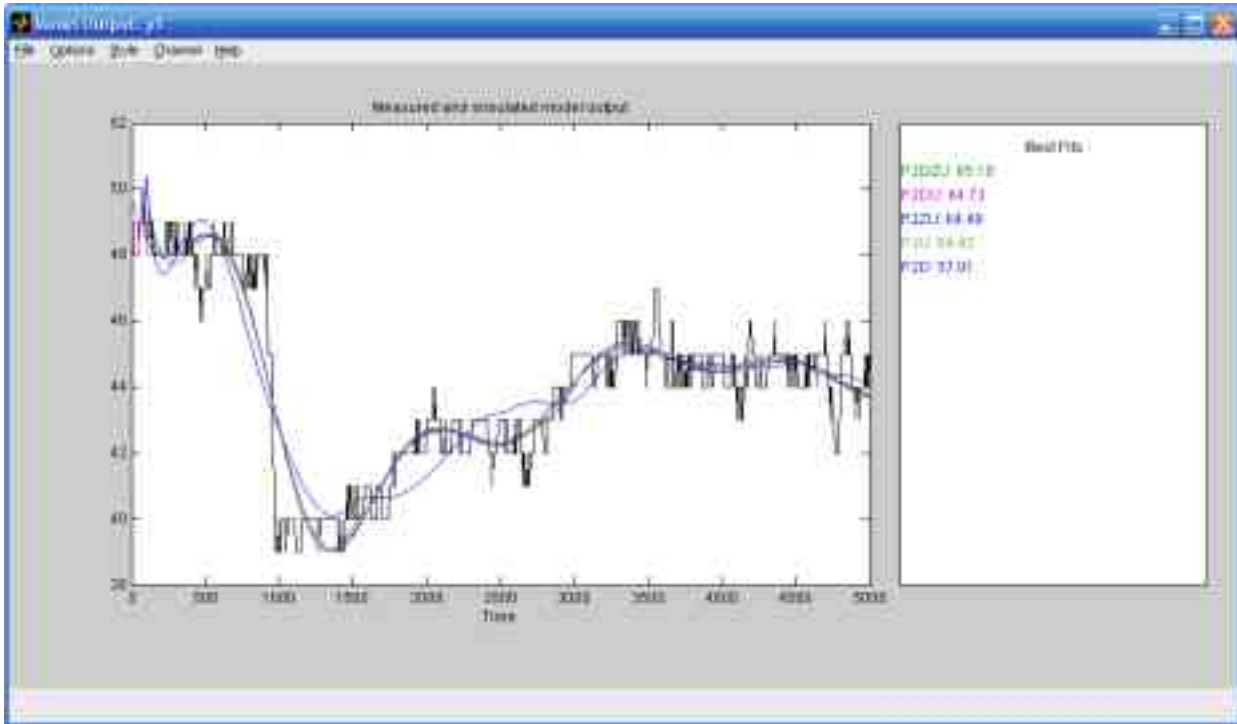


Рисунок 4.12 – Графік відповідності передаточних функцій до графіку перехідного процесу по каналу контролю температури у зоні охолодження 1

Формули передаточної функції P2DZU:

$$W1(p) = K \frac{1 + Tz * s}{1 + 2 * Zeta * Tw * s + (Tw * s)^2} * e^{-Td * s};$$

де $K = 19.851$; $Tw = 667.95c$; $Zeta = 0.61352$; $Td = 115.69c$; $Tz = 672.73c$

$$W2(p) = K \frac{1 + Tz * s}{1 + 2 * Zeta * Tw * s + (Tw * s)^2} * e^{-Td * s};$$

де $K = 0.0065491$; $Tw = 196.12c$; $Zeta = 0.171$; $Td = 0.078234c$; $Tz = 369.57c$

Для каналу контролю температури у зоні охолодження 2 по зміні швидкості руху випалювальних візків, та зміні висоти шару окатишів, був отриманий графік оптимальних рішень (рис.4.13).

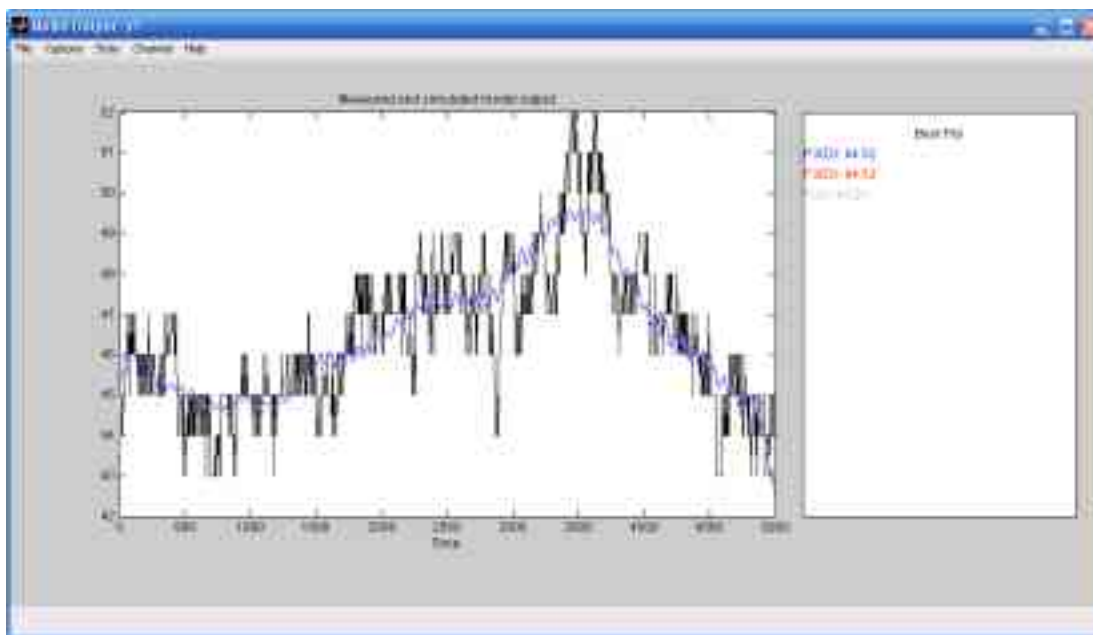


Рисунок 4.13 – Графік відповідності передаточних функцій до графіку перехідного процесу по каналу контролю температури у зоні охолодження 2

Формули передаточної функції P3IZU:

$$W1(p) = K \frac{1 + Tz * s}{s(1 + 2 * Zeta * Tw * s + (Tw * s)^2 (1 + Tp3 * s))};$$

де $K = -0.026034$; $Tw = 24.169c$; $Zeta = 3.8476$; $Tp3 = 177.27c$; $Tz = -2068.9c$

$$W2(p) = K \frac{1 + Tz * s}{s(1 + 2 * Zeta * Tw * s + (Tw * s)^2 (1 + Tp3 * s))};$$

де $K = 0.00012686$; $Tw = 11.623c$; $Zeta = 0.0071226c$; $Tp3 = 23.735c$; $Tz = 24.625c$

4.2 Обґрунтування використання методів теорії керування з прогнозуючими моделями для керування параметрів при виготовленні окатишів

Одним із сучасних формалізованих підходів до аналізу і синтезу систем управління, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія

управління динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей - Model Predictive Control (MPC).

Цей підхід почав розвиватися на початку 60-х років для управління процесами та обладнанням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких застосування традиційних методів синтезу був у край ускладнений у зв'язку з винятковою складністю математичних моделей.

В даний час сфера практичного застосування MPC-методів істотно розширилася, охоплюючи різноманітні технологічні процеси в хімічній і будівельній індустрії, легкої і харчової промисловості, в аерокосмічних дослідженнях, в сучасних системах енергетики і т. д.

Основною перевагою MPC-підходу, що визначає його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем управління, служить відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє управляти багатовимірними і багатозв'язними об'єктами зі складною структурою, що включає нелінійності, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі і керовані змінні, враховувати невизначеності в завданні об'єктів і збурень. Крім того, можливе врахування транспортного запізнювання, змін критеріїв якості в ході процесу і відмов датчиків системи вимірювання.

Сутність MPC-підходу складає наступна схема управління динамічними об'єктами за принципом зворотного зв'язку (рис.4.14).

1. Розглядається деяка (проста) математична модель об'єкта, початковими умовами для якої служить його поточний стан. При заданому програмному управлінні виконується інтегрування рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на деякому кінцевому відрізку часу (горизонті прогнозу).

2. Виконується оптимізація програмного управління, метою якого є наближення регульованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних задаючих сигналів на горизонті прогнозу. Оптимізація здійснюється з

урахуванням усього комплексу обмежень, накладених на керуючі і регульовані змінні.

3. На етапі обчислень, що становить фіксовану малу частину горизонту прогнозу, реалізується знайдене оптимальне управління і здійснюється вимір (або відновлення по вимірних змінним) фактичного стану об'єкта на кінець кроку.

4. Горизонт прогнозу зсувається на крок вперед, і повторюються пункти 1 - 3 цієї послідовності дій.

Даний підхід був обраний для того, щоб можна було якомога точніше і правильніше змодельовати систему, яка б відповідала вимогам технічного рішення, що впроваджується. Справді, після моделювання з отриманих даних деякої системи, необхідно розробити на її основі таку систему автоматичного керування, яка б якомога швидше і точніше прогнозувала результат роботи об'єкту керування у деякий наступний інтервал часу.

Саме такий метод дозволяє розроблюваній системі автоматичного керування працювати таким чином, щоб не обов'язкові енерговитрати у вигляді газоповітряної суміші зводились нанівець.

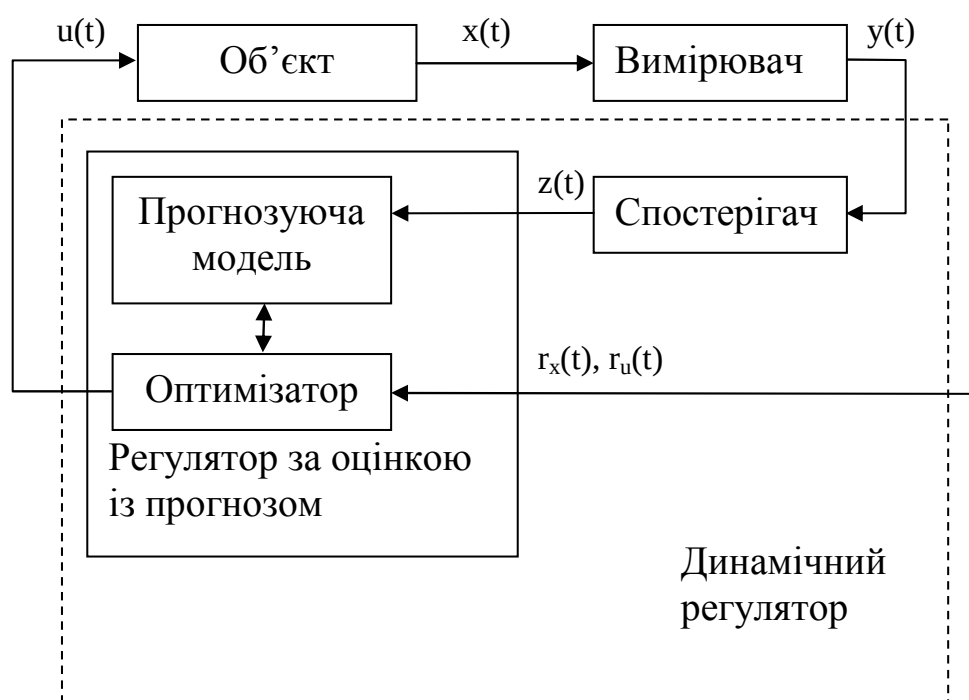


Рисунок 4.14 – Базовий варіант використання MPC-регулятора

Розглянемо основні положення підходу, на базі дискретної моделі об'єкта управління

$$\begin{aligned}\tilde{x}_{k+1} &= \tilde{A}\tilde{x}_k + \tilde{B}\tilde{u}_k + \tilde{H}d_k, \\ \tilde{y}_k &= \tilde{C}\tilde{x}_k + W_k.\end{aligned}\tag{4.1}$$

Тут $k = 0, 1, 2, \dots$ - номер такту, визначаючий дискретний момент часу $t = k * \Delta t$, де Δt - шаг дискретності. Вектори $\tilde{x}_k \in E^n$, $\tilde{u}_k \in E^m$ та $\tilde{y}_k \in E^y$ представляють стан об'єкту, керування та вимірювання (регульовані координати) та відповідно в момент часу $t = k * \Delta t$, а вектори $d_k \in E^{nd}$, $w_k \in E^y$ - зовнішнє збудження та шум у вимірюваннях в той же момент часу. Постійні матриці $\tilde{A}$, $\tilde{B}$, $\tilde{H}$ та $\tilde{C}$ мають відповідні розмірності.

Для оцінки якості процесу керування, введемо в розгляд функціонал який заданий на рухах об'єкта

$$\tilde{J} = \tilde{J}(\tilde{y}, \tilde{u}) = \sum_{i=1}^{\infty} [(\tilde{y}_i - r_i)^T R_i (\tilde{y}_i - r_i) + u_{i-1}^T Q_i u_{i-1}] \tag{4.2}$$

де r_i - значення задаючого сигналу в момент часу $t = i * \Delta t$, R_i та Q_i - додатньо визначені симетричні матриці. Символами $\tilde{y}$ та $\tilde{u}$ позначені послідовності векторів $\tilde{y} = \{\tilde{y}_i\}$, $\tilde{u} = \{\tilde{u}_i\}$, де $i = 0, 1, 2, \dots$. Очевидно, що при однакових початкових умовах та зовнішніх впливів, функціонал (4.2) на рухах об'єкту (4.1) залежить тільки від вибору $\tilde{u}$. При цьому, може бути поставлена оптимізація вигляду:

$$\tilde{J} = \tilde{J}(\tilde{y}(\tilde{u}), \tilde{u}) = \tilde{J}(\tilde{u}) \rightarrow \inf_{\tilde{u} \in \Omega_u} \tag{4.3}$$

де Ω_u - множина будь-яких послідовностей m -мірних векторів, тобто задача (4.3) – це задача без обмежень.

4.3 Розробка алгоритму вимірювання висоти шару окатишів

Система вимірювання об'єму окатишів.

Для вимірювання шару та об'єму окатишів, які подаються на випалювальних візках до зон сушки, підігріву та випалювання, використання

звичайних первинних перетворювачів рівня матеріалів не дасть змоги точно показати необхідну інформацію. Тому, потрібно використати непрямий підхід під час моделювання системи вимірювання шару окатишів.

Розглянемо більш детально, яким саме чином вимірюється висота шару окатишів.

$$H = \frac{\frac{P}{3600}}{r * \frac{v}{60} * Sh} * 1000; \quad (4.4)$$

де H – висота шару окатишів; P – різниця між подачею окатишів, та масою просипу; r – густина шару окатишів; v – швидкість руху випалювальних візків; Sh – ширина шару окатишів.

Наприклад, візьмемо такі дані: $P = 100$; $r = 1,57$; $v = 1,4$; $Sh = 2,1$;

Тоді, за формулою (4.4) отримаємо наступний розрахунок:

$$H = \frac{\frac{200}{3600}}{1,57 * \frac{1,4}{60} * 4} * 1000 = \frac{0,0555}{0,1465} * 1000 = 379_{мм}$$

4.4 Комп'ютерне моделювання підсистем керування температурою у випалювальній машині, реалізованих на базі принципу комбінованого керування та типових регуляторів

Для того, щоб змоделювати системи автоматичного керування по технологічних зонах випалювання окатишів на фабриці огрудкування ПрАТ «ПГЗК», скористаємось утилітою Simulink пакету програм MatLab.

Дана утиліта була обрана через ряд причин, насамперед це:

- відносна легкість у реалізації функціональної схеми;
- простота зміни параметрів передаточних функцій ланок системи автоматичного керування;
- наочність та зрозумілість реалізації системи;

- можливість побудови графіків перехідних процесів систем автоматичного керування, що, в свою чергу, дозволяє аналізувати та вивчати отриману систему автоматичного керування, та інші позитивні властивості утиліті.

Розпочнемо, як завжди, із системи автоматичного керування температурним режимом зони сушки, за каналом температура – висота шару окатишів, швидкість руху випалювальних візків, тиск у зоні сушки.

Для цього, побудуємо функціональну систему в утиліті Simulink. Розглянемо систему на рис.4.15.

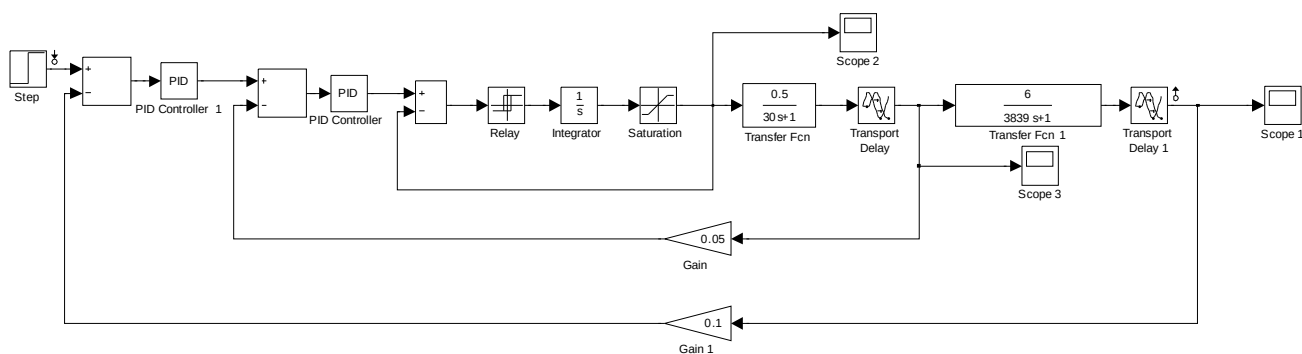


Рисунок 4.15 – Моделювання функціональної схеми системи автоматичного керування температурою в зоні сушки

Якщо необхідно перевірити правильність функціонування системи, можна переглянути графік перехідного процесу (Scope1), який показує, яку температуру буде забезпечувати система автоматичного керування на виході, причому, на вході, сигнал завдання дорівнює 300°C.

Графік перехідного процесу розглянемо на рис.4.15.

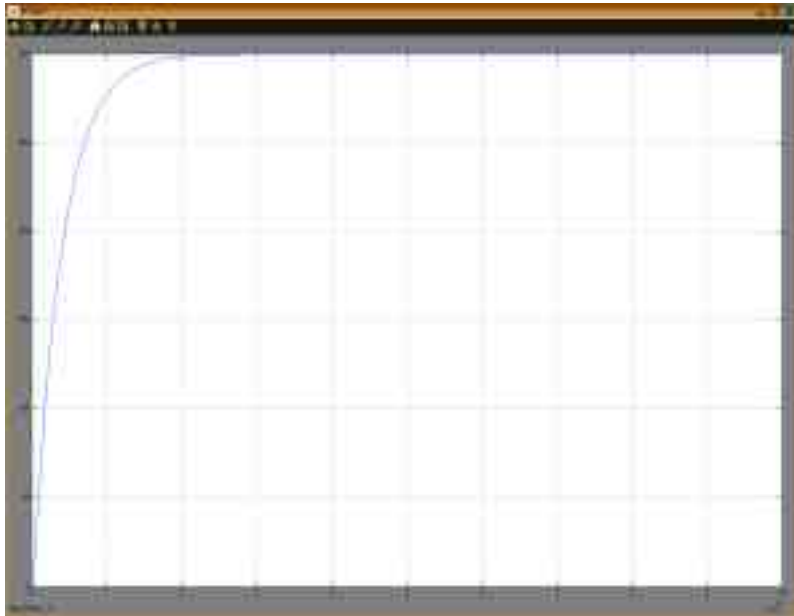


Рисунок 4.15 – Графік перехідного процесу. Зона сушки

Як бачимо, система чітко видає сигнал, який дорівнює необхідній нам величині в 300°C .

Також, розглянемо, які сигнали по ступеню відкриття заслінки φ (Score 2) та тиску P (Score 3) на графіках перехідного процесу, на рис 4.16-4.17.

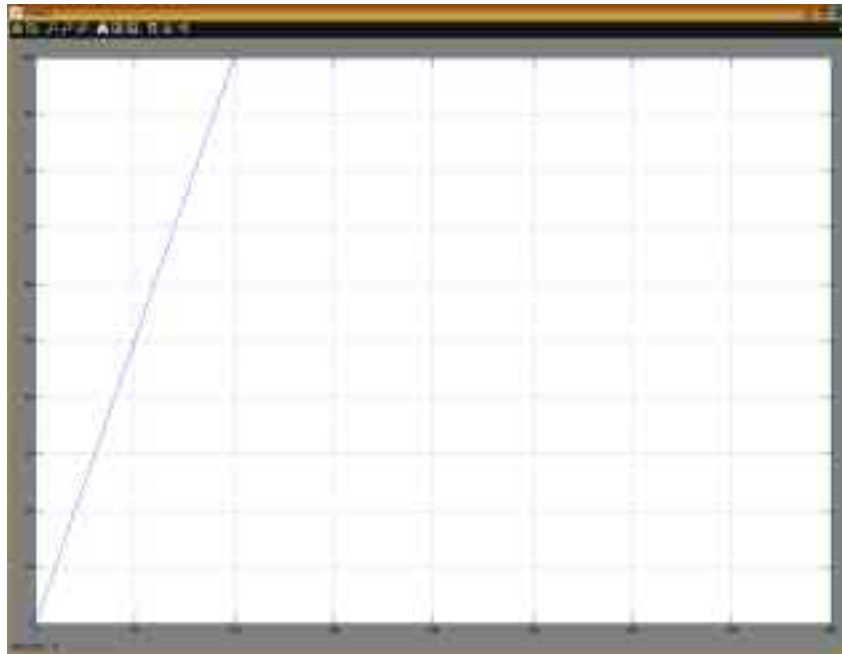


Рисунок 4.16 – Графік перехідного процесу керування заслінкою, вихідний сигнал ступеню відкритості заслінки

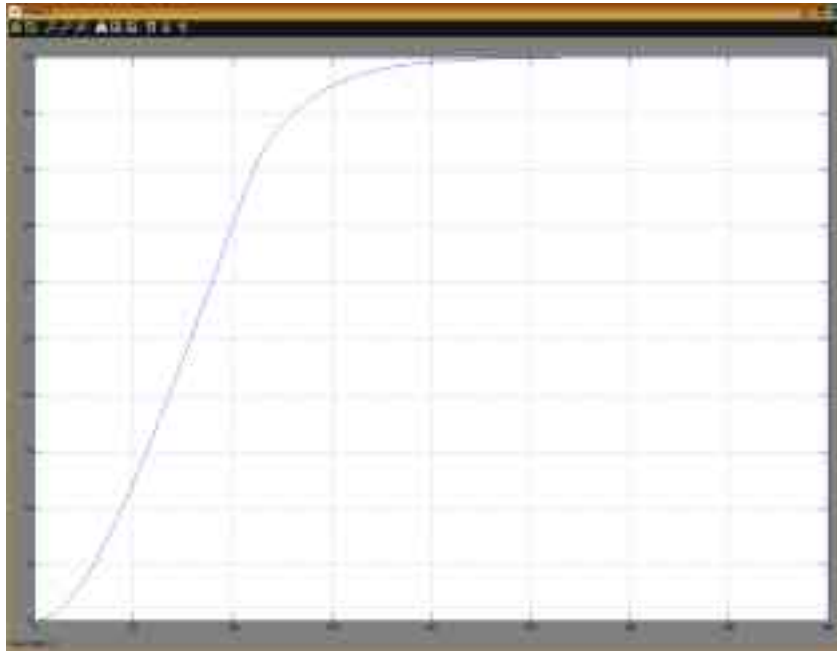


Рисунок 4.17 – Графік перехідного процесу керування тиском, сигнал Р

Як бачимо з рисунків 4.16-4.17, система повністю відповідає вимогам магістерської роботи, підтримуючи тиск у зоні сушки, який дорівнює (відповідаючи даним, зібраним практично) 50кПа, та ступеню відкриття заслінки 100%.

Далі, необхідно врахувати збурення, які діють на систему.

Доповнимо систему, змодельовану у середовищі Simulink. Розглянемо її на рис. 4.18.

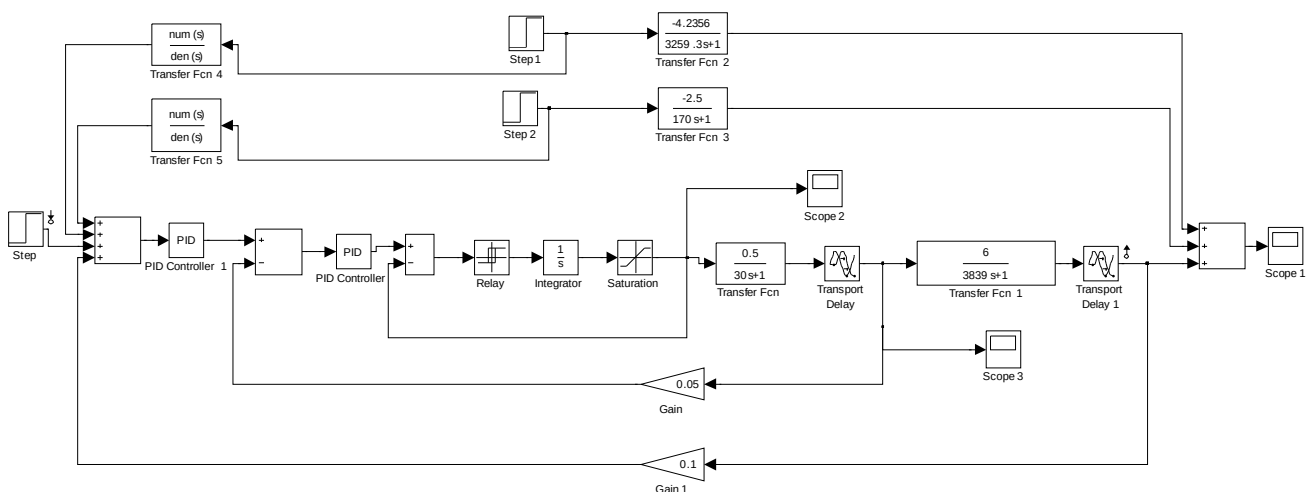


Рисунок 4.18 – Моделювання функціональної схеми системи автоматичного керування температурою в зоні сушки з урахуванням збурень

Також, слід зазначити, що всі параметри налаштування для П-, ПІ-, та ПІД-регуляторів були обрані згідно зі структурно-параметричної системи оптимізації систем автоматичного керування. Дана методика використовується і для побудови схем управління в зоні підігріву та випалювання.

При цьому, всі дані, які вводяться в схему, взяті з попередніх розділів даної роботи, тобто вони цілком відповідають даним, отриманим у результаті моделювання процесу залежності температури від тиску, висоти шару окатишів, та швидкості руху випалювальних візків.

Розглянемо тепер графік перехідного процесу змодельованої системи автоматичного керування на рис.4.19.

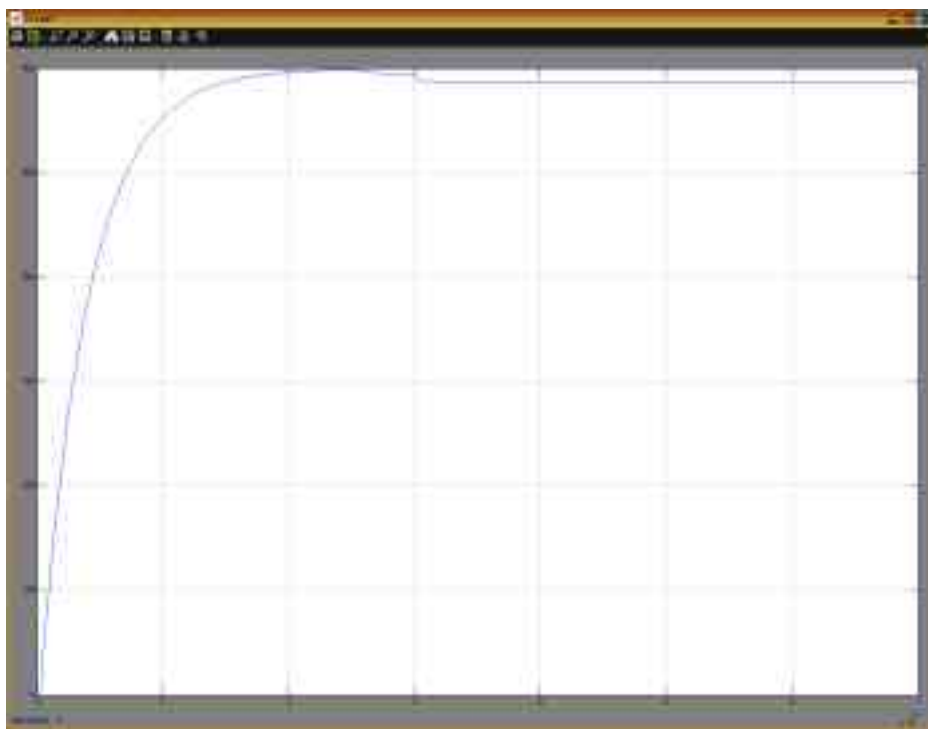


Рисунок 4.19 – Графік перехідного процесу з урахуванням збурень

Отже, після введення сигналів збурення за швидкістю руху випалювальних візків, та висоти шару окатишів, маємо деяку похибку в роботі системи.

Тобто, замість того, щоб давати на виході необхідні 300°C , в системі на часі в 2500 та 3000 с., відбуваються збурення, що «збивають» температуру до рівня, який не є сигналом, необхідним для отримання.

Такі похибки легко виправити за допомогою використання не П- та ПІ-регуляторів, а МРС-регулятору. Та, спочатку, розглянемо також моделювання функціональних схем для зони підігріву та випалювання.

Змодельована функціональна система управління температурним режимом в зоні підігріву, в Simulink, представлена на рисунку 4.20.

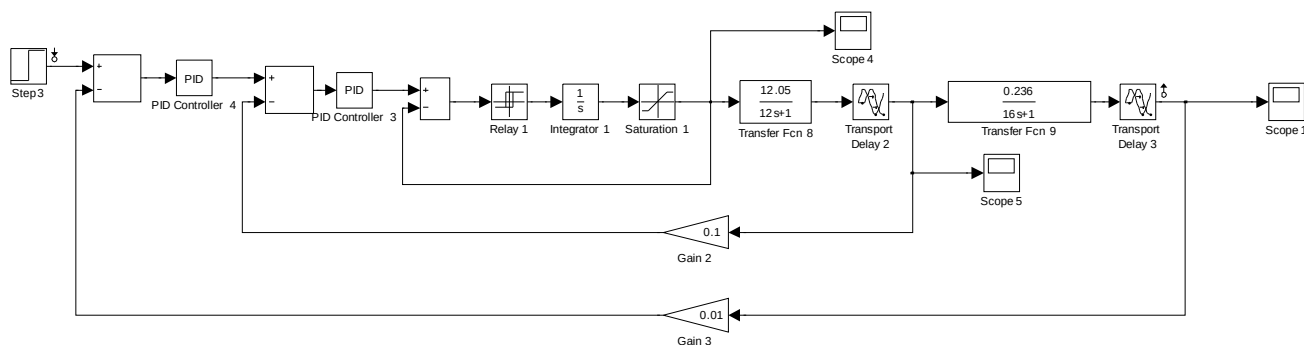


Рисунок 4.20 – Моделювання функціональної схеми системи автоматичного керування температурою в зоні підігріву

Якщо необхідно перевірити правильність функціонування системи, можна переглянути графік перехідного процесу (Scope1), який показує, яку температуру буде забезпечувати система автоматичного керування на виході, причому, на вході, сигнал завдання дорівнює 870°C.

Графік перехідного процесу розглянемо на рисунку 4.21.

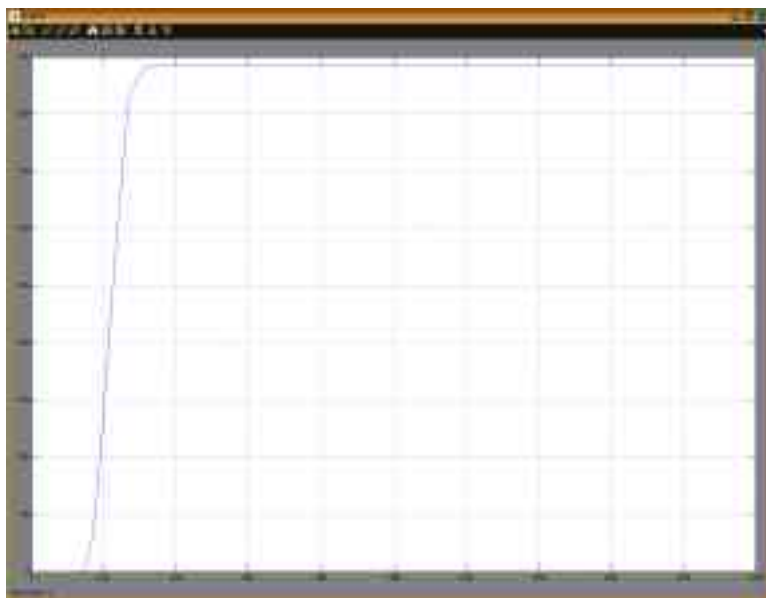


Рисунок 4.21 – Графік перехідного процесу. Зона підігріву

Як бачимо, система чітко видає сигнал, який дорівнює необхідній нам величині в 870°C .

Також, розглянемо, які сигнали по ступеню відкриття заслінки φ (Score 4) та витраті газоповітряної суміші Q (Score 5) на графіках перехідного процесу, на рисунках 4.22, 4.23.



Рисунок 4.22 – Графік перехідного процесу керування заслінкою, вихідний сигнал ступеню відкритості заслінки

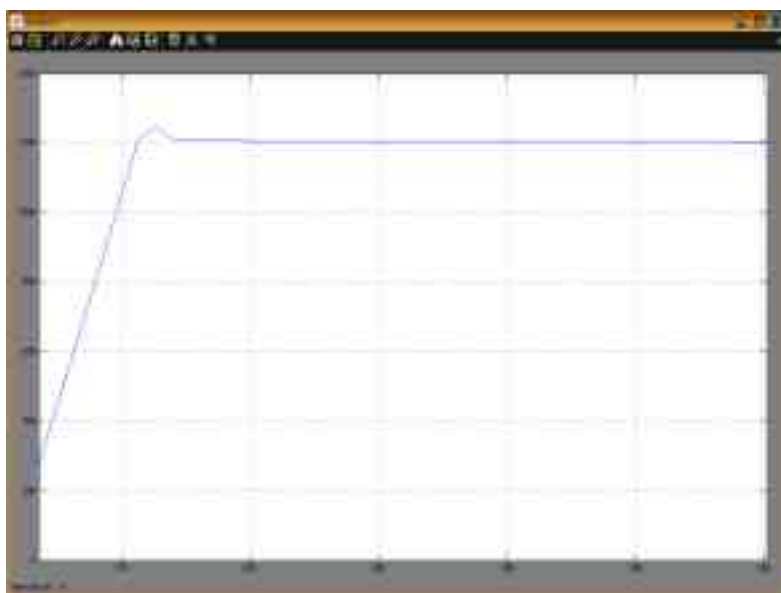


Рисунок 4.23 – Графік перехідного процесу керування витратою газоповітряної суміші, сигнал Q

Як бачимо з рисунків 4.22, 4.23 система повністю відповідає вимогам роботи, підтримуючи необхідну витрату газоповітряної суміші та ступеню відкриття заслінки 100%.

Далі, необхідно врахувати збурення, які діють на систему.

Доповнимо систему, змодельовану у середовищі Simulink. Розглянемо її на рисунку 4.24.

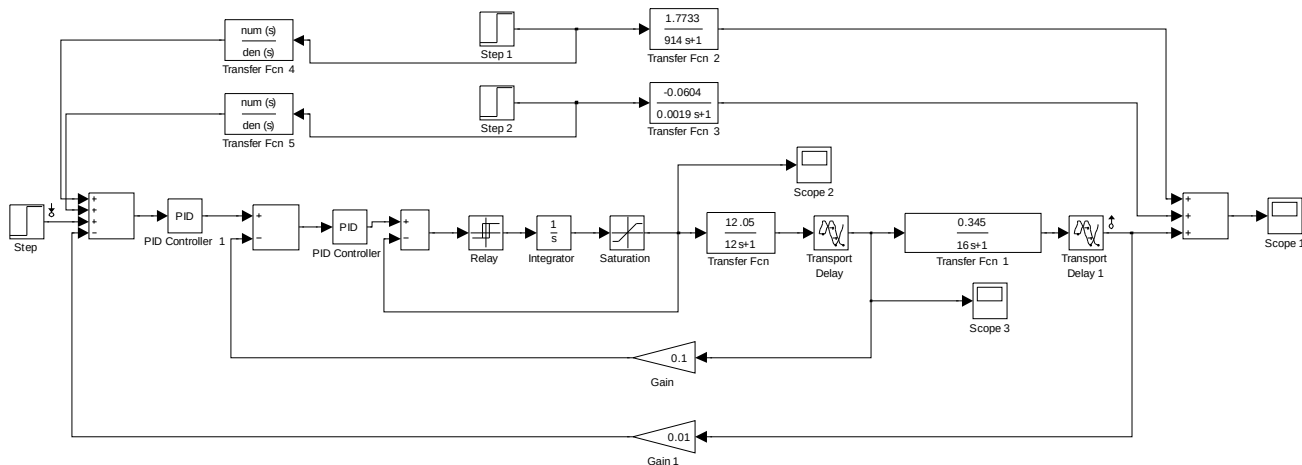


Рисунок 4.24 – Моделювання функціональної схеми системи автоматичного керування температурою в зоні підігріву з урахуванням збурень

При цьому, всі дані, які вводяться в схему, повністю відповідають даним, отриманим у результаті моделювання процесу залежності температури від кількості витрати газоповітряної суміші, висоти шару окатишів, та швидкості руху випалювальних візків.

Розглянемо тепер графік перехідного процесу змодельованої системи автоматичного керування на рисунку 4.24.

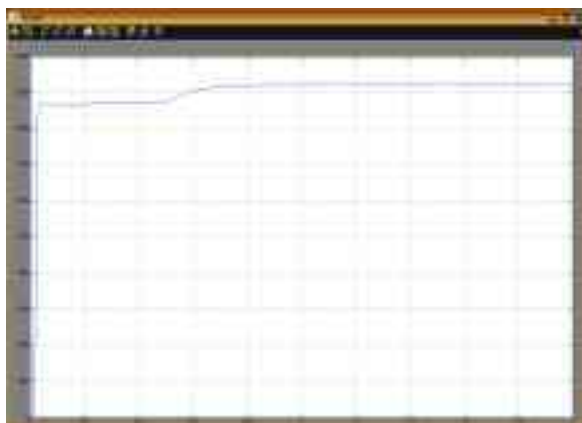


Рисунок 4.24 – Графік перехідного процесу з урахуванням збурень

Отже, після введення сигналів збурення за швидкістю руху випалювальних візків, та висоти шару окатишів, маємо деяку похибку в роботі системи. Тобто, замість того, щоб давати на виході необхідну температуру, в системі відбуваються збурення, що змінюють температуру до рівня, який не є сигналом, необхідним для отримання.

Такі похибки легко виправити за допомогою використання не П- та ПІ-регуляторів, а МРС-регулятора.

Далі, за аналогією, розглянемо моделювання системи автоматичного керування температурою в зоні випалювання.

Для початку, розглянемо змодельовану функціональну систему управління температурним режимом в зоні випалювання в Simulink, на рисунку 4.25.

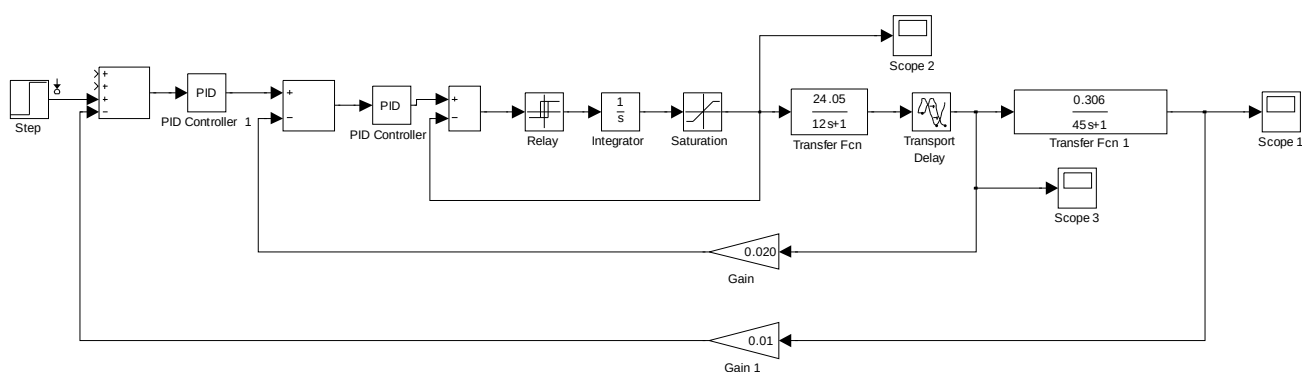


Рисунок 4.25 – Моделювання функціональної схеми системи автоматичного керування температурою в зоні випалювання

Якщо необхідно перевірити правильність функціонування системи, можна переглянути графік перехідного процесу (Scope1), який показує, яку температуру буде забезпечувати система автоматичного керування на виході, причому, на вході, сигнал завдання дорівнює 1110-1120 °C.

Графік перехідного процесу розглянемо на рисунку 4.26.

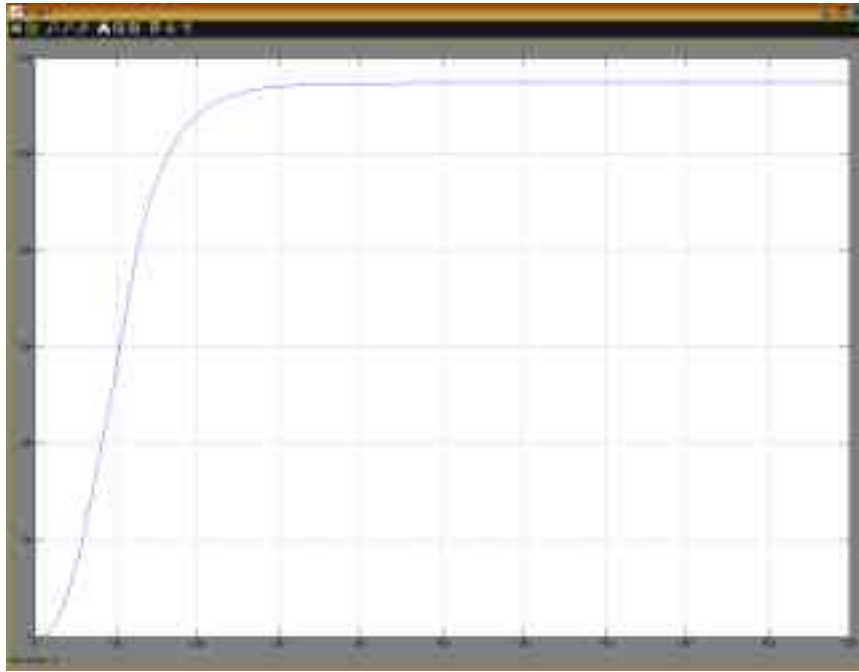


Рисунок 4.26 – Графік перехідного процесу. Зона випалювання

Як бачимо, система чітко видає сигнал, який дорівнює необхідній нам величині в $1110-1120^{\circ}\text{C}$.

Також, розглянемо сигнали по ступеню відкриття заслінки ϕ (Score 2) та витраті газоповітряної суміші Q (Score 3) на графіках перехідного процесу, на рисунках 4.27, 4.28.

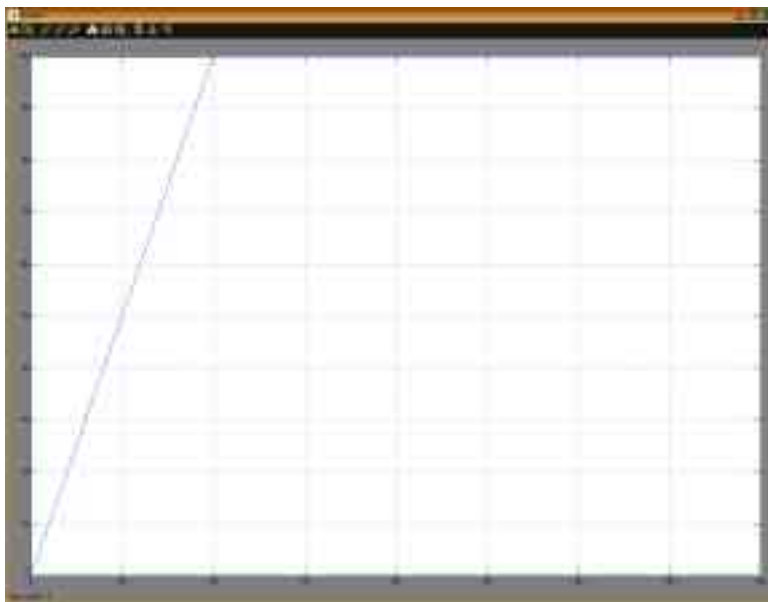


Рисунок 4.27 – Графік перехідного процесу керування заслінкою, вихідний сигнал ступеню відкритості заслінки

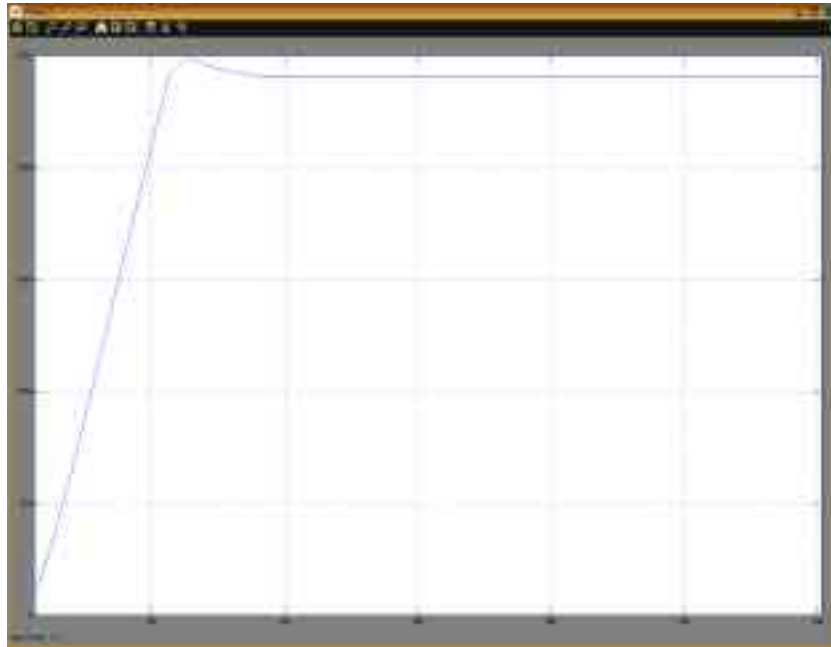


Рисунок 4.28 – Графік перехідного процесу керування витратою газоповітряної суміші, сигнал Q

Як бачимо з рисунків 4.27, 4.28. система повністю відповідає вимогам даного проекту, підтримуючи необхідну витрату газоповітряної суміші та ступеню відкриття заслінки 100%.

Далі, необхідно врахувати збурення, які діють на систему.

Доповнимо систему, змодельовану у середовищі Simulink. Розглянемо її на рисунку 4.29.

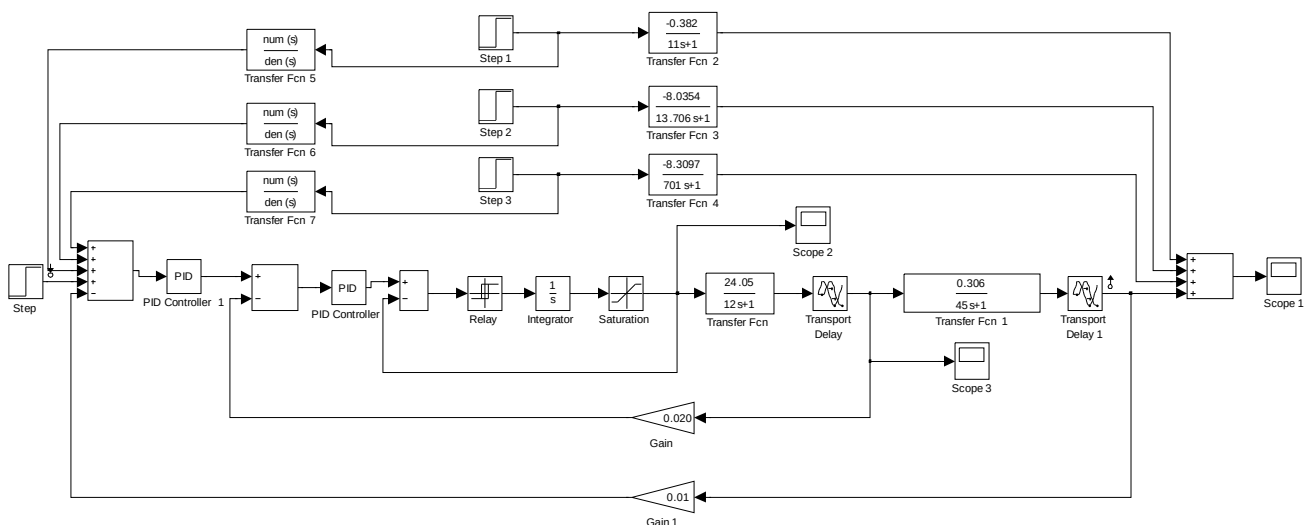


Рисунок 4.29 – Моделювання функціональної схеми системи автоматичного керування температурою в зоні випалювання з урахуванням збурень

При цьому, всі дані, які вводяться в схему, цілковито відповідають даним, отриманим у результаті моделювання процесу залежності температури від кількості витрати газоповітряної суміші, висоти шару окатишів, швидкості руху випалювальних візків, та тиску у газоповітряній камері зони випалювання.

Розглянемо тепер графік перехідного процесу змодельованої системи автоматичного керування на рисунку 4.30.

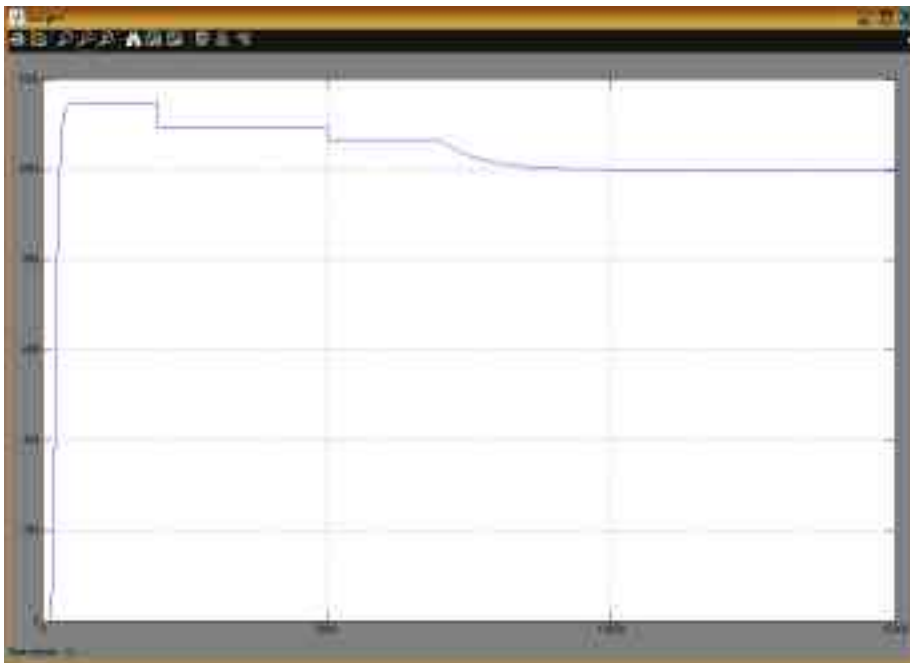


Рисунок 4.30 – Графік перехідного процесу з урахуванням збурень

Отже, після введення сигналів збурення за швидкістю руху випалювальних візків, висоти шару окатишів, та тиску у газоповітряній камері зони випалювання, маємо деяку похибку в роботі системи.

Тобто, замість того, щоб давати на виході необхідні 1110-1120°C, в системі на часі в 2000, 5000 та 7000 с., відбуваються збурення, що «збивають» температуру до рівня, який не є сигналом, необхідним для постійного утримання задля найвищої якості випалювання окатишів, та економії енергоносіїв у вигляді газоповітряної суміші.

4.5 Комп'ютерне моделювання підсистем керування температурою у випалювальній машині, реалізованих на основі методів теорії керування з прогнозуючими моделями

Розглянемо тепер моделювання системи автоматичного керування температурою, в зоні сушки, підігріву, та випалювання. Розпочнемо із зони сушки.

Передаточні функції ланок системи (збурення та зміна задаючого сигналу керування за тиском):

Швидкість руху випалювальних візків:

$$v1 = \frac{-4.236}{3259s + 1}; \quad (4.5)$$

Висота шару окатишів:

$$h1 = \frac{-2.5}{170s + 1}; \quad (4.6)$$

Тиск у зоні сушки:

$$p1 = \frac{6}{3839s + 1}; \quad (4.7)$$

Сигнал завдання даної моделі буде мати вигляд (рис.4.31).

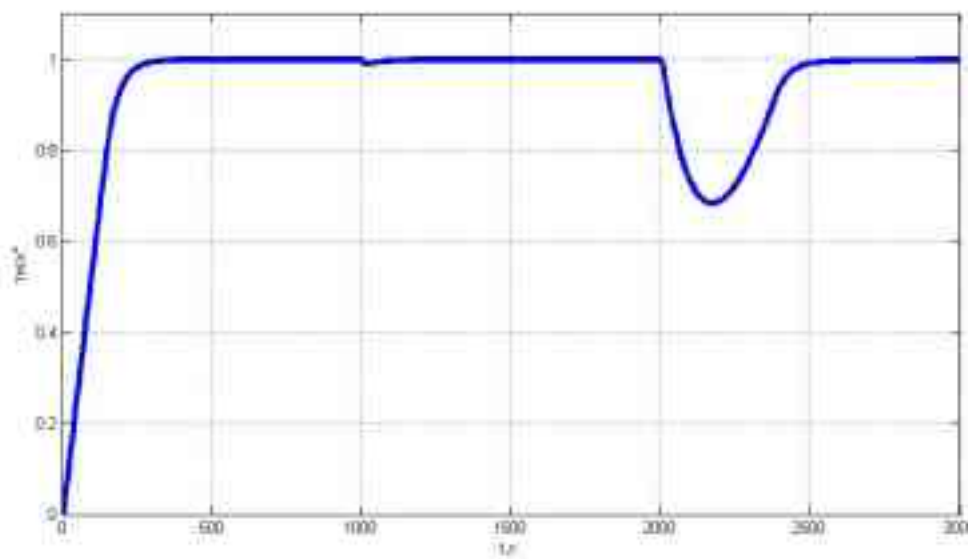


Рисунок 4.31 – Графік зміни збурень у зоні сушки

Перетворимо передаточні функції (4.5-4.7) до вигляду групи матриць:

$$A = \begin{Bmatrix} & x1 & x2 & x3 \\ x1 & -0.0003068 & 0 & 0 \\ x2 & 0 & -0.005882 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & -0.0002605 \end{Bmatrix}; \quad (4.8)$$

$$B = \begin{Bmatrix} & швидкість & висота шару & тиск \\ x1 & 0.03125 & 0 & 0 \\ x2 & 0 & 0.125 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & 0.03125 \end{Bmatrix}; \quad (4.9)$$

$$C = \begin{matrix} & x1 & x2 & x3 \\ температура - & 0.04159 & -0.1176 & 0.05001; \end{matrix} \quad (4.10)$$

Скориставшись функцією MPC, яка вбудована у середовище пакету програм MatLab, отримаємо наступну модель системи автоматичного керування температурою за допомогою регулювання тиском (рис.4.32).

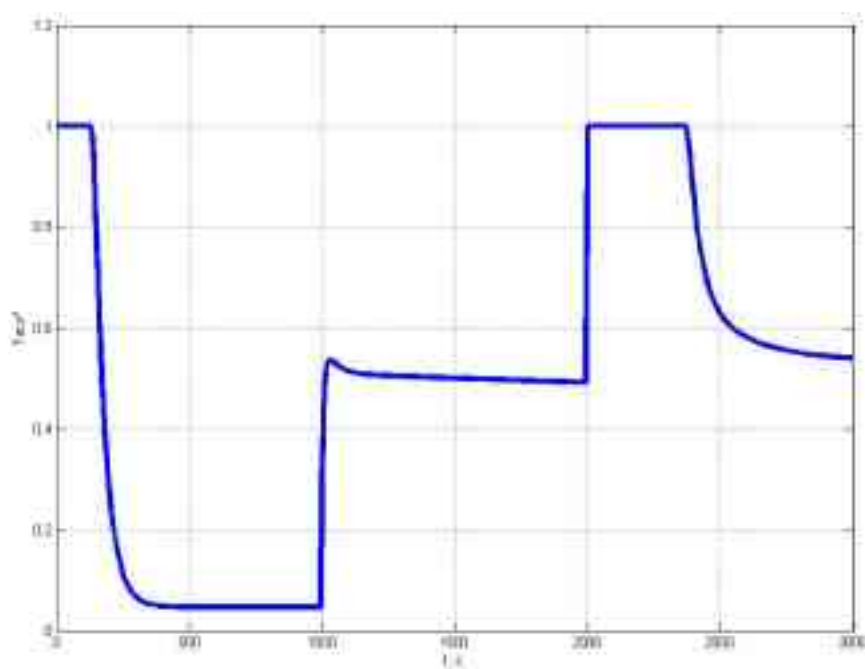


Рисунок 4.32 – Графік зміни сигналу керування у зоні сушки з урахуванням збурень

Розглянемо передаточні функції ланок системи керування температурою у зоні підігріву (збурення та зміна задаючого сигналу керування за витратою газоповітряною сумішшю):

Швидкість руху випалювальних візків:

$$v1 = \frac{1.773}{914s + 1}; \quad (4.11)$$

Висота шару окатишів:

$$h1 = \frac{-0.0604}{19s + 1}; \quad (4.12)$$

Витрата газоповітряної суміші у зоні підігріву:

$$q1 = \frac{0.236}{16s + 1}; \quad (4.13)$$

Сигнал завдання даної моделі буде мати вигляд (рис.4.33).

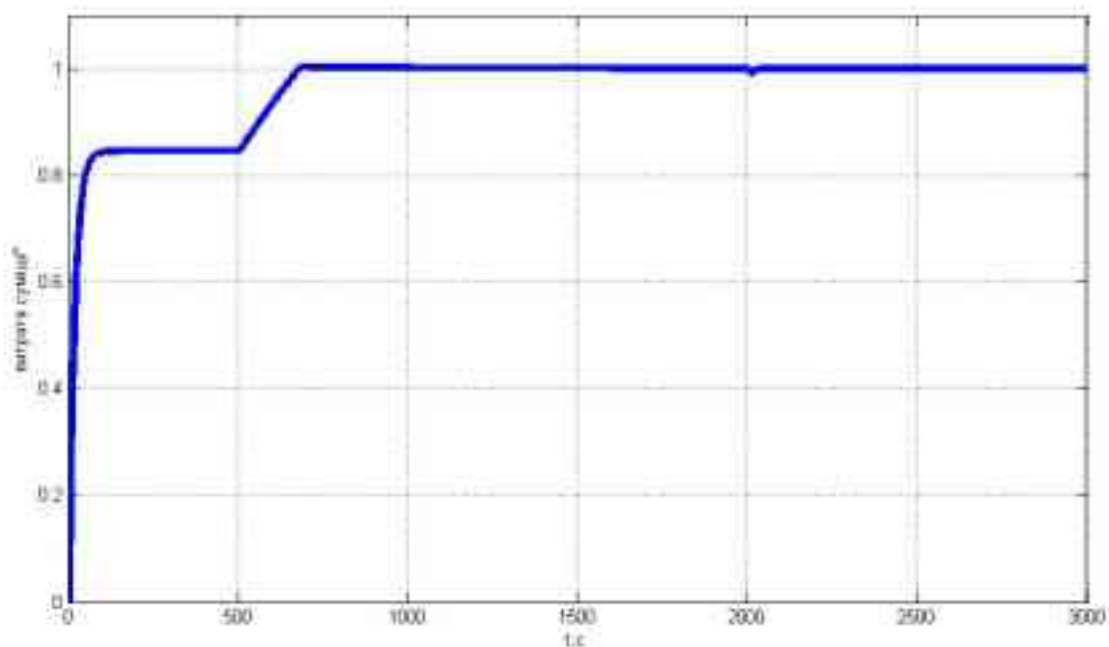


Рисунок 4.33 – Графік змін збурень у зоні підігріву

Перетворимо передаточні функції (4.11-4.13) до вигляду групи матриць:

$$A = \begin{Bmatrix} & x1 & x2 & x3 \\ x1 & -0.001094 & 0 & 0 \\ x2 & 0 & -0.05263 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & -0.0625 \end{Bmatrix}; \quad (4.14)$$

$$B = \begin{Bmatrix} & швидкість & висота шару & тиск \\ x1 & 0.03125 & 0 & 0 \\ x2 & 0 & 0.0625 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & 0.125 \end{Bmatrix}; \quad (4.15)$$

$$C = \begin{matrix} & x1 & x2 & x3 \\ температура & 0.06208 & 0.05086 & 0.118; \end{matrix} \quad (4.16)$$

Скориставшись функцією MPC, яка вбудована у середовищі пакету програм MatLab, отримаємо наступну модель системи автоматичного керування температурою за допомогою регулювання витрати газоповітряної суміші (рис.4.34).

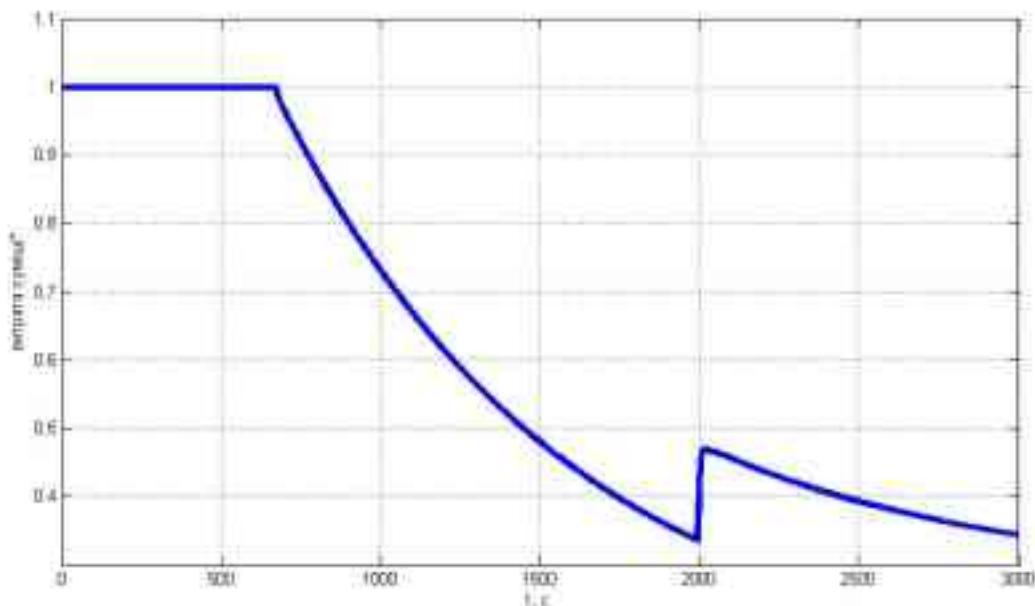


Рисунок 4.34 – Графік змінення сигналу керування у зоні підігріву з урахуванням збурень

Розглянемо передаточні функції ланок системи керування температурою у зоні випалювання (збурення та зміна задаючого сигналу керування за витратою газоповітряною сумішшю):

Швидкість руху випалювальних візків:

$$v1 = \frac{-0.382}{11s + 1}; \quad (4.17)$$

Висота шару окатишів:

$$h1 = \frac{-8.035}{13.71s + 1}; \quad (4.18)$$

Тиск у зоні випалювання:

$$p1 = \frac{-8.31}{701s + 1}; \quad (4.19)$$

Витрата газоповітряної суміші у зоні випалювання:

$$q1 = \frac{0.306}{45s + 1}; \quad (4.20)$$

Сигнал завдання даної моделі буде мати вигляд (рис.4.35).

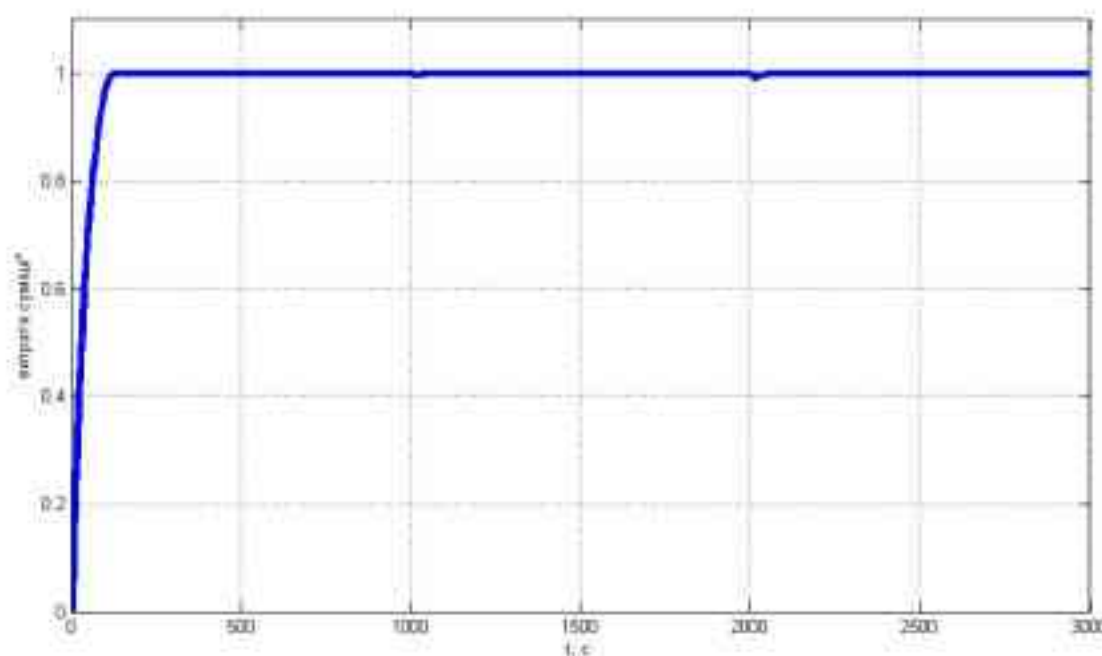


Рисунок 4.35 – Графік зміни збурень у зоні випалювання

Перетворимо передаточні функції (4.17-4.20) до вигляду групи матриць:

$$A = \begin{Bmatrix} & x1 & x2 & x3 & x4 \\ x1 & -0.09091 & 0 & 0 & 0 \\ x2 & 0 & -0.07296 & 0 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & -0.001427 & 0 \\ x4 & 0 & 0 & 0 & -0.02222 \end{Bmatrix}; \quad (4.21)$$

$$B = \begin{Bmatrix} & швидкість & висота шару & тиск & витрата г/н суміші \\ x1 & 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ x2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & 0.125 & 0 \\ x4 & 0 & 0 & 0 & 0.625 \end{Bmatrix}; \quad (4.22)$$

$$C = \begin{matrix} температура & x1 & x2 & x3 & x4 \\ -0.1389 & -0.5863 & -0.09483 & 0.1088 \end{matrix}; \quad (4.23)$$

Скориставшись функцією MPC, яка вбудована у середовищі пакету програм MatLab, отримаємо наступну модель системи автоматичного керування температурою за допомогою регулювання витрати газоповітряної суміші (рис.4.36).

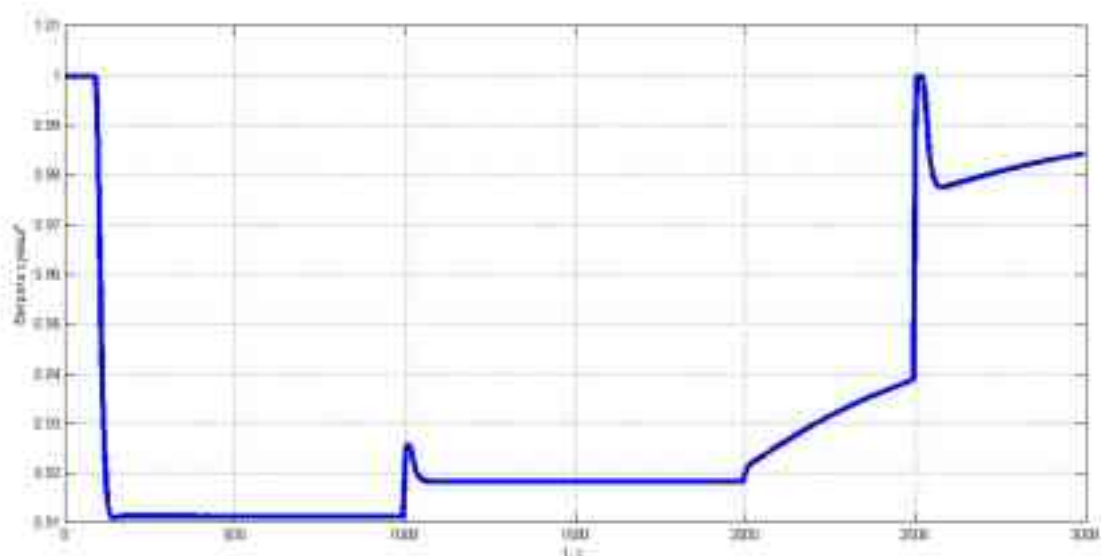


Рисунок 4.36 – Графік зміни сигналу керування у зоні випалювання з урахуванням збурень

4.6 Порівняння енергетичної ефективності розроблених систем

Для того, щоб виконати порівняння ефективності системи, яка використовує МРС регулятор, із системою, яка використовує П-, ПІ-, та ПІД-регулятори, необхідно для зон підігріву та сушки виконати моделювання системи для обох випадків, а потім порівняти їх ефективність, спочатку побудувавши їх графіки перехідного процесу, а після цього, підрахувати вже у відсотковому відношенні ефективність систем.

Розпочнемо із зони підігріву:

Побудуємо схему системи автоматичного керування температурою із урахування збурень для зони підігріву, на основі використання П-регулятора.

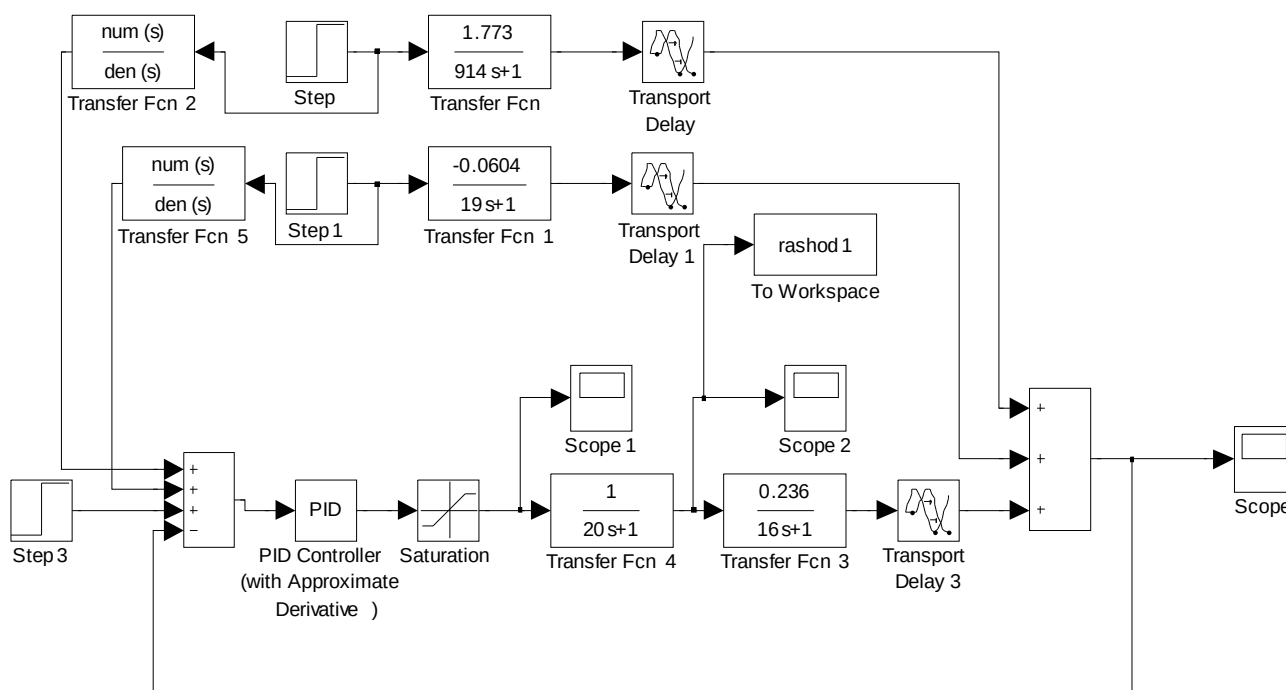


Рисунок 4.37 – Структурна схема системи автоматичного керування температурою із урахування збурень, зона підігріву

Параметри П-регулятора – коефіцієнт підсилення $K=45$;

Тепер, порівняємо сигнали керування із використанням П-регулятора, та МРС-регулятора.

Це порівняння дуже зручно розглянути на рисунку 4.38, де зелений сигнал – сигнал керування із використанням МРС-регулятора, та синій сигнал – сигнал використання П-регулятора.

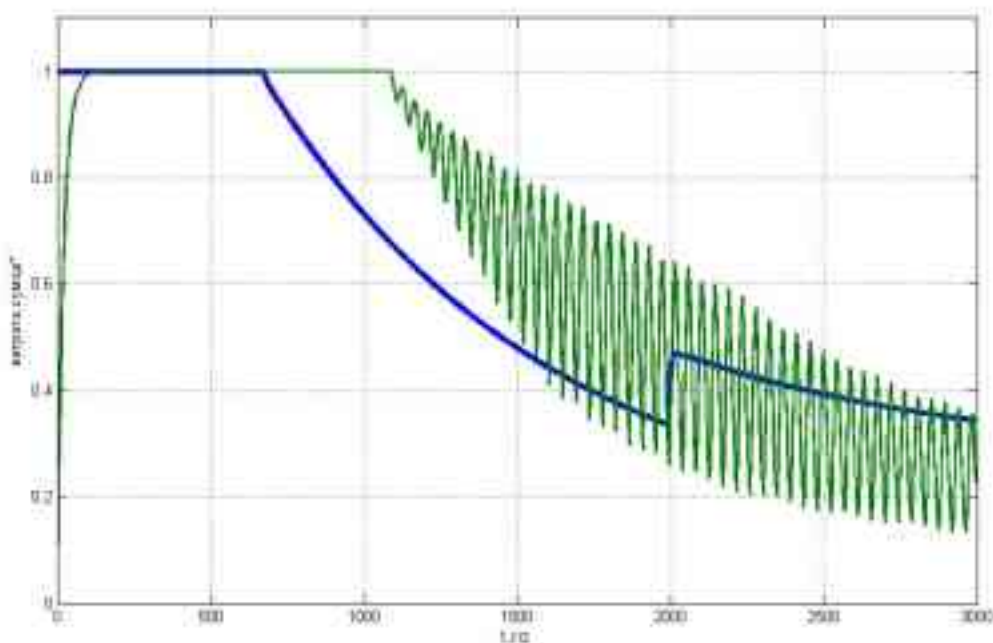


Рисунок 4.38 – Порівняння керуючих сигналів

Далі, за допомогою функції `integral_simps`, підрахуємо коефіцієнти витрати газоповітряної суміші:

Для МРС регулятора – $K1=6,6004$;

Для П регулятора – $K2=7,1563$;

У пропорційних відношеннях, МРС регулятор економить газоповітряну суміш на:

$$\frac{K1}{K2} = \frac{6,6004}{7,1563} - 1 * 100\% = 7,77\%; \quad (4.24)$$

Тобто, система автоматичного керування температурою із урахуванням збурень у зоні підігріву (на базі МРС регулятора) ефективніша за аналог системи із використанням П-регулятора на 7,77%.

Розрахуємо тепер ефективність використання МРС регулятора для зони випалювання.

Побудуємо схему системи автоматичного керування температурою із урахування збурень для зони випалювання, на основі використання ПІ-регулятора.

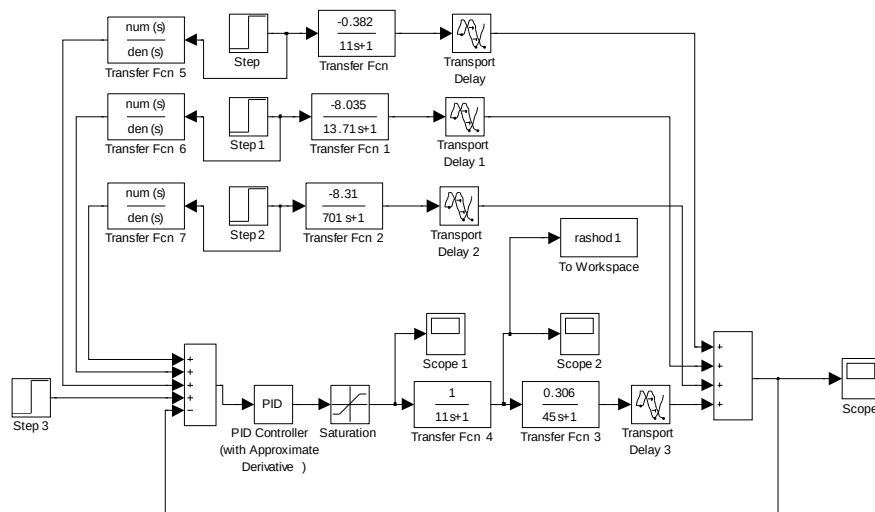


Рисунок 4.39 – Структурна схема системи автоматичного керування температурою із урахування збурень, зона випалювання

Параметри ПІ-регулятора – коефіцієнт підсилення $K=450$, інтегруюча складова $I=10$.

Тепер, порівняємо сигнали керування із використанням ПІ-регулятора та МРС-регулятора.

Це порівняння дуже зручно розглянути на рисунку 4.40, де зелений сигнал – сигнал керування із використанням МРС-регулятора, та синій сигнал – сигнал використання ПІ-регулятора.

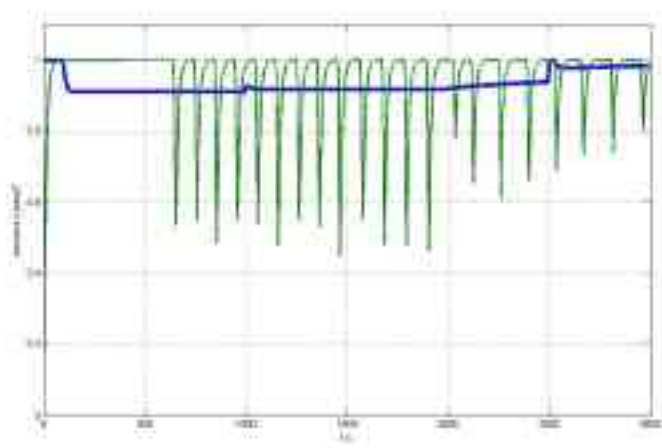


Рисунок 4.40 – Порівняння керуючих сигналів

Далі, за допомогою функції `integral_simps`, підрахуємо коефіцієнти витрати газоповітряної суміші:

Для МРС регулятора – $K1=9,9837$;

Для ПІ регулятора – $K2=10,1133$;

У пропорційних відношеннях, МРС регулятор економить газоповітряну суміш на:

$$\frac{K1}{K2} = \frac{9,9837}{10,1133} - 1 * 100\% = 1,279\%; \quad (4.25)$$

Тобто, система автоматичного керування температурою із урахуванням збурень у зоні підігріву (на базі МРС регулятора) ефективніша за аналог системи із використанням ПІ регулятора на 1,279%.

На ВАТ «ПГЗК» практично встановлено, що витрата газоповітряної суміші розподіляється у таких пропорціях між зонами підігріву та випалювання:

- підігрів – 33%
- випалювання – 67%

Звідси, можна підрахувати сумарний економічний ефект по витраті енергоносія:

$$\frac{(1,279 * 67 + 7,77 * 33)}{100\%} = \frac{85,693 + 256,41}{100\%} = 3,42\%; \quad (4.26)$$

ВИСНОВОК

Метою даної випускної кваліфікаційної магістерської роботи було підвищення ефективності виготовлення залізорудних окатишів за рахунок точного підтримання температурного режиму у випалювальній машині.

Виходячи з аналізу регульованого об'єкта здійснюється система керування температурою у випалювальній машині.

Здійснено аналіз існуючих систем автоматичного керування даним процесом, в процесі якого обґрунтовані вимоги до даної системи та її складових

Технічне завдання роботи було виконане повністю. А саме були створені структурні та функціональні схеми по кожній із зон, які розглядаються. Також, були наведені розрахунки використання П-, ПІ-, ПІД-регуляторів та аналогічні розрахунки використання запропонованих в проекті МРС-регуляторів.

Дані регулятори були використані з метою зменшення енерговитрат під час виробництва, а саме, випалювання окатишів.

Економія газоповітряної суміші по кожній зоні склала: 7,77% для зони сушки, та 1,279% для зони випалювання, що загалом становить 3,42% економії газоповітряної суміші, у порівнянні із системами, які базуються на використанні П-, ПІ-, ПІД-регуляторів.

По розділу охорони праці було проведено розрахунки з облаштування блискавкозахисту виробничого приміщення (цеху), де використовується випалювальна машина типу ОК-324, а влаштування блискавковододів, металевих заземлених сіток на відкритих предметах, заземлення обладнання, що знаходиться всередині будівлі (споруди), утворення замкнених контурів поміж близько розташованими трубопроводами та іншими металевими предметами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Совершенствование технологии и оборудования производства железорудного сырья для современной доменной плавки / В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, Ф.М. Журавлев, Е.В. Чупринов, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим – Кривой Рог : Дионат, 2017. – 368 с.
2. Теория, технология и оборудование производства окатышей и нового железорудного сырья для доменной плавки / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, В.С. Моркун, Е.В. Чупринов, Д.А. Кассим. – Кривой Рог : ФЛ-П Чернявский Д.А., 2019. – 925 с.
3. Теорія та технологія доменного процесу: навчальний посібник / Г.Ю.Крячко, Є.М.Сігарьов, О.Л.Мастеровенко – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. -306 с.
4. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. К.: Вища школа, 1988. - 351с.
5. Технології підвищення якості сталі /О.Г.Величко, О.М.Стоянов, Б.М. Бойченко, К.Г. Нізяєв / – Дніпропетровськ: Середняк Т.К., 2016. – 196с.
6. Зайцев Г.Ф. Теорія автоматичного управління / Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І.; за ред. проф. Г.Ф. Зайцева. - К.: Техніка, 2002.- 688с.
7. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: [підручник] /Попович М.Г., Ковальчук О.В. - К.: Либідь, 1997. - 544 с.
8. Васюра А.С. Елементи та пристрої систем управління і автоматики. /Навчальний посібник. - Вінниця:, ВДТУ, 1999. – 157 с.
9. Охотський В.Б. Теорія металургійних процесів / В.Б.Охотський, О.Л.Костюлов, В.К.Симонов та інш. – К. : ІЗМН, 1997. – 512 с.
10. Рябічева Л.О. Механічні властивості та конструкційна міцність

матеріалів: Навчальний посібник. - Луганськ: Вид-во СЛУ ім. В.Даля. 2013. - 356 с.

11. Грудська, В. П. Електротехнічні пристрої систем автоматичного управління технологічними процесами. К: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 107 с.

12. Основи автоматики та робототехніки: Навчальний посібник/ А. М. Гуржій, А. Т. Нельга, В. М. Співак, О. С. Ітякін:—Дніпро:«Гарант СВ», 2021.- 243с.

13. Гуржій А.М. Математичне моделювання процесів і систем / А. М. Гуржій, В. Б. Струтинський, В. С. Кравцов.- Харків: ХАІ, 2011, 658с.

14. Власюк Г. Г. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації/ Г.Г. Власюк, В.М. Співак, К.О. Трапезон, В.Б. Швайченко.- Київ:, Освіта України, 2010, 293с.

15. Теорія автоматичного управління : конспект лекцій : у 2 ч. Ч. 1 «Аналіз лінійних систем автоматичного управління» / укладач Г. М. Худолей. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 179 с.

16. Глушков В.М. Введение в АСУ. К.: Техніка, 1974. 320 с.

17. Головка Д.Б., Рего К.Г., Скрипник Ю.О. Автоматика і автоматизація технологічних процесів. К.: Либідь, 1997. 232 с.

18. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. К.: Вища школа, 1980. 560 с.

19. Подлесный Н.И., Рубанов В.Г. Элементы систем автоматического управления и контроля. К.: Вища школа, 1982.

20. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. / Скрипник Ю.О., Бондар В.М., Бевз В.І. та ін.. К.: ІЗМН, 1996. 608 с.

21. Н.І. Бурау, Д.О. Півторак Теорія автоматичного управління. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. -57с.

22. Танатар А.И. Элементы промышленной автоматики и их

динамические свойства, К.: Техника, 1975. – 232 с.

23. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.

24. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.

25. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.

26. Конституція України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 05.11.2022).

27. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 17.11.2022).

28. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 26.10.2022).

29. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 09.11.2022).

Додаток А

Охорона праці

А.1 Законодавчі та нормативні акти з питань охорони праці в Україні

В умовах науково-технічного прогресу в усіх галузях промислового комплексу, широкого впровадження нових технічних засобів автоматизації виробничих процесів, технологій виробництва сільськогосподарської продукції, а також нових форм організації й оплати праці, особливого значення набуває проблема охорони праці.

Охорона праці (ОП) – система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці [23, 24].

Поліпшення умов праці є одним з резервів зростання її продуктивності й економічної ефективності виробництва, а також подальшого розвитку самої людини.

Охорона життя та здоров'я громадян в процесі їх трудової діяльності, створення безпечних та нешкідливих умов праці – одне з найважливіших державних завдань.

Правовою основою вітчизняного законодавства щодо ОП є: Конституція України, Закони України: «Про охорону праці», «Основи законодавства України про охорону здоров'я», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування», а також Кодекс цивільного захисту України й Кодекс законів про працю України (КЗпП) [25].

Спеціальними юридичними актами в сфері охорони праці є [23, 25]:

– Міжгалузеві та галузеві нормативно-правові акти з питань охорони праці

(НПАОП) – це правила, норми, регламенти, положення, інструкції та інші документи, яким надано чинність правових норм, обов’язкових для виконання;

- Міждержавні стандарти Системи стандартів безпеки праці (ГОСТ ССБТ);

- Державні стандарти України (ДСТУ) з питань безпеки праці; постанови та положення (норми), затверджені Міністерством охорони здоров’я України;

- Нормативні акти з ОП, що діють в межах об’єкта господарювання (підприємства);

- інші нормативно-правові акти, якими встановлюються загальнообов’язкові правила (норми).

В ст. 43 Конституції України записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає», «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом» [23, 26].

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (ст. 45 Конституції України) [26]. Це право забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, оплачуваної щорічної відпустки, встановленням і скороченого робочого дня щодо окремих професій і виробництв.

У тексті ст. 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист, що включає право на забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття з незалежних від них обставин, а також у старості [26].

Верховна Рада України 14.10.1992 р. прийняла Закон України «Про охорону праці». Цей Закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян про охорону їх життя і здоров’я в процесі трудової діяльності, регулює за участю відповідних державних органів відносини між власником підприємства, установи і організації або уповноваженим ним органом і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці

в Україні. Його дія поширюється на всі підприємства, установи і організації, незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах [27].

В системі законодавства щодо охорони здоров'я та гігієни праці ключове місце займають закони України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» і «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» [23, 25]. Вони передбачають розробку та здійснення адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів; здійснення в необхідних випадках лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санепідеміологічної служби при надзвичайній події та ситуації, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування в установленому порядку працівникам громадянам збитків, яких завдано їх здоров'ю в результаті порушення санітарного законодавства.

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» був прийнятий для регламентації заходів з ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи і запобігання подібним ситуаціям в майбутньому. Він охоплює всі сфери використання радіоактивних матеріалів та технологій, чи, навіть, просто контактування з ними [23, 25].

Страхування від нещасного випадку є самостійним видом загальнообов'язкового державного соціального страхування, за допомогою якого здійснюється соціальний захист, охорона життя та здоров'я громадян у процесі їх трудової діяльності.

Основними принципами соціального страхування від нещасного випадку є наступні:

- обов'язковий порядок страхування працівників, а також учнів та студентів навчальних закладів;
- сплату страхових внесків тільки роботодавцями;
- своєчасне та повне відшкодування шкоди потерпілим;

– надання державних гарантій застрахованим у реалізації їх прав тощо.

Все це знайшло відображення та регламентацію у Законі України «Про загальнообов’язкове державне соціальне страхування» [23, 24].

Основним юридичним документом, що регламентує вимоги щодо пожежної безпеки є, на сьогодні, Кодекс цивільного захисту України (від 02.10.2012) [28]. Він з’явився як результат злиття кількох розрізнених Законів України, що діяли раніше, і визначає загальні правові, економічні та соціальні основи забезпечення цивільного захисту на території України, регулює відносини державних органів, юридичних і фізичних осіб у цій галузі, незалежно від виду їх діяльності та форм власності.

КЗпП України регулює трудові відносини всіх працівників, сприяючи зростанню продуктивності праці, поліпшенню якості роботи, підвищенню ефективності суспільного виробництва і піднесенню на цій основі матеріального і культурного рівня життя трудящих, зміцненню трудової дисципліни і поступовому перетворенню праці на благо суспільства в першу життєву потребу кожної працездатної людини [29].

НПАОП до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП). НПАОП необхідно відрізняти від відомчих документів про охорону праці (ВДОП), які можуть розроблятися на їх основі і затверджуватися Міністерствами, відомствами України або асоціаціями, концернами та іншими об’єднаннями підприємств з метою конкретизації вимог НПАОП залежно від специфіки галузі.

Держані стандарти Системи стандартів безпеки праці (ГОСТ ССБТ) колишнього СРСР застосовується на території України до їх заміни іншими нормативними документами, якщо вони не суперечать чинному законодавству України.

Відповідно до угоди про співробітництво в галузі ОП, укладеною керівниками урядів держав СНД у грудні 1994 р., стандарти ССБТ надалі визначаються Україною як міждержавні стандарти за угодженим переліком, що

переглядається в міру необхідності з урахуванням національного законодавства держав СНД та результатів спільної роботи, спрямованої на удосконалення Системи стандартів безпеки праці [23, 25].

Серед норм, затверджених МОЗ України можна виділити: Граничні норми підймання і переміщення важких речей жінками; Граничні норми підймання і переміщення важких речей неповнолітніми; Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх; Положення про медичний огляд працівників певних категорій.

Виходячи із специфіки і особливих умов на своїх підприємствах, власники можуть розробляти, на основі діючих НПАОП, і впроваджувати нормативні акти з ОП, що діють в межах об'єкта господарювання (підприємства). Такі нормативні акти можуть відхилятися від НПАОП лише у бік покращення умов для працюючого [1]. Серед типових нормативних актів підприємства з ОП можна виділити: Положення про систему управління охороною праці на підприємстві; Положення про службу охорони праці підприємства; Положення про комісію з питань охорони праці підприємства; Загальнооб'єктові та цехові інструкції щодо заходів пожежної безпеки; Порядок атестації робочих місць щодо їхньої відповідності нормативним актам з питань охорони праці.

Відповідно до ст. 49. Закону України «Про охорону праці», за порушення законодавчих та інших нормативних актів про ОП, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за ОП і представників професійних спілок винні притягаються до дисциплінарної, адміністративної та кримінальної відповідальності, згідно із законодавством [23, 25, 27].

А.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва

На здоров'я людини, її життєдіяльність і життєздатність великий вплив мають небезпечні та шкідливі фактори виробництва.

Небезпека – це наслідок такої дії певних факторів на людину, яка при їх невідповідності фізіологічним характеристикам людини зумовлює феномен самої небезпеки [23, 24, 25].

Шкідливий виробничий фактор – це виробничий чинник, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника [23].

Небезпечний виробничий фактор – виробничий чинник, дія якого за певних умов може привести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника [23].

До визначаючих ознак небезпечних і шкідливих факторів відносяться: можливість безпосередньої негативної дії на організм людини; ускладнення нормального функціонування органів людини; можливість порушення нормального стану елементів виробничого процесу, в результаті якого можуть виникнути аварії, вибухи, пожежі, травми.

Матеріальними носіями шкідливих і небезпечних факторів є об'єкти, що формують трудовий процес і які входять в нього, а також загально життєві фактори оточуючого середовища; предмети праці; засоби праці (машини, інструменти, споруди, приміщення, земля, шляхи, канали і т. п.); продукти праці; технологія, операції, дії.

Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74, небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

До небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть виникати у виробничому приміщенні (цеху), де використовується випалювальна машина типу ОК-324, належать:

- наявність рухомих механізмів та пересувних частин;
- можливість підвищення температури поверхонь устаткування;
- недостатній рівень освітленості;
- наявність хімічних та фізичних (пил, кіптява тощо) речовин, що

виділяються;

- підвищена температура повітря;
- підвищені рівні шуму та вібрацій;
- можливість підвищеної швидкості руху повітря від вентиляторів та інших обертових частин обладнання;
- нервово-психічні та емоційні перевантаження, перенапруження органів чуття;
- небезпечне значення напруги в електричних колах;
- можливість ураження споруд, обладнання та працівників блискавкою під час грози.

А.3 Заходи з усунення чи зменшенню впливу шкідливих та небезпечних факторів виробництва

Для запобігання травматизму від рухомих частин обладнання можуть бути застосовані захисні загородження, кожухи, екрани та попереджувальні знаки.

Загороджувальні пристосування зможуть вберегти користувачів і від одержання опіків від нагрітих деталей. Не допускається охолоджувати розпечені деталі водою, оскільки це може викликати руйнування конструктивних частин обладнання.

Освітлення впливає на організм людини і виконання виробничих завдань. Правильне освітлення зменшує кількість нещасних випадків, підвищує продуктивність праці. Дослідження показали, що при хорошому освітленні продуктивність праці збільшується на 15 % [23, 24]. Для забезпечення нормованого рівня освітленості у виробничому приміщенні необхідно передбачити системи штучного виробничого освітлення. Системи штучного виробничого освітлення можуть бути загальними (для освітлення виробничого приміщення чи його ділянки в цілому) та місцевими (для акцентованого освітлення безпосередньо на робочому місці чи у точці протікання

технологічного процесу).

Дуже важливою також є система вентиляції та кондиціонування повітря, на яку покладаються задачі підтримання оптимальних параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях, а також видалення надлишкової концентрації вуглецю, інших хімічних та фізичних сполук, знезараження повітря робочих зон. Як і системи штучного освітлення, системи вентиляції також можуть бути загальними та місцевими.

Спецодяг та користування засобами індивідуального захисту вбережуть працівників від впливу підвищених температури, вологості, підвищених швидкостей руху повітря, хімічних, фізичних та біологічних речовин.

Вібрація серед всіх видів механічних впливів для технічних об'єктів найбільш небезпечна. Вона викликає порушення фізіологічного та функціонального станів людини. Симптоми вібраційної хвороби проявляються у вигляді головного болю, заніміння пальців рук, болю в кистях та передпліччі, виникають судоми, підвищується чутливість до охолодження, виникають патологічні зміни спинного мозку, серцево-судинної системи, кісткових тканин та суглобів, змінюється капілярний кровообіг [23, 24, 25].

Професійні захворювання пов'язані із шкідливою дією шуму – це наслідки дії останнього, що виражається у підвищенні загальної захворюваності, зниженні працездатності, порушенні слухового контролю, зниженні сприйняття звуків звичайної частоти. Високий рівень інфразвуку викликає порушення функції вестибулярного апарату, зумовлюючи запаморочення, головний біль, зниження уваги. Ультразвук викликає функціональні порушення нервової системи, головний біль, зміни кров'яного тиску та складу і властивостей крові, зумовлює втрату слухової чутливості, підвищує втомленість [23].

Для боротьби із виробничим шумом необхідно [24]:

- намагатися ізолювати джерело його виникнення;
- знищувати шум звукопоглинанням та звукоізоляцією;
- знищувати шум акустичною обробкою приміщень.

Дієвими засобами захисту від інфразвуку є [24]:

- збільшення частоти обертання валів до 20 і більше обертів за секунду;
- підвищення жорсткості коливальних конструкцій великих розмірів;
- усунення низькочастотних вібрацій;
- внесення конструктивних змін в будову джерел, що дозволяє перейти з області інфразвукових коливань в область звукових.

Щоб попередити шкідливу дію ультразвуку, який передається через повітря, застосовується метод звукоізоляції.

Загальні методи боротьби з вібрацією класифікуються наступним чином [24]:

- зниження вібрацій в джерелі виникнення, шляхом зниження або усунення збуджувальних сил;
- вібродемпфірування;
- динамічне гасіння;
- віброізоляція;
- використання індивідуальних засобів захисту.

З метою послаблення негативної дії психофізіологічних шкідливих та небезпечних факторів необхідно заздалегідь планувати чергування годин роботи та відпочинку працівників. Важливим є рівномірний розподіл робочих змін (неприпустимий багаторазовий підряд вихід одних і тих самих працівників у нічну зміну). Обов'язковими є обідні та додаткові технологічні перерви. Не припустима грубість та нетактовні зауваження керівників щодо підлеглих.

Одним з найбільш небезпечних виробничих факторів на сучасних підприємствах є можливість враження працівників електричним струмом, оскільки зазвичай виробниче устаткування використовує стандартну електричну мережу $\sim 380(\sim 220)$ В, 50 Гц. Для забезпечення електробезпеки персоналу застосовують 3 методи [23, 24, 25]:

- захисне заземлення;

- захисне занулення;
- захисне відключення.

Кожен з цих методів може бути застосований як окремо, така і у поєднанні з іншими (в залежності від специфіки виробництва і наявної електронезбезпеки).

Для захисту споруд, обладнання та працівників від ураження блискавкою під час грози необхідно передбачити наявність системи блискавкозахисту.

А.4 Влаштування блискавкозахисту виробничого приміщення (цеху), де використовується випалювальна машина типу ОК-324

Захист від прямих ударів блискавок та вторинного прояву атмосферної електрики забезпечується [23, 24, 25]:

- влаштуванням блискавковідводів;
- влаштуванням металевих заземлених сіток на відкритих предметах;
- заземленням обладнання, що знаходиться всередині будівлі (споруди);
- утворенням замкнених контурів поміж близько розташованими трубопроводами та іншими металевими предметами, розташованими поруч, а також заземленням металевих комунікацій перед їх введенням у споруду.

Захист будівель та споруд від прямих ударів блискавок виконується окремо розташованими стержневими або тросовими блискавковідводами, які встановлюються на спорудах, що підлягають захисту. Вибір типу блискавковідводів залежить від розмірів у плані, висоти та форми споруди [23, 24, 25].

Проведемо всі подальші розрахунки, керуючись рекомендаціями, викладеними у джерелах [24, 25].

Для об'єктів з блискавкозахистом І категорії блискавковідводи на спорудах не встановлюються, а стержневий блискавковідвід у цьому випадку повинен мати електричний стояк (частину його) висотою не менше 8 м над спорудою при опорі заземлення не більше $R = 10 \text{ Ом}$. Віддаль струмопроводу від споруди повинна бути не менше 8 м. Допустима віддаль від стержневого

блискавковідводу або від тросового стояка до споруди, яка захищається, при $R = 10$ Ом приймається не менше 4 м. При цьому ж висота троса над спорудою приймається в межах 3-7 м (при висоті тросового стояка 65-150 м відповідно). Слід також врахувати і прогин троса.

Для блискавкозахисту III категорії приймається $R \leq 20$ Ом.

Захист від прямого удару блискавки будівель та споруд, що за влаштуванням блискавкозахисту відносяться до II та III категорій, може бути вирішений як окремо розташованими стержневими блискавковідводами, так і неізолюваними стержневими та тросовими блискавковідводами, що встановлюються на будівлях (віддаль від них до будівлі не нормується), а також шляхом заземлення металеві покрівлі, або влаштуванням блискавкоприймача з металеві сітки зі сталюного дроту діаметром 6-8 мм (з чарункою 6×6 м та 12×12 м для II і III категорії відповідно). Сітка кладеться на діелектричну покрівлю, або під її гідроізоляцію (утеплювач). Струмопроводи, які з'єднують струмоприймальну сітку або метал покрівлі з заземлювачами, повинні бути покладені не рідше, ніж через 25 м по периметру будівлі. У якості струмопроводів слід використовувати металеві конструкції будівель та споруд (колони, ферми тощо). В будь-якому випадку рекомендується об'єднувати заземлювачі захисного заземлення електропристроїв із захистом від прямого удару блискавок та від електростатичної індукції.

Захист від електростатичної індукції здійснюється шляхом заземлення металевих корпусів обладнання та апаратів, встановлених у будівлі, що захищається, і металевих конструкцій. З цією метою використовується захисне заземлення електрообладнання. Захист від електростатичної індукції забезпечують також заземлена металева покрівля та сітка для приймання блискавки на даху будівлі.

Захист від електромагнітної індукції виконується утворенням замкнених контурів шляхом влаштування металевих перемичок між трубопроводами та

іншими металевими предметами в місцях їх взаємного зближення на віддалі 10 см та менше через кожні 20-25 м. Електричний опір кожної перемички (контакту) не повинен перевищувати 0,03 Ом.

Захист від занесення високих потенціалів по металевих комунікаціях та конструкціях забезпечується приєднанням їх перед введенням у споруду, яка захищається, до заземлювачів.

Зона захисту одинарного тросового блискавковідводу висотою $h < 150$ м зображена на рис. А.1.

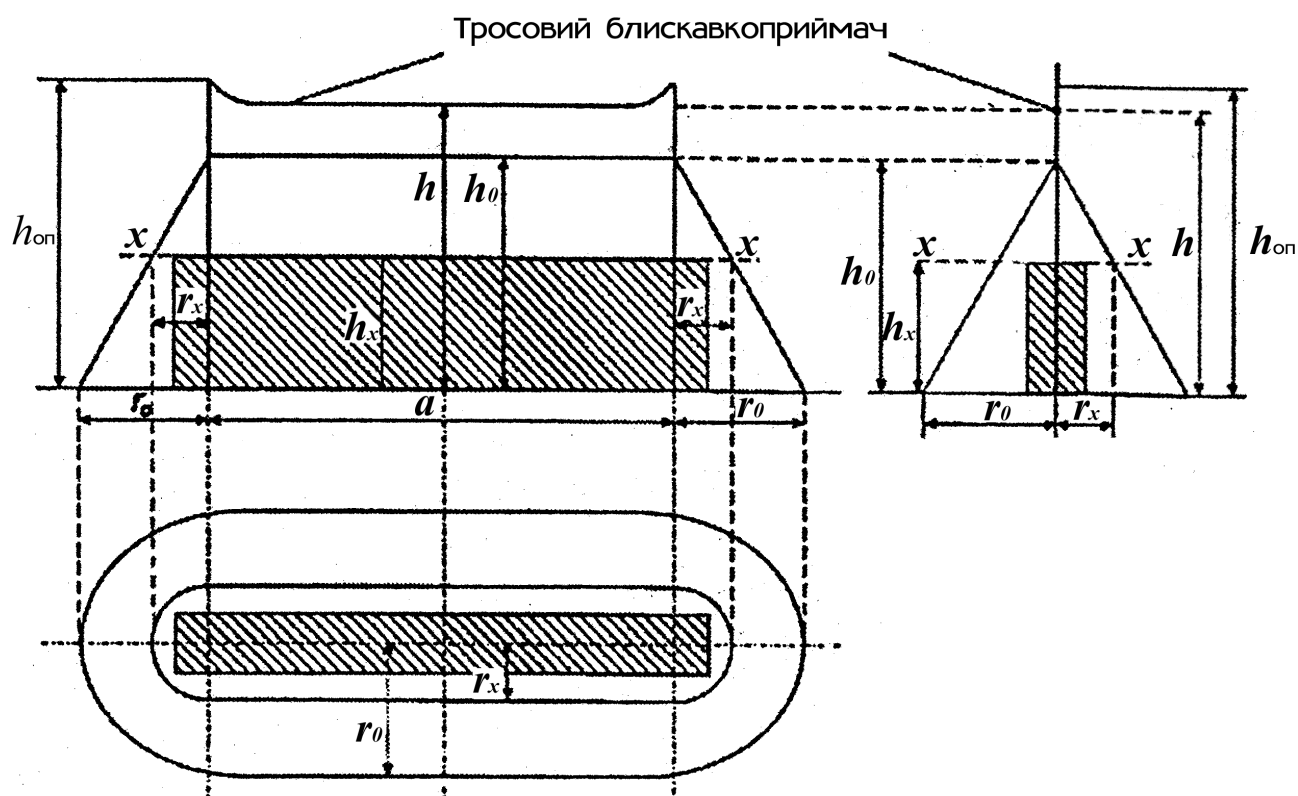


Рисунок А.1 – Зона захисту одинарного тросового блискавковідводу:

$h_{\text{оп}}$ – висота опори; h – висота від поверхні землі до тросу блискавковідводу в точці найбільшого провисання; h_0 – висота конуса, що утворює блискавковідвід; h_x – висота споруди; r_x – радіус кола зони захисту на висоті споруди h_x , що захищається; r_0 – радіус основи конуса на висоті споруди h_x , що захищається

Задамося розмірами виробничого приміщення (цеху), де використовується випалювальна машина типу ОК-324, і проведемо розрахунки.

З врахуванням стріли провисання висота опори $h_0 = h + 3$ м, при $L = 120 - 150$ м, у нашому випадку $L = 140,8$ м, ширина споруди дорівнює 75 м та висота споруди $h_x = 6$ м.

Зона захисту одинарних тросових блискавковідводів має габарити:

– зона А:

$$h_0 = 0,85 \cdot h, \quad (1)$$

$$r_0 = (1,35 - 0,0025 \cdot h) \cdot h, \quad (2)$$

$$r_x = (1,35 - 0,0025 \cdot h) \cdot \left(h - \frac{h_x}{0,85}\right). \quad (3)$$

При розрахунках зони захисту будемо підбирати h – висоту від поверхні землі до тросу блискавковідводу в точці найбільшого провисання.

При цьому потрібно враховувати щоб зона захисту блискавковідводу покривала всю поверхню споруди, у нашому випадку з розмірами $75 \times 140,8$ м.

Приймаємо $h = 39$ м.

$$h_{on} = h + 3 = 42 \text{ м};$$

$$h_0 = 0,85 \cdot 39 = 33,15 \text{ м};$$

$$r_0 = (1,35 - 0,0025 \cdot 39) \cdot 39 = 48,85 \text{ м};$$

$$r_x = (1,35 - 0,0025 \cdot 39) \cdot \left(39 - \frac{6}{0,85}\right) = 40,00 \text{ м}.$$

– зона Б:

$$h_0 = 0,92 \cdot h = 35,88 \text{ м};$$

$$r_0 = 1,7 \cdot h = 66,3 \text{ м};$$

$$r_x = 1,7 \cdot \left(h - \frac{h_x}{0,92}\right) = 55,21 \text{ м}.$$