

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:
***«Автоматизація процесу термічної обробки окатишів з використанням
рішень Phoenix Contact»***

Виконав студент гр. АКІТ-22	_____ Горбань Я. О.
Керівник	_____ Жосан А.А.
Нормоконтроль	_____ Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 29 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-22 ГОРБАНЮ Ярославу Олександровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація процесу термічної обробки окатишів з використанням рішень Phoenix Contact»

затверджено наказом по університету № 171с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 86 с., презентація у Microsoft PowerPoint (12 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Жосан А.А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>05.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 29.01.2026 р.

Керівник _____ / Жосан А. А./

7. **Запевнення:** Я, ГОРБАНЬ Ярослав Олександрович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Горбань Я. О./

АНОТАЦІЯ

Горбань Я. О. Автоматизація процесу термічної обробки окатишів з використанням рішень Phoenix Contact: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 86 с.

Об'єктом дослідження є процес термічної обробки залізорудних окатишів на конвеєрній випалювальній машині.

Метою роботи є розробка системи автоматизації процесу термічної обробки окатишів з використанням рішень Phoenix Contact та дослідження системи автоматичного керування температурою зони випалу.

У першому розділі розглянуто технологію виробництва окатишів, особливості конвеєрної випалювальної машини як об'єкта автоматизації, основні параметри процесу, сучасні системи автоматизації та математичний опис зони випалу.

У другому розділі розроблено функціональну структуру системи автоматизації, виконано вибір технічних засобів PLCnext та Axioline F, синтезовано ПІ-регулятор з предиктором Сміта, описано програмну реалізацію у PLCnext Engineer та наведено результати апробації системи у середовищі симуляції.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованих рішень для побудови локальної системи автоматизації випалювальної машини.

ОКАТИШІ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, PLCNEXT, PHOENIX CONTACT, ЗОНА ВИПАЛЮВАННЯ, ПРЕДИКТОР СМІТА, OPC UA, EDGE COMPUTING

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Горбань Я. О.			АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Жосан А.А.								3	1
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОКАТИШІВ ТА СУЧАСНИХ РІШЕНЬ З ЙОГО АВТОМАТИЗАЦІЇ	11
1.1 Технологія виробництва залізорудних окатишів.....	11
1.2 Конвеєрна випалювальна машина як об'єкт автоматизації.....	14
1.3 Аналіз параметрів технологічного процесу термічної обробки окатишів	18
1.4 Аналіз сучасних систем та підходів до автоматизації процесів випалу окатишів	22
1.4.1 Класичні системи автоматизації металургійних виробництв	22
1.4.2 Сучасні методи автоматичного керування теплотехнічними процесами.....	23
1.4.3 Цифровізація виробництва та концепція Industry 4.0	24
1.4.4 Платформа PLCnext Technology як основа сучасних систем автоматизації.....	25
1.5 Математичний опис процесу термічної обробки окатишів.....	26
1.6 Аналіз сучасних систем та підходів до автоматизації процесів випалу окатишів	32
Висновки за розділом:	35
РОЗДІЛ 2	37
2.1 Розробка структури системи автоматизації процесу термічної обробки окатишів	37
2.2 Вибір технічних засобів для реалізації алгоритмів керування процесом термічної обробки окатишів.....	41
2.3 Розробка системи автоматичного керування температурою зони випалювання	44
2.4 Моделювання системи автоматичного керування температурою зони випалювання	49

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

2.5 Розробка програмного забезпечення контролерного рівня системи керування у PLCnext Engineer.....	54
2.6 Апробація програмної реалізації системи керування	65
2.7 Перспективна реалізація Edge-рівня системи автоматизації	74
<i>Висновки до розділу:</i>	77
ВИСНОВКИ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	84

ВСТУП

Сучасна гірничо-металургійна промисловість характеризується постійним зростанням вимог до якості продукції, енергоефективності виробничих процесів та рівня їх автоматизації. Одним із ключових етапів підготовки залізорудної сировини до металургійного переділу є виробництво залізорудних окатишів, які широко використовуються у доменному та прямому відновлювальному виробництві заліза. Від фізико-механічних характеристик окатишів значною мірою залежать продуктивність металургійних агрегатів, витрати енергії та якість кінцевої продукції.

Додатковим фактором актуальності дослідження є сучасні виклики, що постають перед гірничо-металургійним комплексом у контексті глобальної декарбонізації промисловості та переходу до принципів сталого розвитку. Реалізація положень European Green Deal, впровадження механізму транскордонного вуглецевого коригування (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM), а також постійне зростання вартості енергетичних ресурсів стимулюють підприємства до підвищення енергоефективності виробничих процесів та скорочення питомих викидів парникових газів. Одним із найбільш енергоємних етапів виробництва залізорудних окатишів є їх термічна обробка, на яку припадає значна частина загального споживання природного газу. За таких умов удосконалення систем автоматичного керування температурними режимами випалювальних машин дозволяє не лише забезпечити стабільну якість продукції, але й досягти істотного зниження енергоспоживання та вуглецевого сліду виробництва. У свою чергу, використання сучасних цифрових платформ автоматизації створює передумови для реалізації концепцій Industry 4.0, Industrial Internet of Things та інтелектуальної оптимізації технологічних процесів у режимі реального часу.

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Горбань Я. О.			ВСТУП			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Жосан А.А.								6	2
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

У контексті підвищення енергоефективності та забезпечення стабільної якості металургійної продукції особливого значення набуває процес термічної обробки залізородних окатишів на конвеєрних випалювальних машинах. Недостатня температура випалу призводить до зниження міцності окатишів та збільшення частки браку, тоді як перегрів може викликати оплавлення матеріалу, прискорене зношування футерівки та зростання витрат енергоносіїв. У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка сучасних систем автоматизації, здатних забезпечити стабільне керування технологічним процесом у широкому діапазоні експлуатаційних умов.

В останні роки значного поширення набули програмовані логічні контролери та програмно-апаратні платформи компанії Phoenix Contact, зокрема сімейство PLCnext Technology. Дані рішення поєднують засоби класичної промислової автоматизації з сучасними інформаційними технологіями, підтримують відкриті стандарти промислових комунікацій, забезпечують інтеграцію із системами диспетчерського керування та створюють передумови для впровадження концепцій Industry 4.0, Industrial Internet of Things та Edge Computing.

Таким чином, розробка системи автоматизації процесу термічної обробки залізородних окатишів із використанням рішень Phoenix Contact є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення стабільності технологічного процесу, покращення якості продукції та зниження питомих витрат енергетичних ресурсів.

Метою роботи є розробка системи автоматизації процесу термічної обробки залізородних окатишів на базі програмованого логічного контролера PLCnext із дослідженням та синтезом системи автоматичного керування температурою зони випалювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– виконати аналіз технологічного процесу термічної обробки залізородних окатишів як об'єкта автоматизації;

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- дослідити існуючі технічні та програмні рішення, що застосовуються для автоматизації випалювальних машин;
- розробити математичну модель контуру керування температурою зони випалювання;
- виконати синтез регулятора температури та дослідити його роботу в умовах дії збурень;
- розробити функціональну структуру системи автоматизації процесу;
- обґрунтувати вибір програмованого логічного контролера та засобів введення-виведення Phoenix Contact;
- розробити структуру програмного забезпечення системи керування на базі PLCnext Engineer;
- виконати апробацію запропонованих рішень засобами комп’ютерного моделювання;
- розглянути перспективи розвитку системи із використанням технологій Edge Computing та елементів модельно-прогнозуючого керування.

Об’єктом дослідження є процес термічної обробки залізорудних окатишів на конвеєрній випалювальній машині.

Предметом дослідження є методи та засоби автоматизації процесу термічної обробки окатишів із використанням програмованих логічних контролерів Phoenix Contact та сучасних алгоритмів автоматичного керування.

Методи дослідження базуються на використанні положень теорії автоматичного керування, математичного моделювання теплотехнічних процесів, методів синтезу регуляторів, засобів комп’ютерного моделювання та сучасних технологій промислової автоматизації.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці функціональної структури системи автоматизації процесу термічної обробки окатишів, виборі технічних засобів Phoenix Contact, розробці алгоритмів автоматичного керування температурою зони випалювання та формуванні рекомендацій щодо подальшого впровадження інтелектуальних засобів оптимізації технологічного процесу.

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рішенням даної задачі є використання математичної моделі системи розподілу, оскільки це підвищує енергоефективність роботи станції, а також веде до зменшення антропогенних викидів. На основі математичної моделі створюється імітаційна модель станції, яка дозволяє моделювати розподіл тепла по станції, що, своєю чергою, дає можливість відстежувати температуру в котлоагрегаті з метою забезпечення повного згоряння палива. З'являється можливість контролювати температуру горіння палива без тепловтрат у споживачів або надлишку тепла. Це особливо актуально у моменти різких змін температури повітря.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОКАТИШІВ ТА СУЧАСНИХ РІШЕНЬ З ЙОГО АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологія виробництва залізорудних окатишів

Залізорудні окатиші є одним із основних видів сировини для сучасного металургійного виробництва. Вони являють собою сферичні гранули діаметром переважно від 8 до 18 мм, виготовлені з тонкоподрібненого залізорудного концентрату з додаванням зв'язувальних та флюсуючих компонентів. Порівняно з агломератом окатиші характеризуються більш однорідним гранулометричним складом, підвищеною механічною міцністю, стабільними металургійними властивостями та кращою газопроникністю шару у доменних печах і установках прямого відновлення заліза.

Основною сировиною для виробництва окатишів є залізорудний концентрат, отриманий у результаті подрібнення та збагачення залізних руд. Вміст заліза у сучасних концентратах зазвичай становить 65–70 %, а розмір більшості частинок не перевищує 0,1 мм. Через високу дисперсність концентрат не може безпосередньо використовуватися у металургійних агрегатах, тому потребує попереднього грудкування з утворенням окатишів необхідного розміру та міцності.

Технологічний процес виробництва залізорудних окатишів включає декілька послідовних стадій: підготовку шихти, грудкування, термічну обробку та відвантаження готової продукції. Узагальнену схему виробництва окатишів наведено на рисунку 1.1.

Першим етапом є підготовка шихти, під час якої залізорудний концентрат змішується із необхідними добавками.

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Горбань Я. О.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Жосан А. А								8	15
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

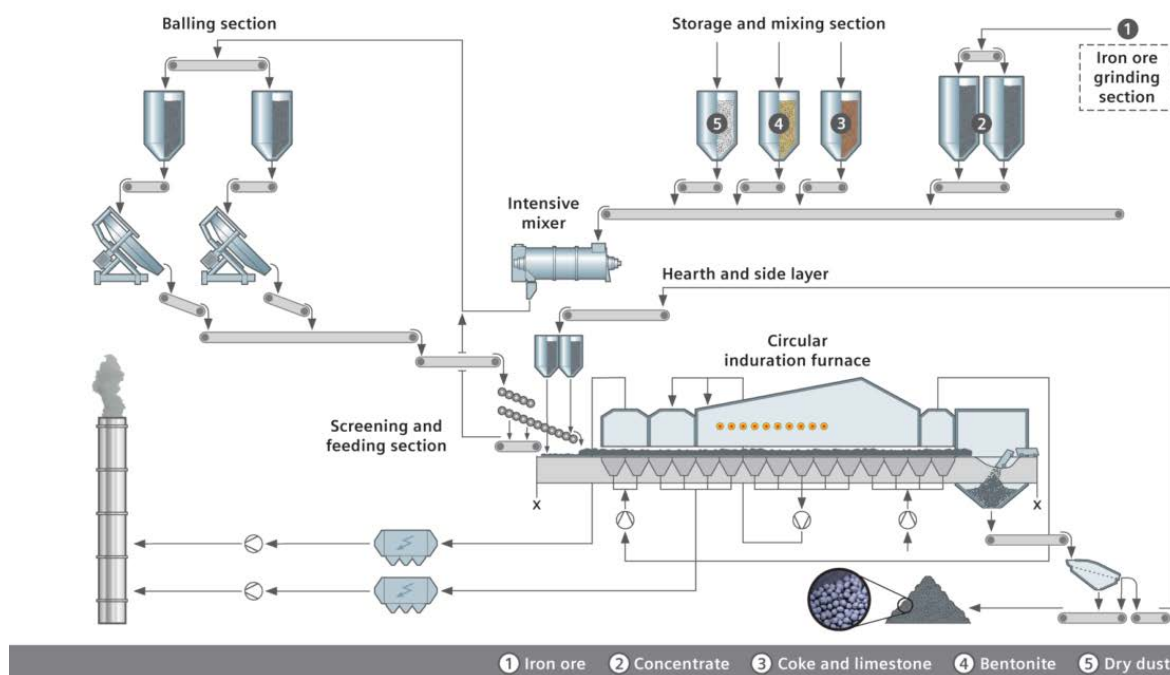


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема виробництва окатишів

Як зв'язувальний матеріал найчастіше використовується бентонітова глина, що забезпечує формування сирих окатишів та їх початкову механічну міцність. Для регулювання хімічного складу та основності окатишів можуть додаватися вапняк, доломіт та інші флюсуючі компоненти. Після дозування складових виконується їх ретельне перемішування та зволоження до необхідної вологості, яка зазвичай становить 8–10 %.

Наступною стадією є огрудкування шихти. Формування сирих окатишів здійснюється у барабанних або дискових огрудковувачах за рахунок злипання частинок концентрату під дією капілярних сил та зв'язувальних речовин. У процесі обертання огрудковувача поступово утворюються сферичні гранули необхідного розміру. Після класифікації придатні окатиші направляються на термічну обробку, а дрібна фракція повертається у процес огрудкування.

Сирі окатиші мають недостатню механічну міцність та не можуть транспортуватися або використовуватися у металургійному виробництві без подальшої термічної обробки. Їх міцність після огрудкування становить лише декілька кілограмів на окатиш, що є недостатнім для витримування механічних навантажень під час транспортування та завантаження у металургійні агрегати.

Тому наступною та найбільш відповідальною стадією виробництва є термічне зміцнення окатишів.

Термічна обробка здійснюється на конвеєрних випалювальних машинах (Travelling Grate Furnace), які забезпечують безперервне переміщення шару окатишів через послідовність технологічних зон із різними температурними режимами. Саме на цій стадії відбувається видалення вологи, окислення магнетиту, утворення міцних міжчастинкових зв'язків та формування кінцевих фізико-механічних властивостей продукції.

Типова конвеєрна випалювальна машина включає чотири основні технологічні зони: сушіння, підігрів, випалювання та охолодження.

У зоні сушіння відбувається видалення фізично зв'язаної вологи з поверхні та внутрішніх пор окатишів. Температура газового середовища в цій зоні зазвичай становить від 200 до 400 °С. Основним завданням етапу є забезпечення рівномірного випаровування вологи без утворення тріщин та руйнування окатишів.

Після сушіння матеріал надходить до зони підігріву, де температура поступово підвищується до 900–1100 °С. На цьому етапі відбуваються процеси декарбонізації флюсуючих добавок та окислення магнетиту до гематиту. Крім того, здійснюється підготовка матеріалу до високотемпературного випалювання.

Найважливішою частиною технологічного процесу є зона випалювання. Температура у даній зоні підтримується в межах 1280–1350 °С залежно від властивостей сировини та вимог до готової продукції. За високих температур відбувається спікання частинок концентрату та формування міцної структури окатишів. Саме параметри зони випалювання значною мірою визначають кінцеву міцність продукції та її придатність для подальшого використання у металургійному виробництві.

Після завершення випалу окатиші надходять до зони охолодження, де їх температура поступово знижується до безпечного рівня. Одночасно здійснюється рекуперація теплової енергії шляхом використання нагрітого

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

повітря для підтримання процесів сушіння та випалювання. Це дозволяє підвищити загальну енергоефективність виробництва та зменшити витрати палива.

Якість готових окатишів оцінюється за комплексом показників, до яких належать механічна міцність, вміст заліза, пористість, гранулометричний склад та ступінь відновлюваності. Забезпечення стабільності зазначених показників безпосередньо залежить від точності підтримання температурних режимів у різних зонах випалювальної машини.

Таким чином, технологія виробництва залізорудних окатишів являє собою складний багатостадійний процес, у якому термічна обробка відіграє визначальну роль у формуванні якісних характеристик готової продукції. Значна енергоємність процесу, наявність взаємопов'язаних технологічних зон та високі вимоги до якості окатишів обумовлюють необхідність застосування сучасних систем автоматизації та ефективних алгоритмів керування температурними режимами випалювальної машини.

1.2 Конвеєрна випалювальна машина як об'єкт автоматизації

Термічна обробка залізорудних окатишів здійснюється на спеціалізованих випалювальних агрегатах, серед яких найбільшого поширення у світовій практиці набули конвеєрні випалювальні машини типу Travelling Grate Furnace (TGF). Даний тип обладнання забезпечує безперервність технологічного процесу, високу продуктивність та можливість ефективного використання теплової енергії за рахунок рекуперації тепла між окремими зонами установки.

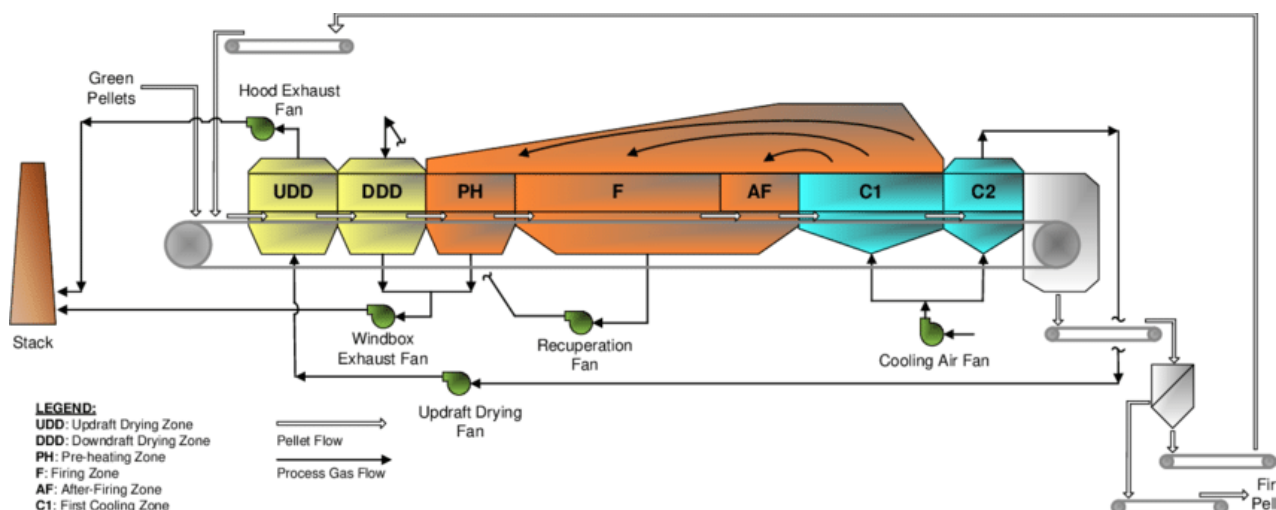
Конвеєрна випалювальна машина являє собою складний теплотехнічний агрегат безперервної дії, основним елементом якого є рухома колосникова стрічка. На поверхні колосникових візків формується шар сирих окатишів товщиною, як правило, від 250 до 400 мм. Під час руху конвеєра матеріал

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

поспідовно проходить через технологічні зони з різними температурними режимами та напрямками руху газових потоків.

Продуктивність сучасних промислових випалювальних машин може становити від декількох мільйонів до понад десяти мільйонів тонн окатишів на рік. При цьому витрати природного газу досягають кількох тисяч кубічних метрів за годину, що обумовлює високу енергоємність процесу та необхідність впровадження ефективних систем автоматичного керування.

Конструктивно конвеєрна випалювальна машина складається з транспортної системи, системи подачі та розподілу газів, палинкових пристроїв, дуттьових і димососних агрегатів, рекупераційних каналів, контрольно-вимірювальних засобів та систем автоматизації. Узагальнену структуру випалювальної машини наведено на рисунку 1.2.



UDD – зона сушіння 1, DDD – зона сушіння 2, PH – зона підігріву, F – зона випалювання, AF – зона рекуперації, C1 – зона охолодження 1, C2 – зона охолодження 2

Рисунок 1.2 – Узагальнена схема випалювальної машини

У процесі роботи через шар окатишів безперервно проходять потоки гарячих газів та повітря, які забезпечують необхідні температурні режими на кожному етапі термічної обробки. Особливістю установки є наявність складної системи газоповітряних трактів, що забезпечують багаторазове використання теплової енергії та взаємозв'язок між окремими зонами агрегату.

Залежно від конструкції конкретної установки технологічний процес може включати різну кількість зон. Проте у більшості випадків виділяють

чотири основні стадії термічної обробки: сушіння, підігрів, випалювання та охолодження.

Зона сушіння призначена для видалення вологи із сирих окатишів перед їх подальшим нагріванням. У даній зоні температура теплоносія зазвичай становить від 200 до 400 °С. Надмірно швидке випаровування вологи може призводити до утворення тріщин та руйнування окатишів, тому процес сушіння потребує ретельного контролю температури та витрати газового потоку.

Основними контрольованими параметрами є температура газів, розрідження під колосниковими візками та витрата повітря. Порушення режиму сушіння негативно впливає на якість продукції та може викликати нестабільність роботи наступних зон.

Після видалення вологи окатиші надходять до зони підігріву, де температура поступово підвищується до 900–1100 °С. У цій зоні відбувається нагрівання матеріалу до температур, необхідних для подальшого випалювання, а також протікають процеси окислення магнетиту та розкладання карбонатних добавок.

Важливою особливістю зони підігріву є значний вплив температурного режиму на подальший перебіг процесу спікання. Недостатній нагрів матеріалу може призвести до збільшення навантаження на палинкову систему зони випалювання та погіршення якості готових окатишів.

Зона випалювання є найбільш відповідальною ділянкою конвеєрної машини та визначає кінцеві властивості готової продукції. Температура в даній зоні підтримується в межах 1280–1350 °С. Нагрівання здійснюється за допомогою газових пальників, які забезпечують необхідну кількість теплової енергії для спікання частинок залізорудного концентрату.

У зоні випалювання формуються міцні міжчастинкові зв'язки, що визначають механічну міцність окатишів. Відхилення температури від оптимального значення навіть на декілька десятків градусів може призвести до погіршення якості продукції. Саме тому контур регулювання температури зони випалювання є основним об'єктом дослідження у даній роботі.

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Основними керуючими впливами для даної зони є витрата природного газу, витрата повітря для горіння та швидкість руху конвеєра.

Після завершення процесу випалювання окатиші надходять до зони охолодження. Тут через шар матеріалу продувається атмосферне повітря, яке забезпечує зниження температури продукції до рівня, безпечного для транспортування та складування.

Особливістю даної зони є можливість рекуперації значної частини теплової енергії. Нагріте повітря використовується для підтримання процесів сушіння та випалювання, що дозволяє суттєво знизити витрати палива.

З точки зору теорії автоматичного керування конвеєрна випалювальна машина належить до складних багатозв'язних об'єктів із розподіленими параметрами. Її динамічна поведінка визначається значною тепловою інерційністю шару окатишів, наявністю транспортних запізнень та взаємним впливом окремих технологічних зон.

До основних особливостей об'єкта належать:

- значні теплові сталі часу;
- наявність транспортних запізнень, обумовлених рухом матеріалу вздовж машини;
- нелінійність процесів теплообміну;
- взаємозв'язок між температурними режимами різних зон;
- залежність параметрів процесу від характеристик сировини;
- жорсткі вимоги до якості регулювання температури зони випалювання.

Крім того, технологічний процес зазнає впливу численних зовнішніх збурень, серед яких найбільш суттєвими є зміни вологості сирих окатишів, коливання теплотворної здатності природного газу, зміна товщини шару матеріалу та нестабільність продуктивності установки.

Таким чином, конвеєрна випалювальна машина є складним багатопараметричним об'єктом автоматизації, ефективність роботи якого значною мірою визначається якістю системи керування температурними режимами. Найбільш відповідальним контуром керування є контур

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

регулювання температури зони випалювання, оскільки саме він безпосередньо впливає на якість готових окатишів, енергоефективність виробництва та надійність роботи технологічного обладнання.

1.3 Аналіз параметрів технологічного процесу термічної обробки окатишів

Ефективність процесу термічної обробки залізорудних окатишів значною мірою залежить від точності підтримання технологічних параметрів у межах заданих значень. Під час проходження матеріалу через окремі зони випалювальної машини відбуваються складні теплофізичні та фізико-хімічні процеси, що визначають якість готової продукції та енергетичну ефективність виробництва.

Для забезпечення стабільної роботи випалювальної машини необхідно здійснювати безперервний контроль великої кількості параметрів технологічного процесу, а також реалізовувати автоматичне регулювання найбільш важливих з них.

До основних контрольованих параметрів процесу термічної обробки окатишів належать температурні, витратні, тискові та технологічні показники.

Найважливішим параметром є температура в технологічних зонах випалювальної машини. Саме температурний режим визначає швидкість перебігу фізико-хімічних процесів, ступінь окислення магнетиту, інтенсивність спікання та кінцеву міцність окатишів.

Контроль температури здійснюється за допомогою високотемпературних термопар, встановлених у газоходах та робочих просторах окремих зон печі.

До основних контрольованих температур належать:

- температура зони сушіння;
- температура зони підігріву;
- температура зони випалювання;
- температура відхідних газів;
- температура повітря після рекуперації;

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– температура готових окатишів після охолодження.

Окрім температурних параметрів важливе значення мають витрати енергоносіїв.

Для забезпечення необхідного теплового режиму контролюються:

- витрата природного газу до пальників;
- витрата повітря для горіння;
- витрата рециркуляційних газів;
- витрата повітря в системі охолодження.

З метою забезпечення стабільного руху газових потоків контролюються параметри тиску та розрідження:

- тиск природного газу;
- тиск дуттьового повітря;
- розрідження в газоходах;
- перепад тиску на шарі окатишів.

Важливими технологічними параметрами також є:

- швидкість руху конвеєра;
- продуктивність машини;
- товщина шару окатишів;
- вологість сирих окатишів.

Основні контрольовані параметри процесу наведені у таблиці 1.1.

Для забезпечення необхідної якості продукції та економічності виробництва частина технологічних параметрів підтримується автоматично.

До основних регульованих параметрів належать:

- температура зони сушіння;
- температура зони підігріву;
- температура зони випалювання;
- температура охолодження;
- розрідження у газових трактах;
- швидкість руху конвеєра.

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Таблиця 1.1 – Основні контрольовані параметри процесу термічної обробки окатишів

Параметр	Тип датчика	Технологічне значення
Температура зони сушіння	Термопара	Контроль видалення вологи
Температура зони підігріву	Термопара	Контроль нагрівання окатишів
Температура зони випалювання	Термопара	Забезпечення необхідної міцності окатишів
Температура охолодження	Термопара	Контроль процесу охолодження
Витрата природного газу	Витратомір	Керування тепловиділенням
Витрата повітря	Витратомір	Забезпечення процесу горіння
Тиск газу	Датчик тиску	Стабільність роботи пальників
Швидкість конвеєра	Енкодер	Контроль часу перебування матеріалу
Вологість сирих окатишів	Вологомір	Контроль якості шихти

Найбільш критичним параметром є температура зони випалювання, оскільки саме вона визначає кінцеву міцність та якість готових окатишів.

Підтримання регульованих параметрів здійснюється шляхом зміни керуючих впливів на технологічне обладнання.

Основними керуючими впливами є:

- витрата природного газу на пальники;
- витрата повітря для горіння;
- продуктивність димососів;
- продуктивність дуттьових вентиляторів;
- швидкість руху конвеєрної стрічки.

Виконавчими механізмами системи автоматизації можуть бути регулюючі клапани, частотні перетворювачі вентиляторів та електроприводи конвеєра.

Процес термічної обробки окатишів характеризується наявністю значної кількості зовнішніх та внутрішніх збурень.

Основними джерелами збурень є:

- зміна вологості сирих окатишів;
- зміна хімічного складу шихти;
- коливання теплотворної здатності природного газу;
- зміна товщини шару окатишів;
- зміна продуктивності машини;
- коливання температури навколишнього середовища;
- зміна характеристик дуттьового повітря.

Найбільш суттєвий вплив на роботу системи керування температурою випалювання мають коливання вологості сировини та теплотворної здатності палива.

Особливістю конвеєрної випалювальної машини є наявність сильних взаємозв'язків між окремими технологічними зонами. Зміна режиму роботи однієї зони неминуче впливає на умови роботи наступних зон.

Наприклад, недостатня температура у зоні підігріву призводить до збільшення теплового навантаження на зону випалу. Аналогічно зміна швидкості конвеєра одночасно впливає на час перебування окатишів у всіх технологічних зонах та, відповідно, на температурний режим усього агрегату.

Саме наявність таких взаємозв'язків, значної теплової інерційності та транспортних запізнень ускладнює задачу автоматичного керування процесом і вимагає використання сучасних засобів автоматизації та ефективних алгоритмів регулювання.

Таким чином, процес термічної обробки окатишів характеризується значною кількістю контрольованих та регульованих параметрів, складними взаємозв'язками між окремими технологічними зонами та впливом численних збурень. Найбільш відповідальним параметром є температура зони випалу, стабілізація якої забезпечує необхідну якість готової продукції та є основним завданням системи автоматизації, що розробляється у даній роботі.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

1.4 Аналіз сучасних систем та підходів до автоматизації процесів випалу окатишів

Сучасне виробництво залізорудних окатишів належить до складних багатопараметричних технологічних процесів, що характеризуються значною енергоємністю, наявністю взаємопов'язаних технологічних зон та високими вимогами до якості кінцевої продукції. За таких умов забезпечення стабільності технологічних режимів неможливе без застосування сучасних систем автоматизації, здатних здійснювати моніторинг, керування та оптимізацію виробничих процесів у режимі реального часу [9].

Постійне зростання вартості енергетичних ресурсів, необхідність зниження викидів парникових газів та впровадження концепцій цифрової трансформації промисловості обумовлюють розвиток нових підходів до автоматизації процесів виробництва окатишів. Сучасні системи керування вже не обмежуються реалізацією локальних контурів регулювання, а включають засоби виробничої аналітики, прогнозування технологічних параметрів, оптимізації режимів роботи та інтеграції з інформаційними системами підприємства [13].

1.4.1 Класичні системи автоматизації металургійних виробництв

Протягом останніх десятиліть основою автоматизації металургійних підприємств залишаються розподілені системи керування технологічними процесами (Distributed Control System, DCS). Такі системи забезпечують централізоване керування виробництвом, збір даних від польових засобів автоматизації, архівування інформації та візуалізацію технологічних процесів.

Типова структура сучасної АСУ ТП включає декілька рівнів. На нижньому рівні розташовуються датчики, виконавчі механізми та первинні засоби вимірювання. Наступний рівень представлений програмованими логічними контролерами або контролерами DCS, які реалізують алгоритми автоматичного керування. Верхній рівень включає SCADA-системи, операторські станції та сервери архівування даних. У багатьох випадках

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

додатково використовується рівень MES та корпоративних інформаційних систем [14].

Однією з найбільш поширених платформ автоматизації є Siemens PCS 7. Дана система забезпечує побудову масштабованих розподілених систем керування та широко використовується у металургійній, хімічній та енергетичній галузях. Основними перевагами PCS 7 є інтеграція з обладнанням Siemens, наявність розвинених бібліотек технологічних об'єктів та можливість реалізації складних алгоритмів автоматичного керування [14].

Іншим поширеним рішенням є ABB Ability System 800xA, яка поєднує функції автоматизації технологічних процесів, електропостачання та управління виробничими активами. Особливістю даної системи є високий рівень інтеграції між різними підсистемами підприємства та підтримка сучасних інструментів цифровізації виробництва [15].

Для автоматизації великих промислових підприємств також широко використовується платформа Honeywell Experion PKS, яка забезпечує реалізацію функцій розподіленого керування, систем протиаварійного захисту та засобів виробничої аналітики [16].

Незважаючи на значні функціональні можливості, зазначені рішення переважно орієнтовані на великі промислові комплекси та характеризуються високою вартістю впровадження, що обмежує їх використання для локальних систем автоматизації окремих технологічних агрегатів.

1.4.2 Сучасні методи автоматичного керування теплотехнічними процесами

Технологічні процеси термічної обробки окатишів належать до класу складних теплотехнічних об'єктів, для яких характерні значні теплові сталі часу, транспортні запізнення та нелінійні залежності між вхідними та вихідними параметрами. У зв'язку з цим особливого значення набуває вибір структури системи автоматичного керування.

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Найбільш поширеним підходом до керування тепловими процесами залишається використання PID-регуляторів. Простота реалізації, висока надійність та відносно невисокі вимоги до обчислювальних ресурсів забезпечили широке застосування PID-регулювання у промисловості [10].

Разом із тим ефективність класичних PID-регуляторів суттєво знижується при наявності значних транспортних запізнень. У таких випадках застосовуються більш складні структури керування, зокрема каскадні системи, feedforward-компенсація збурень та алгоритми прогнозного керування [9].

Одним із найбільш відомих методів компенсації транспортного запізнення є структура Smith Predictor, запропонована О. Смітом у 1957 році [11]. Використання внутрішньої математичної моделі об'єкта дозволяє суттєво покращити динамічні характеристики системи керування та підвищити якість регулювання.

Подальшим розвитком концепції прогнозного керування стали алгоритми Model Predictive Control (MPC), які базуються на використанні математичної моделі об'єкта для прогнозування його майбутнього стану та визначення оптимальних керуючих впливів [13].

Для процесів випалювання окатишів застосування MPC є особливо перспективним, оскільки дозволяє враховувати взаємозв'язки між окремими технологічними зонами, обмеження на технологічні параметри та вимоги до енергоефективності виробництва. Разом із тим реалізація повноцінного MPC потребує значних обчислювальних ресурсів та детальної математичної моделі процесу, що ускладнює його використання на рівні локального керування.

1.4.3 Цифровізація виробництва та концепція Industry 4.0

Однією з основних тенденцій розвитку сучасної промисловості є впровадження концепції Industry 4.0, яка передбачає інтеграцію виробничого обладнання, інформаційних систем та засобів аналітики в єдиний цифровий простір.

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

У контексті автоматизації процесів виробництва окатишів особливого значення набувають технології Industrial Internet of Things (IIoT), які забезпечують збір та обробку технологічних даних у режимі реального часу. Використання відкритих протоколів промислового обміну даними, таких як OPC UA та MQTT, дозволяє організувати взаємодію між обладнанням різних виробників та створити єдину інформаційну інфраструктуру підприємства [19].

Важливим напрямком розвитку є використання технологій Edge Computing, які передбачають виконання обробки даних безпосередньо поблизу джерела їх виникнення. Це дозволяє зменшити навантаження на корпоративні мережі, підвищити швидкодію систем керування та забезпечити реалізацію складних алгоритмів аналітики без необхідності передачі великих обсягів даних до віддалених серверів.

Крім того, сучасні цифрові рішення активно використовують концепцію цифрових двійників (Digital Twin), які дозволяють моделювати поведінку технологічних процесів та прогнозувати наслідки зміни режимів роботи обладнання.

1.4.4 Платформа PLCnext Technology як основа сучасних систем автоматизації

Одним із перспективних рішень для побудови сучасних систем автоматизації є платформа PLCnext Technology компанії Phoenix Contact [17].

На відміну від традиційних програмованих логічних контролерів, PLCnext поєднує переваги класичних засобів автоматизації та відкритих програмних платформ. Контролери даного сімейства підтримують програмування відповідно до стандарту IEC 61131-3, а також використання мов високого рівня, включаючи C#, C++, Python та інші [18].

Важливою перевагою платформи є підтримка сучасних протоколів промислового обміну даними, зокрема OPC UA, MQTT, Modbus TCP та PROFINET. Це забезпечує можливість інтеграції контролера із системами

диспетчерського керування, хмарними платформами та засобами промислової аналітики [19].

Додатковою особливістю PLCnext є можливість реалізації концепції Edge Computing безпосередньо на рівні контролера. Це створює передумови для впровадження інтелектуальних алгоритмів аналізу даних, прогнозування технологічних параметрів та реалізації функцій модельно-прогнозуючого керування.

Проведений аналіз показав, що сучасні системи автоматизації процесів виробництва окатишів розвиваються у напрямку поєднання традиційних засобів автоматичного керування із технологіями цифровізації, промислового Інтернету речей та виробничої аналітики. Для локальних систем автоматизації технологічних агрегатів перспективним рішенням є використання відкритих платформ автоматизації, здатних забезпечити як реалізацію класичних алгоритмів регулювання, так і подальше впровадження сучасних концепцій Industry 4.0.

З урахуванням проведеного аналізу для побудови системи автоматизації процесу термічної обробки окатишів доцільним є використання платформи PLCnext Technology компанії Phoenix Contact, яка поєднує засоби промислової автоматизації з можливостями сучасних цифрових технологій та підтримує подальший розвиток системи у напрямку використання Edge Computing і модельно-прогнозуючого керування.

1.5 Математичний опис процесу термічної обробки окатишів

Ефективне проєктування систем автоматичного керування неможливе без попереднього математичного опису об'єкта керування. Наявність математичної моделі дозволяє досліджувати динамічні властивості технологічного процесу, оцінювати вплив керуючих дій та збурень, а також виконувати синтез і налаштування регуляторів без втручання у роботу реального обладнання [9].

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Процес термічної обробки залізорудних окатишів на конвеєрній випалювальній машині належить до складних теплотехнічних процесів із розподіленими параметрами. Його математичний опис повинен враховувати теплообмін між газовим середовищем та шаром окатишів, рух матеріалу вздовж технологічних зон, фізико-хімічні процеси окислення та спікання, а також вплив зовнішніх збурень.

У загальному випадку побудова повної математичної моделі процесу потребує використання систем рівнянь тепломасообміну у частинних похідних. Проте для задач аналізу та синтезу систем автоматичного керування доцільно використовувати спрощені моделі, які відображають основні динамічні властивості об'єкта та забезпечують прийнятну точність опису його поведінки [9].

Основним об'єктом дослідження у даній роботі є зона випалювання конвеєрної машини, оскільки саме вона визначає якість готових окатишів та характеризується найбільшими енерговитратами.

У зоні випалювання газові пальники, розташовані вздовж довжини зони, забезпечують згоряння природного газу з утворенням димових газів температурою 1400–1500 °С. Ці гази контактують з рухомих шаром окатишів, передаючи їм тепло. У моделі традиційно розглядають ефективний теплообмін між «гарячим газом» (з усередненою температурою T_{gas}) та «шаром окатишів» (з температурою T_{pellet}). Передача тепла включає конвекційний та радіаційний теплообміни.

Конвекція описується законом охолодження Ньютона:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{gas} - T_{pellet}), \quad (1.1)$$

де h – коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт/(м²·К), A – площа теплообмінної поверхні, м². Для типових параметрів процесу (швидкість димових газів ~5–8 м/с, $h \approx 80 \dots 120$ Вт/(м²·К).

При температурах вище 1000 °С домінуючим механізмом теплопередачі стає випромінювання, що описується законом Стефана-Больцмана:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{gas}^4 - T_{pellet}^4), \quad (1.2)$$

де ε – степінь чорності системи (для пеллетного шару $\varepsilon \approx 0,85$), $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – стала Стефана-Больцмана. Принципова відмінність від конвекції – залежність від четвертого степеню абсолютних температур, що робить модель суттєво нелінійною.

Сумарний потік тепла від газів до окатишів становить:

$$Q_{total} = Q_{conv} + Q_{rad} = h \cdot A \cdot (T_{gas} - T_{pellet}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{gas}^4 - T_{pellet}^4). \quad (1.3)$$

Температура газів T_{gas} сама залежить від витрати палива F_{gas} (керуючий вплив системи керування). При постійному стехіометричному коефіцієнті повітря:

$$T_{gas} \approx T_{ad}(F_{gas}), \quad (1.4)$$

де T_{ad} – адіабатична температура згоряння, що визначається тепловим балансом пального. Для природного газу $T_{ad} \approx 1800...1950$ °С при стехіометричному горінні. Для зручності в розрахунках регулятора в моделі використовується ефективна температура газу, узгоджена з конструкцією печі.

Запишемо рівняння теплового балансу для зони випалу як для зосередженого об'єму. Прийняті припущення:

- температура шару окатишів у зоні випалу – однорідна (відсутність градієнтів за поперечним перерізом);
- маса матеріалу в зоні постійна (стаціонарний потік);
- теплові втрати через футерівку обмежені і пропорційні різниці температур;
- витрата газу впливає на T_{gas} з достатньо малою інерцією (вважаємо її практично миттєвою порівняно з тепловими сталими часу шару).

За цих припущень рівняння теплового балансу набуває вигляду:

$$c_p m \frac{dT_{pellet}}{dt} = Q_{conv} + Q_{rad} - Q_{out} - Q_{loss}, \quad (1.5)$$

де $c_p m$ – повна теплоємність шару окатишів у зоні випалу (для шару окатишів маси 12000 кг та $c_p = 800$ Дж/(кг·К) маємо $c_p m \approx 9,6$ МДж/К), Q_{out} – тепло, що передається у зону охолодження разом з матеріалом, Q_{loss} – втрати через футерівку ($\approx 3-5$ % загального теплового балансу).

Підставляючи (1.1) та (1.2) у (1.5), отримуємо нелінійну форму:

$$c_p m \frac{dT}{dt} = h \cdot A \cdot (T_g - T) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_g^4 - T^4) - Q_{out} - Q_{loss}. \quad (1.6)$$

Тут для скорочення запису T позначає T_{pellet} , а $T_g - T_{gas}$. Це рівняння – нелінійне через присутність T^4 , що принципово ускладнює застосування лінійної теорії автоматичного керування. Для синтезу класичного ПІД-регулятора необхідно виконати лінеаризацію навколо робочої точки.

Класичний підхід полягає у представленні змінної у вигляді суми усталеного (робочого) значення і малого відхилення:

$$T = T_0 + \Delta T, \quad T_g = T_{g0} + \Delta T_g, \quad F_{gas} = F_0 + \Delta F, \quad (1.7)$$

де $T_0 = 1320$ °С = 1593,15 К – задана робоча точка зони випалу, F_0 – відповідна усталена витрата газу. У сталому режимі ($dT/dt = 0$) виконується тотожність:

$$h \cdot A \cdot (T_{g0} - T_0) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{g0}^4 - T_0^4) = Q_{out} + Q_{loss}. \quad (1.8)$$

Підставляючи (3.7) у (3.6) і застосовуючи розкладання у ряд Тейлора з утриманням лише членів першого порядку малості (тобто нехтуючи $(\Delta T)^2$, $(\Delta T)^3$ і так далі), отримуємо для члена з T^4 :

$$(T_0 + \Delta T)^4 \approx T_0^4 + 4 \cdot T_0^3 \cdot \Delta T. \quad (1.9)$$

Аналогічно для ΔT_g .

Підстановка (19) у (1.6) з урахуванням сталого режиму (1.8) дає лінійне диференціальне рівняння у відхиленнях:

$$c_p m \frac{d(\Delta T)}{dt} = (hA + 4\varepsilon\sigma AT_{g0}^3)\Delta T_g - (hA + 4\varepsilon\sigma AT_0^3)\Delta T. \quad (1.10)$$

Введемо позначення для ефективних коефіцієнтів теплообміну:

$$a_g = hA + 4\varepsilon\sigma AT_{g0}^3, \quad a_p = hA + 4\varepsilon\sigma AT_0^3. \quad (1.11)$$

Розмірність α – Вт/К. Тоді (1.10) набуває компактного вигляду:

$$c_p m \frac{d(\Delta T)}{dt} = a_g \Delta T_g - a_p \Delta T. \quad (1.12)$$

З урахуванням залежності температури газу від витрати палива ($\Delta T_g = k_F \Delta F$, де k_F – коефіцієнт пропорційності) та запровадивши перетворення Лапласа за нульових початкових умов, отримуємо:

$$c_p m \cdot s \cdot \Delta T(s) = a_g k_F \Delta F(s) - a_p \Delta T(s). \quad (1.13)$$

Перегруповуючи відносно $\Delta T(s)$:

$$(c_p m \cdot s + a_p) \cdot \Delta T(s) = a_g k_F \Delta F(s). \quad (1.14)$$

Отже, передавальна функція «витрата газу $\rightarrow$ температура шару» без врахування транспортного запізнення:

$$G_0(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta F(s)} = \frac{a_g k_F}{a_p (c_p m / a_p \cdot s + 1)} \quad (1.15)$$

Тобто маємо інерційну ланку першого порядку з параметрами:

$$K_p = \frac{a_g k_F}{a_p}, \quad T = \frac{c_p m}{a_p}. \quad (1.16)$$

До отриманої моделі (1.15) необхідно додати транспортне запізнення τ – час, протягом якого зміна витрати газу у пальниках встигає викликати зміну температури в точці вимірювання (місці встановлення термопар). Цей час складається з:

– часу транспортування газів від пальника до зони контролю ($\sim 30\text{--}40$ с при швидкості $5\text{--}7$ м/с);

– інерції самої термопар у захисному чохлі ($\sim 30\text{--}50$ с);

– часу обробки сигналу у вторинному приладі та контролері (1–2 с).

Загальне ефективне запізнення для типової конструкції печі – $\tau \approx 90$ с.

Транспортне запізнення в просторі Лапласа відповідає множнику $e^{-\tau s}$.

Тому повна модель об'єкта зони випалу набуває стандартної форми ланки першого порядку із запізненням (First Order Plus Dead Time, FOPDT):

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta F(s)} = \frac{K_p \cdot e^{-\tau s}}{Ts + 1}. \quad (1.17)$$

За результатами оцінювання параметрів об'єкта (за літературними даними для випалювальних машин типу Лургі продуктивністю 250 т/год [13]) та з урахуванням наведеного вище виведення, для контуру №3 (зона випалювання) прийняті чисельні значення, наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Параметри передавальної функції зони випалювання

Параметр	Значення	Одиниці	Фізичний зміст
K_p	0,18	°C/(м³/год)	Статичне підсилення: на скільки °C збільшиться температура при збільшенні витрати газу на 1 м³/год
T	380	с	Стала часу: характеризує теплову інерцію шару окатишів і футерівки печі
τ	90	с	Транспортне запізнення: час від зміни витрати газу до реєстрації змін термопарою
τ/T	0,237	безрозм.	Індекс керованості: характеризує складність синтезу регулятора для об'єкта
T_0	1320	°C	Робоча точка лінеаризації (центр діапазону 1280–1350 °C)

Аналіз отриманої математичної моделі показує, що зона випалу окатишів є об'єктом із суттєвим транспортним запізненням та значною тепловою інерційністю.

Відношення транспортного запізнення до сталої часу τ/T є важливим показником складності задачі керування. Для об'єктів із великими значеннями даного показника використання традиційних ПП- та ПД-регуляторів може призводити до погіршення показників якості регулювання та зниження запасів стійкості системи.

Наявність транспортного запізнення обумовлює доцільність використання спеціальних методів компенсації, одним із яких є структура предиктора Сміта (Smith Predictor). Даний підхід дозволяє використовувати внутрішню модель об'єкта для прогнозування його поведінки та зменшення негативного впливу запізнення на динаміку системи керування.

Таким чином, результати ідентифікації підтверджують доцільність використання моделі типу FOPDT як основи для синтезу системи автоматичного керування температурою зони випалу. Отримані параметри моделі будуть використані у наступному розділі для налаштування ПП-регулятора та дослідження ефективності застосування структури на базі предиктора Сміта.

1.6 Аналіз сучасних систем та підходів до автоматизації процесів випалу окатишів

Проведений аналіз технології виробництва залізорудних окатишів, особливостей роботи конвеєрної випалювальної машини, параметрів технологічного процесу та сучасних систем автоматизації показав, що забезпечення стабільного температурного режиму є одним із ключових факторів отримання продукції необхідної якості. При цьому процес термічної обробки окатишів характеризується значною тепловою інерційністю, наявністю транспортних запізнень, взаємним впливом окремих технологічних зон та впливом численних зовнішніх збурень.

Аналіз сучасних тенденцій розвитку промислової автоматизації свідчить про доцільність використання відкритих програмно-апаратних платформ, які

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поєднують засоби класичного автоматичного керування з можливостями цифрової трансформації виробництва, Industrial Internet of Things та Edge Computing. Одним із перспективних рішень для реалізації таких систем є платформа PLCnext Technology компанії Phoenix Contact, яка підтримує сучасні промислові протоколи обміну даними та забезпечує можливість подальшого розвитку системи автоматизації.

На основі проведеного аналізу до розроблюваної системи автоматизації висуваються наступні вимоги.

До технологічних вимог належать:

- підтримання температури зони випалу у заданому технологічному діапазоні;
- забезпечення необхідної якості готових окатишів;
- компенсація впливу основних технологічних збурень;
- зниження питомих витрат природного газу;
- забезпечення стабільності роботи випалювальної машини.

До експлуатаційних вимог належать:

- висока надійність функціонування системи;
- безпечність експлуатації обладнання;
- простота технічного обслуговування;
- можливість модернізації та розширення функціональних можливостей.

До інформаційних вимог належать:

- безперервний моніторинг технологічних параметрів;
- архівування виробничих даних;
- візуалізація параметрів процесу;
- реєстрація аварійних та передаварійних ситуацій;
- можливість інтеграції із зовнішніми інформаційними системами.

Відповідно до сучасних принципів побудови автоматизованих систем керування технологічними процесами розроблювана система повинна мати багаторівневу структуру.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

На польовому рівні розташовуються датчики температури, витрати, тиску та інші засоби вимірювання, а також виконавчі механізми, що безпосередньо впливають на перебіг технологічного процесу.

Рівень керування реалізується на базі програмованого логічного контролера PLCnext AXC F 1152, який забезпечує виконання алгоритмів автоматичного регулювання, логічного керування та обробки технологічної інформації.

На верхньому рівні передбачається використання засобів операторського інтерфейсу та диспетчерського контролю, що забезпечують візуалізацію параметрів процесу, архівування даних та формування аварійних повідомлень.

Перспективним напрямком розвитку системи є впровадження додаткового рівня Edge-аналітики, який може бути реалізований на базі Node-RED та використовуватись для прогнозування параметрів процесу, формування рекомендацій оператору та реалізації функцій інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

Конвеєрна випалювальна машина містить декілька взаємопов'язаних контурів автоматичного регулювання, серед яких можна виділити контури керування температурою зон сушіння, підігріву, випалу та охолодження, контури регулювання витрати газу, повітря, розрідження та швидкості руху конвеєра.

Разом із тим найбільш важливим параметром з точки зору забезпечення якості готової продукції є температура зони випалювання. Саме в даній зоні відбуваються процеси спікання частинок концентрату та формування механічної міцності окатишів. Відхилення температури від оптимального значення може призвести до зниження якості продукції, збільшення частки браку та зростання енергетичних витрат.

Крім того, результати математичного моделювання показали, що контур регулювання температури зони випалювання характеризується значною тепловою інерційністю та наявністю транспортного запізнення, що суттєво ускладнює задачу автоматичного керування.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

У зв'язку з цим подальші дослідження у роботі зосереджені на розробці системи автоматичного керування температурою зони випалювання як найбільш відповідального контуру керування технологічним процесом.

Таким чином, на основі проведеного аналізу сформульовано задачу розробки системи автоматизації процесу термічної обробки залізорудних окатишів на базі платформи PLCnext Technology. Основним об'єктом дослідження обрано контур регулювання температури зони випалу, для якого у наступному розділі буде виконано проектування структури системи автоматизації, вибір технічних засобів та розробку алгоритмів автоматичного керування.

Висновки за розділом:

У першому розділі виконано аналіз технології виробництва залізорудних окатишів та досліджено особливості процесу їх термічної обробки як об'єкта автоматизації.

Встановлено, що термічна обробка є одним із найбільш відповідальних та енергоємних етапів виробництва окатишів, під час якого формуються основні фізико-механічні властивості готової продукції. Процес реалізується на конвеєрних випалювальних машинах, що включають зони сушіння, підігріву, випалу та охолодження, кожна з яких характеризується власними технологічними режимами та особливостями керування.

У результаті аналізу конвеєрної випалювальної машини встановлено, що вона належить до складних багатопараметричних об'єктів автоматизації з розподіленими параметрами, значною тепловою інерційністю та наявністю транспортних запізнень. Основними контрольованими параметрами процесу є температура технологічних зон, витрати природного газу та повітря, тиск і розрідження у газоповітряних трактах, а також швидкість руху конвеєра. Найбільш відповідальним параметром з точки зору забезпечення якості готової продукції є температура зони випалу.

					КНУ КРБ.151.26.04.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Проведений аналіз сучасних систем автоматизації показав, що розвиток промислових систем керування відбувається у напрямку інтеграції традиційних засобів автоматичного регулювання з технологіями цифровізації, Industrial Internet of Things, Edge Computing та виробничої аналітики. Встановлено, що платформа PLCnext Technology компанії Phoenix Contact відповідає сучасним вимогам до побудови відкритих систем автоматизації та забезпечує підтримку сучасних протоколів промислового обміну даними, зокрема OPC UA, MQTT та PROFINET.

Виконано математичний опис процесу термічної обробки окатишів на основі теплового балансу зони випалу. Показано, що динамічні властивості об'єкта можуть бути описані моделлю у вигляді аперіодичної ланки з запізненням, яка враховує основні особливості процесу, а саме теплову інерційність та транспортне запізнення. Проведений аналіз підтвердив доцільність використання спеціалізованих методів компенсації запізнення при побудові системи автоматичного керування.

На підставі результатів аналізу сформульовано задачу розробки системи автоматизації процесу термічної обробки залізрудних окатишів на базі платформи PLCnext Technology. Як основний об'єкт дослідження обрано контур автоматичного регулювання температури зони випалу, який безпосередньо впливає на якість готової продукції та енергоефективність виробництва.

Отримані результати створюють теоретичну основу для виконання другого розділу роботи, у якому буде розроблено функціональну структуру системи автоматизації, обґрунтовано вибір технічних засобів Phoenix Contact, реалізовано алгоритми автоматичного керування та виконано апробацію запропонованих технічних рішень.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ТА АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОКАТИШІВ

2.1 Розробка структури системи автоматизації процесу термічної обробки окатишів

На підставі результатів аналізу технологічного процесу термічної обробки окатишів та сформульованих вимог до системи автоматизації розроблено функціональну структуру системи керування, яка забезпечує контроль технологічних параметрів, автоматичне регулювання температурного режиму зони випалу, візуалізацію процесу та можливість подальшого впровадження засобів інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

Під час проєктування системи автоматизації були враховані сучасні вимоги до побудови відкритих промислових систем, сумісних із концепціями Industry 4.0, Industrial Internet of Things та Edge Computing.

Запропонована система автоматизації має багаторівневу структуру та включає такі функціональні рівні (рис. 2.1):

- польовий рівень;
- рівень введення-виведення;
- рівень керування;
- верхній рівень диспетчеризації;
- перспективний рівень Edge-аналітики.

Кожен із зазначених рівнів виконує власні функції та забезпечує взаємодію з іншими компонентами системи.

Польовий рівень призначений для отримання інформації про стан технологічного процесу та реалізації керуючих впливів на обладнання.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.02.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>РОЗДІЛ 2</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Горбань Я. О.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Жосан А.А.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-22</i>		
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						3	1

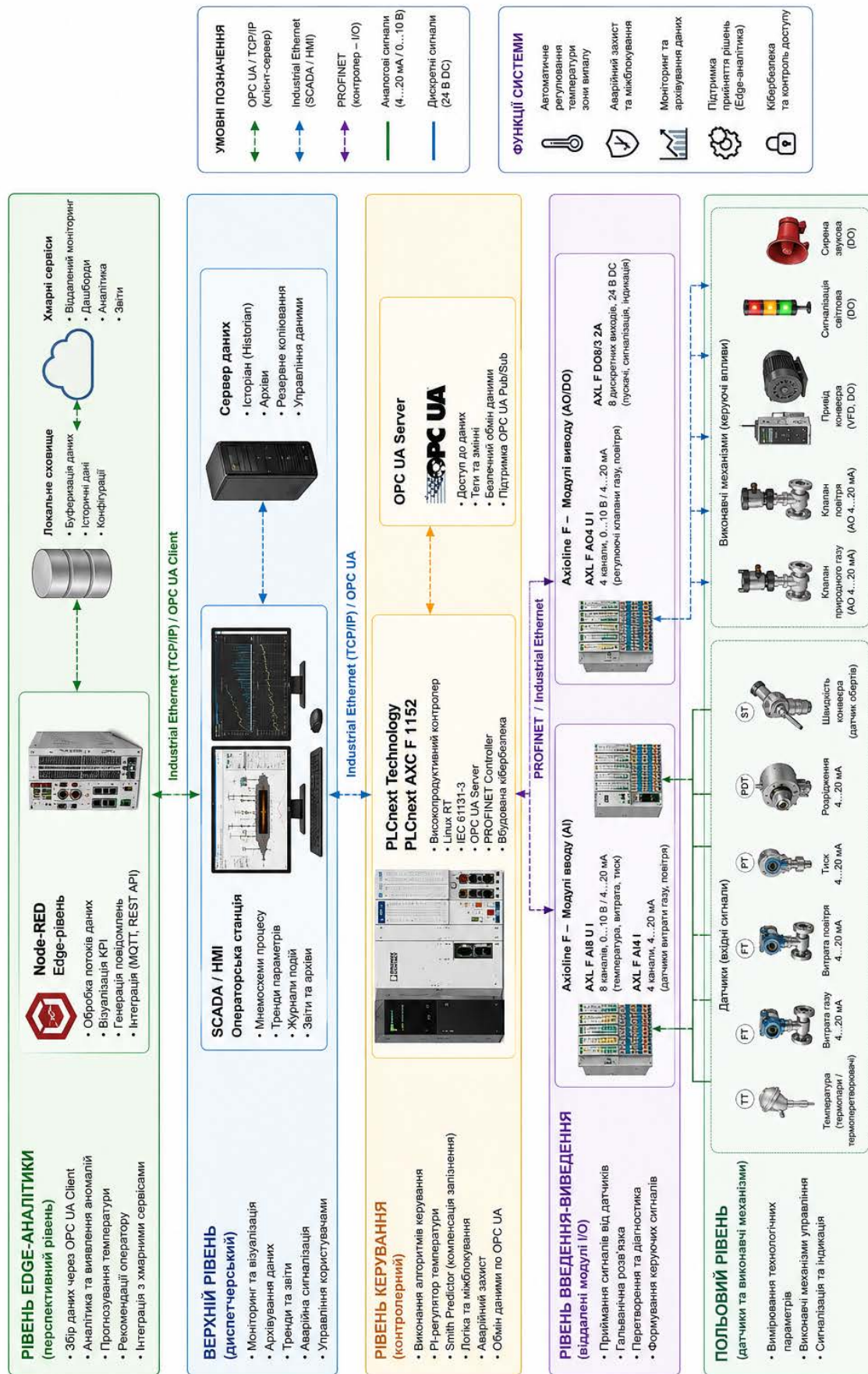


Рисунок 2.1 – Структура системи автоматизації процесу термічної обробки окатишів

До складу польового рівня входять:

- датчики температури зон сушіння, підігріву, випалу та охолодження;
- датчики витрати природного газу;
- датчики витрати повітря;
- датчики тиску та розрідження;
- датчики швидкості руху конвеєра;
- регулюючі клапани подачі природного газу;
- регулюючі клапани подачі повітря;
- електропривод конвеєра;
- засоби світлової та звукової сигналізації.

Основним джерелом інформації для системи автоматичного керування є датчики температури зони випалу, сигнали яких використовуються для формування регулюючих впливів.

Для підключення польових пристроїв до контролера використовуються модулі розподіленого введення-виведення Axioline F.

До функцій рівня введення-виведення належать:

- прийом сигналів від датчиків;
- первинна обробка аналогових сигналів;
- передача інформації до контролера;
- формування сигналів керування виконавчими механізмами;
- гальванічна розв'язка каналів.

Використання модулів Axioline F дозволяє реалізувати модульну структуру системи та спростити її подальше розширення.

Центральним елементом системи автоматизації є програмований логічний контролер PLCnext AXС F 1152.

Контролер виконує такі функції:

- опитування каналів введення-виведення;
- виконання алгоритмів автоматичного регулювання;
- реалізація логіки керування обладнанням;
- контроль аварійних режимів;

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- обмін даними із системою візуалізації;
- передача даних на верхній рівень.

У межах даної роботи на контролері передбачається реалізація таких функціональних модулів:

- модуль збору технологічних даних;
- модуль автоматичного регулювання температури;
- модуль компенсації транспортного запізнення;
- модуль аварійної сигналізації;
- модуль обміну даними по OPC UA.

Основною задачею рівня керування є підтримання температури зони випалювання на заданому рівні шляхом зміни витрати природного газу.

Верхній рівень системи призначений для взаємодії з оператором та забезпечення функцій диспетчерського контролю.

Основними функціями верхнього рівня є:

- візуалізація технологічного процесу;
- відображення поточних параметрів;
- формування архівів даних;
- відображення трендів;
- реєстрація аварійних повідомлень;
- формування виробничих звітів.

Для обміну даними між контролером та верхнім рівнем передбачається використання протоколу OPC UA.

З урахуванням сучасних тенденцій розвитку промислової автоматизації до структури системи додатково включено перспективний рівень Edge-аналітики.

Даний рівень може бути реалізований на базі середовища Node-RED та виконувати такі функції:

- збір даних від контролера через OPC UA;
- аналіз технологічних параметрів;
- прогнозування температурного режиму;

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- виявлення аномальних режимів роботи;
- підготовка рекомендацій оператору;
- інтеграція з хмарними сервісами.

На початковому етапі впровадження даний рівень не бере безпосередньої участі у формуванні керуючих впливів, а використовується як інструмент підтримки прийняття рішень.

2.2 Вибір технічних засобів для реалізації алгоритмів керування процесом термічної обробки окатишів

Одним із ключових етапів проєктування системи автоматизації є вибір технічних засобів, які забезпечують реалізацію алгоритмів керування, збір технологічної інформації, обмін даними між компонентами системи та взаємодію з оператором.

З урахуванням вимог до функціональності, відкритості архітектури, підтримки сучасних промислових протоколів та можливості подальшого розвитку системи автоматизації для реалізації проєкту обрано платформу PLCnext Technology компанії Phoenix Contact.

Як центральний елемент системи автоматизації обрано програмований логічний контролер PLCnext AXC F 1152.

Контролер належить до сімейства PLCnext Control та призначений для побудови високопродуктивних систем автоматизації середнього рівня складності.

Основними перевагами контролера є:

- підтримка стандарту IEC 61131-3;
- можливість програмування мовами C#, C++, Python;
- підтримка OPC UA, MQTT, PROFINET та Modbus TCP;
- вбудований веб-сервер;
- операційна система Linux;
- підтримка технологій Edge Computing;

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

– інтеграція із середовищем PLCnext Engineer.

Технічні характеристики контролера наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики контролера PLCnext AXC F 1152

№ з/п	Параметр	Значення
1	Процесор	ARM Dual Core
2	Операційна система	Linux
3	Оперативна пам'ять	1 ГБ
4	Flash-пам'ять	4 ГБ
5	Ethernet-порти	2 × Gigabit Ethernet
6	PROFINET	Controller
7	OPC UA	Server
8	MQTT	Підтримується
9	Напруга живлення	24 В DC

Вибір контролера АХС F 1152 обумовлений достатньою продуктивністю для реалізації алгоритму регулювання температури, підтримкою сучасних промислових протоколів та можливістю подальшого впровадження засобів прогностичної аналітики.

Для підключення польових засобів автоматизації використовується система розподіленого введення-виведення Axioline F.

На підставі аналізу технологічного процесу визначено необхідність підключення:

- датчиків температури;
- датчиків витрати природного газу;
- датчиків витрати повітря;
- датчиків тиску;
- датчика швидкості конвеєра;
- регулюючих клапанів газу;
- регулюючих клапанів повітря;

– дискретних сигналів стану обладнання.

Для реалізації зазначених функцій пропонується використати конфігурацію модулів, наведену в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Конфігурація модулів Axioline F

№ з/п	Позначення	Тип модуля	Призначення
1	AXL F BK ETH	Шинний адаптер	Підключення до PLCnext
2	AXL F AI8 U/I	8 AI	Температура, тиск, витрата
3	AXL F AI4 I	4 AI	Резерв аналогових сигналів
4	AXL F AO4 U/I	4 AO	Керування клапанами
5	AXL F DI8/3	8 DI	Дискретні сигнали
6	AXL F DO8/2	8 DO	Сигналізація та керування

Запропонована конфігурація має резерв каналів для подальшого розширення системи.

Для забезпечення взаємодії між компонентами системи використовується промислова мережа Ethernet.

Обмін даними між PLCnext та модулями Axioline F здійснюється через PROFINET.

Для взаємодії з верхнім рівнем системи використовується протокол OPC UA, який забезпечує:

- платформонезалежний обмін даними;
- підтримку інформаційних моделей;
- високий рівень кібербезпеки;
- інтеграцію з SCADA-системами.

Для перспективного підключення рівня Edge-аналітики передбачається використання OPC UA Client у середовищі Node-RED.

Таким чином, виконано вибір технічних засобів системи автоматизації на базі платформи PLCnext Technology. Запропонована конфігурація забезпечує необхідну функціональність, має резерв для подальшого розвитку

та відповідає сучасним вимогам до побудови відкритих промислових систем автоматизації.

2.3 Розробка системи автоматичного керування температурою зони випалювання

Температура зони випалу є одним із найважливіших параметрів процесу термічної обробки залізорудних окатишів. Саме у цій зоні відбувається формування кінцевої міцності окатишів за рахунок спікання частинок залізорудного концентрату. Недостатня температура випалу призводить до зниження міцності готової продукції, тоді як перевищення допустимого температурного діапазону може викликати оплавлення матеріалу, пошкодження футерівки та зростання енергетичних витрат.

У зв'язку з цим основною задачею системи автоматичного керування є підтримання температури зони випалу на заданому рівні з мінімальним перерегулюванням, нульовою статичною похибкою та достатнім запасом стійкості. Особливістю даного об'єкта є значна теплова інерційність і наявність транспортного запізнення, що ускладнює використання класичних структур керування.

У роботі для керування температурою зони випалу запропоновано використати ПІ-регулятор із компенсацією транспортного запізнення за допомогою предиктора Сміта. Такий підхід дозволяє поєднати простоту реалізації ПІ-регулятора у промисловому контролері з покращенням динамічних властивостей системи за рахунок використання внутрішньої моделі об'єкта.

У якості регульованої величини приймається температура зони випалювання:

$$y(t) = T_{f(t)} , \quad (2.1)$$

де $y(t) = T_{f(t)}$ – поточна температура зони випалювання, °С.

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Керуючим впливом є витрата природного газу на пальникові пристрої:

$$u(t) = F_{g(t)} , \quad (2.2)$$

де $F_{g(t)}$ – витрата природного газу, м³/год.

До основних збурень, що впливають на процес регулювання температури, належать:

- зміна вологості сирих окатишів;
- зміна продуктивності випалювальної машини;
- коливання теплотворної здатності природного газу;
- зміна товщини шару окатишів;
- зміна температури матеріалу на вході до зони випалу.

З урахуванням особливостей об'єкта керування запропоновано структуру системи, яка включає:

- ПІ-регулятор температури;
- внутрішню модель об'єкта без запізнення;
- внутрішню модель об'єкта із запізненням;
- блок формування сигналу зворотного зв'язку Smith Predictor;
- обмеження керуючого впливу за допустимою витратою природного газу.

Основною перевагою такої структури є те, що регулятор отримує інформацію не лише про фактичний вимірний вихід об'єкта, а й про прогнозовану реакцію об'єкта без запізнення. Це дозволяє зменшити негативний вплив транспортного запізнення на якість регулювання.

Для синтезу системи автоматичного керування використовується математична модель зони випалу, отримана у підрозділі 1.5. Об'єкт керування описується передавальною функцією типу First Order Plus Dead Time:

$$G(s) = \frac{K_o e^{-\tau s}}{Ts + 1} , \quad (2.3)$$

де K_o – коефіцієнт підсилення об'єкта; T – стала часу об'єкта; τ – транспортне запізнення; s – оператор Лапласа.

Для контуру регулювання температури зони випалювання прийнято параметри моделі, наведені у табл. 1.2.

Отже, передавальна функція об'єкта керування має вигляд:

$$G_3(s) = \frac{0,18e^{-90s}}{380s+1}. \quad (2.4)$$

Значення відношення $\tau/T=0,237$ свідчить про те, що об'єкт належить до помірно складних для керування. Для таких об'єктів можливе використання ПІ-регулятора, однак наявність транспортного запізнення потребує обережного вибору параметрів регулятора та доцільності застосування методів компенсації запізнення.

Для базового регулювання температури зони випалу обрано ПІ-регулятор. Використання диференціальної складової у даному випадку є недоцільним, оскільки тепловий об'єкт має значну інерційність, а сигнал термопарі може містити високочастотні завади. Диференціальна складова PID-регулятора у таких умовах може підсилювати шум вимірювання та призводити до небажаних коливань керуючого впливу.

Передавальна функція ПІ-регулятора у стандартній формі має вигляд:

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right). \quad (2.5)$$

де K_c – коефіцієнт підсилення регулятора; T_i – час інтегрування.

Для налаштування регулятора використано метод Lambda tuning, який базується на заданні бажаної швидкодії замкненої системи. Для об'єкта без запізнення бажана передавальна функція замкненої системи має вигляд:

$$T_{cl,0}(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}. \quad (2.6)$$

де λ – параметр налаштування, який визначає компроміс між швидкістю та робастністю системи.

Для об'єкта типу FOPDT із використанням Smith Predictor параметри ПІ-регулятора визначаються за формулами:

$$K_c = \frac{T}{K_o \lambda}, \quad T_i = T. \quad (2.7)$$

З урахуванням значення сталої часу $T=380$ с прийнято:

$$\lambda = T/2 = 380/2 = 190 \text{ с.}$$

Тоді коефіцієнт підсилення регулятора становить:

$$K_c = 380 / (0,18 \cdot 190) = 11,11.$$

Час інтегрування $T_i = 380$ с.

Інтегральний коефіцієнт:

$$K_i = \frac{K_c}{T_i} = \frac{11,11}{380} = 0,0292 \text{ с}^{-1}.$$

Результати розрахунку параметрів ПІ-регулятора наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахункові параметри ПІ-регулятора температури зони випалювання

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Параметр налаштування	λ	190	с
Коефіцієнт підсилення регулятора	K_c	11,11	(м³/год)/°С
Час інтегрування	T_i	380	с
Інтегральний коефіцієнт	K_i	0,0292	с ⁻¹
Диференціальний коефіцієнт	K_d	0	—

Отримані параметри забезпечують аперіодичний характер перехідного процесу та достатній запас стійкості системи.

Транспортне запізнення є однією з основних причин погіршення якості регулювання теплових об'єктів. При використанні класичного ПІ-регулятора зміна керуючого впливу стає помітною у вимірюваній температурі лише після закінчення часу запізнення. У цей період регулятор продовжує накопичувати інтегральну складову, що може призводити до перерегулювання.

Для зменшення впливу запізнення використовується структура предиктора Сміта. Її ідея полягає у введенні до системи внутрішньої моделі об'єкта, яка дозволяє сформувати прогнозовану реакцію системи без запізнення.

У структурі предиктора Сміта використовуються дві моделі:

$$G_{m(s)} = \frac{K_o}{Ts+1}, \quad (2.8)$$

$$G_{md(s)} = \frac{K_o}{Ts+1}. \quad (2.9)$$

де $G_{m(s)}$ – модель об'єкта без запізнення, а $G_{md(s)}$ – модель об'єкта із запізненням.

Сигнал зворотного зв'язку для регулятора формується за виразом:

$$y_{fb(t)} = y(t) - y_{md(t)} + y_m(t). \quad (2.10)$$

де $y(t)$ – реальний вимірний вихід об'єкта; $y_{md(t)}$ – вихід внутрішньої моделі із запізненням; $y_m(t)$ – вихід внутрішньої моделі без запізнення; $y_{fb(t)}$ – ефективний сигнал зворотного зв'язку, що подається на регулятор.

У випадку ідеального збігу моделі з реальним об'єктом різниця $y(t) - y_{md(t)}$ дорівнює нулю, а регулятор працює з прогнозованим сигналом $y_m(t)$, який не містить транспортного запізнення. У реальних умовах ця різниця відображає невідповідність моделі об'єкту та забезпечує корекцію прогнозу.

Для досліджуваного контуру температури зони випалу внутрішні моделі мають вигляд:

$$G_{m(s)} = \frac{0,18}{380s+1}, \quad (2.11)$$

$$G_{md(s)} = \frac{0,18e^{-90s}}{380s+1}. \quad (2.12)$$

Застосування предиктора Сміта дозволяє налаштовувати ПІ-регулятор за моделлю без запізнення, тоді як фактична наявність запізнення враховується через внутрішню модель об'єкта та корекцію сигналу зворотного зв'язку.

Структурна схема системи автоматичного керування температурою зони випалу з використанням Smith Predictor наведена на рисунку 2.2.

Отже, запропоновано систему автоматичного керування температурою зони випалу окатишів. На основі математичної моделі об'єкта типу FOPDT виконано синтез ПІ-регулятора методом Lambda tuning. Для компенсації

транспортного запізнення запропоновано використання структури предиктора Сміта.

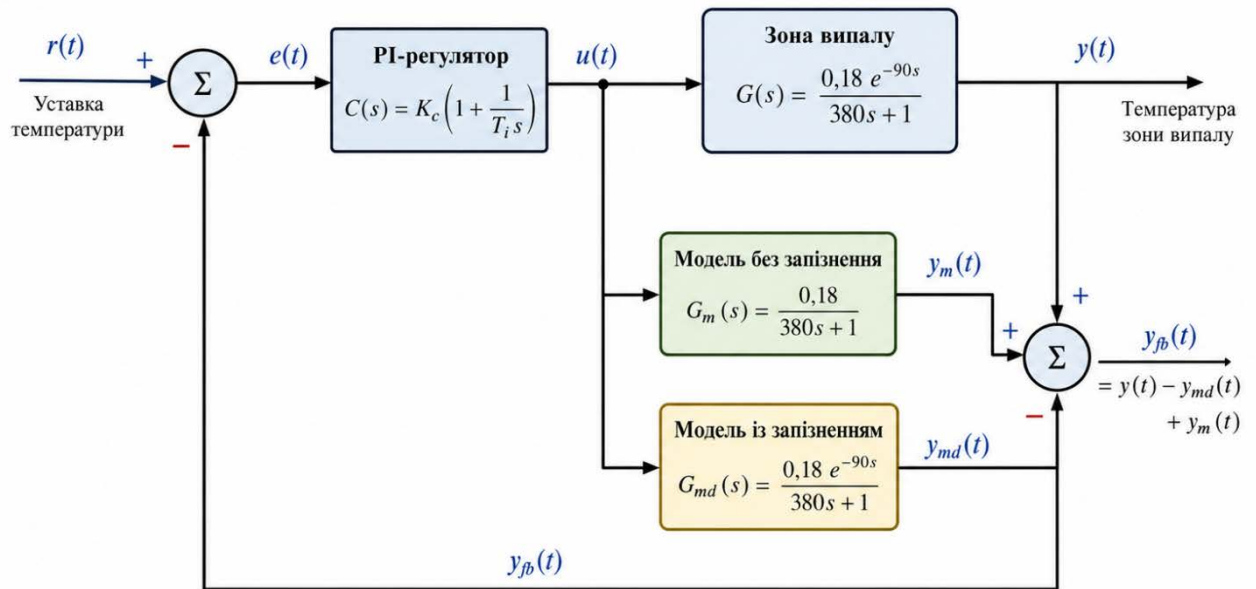


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи автоматичного керування температурою зони випалювання з використанням предиктора Сміта

Розраховані параметри регулятора становлять: $K_c=11,11$, $T_i=380$ с, $K_i=0,0292$ с⁻¹.

2.4 Моделювання системи автоматичного керування температурою зони випалювання

Для перевірки коректності розрахованих параметрів регулятора виконано імітаційне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Розроблену Simulink-модель системи керування наведено на рис. 2.3. Дискретний крок інтегрування $\Delta t = 1$ с, тривалість симуляції – 50 хвилин (3000 с).

Тестовий сценарій: на початку моделювання об'єкт у сталому режимі з температурою 1300 °С; у момент часу $t = 100$ с уставка стрибкоподібно змінюється з 1300 на 1340 °С (зміна на 40 °С – типове коригування при переході між марками окатишів).

Аналізувалися наступні якісні показники процесу керування:

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

- перерегулювання (overshoot);
- час перехідного процесу (при критерії $\pm 2\%$ від ступінчастої зміни);
- статична похибка;
- інтегральні критерії якості: IAE (Integral Absolute Error), ISE (Integral Squared Error), ITAE (Integral Time-weighted Absolute Error).

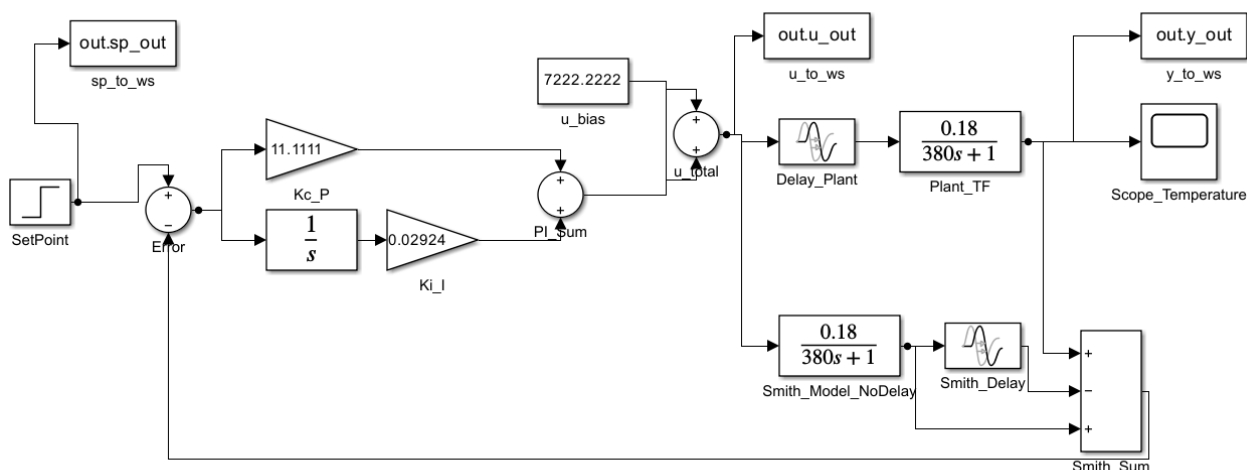


Рисунок 2.3 – Simulink-модель системи автоматичного керування температурою зони випалювання з використанням предиктора Сміта

На рис. 2.4 наведено результати моделювання за умови ідеальної відповідності внутрішньої моделі предиктора Сміта реальному об'єкту керування. Перший графік – динаміка температури $T(t)$; другий – керуючий вплив (витрата газу) $u(t)$; третій – похибка регулювання $\Delta(t)$.

Чисельні значення показників якості перехідного процесу наведено у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Показники якості перехідного процесу

Показник	Значення	Вимога
Перерегулювання (overshoot)	0 %	< 5 %
Час перехідного процесу (settling time, $\pm 2\%$)	≈ 14 хв (833 с)	< 20 хв
Статична похибка	0 °C	0 (вимога інтегральної дії)
IAE	11 200 °C·с	мінімум
Максимальна витрата газу	7670 м³/год	< 12 000 м³/год

Запас до межі оплавлення 1380 °C	40 °C	> 30 °C
-------------------------------------	-------	---------

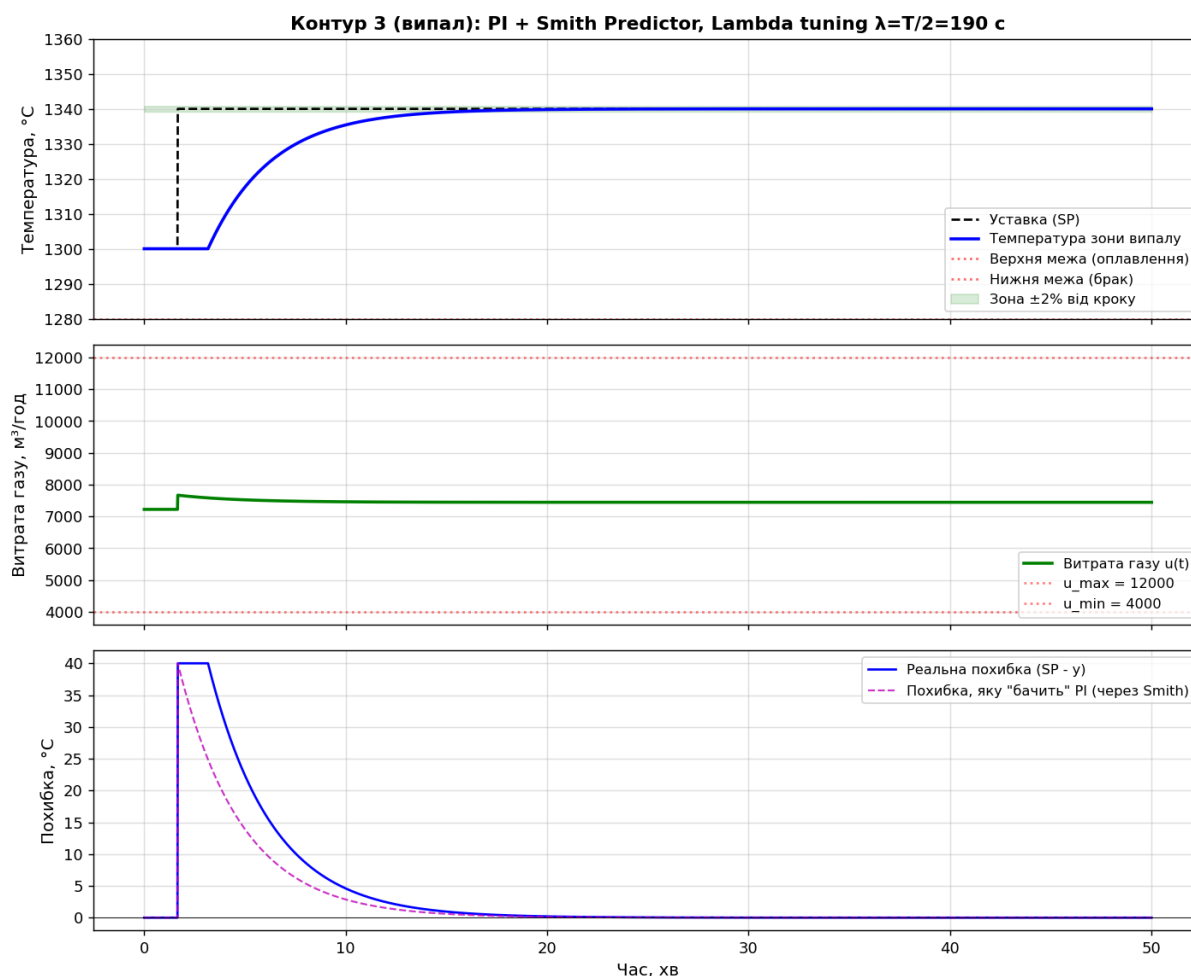


Рисунок 2.4 – Перехідний процес контуру №3 при ступінчастій зміні уставки
1300 → 1340 °C

Аналіз наведених графіків показує, що усі показники якості перехідного процесу задовольняють технологічні вимоги з суттєвим запасом. Зокрема, відсутність перерегулювання критично важлива для запобігання потенційному пошкодженню футерівки печі при наближенні до межі 1380 °C.

Однією з ключових переваг предиктора Сміта є підвищена робастність до невідповідності внутрішньої моделі реальному об'єкту (model mismatch). У реальній експлуатації параметри об'єкта можуть відрізнятися від лінеаризованих значень через:

- відхилення робочої точки від $T_0 = 1320\text{ }^{\circ}\text{C}$ (зменшення/збільшення підсилення K_r на 10–30 %);
- зміни теплотворності палива (вплив на ефективне підсилення);
- повільні зміни характеристик футерівки печі при її зношенні (вплив на сталу часу T).

Для оцінки робастності виконано тест, у якому реальне підсилення об'єкта на 30 % більше за модельне значення ($K_{r_real} = 0,234$ при $K_m = 0,18$). Це відповідає реалістичному відхиленню при виході від робочої точки лінеаризації. Результати порівняння класичного ПІ та ПІ з предиктором Сміта наведено на рис. 2.5.

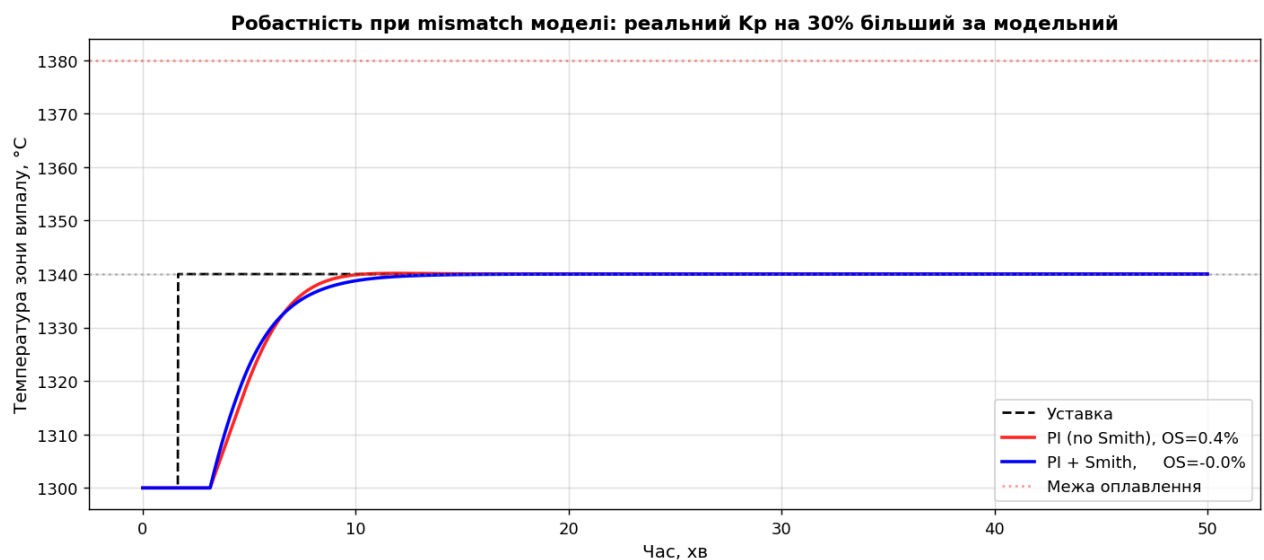


Рисунок 2.5 – Поведінка регуляторів при невідповідності моделі ($K_{r_real} = 1,3 \cdot K_m$)

Як видно з рисунка, при невідповідності моделі +30 % класичний ПІ демонструє невелике перерегулювання (~0,4 %, що для робочої точки $1340\text{ }^{\circ}\text{C}$ означає викид у $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$). Регулятор з предиктором Сміта зберігає аперіодичний характер переходного процесу і не виходить за уставку. У реальних умовах експлуатації при більш значних коливаннях параметрів (mismatch 50 – 100 %) перевага предиктора Сміта стає ще більш виразною – це продемонстровано у праці [13] для аналогічних об'єктів.

При ідеальній моделі (рис. 2.6) обидва регулятори – класичний ПІ з налаштуванням Lambda для FOPDT ($K_c = 7,54$, $T_i = 380$ с) та ПІ з предиктором Сміта ($K_c = 11,11$, $T_i = 380$ с) – дають практично однакові результати. Це є очікуваним теоретичним наслідком: при відсутності збурень і ідеальній моделі обидві структури еквівалентні.

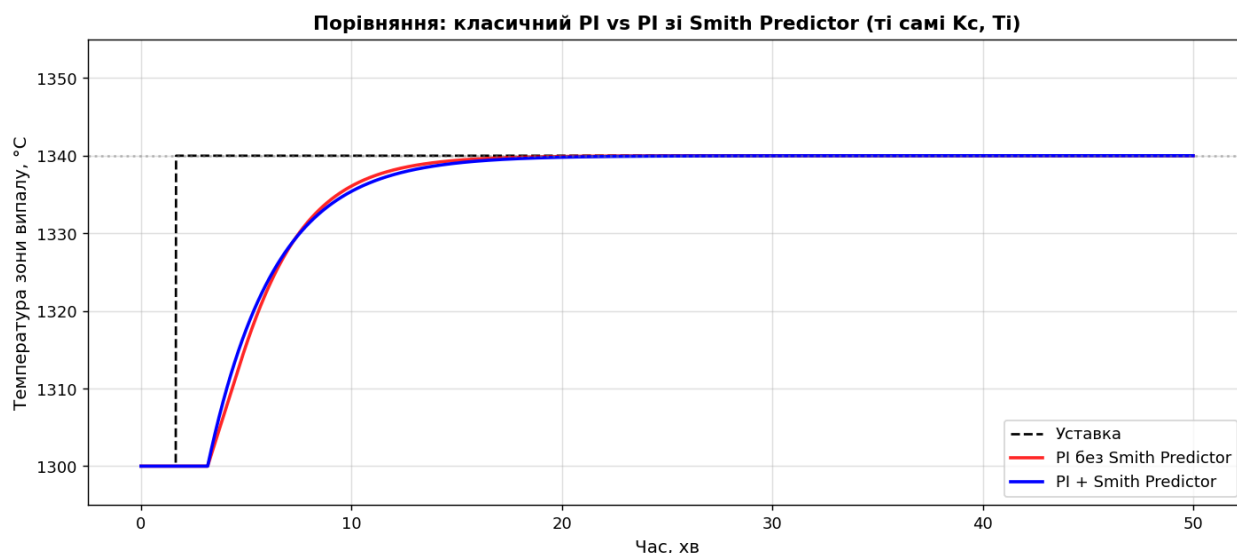


Рисунок 2.6 – Порівняння класичного ПІ та ПІ з предиктором Сміта при ідеальній моделі

Однак ключова перевага предиктора Сміта проявляється лише за наявності збурень або невідповідності моделі. Саме така ситуація домінує у промисловій експлуатації: робоча точка постійно змінюється через коливання вологості сировини, теплотворності газу, тиску дуття. Тому з інженерної точки зору вибір предиктора Сміта для контуру керування температурою у зоні випалювання повністю виправданий, незважаючи на трохи більшу складність реалізації.

Таким чином, виконане імітаційне моделювання у MATLAB/Simulink підтвердило відповідність синтезованого регулятора всім технологічним вимогам: перерегулювання 0 %, час встановлення ≈ 14 хв, запас до межі оплавлення 40 °C. Тест робастності при невідповідності коефіцієнту підсилення на +30 % підтвердив перевагу схеми з предиктором Сміта – збереження аперіодичного характеру перехідного процесу.

2.5 Розробка програмного забезпечення контролерного рівня системи керування у PLCnext Engineer

Після вибору технічних засобів автоматизації та синтезу системи автоматичного керування температурою зони випалу необхідно виконати програмну реалізацію розробленого алгоритму. Програмне забезпечення має забезпечувати зчитування технологічних параметрів, виконання алгоритму ПІ-регулювання зі Smith Predictor, формування керуючого впливу на виконавчий механізм, контроль аварійних режимів, а також можливість тестування алгоритму без підключення до реального технологічного об'єкта.

Реалізацію системи керування виконано у середовищі PLCnext Engineer для контролера Phoenix Contact PLCnext AXC F 1152. Як основну мову програмування використано Structured Text (ST), що відповідає стандарту IEC 61131-3 та є зручною для опису алгоритмічних процедур, математичних розрахунків і реалізації функціональних блоків промислових регуляторів.

Програмне забезпечення розроблено за модульним принципом. Центральним елементом є функціональний блок FB_PID_Smith, який реалізує ПІ-регулятор зі структурою Smith Predictor та додатковими промисловими механізмами підвищення надійності керування. Для перевірки роботи алгоритму без використання реального обладнання реалізовано програмний імітатор об'єкта керування FB_PlantSimulator.

Архітектура програмного забезпечення побудована на основі розділення функцій регулювання, імітації об'єкта та координації роботи програми. Такий підхід дозволяє спростити налагодження, підвищити повторне використання коду та забезпечити можливість подальшого розширення системи.

Опис основних програмних модулів, що входять до складу програмного рішення, наведено у табл. 2.5.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Таблиця 2.5 – Основні модулі програмного забезпечення системи керування

Програмний модуль	Тип ROU	Призначення
FB_PID_Smith	Function Block	Реалізація PI-регулятора зі Smith Predictor, фільтрацією сигналу, anti-windup та обмеженням швидкості зміни виходу
FB_PlantSimulator	Function Block	Імітація динаміки об'єкта керування типу FOPDT для тестування алгоритму у PLCnext Engineering Simulator
Main	Program	Головна циклічна програма, що виконує інстанціювання функціональних блоків, замикання контуру керування та формування аварійних сигналів

Функціональний блок FB_PID_Smith є основним модулем системи керування. Він містить внутрішні стани регулятора, моделі Smith Predictor, буфер транспортного запізнення, фільтр вхідного сигналу та логіку обмеження керуючого впливу. Завдяки інкапсуляції алгоритму у вигляді функціонального блока його можна повторно використовувати для інших контурів випалювальної машини, змінюючи лише параметри налаштування.

Головна програма Main виконує координаційну функцію. У ній створюються екземпляри функціональних блоків PID_Zone3 та Plant_Zone3, задаються параметри моделі та регулятора, а також організовується обмін сигналами між регулятором і програмним імітатором об'єкта.

У тестовому режимі вихід регулятора MV подається на вхід імітатора об'єкта U_in, а вихід імітатора Y_out використовується як виміряне значення температури PV. При переході до реального впровадження блок FB_PlantSimulator може бути вилучений із програми, а сигнал PV має надходити від фізичного каналу аналогового введення модуля Axioline F.

Оскільки процес випалу окатишів є тепловим об'єктом із великою сталою часу, програму керування доцільно виконувати у повільній циклічній задачі (рис. 2.7). Для реалізованого проєкту прийнято період виконання задачі $dt=1$ с.

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

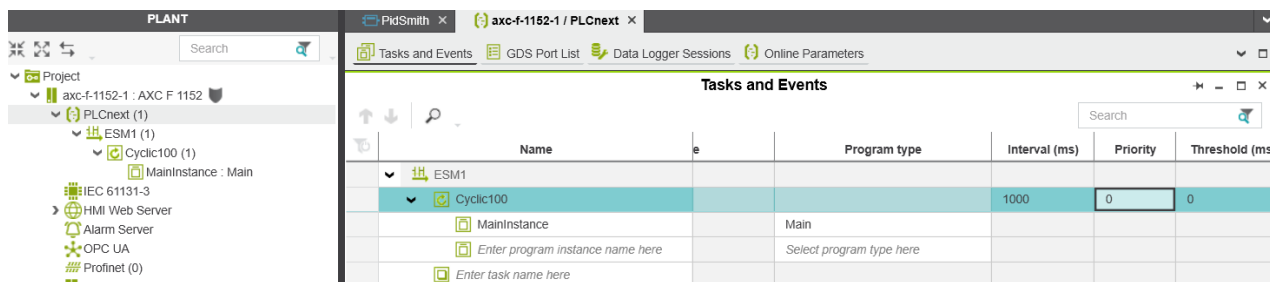


Рисунок 2.7 – Налаштування період дискретизації головної циклічної задачі ПЛК

Такий період дискретизації є значно меншим за сталу часу об'єкта $T=380$ с та транспортне запізнення $\tau=90$ с, що забезпечує достатню точність дискретного опису процесу та практично виключає негативний вплив дискретизації на якість регулювання.

Вибір циклу 1000 мс також забезпечує швидку реакцію на зміну уставки, своєчасне формування аварійних сигналів і достатню деталізацію для запису трендів під час налагодження системи.

Функціональний блок FB_PID_Smith має чітко визначений інтерфейс, який включає вхідні параметри, вихідні сигнали та внутрішні змінні стану. Вхідні параметри задають режим роботи блока, уставку, виміряне значення температури, параметри регулятора, параметри внутрішньої моделі та технологічні обмеження.

Основні вхідні параметри блока наведені у таблиці 2.6.

Для числових розрахунків використано тип даних LREAL, що забезпечує підвищену точність під час накопичення інтегральної складової та моделювання динаміки об'єкта.

Вихідні сигнали блока містять не лише основний керуючий вплив, але й діагностичні параметри, необхідні для аналізу роботи системи (табл. 2.7).

Наявність діагностичних виходів є важливою для промислового застосування, оскільки дозволяє контролювати не лише кінцевий керуючий сигнал, але й внутрішній стан алгоритму регулювання.

Таблиця 2.6 – Основні вхідні параметри FB_PID_Smith

Параметр	Тип	Призначення
Enable	BOOL	Дозвіл роботи регулятора
Reset	BOOL	Скидання внутрішніх станів блока
SP	LREAL	Уставка температури, °C
PV	LREAL	Виміряне значення температури, °C
Kc	LREAL	Коефіцієнт підсилення PI-регулятора
Ti	LREAL	Час інтегрування, с
Km	LREAL	Коефіцієнт підсилення внутрішньої моделі
Tm	LREAL	Стала часу внутрішньої моделі, с
Tau_m	LREAL	Транспортне запізнення внутрішньої моделі, с
U_min	LREAL	Мінімальне значення керуючого впливу
U_max	LREAL	Максимальне значення керуючого впливу
U_rate_limit	LREAL	Максимальна швидкість зміни керуючого впливу
Filter_T	LREAL	Стала часу фільтра вхідного сигналу
dt	LREAL	Період дискретизації
AntiWindupMode	INT	Вибір режиму anti-windup

Таблиця 2.7 – Вихідні сигнали FB_PID_Smith

Сигнал	Тип	Призначення
MV	LREAL	Керуючий вплив, що відповідає витраті природного газу
PV_filtered	LREAL	Відфільтроване значення температури
Error	LREAL	Похибка регулювання
Y_fb	LREAL	Скоригований сигнал зворотного зв'язку Smith Predictor
Y_model_nd	LREAL	Вихід моделі без запізнення
Y_model_dly	LREAL	Вихід моделі із запізненням
I_state_out	LREAL	Стан інтегральної складової
Saturated	BOOL	Ознака насичення керуючого впливу
RateLimited	BOOL	Ознака спрацювання обмежувача швидкості зміни виходу
ModelMismatch	LREAL	Невідповідність між реальною температурою та моделлю із запізненням

У промислових умовах сигнал термопари може містити високочастотні завади, спричинені електромагнітними наведеннями, пульсаціями газового потоку та шумом аналого-цифрового перетворення. Для зменшення впливу таких завад у функціональному блоці реалізовано низькочастотний фільтр першого порядку.

Передавальна функція фільтра має вигляд:

$$G_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1}. \quad (2.13)$$

де T_f – стала часу фільтра.

У дискретній формі фільтр реалізується за рекурентним співвідношенням:

$$y[k] = y[k - 1] + \alpha(u[k] - y[k - 1]), \quad (2.14)$$

де $y[k]$ – відфільтроване значення сигналу; $u[k]$ – поточне виміряне значення; α – коефіцієнт згладжування.

Коефіцієнт α визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{dt}{T_f + dt}. \quad (2.15)$$

У програмній реалізації прийнято $T_f = 5$ с та $dt = 1$ с, тому:

$$\alpha = \frac{1}{5 + 1} = 0,167.$$

Таке значення забезпечує згладжування високочастотних завад без суттєвого сповільнення реакції системи керування.

Код реалізації фільтра на мові ST у тілі функціонального блоку наведено на рис. 2.8.

Основою структури предиктора Сміта є використання двох внутрішніх моделей об'єкта: моделі без запізнення та моделі із запізненням. Модель без запізнення забезпечує прогноз майбутньої реакції об'єкта, а модель із запізненням використовується для порівняння з фактичним виміряним значенням температури.

Для дискретної реалізації моделі першого порядку використано рівняння:

$$a = \exp\left(-\frac{dt}{T_m}\right), \quad (2.16)$$

$$b = K_m(1-a), \quad (2.17)$$

$$\Delta y[k+1] = a\Delta y[k] + b\Delta u[k], \quad (2.18)$$

де $\Delta y[k]$ – відхилення вихідної величини від робочої точки; $\Delta u[k]$ – відхилення керуючого впливу від базового значення; K_m – коефіцієнт підсилення моделі; T_m – стала часу моделі.

```

158 (* =====
159 * 3. INPUT FILTER (low-pass першого порядку, дискретний)
160 *
161 * Безперервний: T_f * dy/dt + y = u
162 * Дискретний:   y[k] = y[k-1] + α * (u[k] - y[k-1])
163 * де α = dt / (T_f + dt) – коефіцієнт згладжування
164 * ===== *)
165 IF Filter_T > 0.0 THEN
166     alpha_filter := dt / (Filter_T + dt);
167     PV_filtered := PV_filt_prev + alpha_filter * (PV - PV_filt_prev);
168 ELSE
169     PV_filtered := PV; (* фільтр вимкнено *)
170 END_IF;
171 PV_filt_prev := PV_filtered;
172
173

```

Рисунок 2.8 – Код реалізації низькочастотного фільтра вхідного сигналу

Використання змінних у відхиленнях від робочої точки дозволяє зменшити вплив великих абсолютних значень температури на числові розрахунки та спростити реалізацію внутрішньої моделі.

Транспортне запізнення реалізовано за допомогою циклічного буфера. Кількість елементів буфера визначається за формулою:

$$N_{delay} = \frac{\tau}{dt}. \quad (2.19)$$

Для прийнятих параметрів $\tau=90$ с та $dt=1$ с маємо:

$$N_{delay} = 90.$$

Отже, модель із запізненням використовує значення керуючого впливу, затримане на 90 циклів виконання програми.

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Скоригований сигнал зворотного зв'язку предиктора Сміта формується як:

$$Y_{fb} = PV_{filtered} + \Delta y_{nd} - \Delta y_{dly}, \quad (2.20)$$

де $PV_{filtered}$ – відфільтроване значення температури; Δy_{nd} – вихід моделі без запізнення; Δy_{dly} – вихід моделі із запізненням.

У разі точного збігу моделі з реальним об'єктом такий сигнал фактично відповідає прогнозованій температурі без транспортного запізнення. Це дозволяє ПІ-регулятору реагувати на зміну керуючого впливу швидше, ніж при використанні лише виміряного сигналу температури.

Фрагмент коду реалізації описаного вище алгоритму функціонування предиктора Сміта наведено на рис. 2.9.

```

186 a_model := EXP(-dt / Tm);
187 b_model := Km * (1.0 - a_model);
188 (* --- Модель БЕЗ затримки: реагує на U_prev (поточне керування) --- *)
189 dU_curr := U_prev - U_bias;
190 dY_model_nd_state := a_model * dY_model_nd_state + b_model * dU_curr;
191 (* --- Модель ІЗ затримкою: дістаємо U(t - τ) з циклічного буфера --- *)
192 Nd := REAL_TO_INT(Tau_m / dt);
193 IF Nd > (DELAY_BUF_SIZE - 1) THEN
194     Nd := DELAY_BUF_SIZE - 1; (* Захист від overrun *)
195 END_IF;
196 IF Nd < 0 THEN Nd := 0; END_IF;
197
198 idx_delayed := Buf_head - Nd;
199 IF idx_delayed < 0 THEN
200     idx_delayed := idx_delayed + DELAY_BUF_SIZE;
201 END_IF;
202 U_delayed := Delay_buf[idx_delayed];
203 dU_del := U_delayed - U_bias;
204 dY_model_dly_state := a_model * dY_model_dly_state + b_model * dU_del;
205 (* --- Виходи моделі для моніторингу (у абсолютних °C) --- *)
206 Y_model_nd := T_baseline + dY_model_nd_state;
207 Y_model_dly := T_baseline + dY_model_dly_state;
208
209 (* --- Smith feedback: Y_fb = PV - Y_model_delayed + Y_model_nodelay --- *)
210 Y_fb := PV_filtered + dY_model_nd_state - dY_model_dly_state;
211 (* --- Діагностика: невідповідність моделі --- *)
212 ModelMismatch := PV_filtered - Y_model_dly;

```

Рисунок 2.9 – Код реалізації логіки структури предиктора Сміта

ПІ-регулятор реалізовано у паралельній формі. Керуючий вплив визначається як сума базового значення, пропорційної складової та інтегральної складової:

$$u(t) = U_{bias} + K_c e(t) + \left(\frac{K_c}{T_i}\right) \int e(t) dt, \quad (2.21)$$

де U_{bias} – базове значення керуючого впливу; K_c – коефіцієнт підсилення регулятора; T_i – час інтегрування; $e(t)$ – похибка регулювання.

У дискретній формі інтегральна складова обчислюється за виразом:

$$I[k + 1] = I[k] + \left(\frac{K_c}{T_i}\right) e[k] dt. \quad (2.22)$$

Оскільки виконавчий механізм має фізичні обмеження, у системі можливе виникнення інтегрального насичення. Для запобігання цьому явищу у функціональному блоці передбачено механізм anti-windup.

Основним режимом anti-windup обрано метод back-calculation. У цьому методі інтегральна складова коригується з урахуванням різниці між обмеженим і необмеженим значеннями керуючого впливу:

$$I[k + 1] = I[k] + \left(\frac{K_c}{T_i}\right) e[k] dt + \frac{u_{sat} - u_{unsat}}{T_t}, \quad (2.23)$$

де u_{unsat} – необмежене значення керуючого впливу; u_{sat} – значення керуючого впливу після обмеження; T_t – стала часу зворотного розрахунку.

Для РІ-регулятора прийнято:

$$T_t = T_i.$$

Такий підхід забезпечує плавніше виходження системи з режиму насичення та зменшує ризик перерегулювання після тривалого перебування керуючого впливу на межі допустимого діапазону.

Керуючим впливом у системі є витрата природного газу до пальників зони випалу. З метою забезпечення технологічної безпеки значення керуючого впливу обмежується в діапазоні:

$$U_{min} = 4000 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$U_{max} = 12000 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Код реалізації логіки роботи ПІ-регулятора на мові ST наведено на рис. 2.10.

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

```

228 Error    := SP - Y_fb;
229 P_term   := Kc * Error;
230 (* --- Обчислюємо необмежене керування --- *)
231 U_unsat   := U_bias + P_term + I_state;
232 (* --- Saturate до фізичних меж [U_min, U_max] --- *)
233 U_sat     := LIMIT(U_min, U_unsat, U_max);
234 (* --- Rate limiter: обмеження швидкості зміни керування --- *)
235 U_max_step := U_rate_limit * dt;
236 U_change   := U_sat - U_prev;
237 RateLimited := FALSE;
238 IF U_change > U_max_step THEN
239     U_sat      := U_prev + U_max_step;
240     RateLimited := TRUE;
241 ELSIF U_change < -U_max_step THEN
242     U_sat      := U_prev - U_max_step;
243     RateLimited := TRUE;
244 END_IF;
245 (* --- Прапор насичення --- *)
246 Saturated := (U_sat <> U_unsat);
247 (* --- ANTI-WINDUP --- *)
248 IF AntiWindupMode = 1 THEN
249     (* === Clamping ===
250     Інтегруємо тільки якщо НЕ насичені, АБО якщо помилка
251     штовхає назад у робочий діапазон *)
252     IF NOT Saturated THEN
253         I_state := I_state + (Kc / Ti) * Error * dt;
254     ELSE
255         IF ((U_unsat > U_sat) AND (Error < 0.0)) OR
256            ((U_unsat < U_sat) AND (Error > 0.0)) THEN
257             I_state := I_state + (Kc / Ti) * Error * dt;
258         END_IF;
259     END_IF;
260 ELSE
261     (* === Back-calculation (рекомендований метод) ===
262     І оновлюється завжди, плюс корекція пропорційна різниці
263     між saturated і unsaturated виходом *)
264     Tt      := Ti; (* Для PI: Tt = Ti *)
265     I_state := I_state + (Kc / Ti) * Error * dt + (U_sat - U_unsat) / Tt;
266 END_IF;

```

Рисунок 2.10 – Код реалізації алгоритму дискретного ПІ-регулятора

Крім обмеження абсолютного значення виходу, у програмі реалізовано обмеження швидкості зміни керуючого впливу. Такий механізм захищає регулюючий клапан від різких переміщень і забезпечує більш плавну роботу виконавчого механізму.

Максимальний приріст керуючого впливу за один цикл визначається як:

$$\Delta U_{max} = U_{rate_limit} \cdot dt, \quad (2.24)$$

Для реалізованої системи прийнято:

$$U_{rate_limit} = 100 \text{ (м}^3\text{/год)}/\text{с.}$$

При $dt = 1$ с максимальна зміна керуючого впливу за один цикл становить:

$$\Delta U_{max} = 100 \text{ м}^3\text{/год.}$$

Якщо бажана зміна виходу перевищує це значення, вона обмежується до допустимого приросту, а на діагностичному виході встановлюється ознака RateLimited.

Для перевірки працездатності алгоритму без використання реального обладнання розроблено функціональний блок FB_PlantSimulator. Він відтворює динаміку зони випалу на основі дискретної моделі типу FOPDT.

Імітатор використовує ті самі принципи дискретизації, що й внутрішні моделі Smith Predictor, однак його параметри задаються окремо. Це дозволяє моделювати невідповідність між моделлю регулятора та реальним об'єктом.

До основних параметрів імітатора належать:

- коефіцієнт підсилення реального об'єкта Kp_{real} ;
- стала часу реального об'єкта T_{real} ;
- транспортне запізнення реального об'єкта τ_{real} ;
- амплітуда вимірювального шуму;
- зовнішнє збурення.

Наявність окремого імітатора дозволяє виконувати HIL-тестування у PLCnext Engineering Simulator, перевіряти реакцію системи на зміну уставки, збурення, шум вимірювання та невідповідність параметрів моделі.

У реальній системі блок FB_PlantSimulator не використовується. Замість нього значення температури PV надходить від фізичного датчика через модуль аналогового введення Axioline F.

Отже, розроблено програмну реалізацію системи автоматичного керування температурою зони випалу у середовищі PLCnext Engineer.

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Основним програмним модулем є функціональний блок FB_PID_Smith, який реалізує ПІ-регулятор з предиктором Сміта, фільтрацію сигналу температури, anti-windup, обмеження керуючого впливу та обмеження швидкості його зміни.

Для тестування алгоритму без реального обладнання розроблено функціональний блок FB_PlantSimulator, який відтворює динаміку об'єкта керування типу FOPDT і дозволяє виконувати HiL-тестування у PLCnext Engineering Simulator (рис. 2.11).

```

.97  * 2. ЕФЕКТИВНИЙ ВХІД (керування + збурення)
.98  * ===== *)
.99  U_effective := U_in + Disturbance;
.00
.01  (* =====
.02  * 3. ЗАПИС ПОТОЧНОГО ВХОДУ В БУФЕР
.03  * ===== *)
.04  Delay_buf[Buf_head] := U_effective;
.05  Buf_head := Buf_head + 1;
.06  IF Buf_head >= DELAY_BUF_SIZE THEN
.07      Buf_head := 0;
.08  END_IF;
.09
.10
.11  (* =====
.12  * 4. ВИБІРКА ЗАТРИМАНОГО ВХОДУ
.13  * ===== *)
.14  Nd := REAL_TO_INT(Tau_real / dt);
.15  IF Nd > (DELAY_BUF_SIZE - 1) THEN
.16      Nd := DELAY_BUF_SIZE - 1;
.17  END_IF;
.18  IF Nd < 0 THEN Nd := 0; END_IF;
.19
.20  idx_delayed := Buf_head - Nd - 1;
.21  IF idx_delayed < 0 THEN
.22      idx_delayed := idx_delayed + DELAY_BUF_SIZE;
.23  END_IF;
.24  U_delayed := Delay_buf[idx_delayed];
.25  dU_del := U_delayed - U_bias;

```

Рисунок 2.11 – Фрагмент коду реалізації функціонального блоку для моделювання динаміки об'єкта керування

Запропонована структура програмного забезпечення забезпечує модульність, можливість повторного використання функціональних блоків,

діагностику внутрішніх станів регулятора та підготовку даних для подальшої інтеграції з верхнім рівнем системи автоматизації.

2.6 Апробація програмної реалізації системи керування

Після розробки програмного забезпечення системи автоматичного керування температурою зони випалу необхідно виконати перевірку його працездатності та оцінити якість регулювання у типових і граничних режимах роботи. Оскільки використання реального промислового об'єкта на етапі бакалаврського проєктування є неможливим, апробацію виконано у середовищі PLCnext Engineering Simulator із застосуванням програмного імітатора об'єкта керування FB_PlantSimulator.

Такий підхід відповідає принципу hardware-in-the-loop (HIL) тестування, за якого алгоритм керування виконується у середовищі, максимально наближеному до цільової платформи, а реальний об'єкт замінюється його програмною моделлю. Це дозволяє перевірити не лише математичну правильність алгоритму, але й особливості його реалізації у вигляді програмних функціональних блоків.

Апробація програмної реалізації проводилася для контуру регулювання температури зони випалу. У тестовій структурі головна програма Main створює два функціональні блоки: FB_PID_Smith, який реалізує регулятор, та FB_PlantSimulator, який імітує динаміку об'єкта керування.

Вихід регулятора MV, що відповідає витраті природного газу, подається на вхід імітатора об'єкта. Вихід імітатора Y_{out} використовується як виміряне значення температури PV, яке повертається на вхід регулятора. Таким чином формується замкнений контур керування, що дозволяє дослідити поведінку системи без підключення до реального обладнання.

Під час тестування аналізувалися такі параметри:

- уставка температури SP;
- поточна температура зони випалу PV;

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- відфільтроване значення температури $PV_{filtered}$;
- керуючий вплив MV ;
- виходи внутрішніх моделей предиктора Сміта;
- стан інтегральної складової;
- ознаки насичення та обмеження швидкості зміни виходу;
- сигнал невідповідності моделі $ModelMismatch$.

Для оцінки якості регулювання використовувалися такі показники:

- перерегулювання;
- час перехідного процесу;
- статична похибка;
- інтегральний критерій абсолютної похибки IAE ;
- максимальне значення керуючого впливу;
- запас до граничної температури оплавлення.

Перший тестовий сценарій призначений для перевірки базової працездатності системи автоматичного керування за умови повної відповідності параметрів внутрішньої моделі регулятора параметрам імітатора об'єкта.

У початковому стані температура зони випалу дорівнювала $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. У момент часу $t=100\text{ с}$ уставка була змінена до $1340\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такий тест дозволяє оцінити реакцію системи на зміну технологічного режиму.

Результати моделювання (рис. 2.12) показали, що система виходить на нове усталене значення без перерегулювання. Температура зони випалювання монотонно наближається до заданого значення, а керуючий вплив залишається в межах допустимого діапазону витрати природного газу.

Основні показники якості для даного сценарію:

- перерегулювання – $0,00\text{ }\%$;
- час перехідного процесу – 798 с ;
- усталене значення температури – $1340\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- максимальна витрата газу – $7664\text{ м}^3/\text{год}$;
- запас до межі оплавлення $1380\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані результати підтверджують правильність налаштування ПІ-регулятора та ефективність застосування предиктора Сміта для компенсації транспортного запізнення.

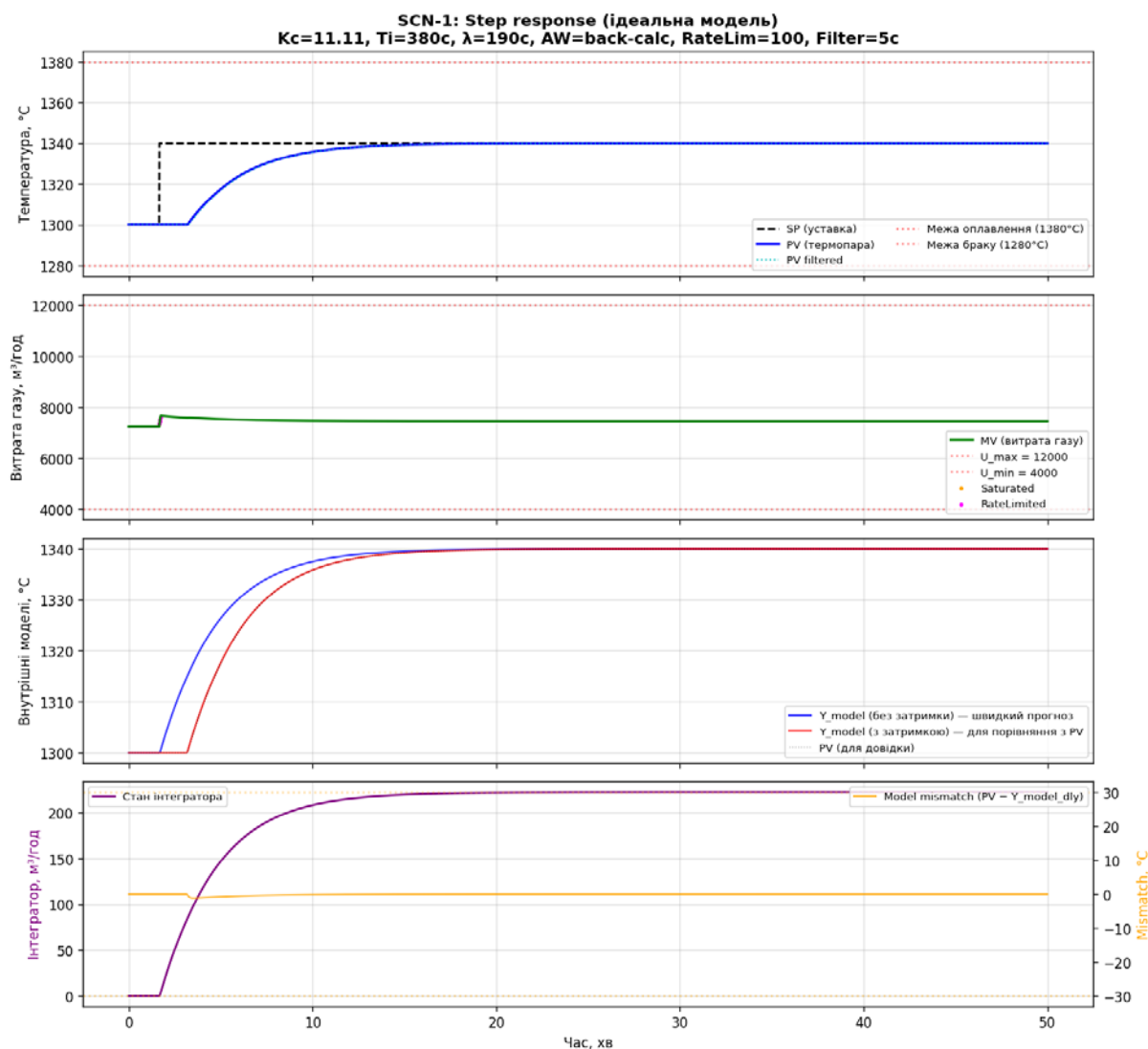


Рисунок 2.12 – Перехідний процес при ступінчастій зміні уставки 1300 → 1340 °C

Другий сценарій призначений для перевірки робастності системи при невідповідності внутрішньої моделі регулятора реальному об'єкту. Така ситуація є типовою для промислових умов, оскільки параметри об'єкта можуть змінюватися внаслідок коливань теплотворної здатності газу, зміни стану футерівки, продуктивності машини або товщини шару окатишів.

У даному сценарії коефіцієнт підсилення імітатора об'єкта збільшено на 30 % порівняно з параметром внутрішньої моделі:

$$K_{real} = 1,3 \cdot K_m = 1,3 \cdot 0,18 = 0,234 .$$

Результати тестування (рис. 2.13) показали, що навіть за такої невідповідності система зберігає аперіодичний характер перехідного процесу та не має перерегулювання. Час перехідного процесу становить 507 с, що навіть менше, ніж у сценарії з ідеальною моделлю, оскільки об'єкт із більшим підсиленням швидше реагує на зміну керуючого впливу.

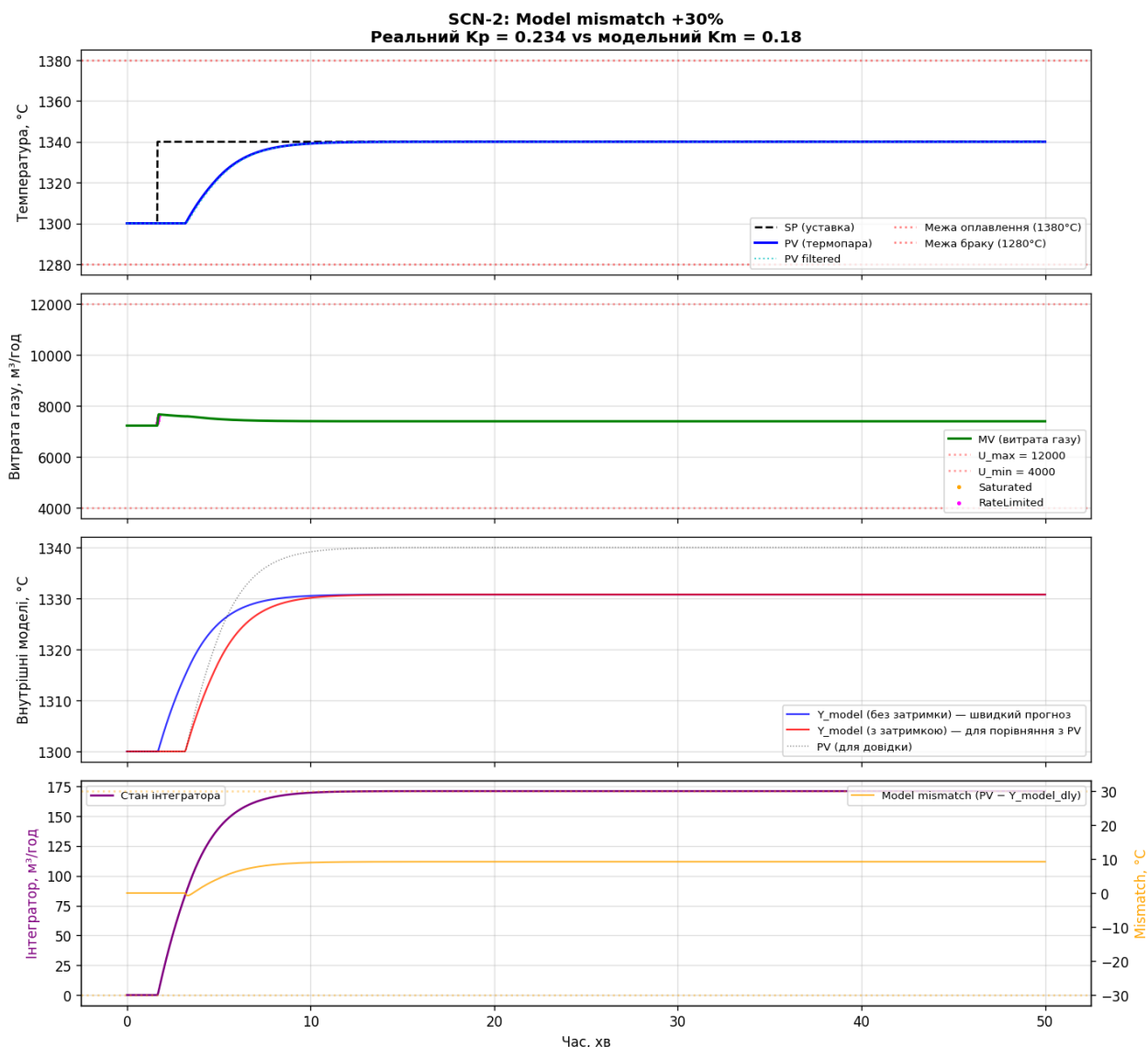


Рисунок 2.13 – Перехідний процес при невідповідності коефіцієнту підсилення моделі реальному об'єкту на +30 %

Важливим результатом є те, що сигнал ModelMismatch виявляє відмінність між фактичною поведінкою об'єкта та внутрішньою моделлю.

Це підтверджує доцільність використання такого сигналу як діагностичного параметра для верхнього рівня системи або майбутнього Edge-модуля підтримки прийняття рішень.

Третій сценарій призначений для оцінки поведінки системи при дії невимірюваного збурення (рис. 2.14). У сталому режимі за температури 1340 °С у модель було введено від'ємне збурення, еквівалентне зменшенню ефективного керуючого впливу на 500 м³/год.

Таке збурення може відповідати раптовому зниженню теплотворної здатності природного газу, порушенню режиму дуття або зміні умов теплообміну у зоні випалу.

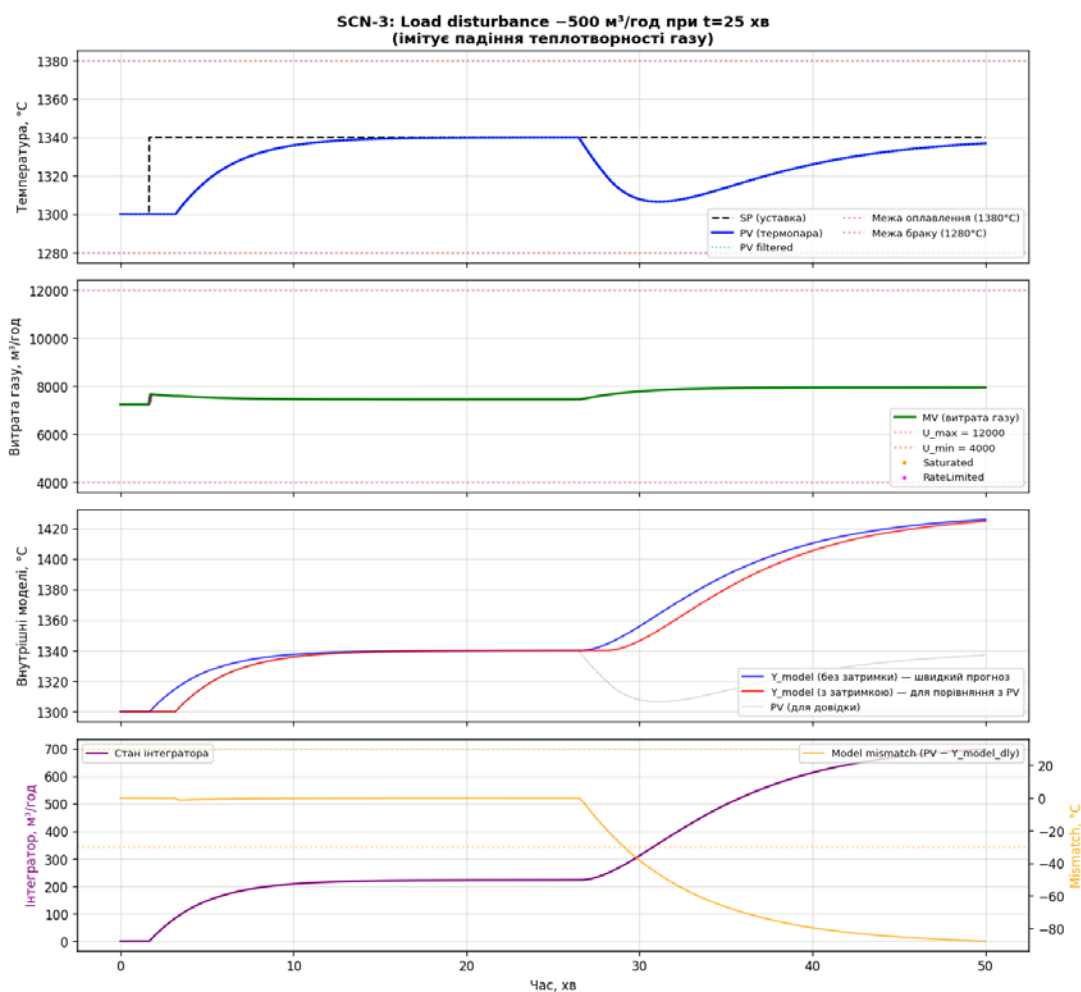


Рисунок 2.14 – Реакція системи на зовнішнє збурення, еквівалентне
–500 м³/год

Після введення збурення температура зони випалу знижується приблизно на 33 °С, однак залишається у допустимому технологічному діапазоні 1280–1380 °С. Регулятор реагує збільшенням витрати природного газу, поступово компенсуючи вплив збурення.

Особливу діагностичну цінність у цьому сценарії має сигнал ModelMismatch, який суттєво зростає після появи збурення. Це свідчить про те, що внутрішня модель не може пояснити спостережувану поведінку об'єкта лише зміною керуючого впливу. У реальній системі такий сигнал може бути використаний для формування попереджувального повідомлення оператору або запуску додаткового алгоритму аналізу на Edge-рівні.

Четвертий сценарій призначений для перевірки ефективності фільтрації сигналу температури. У модель було введено вимірювальний шум амплітудою $\pm 0,5$ °С, що відповідає реалістичним умовам вимірювання температури термopарою у промисловому середовищі.

У програмному блоці FB_PID_Smith для зменшення впливу шуму реалізовано низькочастотний фільтр першого порядку зі сталою часу Filter_T=5 с. Результати моделювання показали, що фільтр ефективно згладжує високочастотну складову сигналу, зберігаючи при цьому достатню швидкість реакції системи на зміну уставки (рис. 2.15).

Наявність шуму практично не погіршує якість регулювання. Невеликі коливання керуючого впливу у сталому режимі є очікуваним наслідком проходження частини згладженого шуму через регулятор. За необхідності у промисловій реалізації може бути додатково використана нечутлива зона навколо уставки, однак це може призвести до появи невеликої статичної похибки.

П'ятий сценарій призначений для перевірки роботи механізму anti-windup в умовах, коли керуючий вплив може наближатися до технологічних обмежень. Для цього було змодельовано зменшення реального коефіцієнта підсилення об'єкта на 40 %, що імітує ситуацію, коли для досягнення заданої температури потрібне суттєве збільшення витрати природного газу.

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

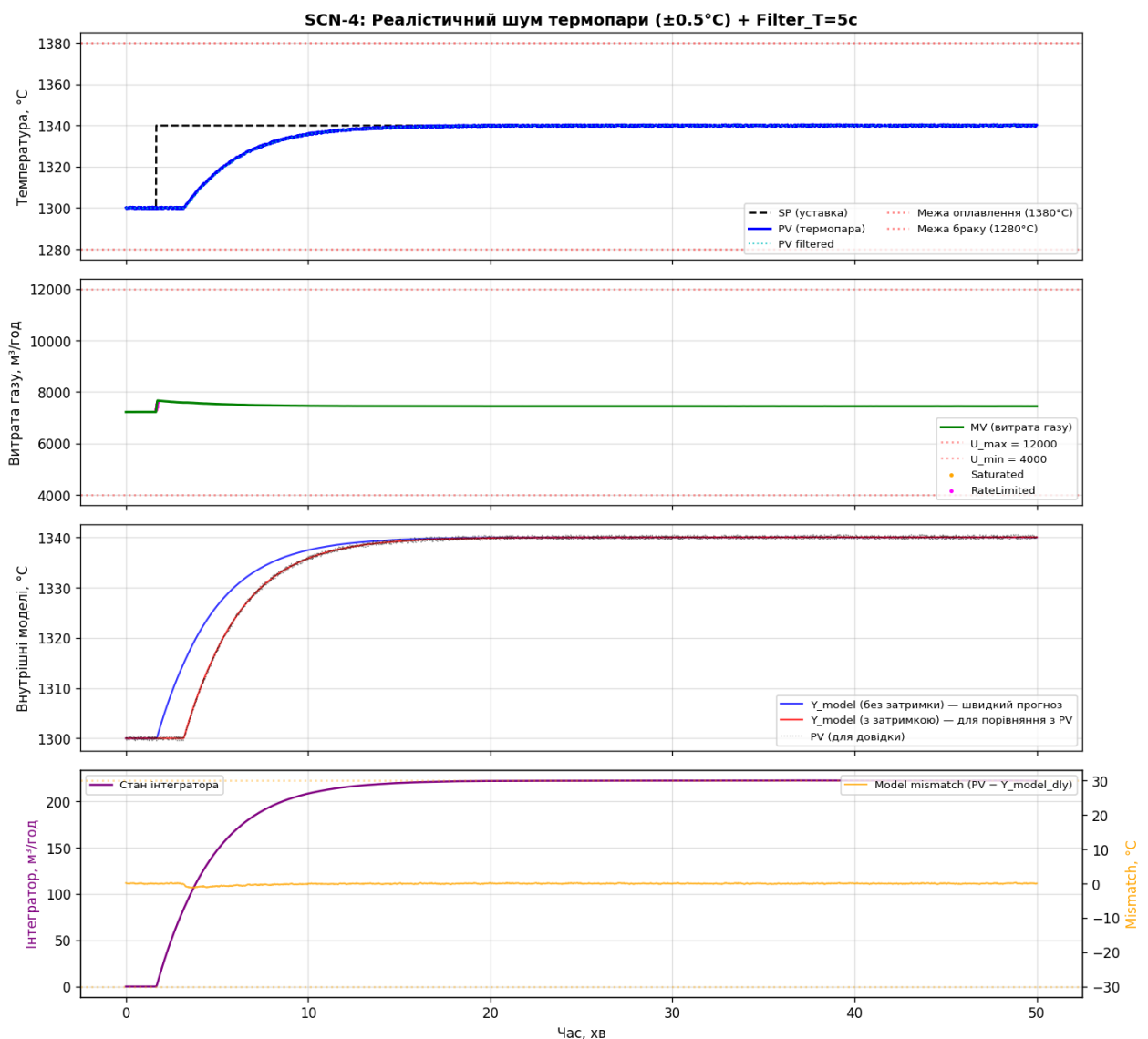


Рисунок 2.15 – Перехідний процес при наявності шуму у вимірюваннях $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ і $\text{Filter_T} = 5 \text{ c}$

У таких умовах ПІ-регулятор може сформувати керуючий вплив, який перевищує допустимий рівень. Якщо інтегральна складова продовжує накопичуватися під час насичення виходу, після повернення системи до нормального режиму можливе значне перерегулювання. Для запобігання цьому у програмі реалізовано механізм anti-windup методом back-calculation.

Результати тестування показали, що система зберігає стійку поведінку та виходить на уставку без перерегулювання (рис. 2.16).

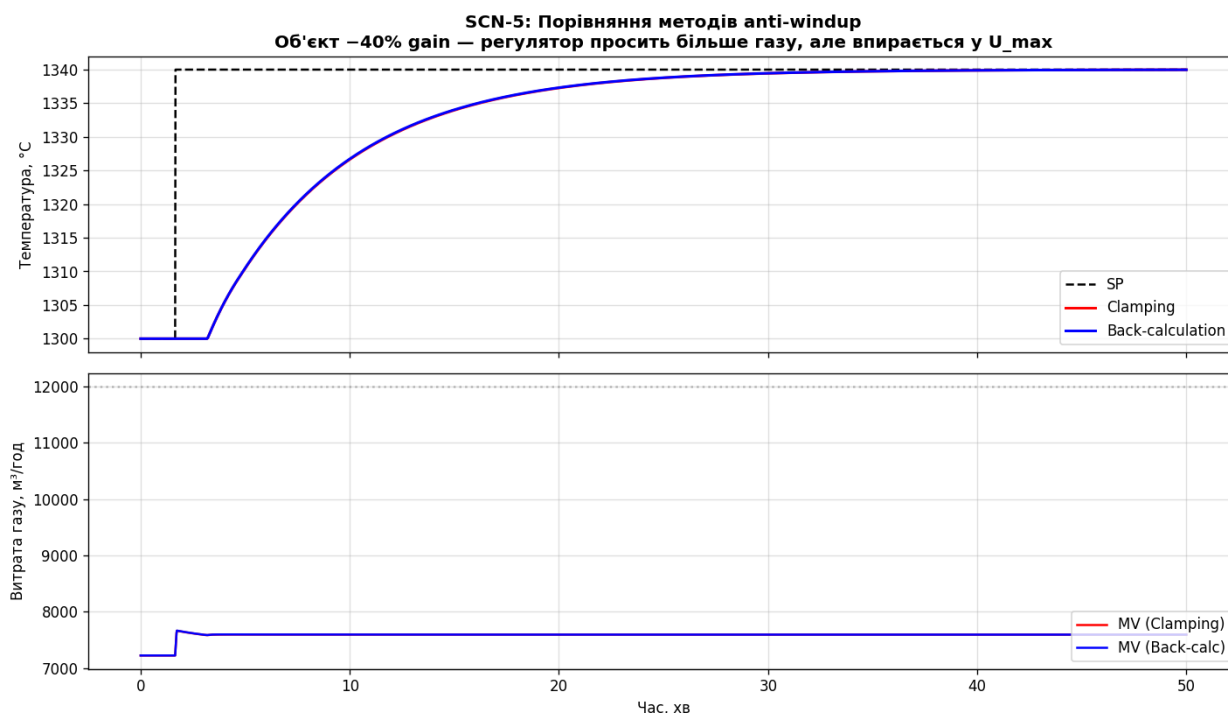


Рисунок 2.16 – Результати порівняння методів anti-windup при зменшенні коефіцієнту підсилення на 40 %

Це підтверджує правильність реалізації механізму anti-windup та доцільність його використання у промисловій системі керування температурою зони випалу.

Зведені результати тестування програмної реалізації системи автоматичного керування наведено у таблиці 2.8.

Аналіз результатів показує, що розроблена програмна реалізація системи керування забезпечує виконання технологічних вимог в усіх розглянутих сценаріях. Найважливішим результатом є відсутність перерегулювання у базових режимах, що має принципове значення для запобігання перегріву матеріалу та пошкодженню футерівки.

Додатково результати підтверджують ефективність використання діагностичних сигналів Saturated, RateLimited та ModelMismatch. Вони дозволяють оцінювати не лише зовнішню поведінку системи, але й внутрішній стан алгоритму керування, що є важливим для налагодження та подальшого промислового впровадження.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Таблиця 2.8 – Зведені результати апробації програмної реалізації

Сценарій	Умова тестування	Основний результат	Висновок
SCN-1	Ступінчаста зміна уставки 1300 → 1340 °C	Перерегулювання 0,00 %, settling time 798 с	Відповідає вимогам
SCN-2	Збільшення підсилення об'єкта на 30 %	Перерегулювання 0,00 %, settling time 507 с	Робастність підтверджена
SCN-3	Зовнішнє збурення –500 м³/год	Падіння температури приблизно на 33 °C	Температура залишається у допустимих межах
SCN-4	Вимірювальний шум ±0,5 °C	Перерегулювання близько 0,52 °C, settling time 939 с	Фільтр ефективно згладжує шум
SCN-5	Порівняння методів anti-windup при зменшенні підсилення на 40 %	Перерегулювання 0,00 %	Back-calculation обрано як рекомендований метод

Таким чином, виконано апробацію програмної реалізації системи автоматичного керування температурою зони випалу. Тестування проведено у середовищі PLCnext Engineering із використанням програмного імітатора об'єкта керування FB_PlantSimulator.

Розглянуто п'ять тестових сценаріїв, що охоплюють зміну уставки, невідповідність параметрів моделі, дію зовнішнього збурення, вимірювальний шум та роботу механізму anti-windup. Усі сценарії підтвердили працездатність розробленого алгоритму та відповідність системи основним технологічним вимогам.

Отримані результати свідчать про доцільність використання ПІ-регулятора з предиктором Сміта для керування температурою зони випалу та підтверджують можливість подальшого впровадження розробленої програмної реалізації на контролері PLCnext AXC F 1152.

2.7 Перспективна реалізація Edge-рівня системи автоматизації

Розроблена система автоматизації процесу термічної обробки окатишів має відкриту багаторівневу архітектуру, що дозволяє у перспективі доповнити її Edge-рівнем для виконання локальної аналітики, прогнозування параметрів процесу та підтримки прийняття рішень оператором.

Основна система керування реалізується на рівні PLCnext AXC F 1152 і виконує безпосереднє автоматичне регулювання температури зони випалу. Edge-рівень при цьому не повинен замінювати або дублювати базовий контур керування, а має виконувати допоміжні функції аналітики та рекомендацій. Такий підхід дозволяє зберегти детермінованість і надійність нижнього рівня керування та водночас розширити функціональність системи відповідно до концепцій Industry 4.0.

Як середовище реалізації Edge-рівня доцільно використати Node-RED, що може працювати на окремому промисловому комп'ютері, Edge-шлюзі або іншому обчислювальному пристрої, підключеному до промислової мережі. Взаємодія з контролером PLCnext здійснюється через OPC UA. У такій структурі PLCnext виконує роль OPC UA Server, а Node-RED – роль OPC UA Client.

На першому етапі Edge-рівень може виконувати функції моніторингу та діагностики. Наприклад, за значним відхиленням сигналу ModelMismatch можна виявляти ситуації, коли реальний процес починає суттєво відрізнятися від внутрішньої моделі регулятора. Причинами такої невідповідності можуть бути зміна теплотворної здатності газу, зміна вологості або маси шару окатишів, порушення режиму дуття чи зміна швидкості конвеєра.

Основні параметри, що будуть передаватися до Edge-рівня, наведені у таблиці 2.9.

На другому етапі Edge-рівень може бути розширений до функцій рекомендаційного модуля. У цьому випадку Node-RED не формує керуючий вплив безпосередньо, а лише розраховує рекомендації для оператора або

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

верхнього рівня системи. Наприклад, при тривалому від'ємному значенні ModelMismatch система може сформувати повідомлення про ймовірне зниження теплотворної здатності газу або збільшення теплового навантаження на зону випалювання.

Таблиця 2.9 – Зведені результати апробації програмної реалізації

Змінна	Зміст	Призначення на Edge-рівні
SP	Уставка температури	Контроль заданого режиму
PV	Поточна температура зони випалу	Аналіз фактичного стану процесу
PV_filtered	Відфільтрована температура	Побудова трендів і прогнозування
MV	Керуючий вплив	Аналіз витрати природного газу
Y_model_nd	Вихід моделі без запізнення	Оцінка прогнозованої реакції об'єкта
Y_model_dly	Вихід моделі із запізненням	Порівняння моделі з фактичним процесом
ModelMismatch	Невідповідність моделі та об'єкта	Виявлення аномалій і збурень
Saturated	Ознака насичення регулятора	Діагностика обмежень керування
RateLimited	Ознака обмеження швидкості зміни виходу	Аналіз роботи виконавчого механізму
Alarm_HighTemp, Alarm_LowTemp	Аварійні сигнали	Формування повідомлень оператору

У подальшому Edge-рівень може бути використаний як основа для реалізації MPC Advisor – рекомендаційного модуля модельно-прогнозуючого керування. Такий модуль може прогнозувати зміну температури зони випалу на декілька хвилин уперед і формувати оптимальні рекомендації щодо корекції уставок, витрати газу або швидкості конвеєра. При цьому остаточне

керування залишається на рівні PLCnext, що забезпечує безпечність і надійність роботи системи.

Приклади логіки рекомендаційного модуля можуть бути подані так:

- 1. Якщо $ModelMismatch < -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом більше 120 с, то сформувати рекомендацію: «Перевірити теплотворну здатність газу, режим дуття або збільшити уставку витрати газу».
- 2. Якщо $Saturated = TRUE$ протягом більше 300 с, то сформувати рекомендацію: «Керуючий вплив досяг обмеження. Необхідна перевірка технологічного режиму або корекція уставки».
- 3. Якщо $RateLimited$ часто активується після зміни уставки, то сформувати рекомендацію: «Швидкість зміни керуючого впливу обмежується. Доцільно перевірити параметри регулятора або виконавчого механізму».

Узагальнена структура взаємодії Edge-рівня з основною системою автоматизації представлена на рис. 2.15.

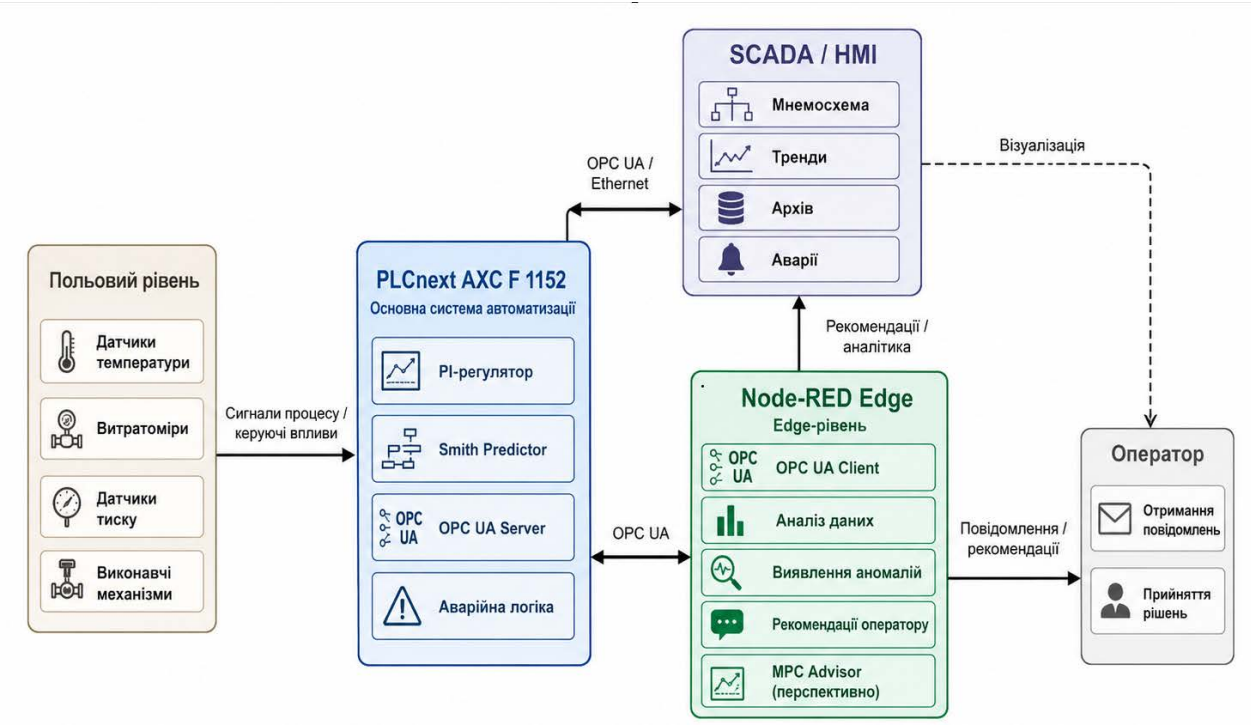


Рисунок 2.17 – Узагальнена структура взаємодії Edge-рівня з основною системою візуалізації

Таким чином, запропонована реалізація Edge-рівня не ускладнює базову систему автоматичного керування, але створює основу для її подальшого розвитку. Використання Node-RED та OPC UA дозволяє організувати локальну аналітику, діагностику відхилень і формування рекомендацій без втручання у детермінований контур керування температурою зони випалювання.

Висновки до розділу:

У другому розділі виконано проєктування та апробацію системи автоматизації процесу термічної обробки залізорудних окатишів із використанням рішень Phoenix Contact.

На основі результатів аналізу технологічного процесу розроблено функціональну структуру системи автоматизації, яка включає польовий рівень, рівень введення-виведення, рівень керування на базі контролера PLCnext AXC F 1152, верхній рівень диспетчеризації та перспективний Edge-рівень. Така структура забезпечує збір технологічних параметрів, формування керуючих впливів, візуалізацію процесу, архівування даних та можливість подальшого розширення системи відповідно до концепцій Industry 4.0.

Виконано вибір технічних засобів автоматизації. Як центральний елемент системи обрано контролер PLCnext AXC F 1152, який забезпечує реалізацію алгоритмів керування, підтримує сучасні промислові протоколи обміну даними та дозволяє інтегрувати систему з верхнім рівнем через OPC UA. Для підключення датчиків і виконавчих механізмів передбачено використання модулів розподіленого введення-виведення Axioline F. Запропонована конфігурація має модульну структуру та може бути розширена для підключення додаткових контурів керування.

Розроблено систему автоматичного керування температурою зони випалу. На основі математичної моделі об'єкта типу FOPDT виконано синтез PI-регулятора методом Lambda tuning. Для компенсації транспортного запізнення запропоновано структуру предиктора Сміта, що дозволяє

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшити негативний вплив транспортного запізнення та підвищити якість регулювання температури зони випалювання.

Розроблено програмну реалізацію системи керування у середовищі PLCnext Engineer мовою Structured Text. Основним програмним модулем є функціональний блок FB_PID_Smith, який реалізує PI-регулятор зі Smith Predictor, фільтрацію сигналу температури, механізм anti-windup, обмеження керуючого впливу та обмеження швидкості його зміни. Такий підхід забезпечує модульність програмного забезпечення та можливість повторного використання розробленого блока для інших контурів випалювальної машини.

Для тестування алгоритму без використання реального технологічного обладнання розроблено програмний імітатор об'єкта керування FB_PlantSimulator. Його використання дозволило сформувати замкнений контур керування у середовищі PLCnext Engineering Simulator і виконати апробацію програмної реалізації в умовах, наближених до роботи реальної системи.

Апробацію системи виконано за п'ятьма тестовими сценаріями, що охоплюють ступінчасту зміну уставки, невідповідність параметрів моделі, дію зовнішнього збурення, наявність вимірювального шуму та перевірку механізму anti-windup. Отримані результати підтвердили працездатність розробленого алгоритму. У базовому сценарії система забезпечила вихід на нову уставку без перерегулювання, зі статичною похибкою, що прямує до нуля, та з дотриманням технологічних обмежень щодо температури і витрати природного газу.

Показано, що діагностичні сигнали Saturated, RateLimited та ModelMismatch можуть використовуватися не лише для налагодження системи, але й для подальшого аналізу стану технологічного процесу. Зокрема, сигнал ModelMismatch дозволяє виявляти ситуації, коли фактична поведінка об'єкта суттєво відрізняється від внутрішньої моделі регулятора, що може бути ознакою зміни теплотворної здатності газу, режиму дуття, товщини шару окатишів або інших збурень.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окремо розглянуто перспективну реалізацію Edge-рівня системи автоматизації на базі Node-RED. Запропоновано використовувати Edge-рівень для локальної аналітики, виявлення аномалій, формування рекомендацій оператору та подальшого розвитку системи у напрямку MPC Advisor. При цьому базовий детермінований контур керування залишається на рівні PLCnext, що забезпечує надійність і безпечність роботи системи.

Таким чином, у другому розділі розроблено завершене проєктне рішення системи автоматизації процесу термічної обробки окатишів. Запропонована система поєднує класичні засоби промислового автоматичного керування, програмну реалізацію PI-регулятора зі Smith Predictor на платформі PLCnext та можливість подальшого розвитку за рахунок Edge-аналітики. Отримані результати підтверджують доцільність використання рішень Phoenix Contact для автоматизації процесу термічної обробки залізрудних окатишів.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра вирішено задачу розробки системи автоматизації процесу термічної обробки залізорудних окатишів з використанням рішень Phoenix Contact. Основну увагу приділено автоматизації контуру регулювання температури зони випалу як найбільш відповідального етапу процесу, що безпосередньо впливає на якість готової продукції, енергоефективність виробництва та безпечність роботи технологічного обладнання.

У першому розділі виконано аналіз технології виробництва залізорудних окатишів. Показано, що термічна обробка є одним із ключових етапів виробництва, під час якого формуються основні фізико-механічні властивості готової продукції. Розглянуто основні зони конвеєрної випалювальної машини: сушіння, підігрів, випал та охолодження. Встановлено, що найбільш критичною з точки зору якості окатишів є зона випалу, у якій відбувається спікання частинок концентрату та формування міцної структури матеріалу.

Проаналізовано конвеєрну випалювальну машину як об'єкт автоматизації. Встановлено, що вона належить до складних багатопараметричних теплотехнічних об'єктів із розподіленими параметрами, значною тепловою інерційністю, транспортними запізненнями та взаємозв'язком між окремими технологічними зонами. До основних контрольованих параметрів процесу віднесено температуру технологічних зон, витрати природного газу та повітря, тиск і розрідження у газоповітряних трактах, швидкість руху конвеєра та параметри сировини.

Виконано аналіз сучасних систем автоматизації процесів випалу окатишів та загальних тенденцій розвитку промислової автоматизації.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ВИСНОВКИі</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Горбань Я. О.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Жосан А.А.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-22</i>		
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						64	2

Показано, що сучасні системи керування розвиваються у напрямку поєднання класичних засобів автоматичного регулювання з відкритими цифровими платформами, технологіями Industrial Internet of Things, OPC UA, Edge Computing та виробничої аналітики. На підставі цього обґрунтовано доцільність використання платформи PLCnext Technology компанії Phoenix Contact для реалізації системи автоматизації.

Розроблено математичний опис процесу термічної обробки окатишів у зоні випалу. На основі рівняння теплового балансу та лінеаризації моделі в околі робочої точки отримано модель об'єкта керування типу First Order Plus Dead Time.

У другому розділі розроблено функціональну структуру системи автоматизації процесу термічної обробки окатишів. Запропонована структура включає польовий рівень, рівень введення-виведення, рівень керування на базі PLCnext AXC F 1152, верхній рівень диспетчеризації та перспективний Edge-рівень. Така архітектура забезпечує збір технологічних параметрів, виконання алгоритмів автоматичного керування, формування керуючих впливів, візуалізацію процесу, архівування даних та можливість подальшого розвитку системи.

Виконано вибір технічних засобів автоматизації. Як центральний елемент системи обрано контролер PLCnext AXC F 1152, який підтримує сучасні промислові протоколи обміну даними, зокрема OPC UA, PROFINET, Modbus TCP та MQTT. Для підключення польових пристроїв запропоновано використання модулів розподіленого введення-виведення Axioline F. Обрана конфігурація забезпечує підключення датчиків температури, витрати, тиску, виконавчих механізмів та засобів сигналізації.

Розроблено систему автоматичного керування температурою зони випалу. Для базового керування обрано ПІ-регулятор, параметри якого розраховано методом Lambda tuning.

Для компенсації транспортного запізнення запропоновано структуру предиктора Сміта, яка використовує внутрішню модель об'єкта без запізнення

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

та модель із запізненням. Це дозволяє сформувати скоригований сигнал зворотного зв'язку та зменшити негативний вплив запізнення на якість регулювання.

Розроблено програмну реалізацію системи керування у середовищі PLCnext Engineer мовою Structured Text. Основним програмним модулем є функціональний блок FB_PID_Smith, який реалізує ПІ-регулятор з предиктором Сміта, фільтрацію сигналу температури, обмеження керуючого впливу та обмеження швидкості його зміни. Програмне забезпечення побудовано за модульним принципом, що забезпечує зручність налагодження та можливість повторного використання розробленого блока для інших контурів випалювальної машини.

Для тестування алгоритму без використання реального обладнання розроблено програмний імітатор об'єкта керування FB_PlantSimulator. Він відтворює динаміку зони випалу на основі дискретної моделі типу FOPDT і дозволяє виконувати апробацію системи у PLCnext Engineering. Такий підхід забезпечує можливість перевірки працездатності алгоритму, оцінки якості регулювання та аналізу поведінки системи в умовах збурень і невідповідності параметрів моделі.

Апробацію програмної реалізації виконано за п'ятьма тестовими сценаріями: ступінчаста зміна уставки, невідповідність параметрів моделі, дія зовнішнього збурення, наявність вимірювального шуму та перевірка механізму anti-windup. У базовому сценарії при зміні уставки з 1300 до 1340 °C система забезпечила аперіодичний перехідний процес без перерегулювання, усталення температури на заданому рівні та дотримання технологічних обмежень за витратою природного газу. Отримані результати підтверджують працездатність розробленого алгоритму та доцільність використання ПІ-регулятора зі Smith Predictor для керування температурою зони випалу.

Окремо розглянуто перспективну реалізацію Edge-рівня системи автоматизації на базі Node-RED. Запропоновано використовувати Edge-рівень для локальної аналітики, виявлення аномалій, формування рекомендацій

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оператору та подальшого розвитку системи у напрямку MPC Advisor. При цьому базовий контур автоматичного керування залишається на рівні PLCnext, що забезпечує детермінованість, надійність і безпечність роботи системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці завершеного проєктного рішення системи автоматизації процесу термічної обробки окатишів. Запропонована система поєднує сучасну апаратну платформу Phoenix Contact PLCnext, алгоритм автоматичного керування температурою з компенсацією транспортного запізнення, програмну реалізацію у PLCnext Engineer та можливість подальшого розширення за рахунок Edge-аналітики.

Таким чином, поставлену мету роботи досягнуто. У роботі виконано аналіз технологічного процесу, обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації, розроблено математичну модель об'єкта, синтезовано систему автоматичного керування температурою зони випалу, реалізовано алгоритм у середовищі PLCnext Engineer та виконано його апробацію. Отримані результати підтверджують доцільність використання рішень Phoenix Contact для автоматизації процесу термічної обробки залізрудних окатишів.

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Meyer K. Pelletizing of Iron Ores. Berlin ; Heidelberg ; Düsseldorf : Springer-Verlag, Verlag Stahleisen mbH, 1980. 302 p.

2. Stjernberg J. The grate-kiln induration machine – history, advantages, and drawbacks, and outline for the future // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115, No. 2. P. 137–144. URL: <https://www.saimm.co.za/Journal/v115n02p137.pdf>.

3. Huerta M., Cameron I., O’Leary K., Mourão J. M., Medeiros U. V. Guidelines for Selecting Pellet Plant Technology // AISTech Conference Proceedings. Pittsburgh, USA, 2013. URL: <https://www.hatch.com/About-Us/Publications/Technical-Papers/2015/07/Guidelines-For-Selecting-Pellet-Plant-Technology>.

4. Mourão J. M., Huerta M., Medeiros U. V., Cameron I. Guidelines for Selecting Pellet Plant Technology // ABM Proceedings. 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/341386564_GUIDELINES_FOR_SELECTING_PELLET_PLANT_TECHNOLOGY.

5. Primetals Technologies. Circular Pelletizing Technology. URL: <https://www.primetals.com/en/metals-magazine/circular-pelletizing-technology/> SNIMH. CPT – Circular Pelletizing Technology. URL: <https://www.snmhi.com/cpt-circular-pelletizing-technology/>.

6. Aichinger H., Fulgencio A., Hofbauer O. Circular Pelletizing Technology – The World’s Most Compact Pelletizing Plant // ABM Week Proceedings. 2017. URL: <https://abmproceedings.com.br/en/article/circular-pelletizing-technology-the-world-s-most-compact-pelletizing-plant>.

7. SNIMH. CPT – Circular Pelletizing Technology. URL: <https://www.snmhi.com/cpt-circular-pelletizing-technology/>

					КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ			Лім.	Арк.	Аркушів	
Розроб.		Горбань Я.О,									
Перевір.		Савицький О. І.								66	3
								КНУ АКИТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затвердив		Маринич І.А.									

8. Metso Outotec. Straight Grate Pelletizing Plant Services. Espoo : Metso Outotec, 2021. URL: https://www.metso.com/globalassets/services/sintering--pelletizing/straight-grate-pelletizing-plant-services_en_web.pdf.

9. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2017. 512 p.

10. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd ed. Research Triangle Park : ISA, 1995. 343 p.

11. Smith O. J. M. Closer Control of Loops with Dead Time // Chemical Engineering Progress. 1957. Vol. 53, No. 5. P. 217–219.

12. Skogestad S. Simple Analytic Rules for Model Reduction and PID Controller Tuning // Journal of Process Control. 2003. Vol. 13, No. 4. P. 291–309.

13. Holm-Christensen N. J., Madsen R. B. Model Predictive Control of Iron Ore Pellet Induration Process. Aalborg : Aalborg University, 2014. 145 p.

14. Siemens AG. SIMATIC PCS 7 Process Control System. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal/simatic-pcs-7.html>

15. ABB. System 800xA Distributed Control System. URL: <https://new.abb.com/control-systems/system-800xa>

16. Honeywell International Inc. Experion Process Knowledge System (PKS). URL: <https://www.honeywellprocess.com/en-US/explore/products/control-monitoring-and-safety-systems/experion-pks>

17. Phoenix Contact. PLCnext Technology. URL: <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products/plcnext-technology>

18. PLCnext Community. PLCnext Technology Info Center. URL: <https://www.plcnext-community.net/infocenter/>

19. Phoenix Contact. OPC UA Server for PLCnext Technology Controllers. URL: https://engineer.plcnext.help/latest/OPC_Server_Intro.htm

20. Metso Outotec. Digital Solutions for Pelletizing Plant Performance Improvement. URL: <https://www.metso.com/corporate/media/news/2021/9/metso-outotec-launches-new-digital-solutions-for-boosting-iron-ore-pelletizing-plant->

					<i>KHY KPB.151.26.04.00.II3</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

[performance/](#)

21. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

22. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

23. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

24. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація).

25. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).

					<i>КНУ КРБ.151.26.04.00.ПЗ</i>	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

