

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:

«Прогнозуюче керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині»

Виконав студент гр. АКІТ-22 _____ Тарасенко Б. С.

Керівник _____ Харламенко В. Ю.

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 Тарасенку Богдану Сергійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Прогнозуюче керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині»

затверджено наказом по університету № 171с від 31.01.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 112 с., презентація у Microsoft PowerPoint (12 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Харламенко В. Ю.

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 _____ / Харламенко В. Ю./

7. Запевнення: Я, Тарасенко Богдан Сергійович, 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 _____ / Тарасенко Б. С./

АНОТАЦІЯ

Тарасенко Б. С. Прогнозуюче керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 112 с.

Об'єктом дослідження є процес запалювання шихти на агломераційній машині.

Метою роботи є розроблення та апробація системи прогнозуючого керування температурним режимом горна запалювання для підвищення стабільності процесу та раціонального використання газового палива.

У першому розділі розглянуто технологічні особливості агломерації, роль зони запалювання, існуючі системи автоматизації, методи керування та математичні моделі процесів запалювання і спікання. Обґрунтовано доцільність застосування прогнозуючого керування для інерційного теплового об'єкта із запізненням. У другому розділі формалізовано об'єкт керування, побудовано FOPDT-модель температурного контуру, розроблено алгоритм PFC/MFC, модель контуру газ/повітря та виконано імітаційне дослідження. Отримані результати показали відсутність перерегулювання та плавний характер зміни витрати газу. Практична цінність роботи полягає у можливості використання запропонованої структури для модернізації локальної АСУ ТП горна запалювання, підвищення енергоефективності та зменшення навантаження на виконавчі механізми. Результати можуть бути використані під час подальшого промислового впровадження системи.

АГЛОМЕРАЦІЙНА МАШИНА, ШИХТА, ЗАПАЛЮВАННЯ, ГОРН, ПРОГНОЗУЮЧЕ КЕРУВАННЯ, PREDICTIVE FUNCTIONAL CONTROL, АВТОМАТИЗАЦІЯ, АСУ ТП, ПЛК, PLCNEXT.

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Тарасенко Б. С.			АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Харламенко В.Ю.								3	1
								КНУ АКИТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЗАПАЛЮВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ ТА СУЧАСНИХ РІШЕНЬ З ЙОГО АВТОМАТИЗАЦІЇ	9
1.1 Технологічний процес агломерації та роль зони запалювання шихти	9
1.2 Процес запалювання шихти як об'єкт автоматизації.....	13
1.3 Аналіз існуючих систем автоматизації агломераційних машин.....	19
1.4 Методи керування процесом запалювання шихти	26
1.5 Методи керування процесом запалювання шихти	33
1.7 Теоретичні основи прогнозуючого керування.....	41
1.7 Постановка задачі дослідження.....	48
РОЗДІЛ 2	55
2.1 Формалізація процесу запалювання як об'єкта автоматичного керування	55
2.2 Формалізація процесу запалювання як об'єкта автоматичного керування	60
2.3 Формалізація процесу запалювання як об'єкта автоматичного керування	67
2.4 Модель контуру співвідношення газ/повітря.....	74
2.5 Розробка алгоритму прогнозуючого керування температурою.....	81
2.6 Імітаційне моделювання та дослідження системи прогнозуючого керування процесом запалювання шихти.....	90
2.7 Методика практичної реалізації алгоритму прогнозуючого керування процесом запалювання шихти	96
Висновки до розділу:	102
ВИСНОВКИ	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	109

ВСТУП

Агломераційне виробництво є одним із ключових переділів чорної металургії, оскільки саме якість агломерату значною мірою визначає стабільність подальшої роботи доменного виробництва, продуктивність печей і питому витрату палива. У технологічному ланцюзі агломераційної машини особливе місце займає процес запалювання шихти, під час якого у верхньому шарі матеріалу формується початковий осередок горіння твердого палива. Надалі цей фронт горіння поширюється вглиб шару під дією розрідження, що створюється вакуум-камерами, і визначає розвиток усього процесу спікання.

Процес запалювання шихти є складним теплотехнічним об'єктом керування. Його перебіг залежить від витрати та теплотворної здатності газового палива, витрати повітря на горіння, температури в горні, висоти шару шихти, швидкості руху палетної стрічки, вологості та гранулометричного складу матеріалу. Відхилення температурного режиму під горном від оптимального діапазону може призводити до недостатнього прогріву верхнього шару, перепаду матеріалу, нерівномірного розвитку зони спікання, погіршення механічної міцності агломерату та нераціональної витрати природного або змішаного газу.

Традиційні системи автоматичного керування процесом запалювання зазвичай базуються на локальних контурах регулювання температури, витрати газу та витрати повітря. Найчастіше для таких задач застосовуються класичні ПІД-регулятори, які є простими в реалізації та добре відпрацьованими в промислових умовах. Однак для процесу запалювання шихти характерними є інерційність, транспортне запізнення, дія неконтрольованих збурень і обмеження на зміну керуючих впливів.

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Тарасенко Б. С.			ВСТУП			Лім.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Харламенко В.Ю.								6	2
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

У таких умовах класичне регулювання не завжди забезпечує необхідну якість перехідних процесів, особливо при зміні тиску газу, теплотворної здатності палива або продуктивності агломераційної машини.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності керування тепловими процесами з інерційністю та запізненням є застосування прогнозуючого керування. На відміну від класичного регулювання за поточною похибкою, прогнозуючий підхід використовує математичну модель об'єкта для оцінювання майбутньої поведінки регульованої величини на певному горизонті часу. Це дає змогу заздалегідь враховувати динаміку об'єкта, обмеження на витрату палива, допустиму швидкість зміни керуючого впливу та можливі технологічні збурення. Для промислових об'єктів із помірним запізненням доцільним є використання спрощених варіантів прогнозуючого керування, зокрема Model Functional Control або Predictive Functional Control, які можуть бути реалізовані на промислових програмованих логічних контролерах.

Актуальність роботи полягає у необхідності підвищення стабільності температурного режиму горна запалювання агломераційної машини та зменшення нераціональної витрати газового палива шляхом застосування алгоритмів прогнозуючого керування, придатних для практичної реалізації у складі автоматизованої системи керування технологічним процесом.

Об'єктом дослідження є процес запалювання шихти на агломераційній машині.

Предметом дослідження є математичні моделі, алгоритми та структура системи прогнозуючого керування температурним режимом горна запалювання агломераційної машини.

Метою роботи є розроблення та апробація системи прогнозуючого керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині, спрямованої на підвищення стабільності температури під горном і забезпечення раціонального використання газового палива.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати технологічні особливості процесу агломерації та роль зони запалювання шихти у формуванні якості агломерату;
- виконати огляд існуючих підходів до автоматизації та керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині;
- обґрунтувати доцільність застосування прогнозного керування для температурного контуру горна запалювання;
- сформулювати математичний опис процесу запалювання як об'єкта автоматичного керування;
- розробити структуру системи керування з основним прогнозуючим контуром температури та підлеглим контуром співвідношення газ/повітря;
- виконати імітаційне дослідження роботи запропонованої системи керування;
- оцінити практичне значення та можливість реалізації запропонованого рішення у складі промислової АСУ ТП.

У роботі використовуються методи теорії автоматичного керування, математичного моделювання динамічних об'єктів, аналізу систем із запізненням, методи прогнозного керування, а також імітаційне моделювання перехідних процесів.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої структури системи керування для модернізації автоматизованого керування горном запалювання агломераційної машини. Реалізація прогнозного регулятора температури у поєднанні з контуром підтримання співвідношення газ/повітря може сприяти підвищенню стабільності теплового режиму, зменшенню впливу технологічних збурень, покращенню якості запалювання шихти та раціональнішому використанню газового палива.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЗАПАЛЮВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ ТА СУЧАСНИХ РІШЕНЬ З ЙОГО АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний процес агломерації та роль зони запалювання шихти

Агломераційне виробництво є однією з основних ланок підготовки залізорудної сировини до доменного переділу. Його призначення полягає в окускуванні дрібнодисперсних залізорудних матеріалів шляхом їх спікання у шарі з використанням твердого палива, що входить до складу шихти. У результаті процесу утворюється агломерат — пористий кусковий матеріал із заданими фізико-механічними та хімічними властивостями, придатний для подальшого використання у доменній печі [1, 7, 8].

Необхідність агломерації зумовлена тим, що значна частина залізорудної сировини надходить у вигляді дрібних фракцій, які не можуть безпосередньо завантажуватися у доменну піч. Надмірна кількість дріб'язку погіршує газопроникність доменної шихти, ускладнює рівномірний розподіл газового потоку та знижує ефективність теплообміну. Агломерація дає змогу перетворити дрібнодисперсну сировину на міцніші грудки, що мають достатню пористість, механічну міцність і стабільний гранулометричний склад [7, 8].

До складу агломераційної шихти зазвичай входять залізорудний концентрат або дрібна руда, флюсові добавки, тверде паливо у вигляді коксового дріб'язку або антрацитового штибу, повернення, а також інші технологічні добавки. Перед подачею на агломераційну машину шихта змішується, зволожується та гранулюється. Якість підготовки шихти суттєво впливає на газопроникність шару, рівномірність проходження повітря через матеріал і стабільність подальшого процесу спікання [1, 7].

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Тарасенко Б. С.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Харламенко В.Ю.								8	15
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Агломераційна машина безперервної дії являє собою рухому палетну стрічку, на яку завантажується підготовлена шихта шаром заданої висоти (рис. 1.1). Палети переміщуються вздовж машини та послідовно проходять основні технологічні зони: завантаження шихти, запалювання, спікання, охолодження та розвантаження готового агломерату. У нижній частині машини розміщені вакуум-камери, з'єднані з газовідвідним трактом і димососами. За рахунок створеного розрідження повітря та продукти горіння просмоктуються через шар шихти зверху вниз, забезпечуючи поширення фронту горіння твердого палива [6, 9, 10].

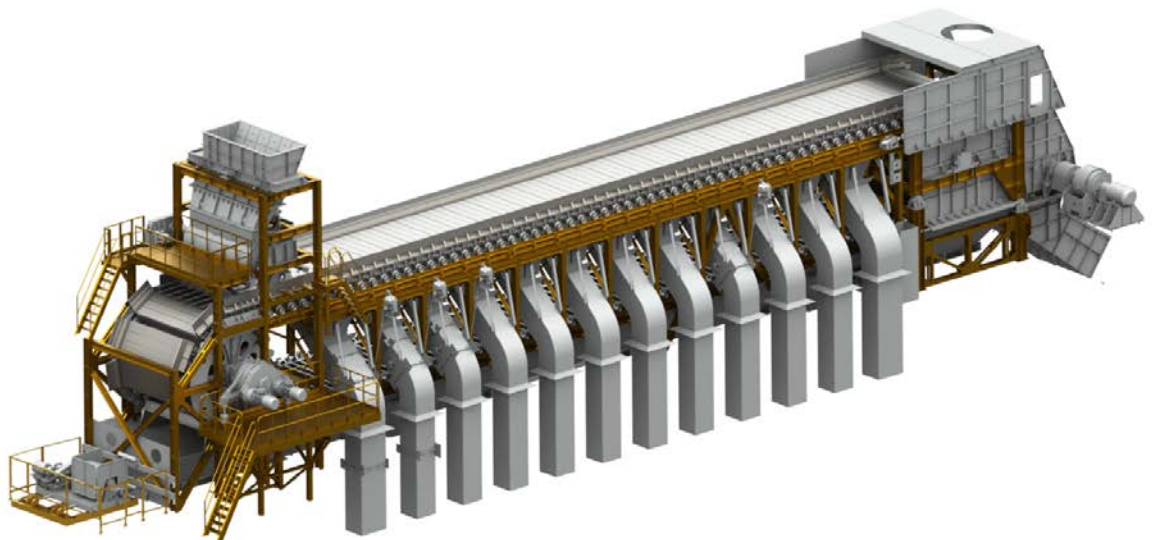


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд агломераційної машини [32]

Ключовою початковою стадією агломераційного процесу є запалювання шихти. Воно відбувається під горном запалювання, де верхній шар матеріалу нагрівається до температури, достатньої для займання твердого палива. Горн має футеровану конструкцію та оснащується пальниковими пристроями, у яких спалюється природний газ або суміш газоподібних палив. Високотемпературні продукти горіння передають тепло верхньому шару шихти, ініціюючи займання

кокового дріб'язку або іншого твердого палива, що входить до складу шихти [5, 7, 9].

Після виходу палет із-під горна процес горіння вже не підтримується безпосередньо пальниками. Подальше спікання відбувається за рахунок горіння твердого палива у шарі шихти. Фронт горіння поступово переміщується зверху вниз під дією розрідження у вакуум-камерах. Вище фронту формується зона готового або частково спеченого агломерату, нижче розташовуються зони нагрівання, сушіння та підготовки матеріалу до спікання. Таким чином, початкові умови, створені в зоні запалювання, визначають подальший розвиток теплового процесу по висоті шару [1, 7, 9].

Зона запалювання має визначальний вплив на стабільність усього агломераційного процесу. Якщо температура під горном є недостатньою, верхній шар шихти прогрівається неповністю, тверде паливо займається нерівномірно, а фронт горіння формується нестабільно. Це може призводити до недопалу частини матеріалу, зниження міцності агломерату, збільшення кількості повернення та погіршення техніко-економічних показників роботи агломераційної машини [6, 8, 10].

Надмірна температура у горні також є небажаною. Перегрів верхнього шару може спричиняти перепал матеріалу, надмірне оплавлення поверхні шару, погіршення його газопроникності та нерівномірний перебіг процесу по ширині палетної стрічки. Крім того, завищена температура пов'язана з перевитратою газового палива та прискореним зносом футерування горна. Отже, ефективне керування запалюванням повинно забезпечувати не максимально можливу, а технологічно оптимальну температуру, достатню для стабільного займання палива без зайвих енергетичних витрат [5, 6, 10].

Важливою характеристикою агломераційного процесу є точка закінчення спікання, або Burn-Through Point. Вона відповідає положенню фронту горіння в кінцевій частині агломераційної машини та використовується для оцінювання завершеності процесу спікання. Хоча ВТР безпосередньо контролюється у вихідній частині машини, її положення значною мірою залежить від умов,

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

сформованих на початку процесу, тобто у зоні запалювання. Нестабільне або нерівномірне запалювання може спричиняти зміщення точки закінчення спікання, що негативно впливає на продуктивність машини та якість готового агломерату [23-25].

На процес запалювання шихти впливає значна кількість технологічних факторів. До основних належать витрата газового палива, витрата повітря на горіння, співвідношення газ/повітря, тиск газу перед пальниками, теплотворна здатність палива, температура повітря, висота шару шихти, швидкість руху палетної стрічки, вологість, гранулометричний склад і хімічні властивості шихти. Частина цих параметрів може регулюватися автоматично, частина лише контролюється, а частина виступає як зовнішні збурення, що ускладнюють підтримання стабільного температурного режиму [6, 10-12].

Особливо важливими для процесу запалювання є швидкість руху палетної стрічки та висота шару шихти. Швидкість стрічки визначає час перебування матеріалу під горном, тобто тривалість теплового впливу на верхній шар. При збільшенні швидкості стрічки час нагрівання зменшується, тому для збереження якості запалювання може виникати потреба у підвищенні інтенсивності теплопідведення. Висота шару впливає на газодинамічний опір і умови проходження газового потоку через матеріал. Зміна висоти шару може змінювати розподіл температур і положення фронту горіння [7, 9, 10].

Не менш важливим є підтримання раціонального співвідношення між витратою газу та повітря. Недостатня кількість повітря призводить до неповного згоряння палива, зниження теплової ефективності та можливого утворення чадного газу. Надлишкова подача повітря, навпаки, може охолоджувати факел і зменшувати температуру продуктів горіння. Тому у сучасних системах автоматизації доцільно не лише регулювати температуру під горном, але й підтримувати оптимальне співвідношення газоповітряної суміші [5, 10, 11].

З погляду автоматизації процес запалювання шихти є складним тепловим об'єктом керування. Зміна витрати газу або положення регулювального клапана

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

не спричиняє миттєвої зміни температури під горном. Спочатку змінюється витрата палива, потім змінений газовий потік надходить до пальникових пристроїв, після чого змінюється інтенсивність горіння та теплопередача до газового об'єму горна, футерування і верхнього шару шихти. Лише через певний час відповідна зміна фіксується температурними датчиками. Отже, для цього об'єкта характерні інерційність, транспортне запізнення та дія змінних збурень [6, 10].

У традиційних системах керування температурою горна часто застосовуються локальні контури автоматичного регулювання, побудовані на основі класичних регуляторів. Такі рішення є простими, надійними та технологічно зрозумілими, однак їх можливості обмежуються наявністю істотного запізнення, параметричної невизначеності та швидких змін зовнішніх збурень. Саме тому сучасні підходи до автоматизації агломераційних машин дедалі частіше передбачають використання моделей процесу, прогнозування температурного стану та координоване керування окремими підсистемами агломашини [6, 10, 17, 18].

Таким чином, процес запалювання шихти відіграє визначальну роль у формуванні подальшого теплового режиму агломераційної машини. У зоні горна створюються початкові умови для розвитку фронту горіння, від яких залежать рівномірність спікання, положення точки закінчення процесу, якість готового агломерату та енергоефективність роботи агрегату. Наявність інерційності, запізнення, технологічних обмежень і зовнішніх збурень обумовлює необхідність удосконалення системи керування процесом запалювання, зокрема шляхом використання прогнозуючих алгоритмів керування.

1.2 Процес запалювання шихти як об'єкт автоматизації

Зона запалювання шихти є однією з найбільш відповідальних ділянок агломераційної машини з погляду автоматизації, оскільки саме тут формується

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

початковий температурний стан шару та створюються умови для подальшого поширення фронту горіння. На відміну від багатьох механічних або транспортних підсистем агломераційного виробництва, горн запалювання є складним теплотехнічним об'єктом, у якому одночасно відбуваються процеси горіння газоповітряної суміші, теплопередачі до шихти, взаємодії з газовим потоком і накопичення тепла у футеруванні. Тому ефективно автоматичне керування цією зоною потребує врахування не лише поточного значення температури, а й інерційності об'єкта, запізнення, обмежень на керуючі впливи та дії технологічних збурень [6, 10, 17, 18].

З погляду системного аналізу зона запалювання може бути розглянута як локальний об'єкт автоматизації у складі загальної АСУ ТП агломераційної машини. Його межами доцільно вважати ділянку від подачі газу та повітря до пальникових пристроїв горна до виходу палет із зони безпосереднього теплового впливу. До складу об'єкта входять горн запалювання з футерованим корпусом, пальникові пристрої, газовий і повітряний колектори, регулювальні клапани, засоби вимірювання температури, витрати, тиску та засоби технологічного захисту. Водночас цей об'єкт функціонує не ізольовано, а у тісному зв'язку з підсистемами завантаження шихти, регулювання швидкості палетної стрічки, вакуумною системою та системою контролю точки закінчення спікання [2-4, 6].

Основною регульованою величиною зони запалювання є температура під горном T_g , яка характеризує інтенсивність теплового впливу на верхній шар шихти. Саме ця температура визначає, чи буде забезпечено достатній прогрів матеріалу для займання твердого палива. У промислових умовах температура зазвичай вимірюється термопарами, встановленими у характерних точках робочого простору горна. Для підвищення достовірності контролю може використовуватися декілька датчиків по довжині або ширині горна з подальшим усередненням чи вибором репрезентативного значення.

Другою важливою регульованою або розрахунковою величиною є коефіцієнт надлишку повітря α , який характеризує співвідношення між

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

фактичною витратою повітря та теоретично необхідною витратою для повного згоряння газового палива. Підтримання раціонального значення α є необхідною умовою повного й енергоефективного горіння. При недостатній подачі повітря можливе неповне згоряння палива й утворення CO, а при надмірній подачі повітря відбувається охолодження факела та зниження температури продуктів горіння [10-12].

До основних керуючих впливів у зоні запалювання належать витрата газового палива $Q_{\text{газ}}$ та витрата повітря на горіння $Q_{\text{пов.}}$. Витрата газу безпосередньо визначає кількість тепла, що виділяється у пальникових пристроях, тому вона є головним керуючим впливом для температурного контуру. Витрата повітря використовується для забезпечення необхідних умов горіння та підтримання заданого співвідношення газ/повітря. На практиці ці впливи реалізуються за допомогою регулювальних клапанів, шиберів або частотно-керованих приводів повітрорудних пристроїв.

Загальна структура керуючих і регульованих величин зони запалювання може бути подана у вигляді:

$$u(t) = [Q_{\text{газ}}(t), Q_{\text{пов.}}(t)], \quad y(t) = [T_g(t), \alpha(t)]. \quad (1.1)$$

У такій постановці об'єкт має дві основні вхідні та дві основні вихідні величини. Однак характер взаємодії між ними не є однаковим. Найбільш суттєвим є канал «витрата газу — температура під горном», оскільки збільшення або зменшення витрати палива безпосередньо змінює теплоприток у горні. Канал «витрата повітря — коефіцієнт надлишку повітря» є швидшим і використовується переважно для стабілізації газоповітряного співвідношення. Водночас між каналами існують перехресні зв'язки: зміна витрати повітря певною мірою впливає на температуру факела, а зміна витрати газу впливає на розрахункове значення коефіцієнта надлишку повітря. Саме тому в системі керування доцільно передбачати узгоджену роботу температурного контуру та контуру співвідношення газ/повітря [6, 10, 18].

Для практичного керування важливим є розділення параметрів об'єкта на керуючі впливи, регульовані величини, контрольовані параметри та збурення.

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таке розділення дає змогу сформувати структуру автоматизованої системи, визначити склад датчиків і виконавчих механізмів, а також обґрунтувати вибір алгоритму керування. Узагальнену класифікацію основних параметрів зони запалювання наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні параметри зони запалювання шихти як об'єкта автоматизації

Група параметрів	Позначення	Фізичний зміст	Роль у системі керування
Керуючий вплив	$Q_{\text{газ}}$	Витрата повітря на горіння	Формування співвідношення газ/повітря
Керуючий вплив	$Q_{\text{пов}}$	Витрата повітря на горіння	Формування співвідношення газ/повітря
Регульована величина	T_g	Температура під горном	Основний показник якості запалювання
Регульована / розрахункова величина	α	Коефіцієнт надлишку повітря	Показник повноти та ефективності горіння
Контрольований параметр	$P_{\text{газ}}$	Тиск газу перед пальниками	Діагностика та компенсація збурень
Контрольований параметр	O_2, CO, CO_2	Склад відхідних газів	Контроль повноти горіння
Контрольований параметр	$T_{\text{вк}}$	Температури у вакуум-камерах	Оцінювання розвитку процесу спікання та ВТР
Збурення	Q_n	Нижча теплота згоряння газу	Впливає на фактичний теплоприток
Збурення	h	Висота шару шихти	Впливає на газопроникність і теплопередачу
Збурення	$w_{\text{стр}}$	Швидкість палетної стрічки	Визначає час перебування шихти під горном
Збурення	W	Вологість шихти	Впливає на витрати тепла на сушіння
Збурення	$T_{\text{пов}}$	Температура повітря на горіння	Впливає на температуру газоповітряної суміші

Наведена класифікація показує, що процес запалювання є багатофакторним об'єктом. При цьому не всі параметри можуть бути безпосередньо стабілізовані засобами локальної системи керування горном. Наприклад, висота шару, вологість шихти та швидкість палетної стрічки формуються іншими підсистемами агломераційної машини, однак їх зміна суттєво впливає на якість запалювання. Тому для температурного контуру ці параметри доцільно розглядати як збурення, які повинні враховуватися під час аналізу роботи системи керування [6, 7, 10].

Значний вплив на процес запалювання мають також властивості газового палива. У разі використання природного газу відносно стабільною є його теплота згоряння, проте навіть її коливання можуть призводити до зміни фактичного теплопритоку при незмінній витраті палива. Якщо ж використовується суміш природного, коксового або доменного газу, вплив зміни компонентного складу стає ще більш помітним. У такому випадку одна й та сама об'ємна витрата газу може відповідати різній кількості підведеної теплоти. Це ускладнює регулювання температури лише за сигналом витрати газу та підвищує вимоги до алгоритму керування [11, 12, 18].

Завдання автоматизації зони запалювання полягає не лише у підтриманні температури під горном на заданому рівні. Система керування повинна забезпечувати комплекс взаємопов'язаних функцій: стабілізацію температурного режиму, підтримання раціонального співвідношення газу й повітря, компенсацію основних технологічних збурень, обмеження витрати газу, захист обладнання та запобігання аварійним режимам. Особливе значення мають функції технологічної безпеки: контроль наявності полум'я, контроль мінімального та максимального тиску газу, блокування подачі палива при аварійних відхиленнях, контроль справності датчиків і виконавчих механізмів.

Типові задачі автоматизації зони запалювання можна сформулювати таким чином:

– підтримання температури під горном у технологічно допустимому діапазоні;

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- мінімізація статичної та динамічної похибки температурного контуру;
- підтримання заданого коефіцієнта надлишку повітря або співвідношення газ/повітря;
- компенсація впливу коливань тиску газу, теплотворної здатності палива, швидкості палетної стрічки та висоти шару шихти;
- обмеження максимальної та мінімальної витрати газу відповідно до технологічних і безпекових вимог;
- забезпечення плавної зміни керуючих впливів для запобігання різким тепловим навантаженням на горн;
- реєстрація основних параметрів процесу, формування трендів, аварійних повідомлень і даних для подальшого аналізу.

З урахуванням цих задач доцільною є багаторівнева структура системи автоматизації. На польовому рівні розміщуються датчики температури, витратоміри газу й повітря, датчики тиску, аналізатори газів, датчики полум'я та виконавчі механізми. На рівні програмованого логічного контролера реалізуються алгоритми регулювання, логіка блокувань, обробка сигналів і формування керуючих впливів. На рівні SCADA або операторської станції забезпечуються візуалізація процесу, введення завдань, архівування даних, сигналізація та аналіз трендів [10, 29-31].

Найбільш поширеним підходом до регулювання температури під горном є застосування локального регулятора за відхиленням температури від заданого значення. Однак для теплових об'єктів із запізненням та інерційністю такий підхід має певні обмеження. Якщо регулятор реагує лише на вже зафіксовану похибку, керуючий вплив формується із запізненням відносно реального розвитку процесу. Це може призводити до коливань температури, надмірної активності клапана, перевитрати газу або недостатньої компенсації збурень. Саме такі властивості об'єкта обґрунтовують доцільність застосування прогнозуючих алгоритмів керування [13-15, 17, 18].

Для зони запалювання шихти прогнозує керування є перспективним тому, що воно дає змогу використовувати математичну модель об'єкта для

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

оцінювання майбутньої температури під горном на певному горизонті часу. На основі такого прогнозу регулятор може формувати керуючий вплив не лише за поточною похибкою, а й з урахуванням очікуваної динаміки процесу. Це особливо важливо для каналу «витрата газу – температура під горном», де наявні транспортне запізнення, теплова інерційність і обмеження на допустиму швидкість зміни витрати газу [13, 14, 16].

Таким чином, зона запалювання шихти є складним об'єктом автоматизації, для якого характерні багатофакторність, взаємозв'язок теплових і газодинамічних процесів, наявність інерційності, запізнення та змінних збурень. Основними керуючими впливами є витрати газу й повітря, основними регульованими величинами – температура під горном і коефіцієнт надлишку повітря. Традиційні локальні системи регулювання можуть забезпечувати базову стабілізацію параметрів, однак для підвищення якості керування та енергоефективності доцільним є використання алгоритмів, що враховують динамічну модель об'єкта та прогноз його майбутнього стану.

1.3 Аналіз існуючих систем автоматизації агломераційних машин

Сучасна агломераційна машина є складним технологічним агрегатом безперервної дії, робота якого залежить від узгодженої взаємодії великої кількості механічних, теплотехнічних, газодинамічних та інформаційно-вимірjuвальних підсистем. Тому автоматизація агломераційного процесу не може обмежуватися лише локальним регулюванням окремих параметрів. Вона має забезпечувати комплексне керування підготовкою та завантаженням шихти, підтриманням висоти шару, запалюванням, вакуумним режимом, швидкістю палетної стрічки, контролем завершеності спікання, охолодженням агломерату та газоочисним обладнанням [2, 3, 6, 10].

Узагальнено автоматизовану систему керування технологічним процесом агломерації можна подати як багаторівневу систему. На нижньому рівні розташовані датчики, виконавчі механізми та локальні пристрої керування. До

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

них належать термопари, витратоміри газу й повітря, датчики тиску та розрідження, газоаналізатори, датчики положення механізмів, регулювальні клапани, приводи шибєрів, частотно-керовані електроприводи та пристрої технологічного захисту. На рівні програмованих логічних контролерів реалізуються алгоритми регулювання, логіка блокувань, обробка сигналів і формування керуючих впливів. Верхній рівень системи представлений SCADA/HMI-засобами, що забезпечують візуалізацію параметрів, архівування даних, реєстрацію аварійних подій, побудову трендів та взаємодію оператора з технологічним процесом [10, 29-31].

За функціональним призначенням у складі АСУ ТП агломераційної машини можна виділити кілька основних підсистем. До них належать підсистема дозування компонентів шихти, підсистема зволоження та гранулювання, підсистема завантаження і підтримання висоти шару, підсистема керування горном запалювання, підсистема регулювання вакуумного режиму, підсистема керування швидкістю палетної стрічки, підсистема контролю точки закінчення спікання, підсистема охолодження та підсистема газоочищення. Кожна з цих підсистем має власні локальні задачі, однак їхня робота є взаємопов'язаною, оскільки зміна параметрів однієї ділянки впливає на тепловий стан і якість процесу на наступних стадіях [2, 3, 6].

Підсистема дозування і підготовки шихти забезпечує формування заданого складу агломераційної суміші. Вона відповідає за подачу залізорудного концентрату, флюсів, твердого палива, повернення та інших добавок у необхідних співвідношеннях. Якість роботи цієї підсистеми визначає хімічний склад, вміст палива, вологість і гранулометричні характеристики шихти. Від цих параметрів залежить газопроникність шару, швидкість поширення фронту горіння, витрата тепла на сушіння та кінцева якість агломерату [1, 3, 7].

Підсистема завантаження і підтримання висоти шару забезпечує рівномірне розміщення шихти на палетній стрічці. Висота шару є важливим технологічним параметром, оскільки вона впливає на газодинамічний опір,

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умови просмоктування повітря через матеріал та тривалість проходження фронту горіння по вертикалі. У традиційних системах автоматизації висота шару контролюється за допомогою рівнемірів, датчиків положення завантажувальних пристроїв або непрямих показників продуктивності. Порушення рівномірності завантаження може призводити до нерівномірного спікання по ширині машини та ускладнювати стабілізацію температурного режиму [6, 7, 10].

Підсистема керування горном запалювання є однією з ключових для забезпечення стабільності агломераційного процесу. У традиційному виконанні вона включає регулювання витрати газу, витрати повітря, тиску газу перед пальниками, контроль температури під горном, контроль наявності полум'я та аварійне відсікання палива у небезпечних режимах. Основним завданням цієї підсистеми є підтримання температури, достатньої для займання твердого палива у верхньому шарі шихти, без надмірної перевитрати газу та перегріву футерування [5, 6, 10].

Найпоширенішим підходом до автоматизації горна є використання локальних контурів регулювання. Температура під горном стабілізується шляхом зміни витрати газового палива, а співвідношення газ/повітря підтримується окремим контуром або розрахунковим завданням витрати повітря залежно від поточної витрати газу. Таке рішення є простим у реалізації, зрозумілим для експлуатаційного персоналу та сумісним із типовими промисловими контролерами. Однак його ефективність значною мірою залежить від правильного налаштування регуляторів, якості вимірювання температури та стабільності властивостей об'єкта [10, 13, 14].

Підсистема регулювання вакуумного режиму забезпечує необхідне розрідження у вакуум-камерах, завдяки якому повітря та продукти горіння просмоктуються через шар шихти. Вакуумний режим впливає на швидкість поширення фронту горіння, інтенсивність теплообміну, газопроникність шару та положення зони завершення спікання. У традиційних системах керування регулюється розрідження у газовідвідному тракті або в окремих групах вакуум-

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

камер, а також контролюється температура відхідних газів. Зміна вакуумного режиму може компенсувати певні відхилення процесу, однак її необхідно узгоджувати зі швидкістю стрічки та режимом запалювання [6, 9, 10].

Важливим елементом сучасної автоматизації агломераційних машин є контроль точки закінчення спікання, або Burn-Through Point. ВТР характеризує положення, у якому фронт горіння досягає нижньої частини шару, і є одним із головних показників завершеності процесу. Для його оцінювання використовують температурний профіль у вакуум-камерах, склад відхідних газів або засоби інфрачервоного контролю. У низці систем ВТР застосовується не лише для моніторингу, а й для коригування швидкості палетної стрічки, вакуумного режиму або інших керуючих впливів [4, 23-25].

У патентних і науково-технічних рішеннях значна увага приділяється координованому керуванню процесом спікання за даними температур у вакуум-камерах та складу відхідних газів. Наприклад, у патенті України на спосіб автоматичного регулювання процесу спікання запропоновано використовувати інформацію про температурний стан у вакуум-камерах і вміст CO_2 у відхідних газах для формування керуючих дій. Такий підхід демонструє важливий принцип: якість спікання не може оцінюватися лише за одним локальним параметром, а система керування повинна враховувати взаємозв'язок між запалюванням, рухом фронту горіння та завершенням процесу [4].

Окремим напрямом розвитку систем автоматизації агломераційних машин є використання експертних систем, математичних моделей та алгоритмів інтелектуального керування. Такі системи можуть включати бази технологічних правил, прогностні моделі температурного стану, моделі точки закінчення спікання, нейромережеві оцінювачі та алгоритми оптимізації. Їх метою є не лише стабілізація окремих параметрів, а й підвищення продуктивності машини, зменшення витрати палива, покращення якості агломерату та зниження впливу людського фактора [17, 18, 21, 23, 26, 28].

У сучасних роботах, присвячених інтелектуальному керуванню агломераційним процесом, значну увагу приділено прогнозуванню температури запалювання та ВТР. Зокрема, запропоновано структури, у яких прогнозна модель оцінює майбутню температуру або положення фронту горіння, після чого регулятор або експертна система формує коригувальні дії. Такі підходи є особливо важливими для об'єктів із запізненням, оскільки дозволяють реагувати не лише на вже зафіксовані відхилення, а й на очікувану зміну стану процесу [18, 21-23].

Попри розвиток інтелектуальних методів, у промислових умовах досі широко застосовуються класичні локальні системи регулювання. Це пояснюється їхньою простотою, надійністю, передбачуваністю поведінки та відносно невисокими вимогами до обчислювальних ресурсів. Проте такі системи часто мають обмежені можливості щодо врахування зміни властивостей сировини, коливань теплотворної здатності газу, варіацій висоти шару, зміни швидкості палетної стрічки та інших збурень. Унаслідок цього оператори змушені вручну коригувати завдання регуляторам, орієнтуючись на тренди температури, показники вакуум-камер та власний технологічний досвід [6, 10, 17].

Основні типи систем і підходів до автоматизації агломераційних машин можна узагальнити у таблиці 1.2.

Аналіз наведених підходів показує, що традиційна автоматизація агломераційних машин забезпечує базову стабілізацію технологічних параметрів, однак не завжди гарантує оптимальну роботу в умовах змінних збурень. Особливо це стосується зони запалювання, для якої характерні теплова інерційність, транспортне запізнення, зміна властивостей газового палива, коливання витрати та тиску газу, а також залежність від параметрів шихти. Якщо система керування реагує лише на поточну або вже зафіксовану похибку температури, її дія може бути запізнілою відносно реального розвитку процесу [13, 14, 18].

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика підходів до автоматизації агломераційних машин

Підхід до автоматизації	Основні функції	Переваги	Обмеження
Локальні контури регулювання	Стабілізація температури, витрати газу, витрати повітря, тиску, розрідження	Простота реалізації, надійність, сумісність із типовими ПЛК	Обмежене врахування збурень, слабка координація між підсистемами
Каскадне та ratio-регулювання	Підтримання співвідношення газ/повітря, стабілізація допоміжних контурів	Покращення якості горіння, зменшення впливу швидких збурень	Не вирішує повністю проблему запізнення температурного контуру
Керування за ВТР	Коригування швидкості стрічки, вакуумного режиму або теплового режиму за точкою завершення спікання	Орієнтація на кінцевий результат процесу спікання	ВТР є запізненим показником відносно процесу запалювання
Експертні системи	Формування рекомендацій або керуючих дій на основі правил і досвіду операторів	Використання технологічних знань, можливість комплексної оцінки процесу	Складність підтримання бази правил, залежність від якості експертних знань
Прогнозні та нейронні моделі	Прогноз температури, ВТР, якості агломерату або витрати палива	Можливість урахування складних нелінійних залежностей	Потреба у великих масивах якісних виробничих даних
Прогнозуюче керування	Формування керуючого впливу з урахуванням моделі, запізнення, обмежень і прогнозу	Придатність для інерційних об'єктів із запізненням, можливість урахування обмежень	Потреба у математичній моделі та налаштуванні параметрів алгоритму

Ще одним обмеженням існуючих систем є недостатня інтеграція локального керування запалюванням із загальним контуром оптимізації агломераційного процесу. У багатьох випадках температура під горном, швидкість стрічки, вакуумний режим і ВТР контролюються окремими підсистемами, між якими існує лише часткова координація. Водночас з

технологічної точки зору ці параметри є взаємопов'язаними: якість запалювання впливає на подальше положення фронту горіння, а отже – на завершеність спікання та якість готового агломерату [4, 23-25].

З позиції енергоефективності важливим недоліком традиційних систем є орієнтація переважно на підтримання заданої температури без достатнього врахування мінімізації витрати газу. У реальних умовах оператори часто задають завищений температурний режим як запас для уникнення недопалу, що може призводити до перевитрати палива. Для зменшення таких втрат система керування повинна не лише стабілізувати температуру, але й враховувати обмеження на витрату газу, співвідношення газ/повітря, теплотворну здатність палива та допустимі динамічні відхилення температури [5, 10-12].

Перспективним напрямом удосконалення автоматизації зони запалювання є використання модельно-орієнтованих алгоритмів, зокрема прогнозуючого керування. На відміну від класичних локальних регуляторів, такі алгоритми використовують математичну модель об'єкта для прогнозування майбутньої температури та формування керуючого впливу з урахуванням запізнення, інерційності й технологічних обмежень. Це дає змогу підвищити якість регулювання температури під горном і зменшити ризик як недопалу, так і перевитрати газу [13-16].

Таким чином, аналіз існуючих систем автоматизації агломераційних машин показує, що сучасна АСУ ТП повинна забезпечувати не лише локальну стабілізацію параметрів, а й узгоджене керування взаємопов'язаними підсистемами агломераційного процесу. Для зони запалювання найбільш актуальною є задача підвищення якості температурного регулювання в умовах інерційності, запізнення, обмежень і змінних збурень. Це створює передумови для застосування прогнозуючого керування як інструменту підвищення стабільності теплового режиму та енергоефективності процесу запалювання шихти.

1.4 Методи керування процесом запалювання шихти

Процес запалювання шихти на агломераційній машині є складним об'єктом керування, для якого характерні нелінійність, теплова інерційність, транспортне запізнення, взаємний вплив витрат газу й повітря, а також дія значної кількості технологічних збурень. До таких збурень належать коливання тиску та теплотворної здатності газу, зміна висоти шару шихти, швидкості палетної стрічки, вологості та складу матеріалу. У зв'язку з цим вибір методу керування зоною запалювання має важливе значення для забезпечення стабільного температурного режиму, якості агломерату та раціонального використання палива [6, 10, 17].

Історично найпростішим підходом до керування процесом запалювання було ручне або напівавтоматичне керування. У такому випадку оператор, орієнтуючись на показання температури під горном, витрати газу, тиску, стану полум'я, температур у вакуум-камерах та власний досвід, змінює завдання локальним регуляторам або безпосередньо коригує положення виконавчих механізмів. Перевагою такого підходу є можливість врахування технологічного досвіду персоналу та непрямих ознак перебігу процесу. Проте ручне керування має низку очевидних недоліків: залежність від кваліфікації оператора, суб'єктивність прийняття рішень, запізнена реакція на збурення та складність підтримання стабільного режиму в умовах змінної якості сировини й палива [10, 28].

Найпоширенішим промисловим методом автоматичного керування температурою під горном є використання класичних ПІД-регуляторів. У цьому випадку регулятор формує керуючий вплив на основі похибки між заданим і поточним значенням температури. Зазвичай зміна температури реалізується через регулювання витрати газового палива, що подається до пальникових пристроїв. ПІД-регулятори мають важливі практичні переваги: простоту реалізації, зрозумілу структуру, наявність стандартних функціональних блоків

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

у більшості промислових контролерів і достатню надійність для багатьох технологічних об'єктів [10, 13].

Однак для процесу запалювання шихти класичне ПД-регулювання має обмеження. Температура під горном змінюється не миттєво після зміни витрати газу, а з певним запізненням, зумовленим транспортом газу до пальників, інерційністю горіння, теплоємністю футерування та інерційністю температурних датчиків. Якщо регулятор реагує лише на вже зафіксовану похибку, його дія може бути запізнілою відносно реального розвитку процесу. Це може призводити до коливань температури, надмірної активності газового клапана, перерегулювання або, навпаки, недостатньої компенсації збурень. Крім того, ПД-регулятор у базовому вигляді не враховує явно обмеження на витрату газу, швидкість зміни керуючого впливу та прогноз майбутньої поведінки об'єкта [13-15].

Для підвищення якості керування горінням у промислових системах широко застосовується каскадне регулювання та регулювання співвідношення газ/повітря. Каскадний підхід передбачає наявність головного контуру, який формує завдання для підлеглого швидшого контуру. У випадку горна запалювання головним може бути контур температури під горном, а підлеглим – контур витрати газу або співвідношення газу й повітря. Ratio-регулювання передбачає автоматичне формування завдання витрати повітря залежно від поточної або заданої витрати газу, що дає змогу підтримувати раціональний коефіцієнт надлишку повітря [10-12].

Перевагою такого підходу є покращення умов горіння та зменшення впливу швидких збурень у газоповітряному тракті. Підтримання правильного співвідношення між паливом і повітрям сприяє повнішому згорянню газу, зменшує ризик утворення СО та запобігає надмірному охолодженню факела надлишком повітря. Водночас каскадне та ratio-регулювання не вирішують повністю проблему інерційності температурного контуру. Вони покращують якість реалізації керуючого впливу, але не забезпечують самі по собі

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

прогнозування температури під горном і не дають можливості завчасно компенсувати майбутні відхилення [10, 13, 14].

Окрему групу становлять нечіткі регулятори, які використовують базу правил виду «якщо – то» для формування керуючого впливу. Такі регулятори є зручними для об'єктів, математичний опис яких складний або неповний, але для яких існує значний технологічний досвід експлуатації. Наприклад, у правилах можуть враховуватися не лише поточне відхилення температури, а й швидкість її зміни, рівень витрати газу, стан полум'я або непрямі ознаки розвитку процесу. Нечітке керування дає змогу формалізувати досвід оператора та застосувати його в автоматизованому режимі [17, 28].

Недоліком нечіткого керування є складність побудови якісної бази правил і функцій належності. Для різних агломераційних машин, видів шихти, палива та режимів роботи правила можуть відрізнятися. Крім того, нечіткий регулятор не завжди забезпечує оптимальну поведінку при істотній зміні властивостей об'єкта, якщо база правил не містить відповідних ситуацій. Тому нечіткі системи часто використовуються не як самостійний універсальний засіб керування, а як частина гібридних або експертних систем [17, 28].

Більш адаптивним підходом є використання нейромережевих регуляторів або ПІД-регуляторів із нейромережевим налаштуванням параметрів. У таких системах нейронна мережа може виконувати функцію ідентифікатора об'єкта, прогнозує моделі або коректора параметрів регулятора. Наприклад, PIDNN-підхід передбачає поєднання класичної структури ПІД-регулювання з можливістю автоматичного коригування коефіцієнтів на основі навчання. Це дає змогу підвищити адаптивність системи до зміни сировини, палива або режимів роботи [19].

Основним обмеженням нейромережевих методів є потреба у якісних навчальних даних, що відображають різні режими роботи об'єкта. Для агломераційного виробництва це є суттєвим фактором, оскільки дані можуть містити пропуски, шуми, аварійні режими, вплив ручного керування та нестационарність технологічного процесу. Крім того, нейромережеві

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

регулятори складніше валідувати та пояснити з погляду промислової безпеки, ніж класичні регулятори або модельно-орієнтовані алгоритми з явною математичною структурою [17, 19, 26].

Адаптивне керування є ще одним напрямом удосконалення систем запалювання. Його ідея полягає у зміні параметрів регулятора або моделі об'єкта під час роботи системи залежно від поточного стану процесу. Для агломераційного виробництва це є актуальним через зміну складу шихти, вологості, теплотворної здатності палива, стану пальникових пристроїв і футерування горна. Адаптивні системи можуть використовувати онлайн-ідентифікацію параметрів об'єкта або перемикання між наборами параметрів для різних робочих режимів [20].

Перевагою адаптивного керування є здатність пристосовуватися до повільної зміни властивостей об'єкта. Проте такий підхід має і певні складнощі: необхідність надійної ідентифікації параметрів у реальному часі, чутливість до шумів вимірювання, ризик некоректного налаштування у перехідних або аварійних режимах. Тому для промислових теплових об'єктів адаптивні алгоритми потребують обережного застосування та додаткових обмежень безпеки [20].

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється гібридним системам керування, що поєднують прогнозні моделі, експертні правила, нечітку логіку та оптимізаційні алгоритми. Одним із прикладів є підхід, у якому для прогнозування температури запалювання використовується модель Elman-мережі з оптимізацією параметрів методом рою частинок, а керуючі дії формуються на основі інтелектуального або експертного регулятора. Такі системи орієнтовані на компенсацію коливань тиску газу та інших збурень до того, як вони спричинять значне відхилення температури [21].

Ще більш складним напрямом є використання глибоких нейромережевих архітектур для прогнозування температури запалювання. Зокрема, у сучасних роботах застосовуються CNN-LSTM моделі з механізмом уваги, які поєднують можливості згорткових мереж для виділення локальних ознак і LSTM-мереж

для врахування часових залежностей. Такі моделі можуть забезпечувати високу точність прогнозування за наявності великого масиву виробничих даних, однак потребують значних обчислювальних ресурсів, ретельної підготовки даних і складної процедури валідації [22, 26].

Окремий клас становлять системи керування, орієнтовані на прогноз точки закінчення спікання. ВТР характеризує завершеність процесу спікання і може використовуватися для коригування швидкості палетної стрічки, вакуумного режиму або теплового режиму машини. Інтелектуальні системи, побудовані на прогнозі ВТР, дають змогу оцінювати не лише локальний стан зони запалювання, а й кінцевий результат розвитку фронту горіння по довжині агломераційної машини [23-25].

Разом з тим керування лише за ВТР має певне обмеження для задачі запалювання. Точка закінчення спікання є віддаленим і запізнаним показником відносно початкового теплового впливу під горном. Якщо відхилення у зоні запалювання проявляється у зміні ВТР лише через певний час, то коригувальна дія може бути сформована надто пізно. Тому для керування безпосередньо процесом запалювання доцільно використовувати локальний прогноз температури під горном у поєднанні з інформацією про подальший стан процесу [23-25].

Найбільш придатним для об'єктів із запізненням та обмеженнями є клас методів прогнозуючого керування. Його загальна ідея полягає у використанні математичної моделі об'єкта для прогнозування майбутньої поведінки регульованої величини на певному горизонті часу. На основі прогнозу регулятор формує таку зміну керуючого впливу, яка забезпечує наближення виходу до заданої траєкторії з урахуванням технологічних обмежень. На відміну від класичного ПІД-регулювання, прогнозуюче керування реагує не лише на поточну похибку, а й на очікувану динаміку об'єкта [13-16].

До переваг прогнозуючого керування для процесу запалювання шихти належать можливість явного врахування запізнення у каналі «витрата газу – температура під горном», обмежень на мінімальну та максимальну витрату

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

газу, обмежень на швидкість зміни клапана, а також можливість згладжування керуючих дій. Це особливо важливо для горна запалювання, де надмірно різкі зміни витрати газу небажані з погляду безпеки, ресурсу обладнання та стабільності полум'я [13, 14, 16].

Серед методів прогнозуючого керування окреме місце займає Predictive Functional Control або Model Functional Control. Цей підхід можна розглядати як практично орієнтований варіант прогнозуючого керування, придатний для промислових об'єктів із відносно простою динамічною моделлю. На відміну від повного MPC, який зазвичай потребує розв'язання оптимізаційної задачі на кожному кроці, PFC/MFC має простішу обчислювальну структуру і може бути реалізований у циклі роботи промислового програмованого логічного контролера. Для об'єктів, які можуть бути описані моделлю першого порядку із запізненням, такий підхід є особливо зручним [14, 16].

Порівняльну характеристику основних методів керування процесом запалювання шихти наведено у таблиці 1.3.

Аналіз наведених методів показує, що жоден із підходів не є універсальним для всіх задач автоматизації агломераційного процесу. Класичні ПІД-регулятори залишаються доцільними для швидких і добре ідентифікованих локальних контурів, зокрема контурів витрати або тиску. Ratio-регулювання є раціональним для підтримання співвідношення газ/повітря. Інтелектуальні й нейромережеві методи мають значний потенціал для складних задач прогнозування, однак потребують великих обсягів якісних даних і складнішої інфраструктури.

Для задачі керування температурою під горном у межах бакалаврської роботи найбільш доцільним є використання прогнозуючого підходу на основі спрощеної динамічної моделі об'єкта. Такий підхід дає змогу врахувати головні особливості температурного контуру – інерційність, запізнення та обмеження на витрату газу – без надмірного ускладнення алгоритму. При цьому підлеглий контур співвідношення газ/повітря може бути реалізований за класичним ПІ-

або ratio-принципом, тоді як основний температурний контур доцільно побудувати на основі PFC/MFC-регулятора.

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика методів керування процесом запалювання шихти

Метод керування	Основна ідея	Переваги	Обмеження
Ручне або напівавтоматичне керування	Коригування режиму оператором за показниками процесу	Використання досвіду персоналу, гнучкість	Суб'єктивність, запізнена реакція, залежність від оператора
Класичне ПІД-регулювання	Формування керуючого впливу за поточною похибкою температури	Простота, надійність, наявність стандартних ПЛК-блоків	Обмежена ефективність при запізненні та збуреннях
Каскадне та ratio-регулювання	Узгоджене регулювання температури, витрати газу і співвідношення газ/повітря	Покращення умов горіння, стабілізація допоміжних контурів	Не забезпечує прогнозування температури
Нечітке керування	Формування дій за базою правил «якщо — то»	Можливість врахування експертного досвіду	Складність побудови та підтримання бази правил
PIDNN та нейромережеве керування	Адаптація параметрів або прогнозування стану за допомогою нейронної мережі	Адаптивність, можливість роботи з нелінійностями	Потреба у навчальних даних, складність валідації
Адаптивне керування	Зміна параметрів регулятора або моделі під час роботи	Пристосування до зміни властивостей об'єкта	Складність ідентифікації, чутливість до шумів
Гібридні інтелектуальні системи	Поеднання прогновної моделі, експертних правил і оптимізації	Висока потенційна ефективність	Висока складність реалізації та супроводу
Керування за прогнозом ВТР	Коригування процесу за прогнозом точки закінчення спікання	Орієнтація на кінцевий результат процесу	ВТР є запізним показником для зони запалювання
Прогнозуюче керування PFC/MFC	Розрахунок керуючого впливу за прогнозом температури на основі моделі	Врахування запізнення, інерційності й обмежень, придатність для ПЛК	Потреба у математичній моделі та налаштуванні горизонту прогнозу

Таким чином, подальше дослідження у роботі доцільно спрямувати на розроблення системи прогнозуючого керування температурою під горном запалювання з використанням математичної моделі об'єкта. Така система має поєднувати простоту промислової реалізації, можливість роботи в умовах запізнення та здатність формувати більш плавні й обґрунтовані керуючі дії порівняно з традиційним регулюванням за поточною похибкою.

1.5 Методи керування процесом запалювання шихти

Математичне моделювання процесів запалювання та спікання є важливою складовою розроблення сучасних систем автоматизації агломераційних машин. Модель дає змогу формалізувати взаємозв'язок між вхідними діями, технологічними збуреннями та вихідними показниками процесу, оцінити динаміку температурного поля, визначити вплив окремих параметрів на якість агломерату та обґрунтувати вибір алгоритму керування. Для задачі прогнозуючого керування математична модель набуває особливого значення, оскільки саме вона використовується для оцінювання майбутньої поведінки об'єкта на заданому горизонті прогнозування [13-16].

Процес агломерації є складним багатофакторним фізико-хімічним процесом, у якому одночасно відбуваються теплопередача, масообмін, фільтрація газу через пористий шар, сушіння шихти, горіння твердого палива, часткове плавлення компонентів, утворення рідкої фази та подальше затвердіння агломерату. Тому повна математична модель агломераційного процесу повинна враховувати зміну температури газової та твердої фаз, вологовміст, концентрації компонентів газової суміші, швидкість руху фронту горіння, властивості шару та умови теплообміну [1, 7, 8].

За рівнем деталізації математичні моделі процесів запалювання та спікання можна умовно поділити на кілька груп: фізико-хімічні моделі на основі рівнянь тепломасообміну; спрощені теплові балансові моделі; емпіричні та регресійні моделі; моделі точки закінчення спікання; data-driven моделі на

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

основі машинного навчання; а також редуковані динамічні моделі, придатні для синтезу систем керування. Кожна з цих груп має власне призначення, переваги та обмеження.

Найбільш фізично обґрунтованими є моделі, що базуються на рівняннях теплопровідності, конвективного теплообміну та масообміну у шарі зернистого матеріалу. У таких моделях шар шихти розглядається як пористе середовище, через яке проходить газовий потік. Температура твердої фази, температура газової фази, вміст вологи та концентрації компонентів змінюються як у часі, так і за координатою по висоті шару. Саме такий підхід дозволяє описати просторову структуру агломераційного процесу: зону готового агломерату, зону горіння палива, зону нагрівання, зону сушіння та зону перезволоження [1, 7].

У загальному вигляді теплофізична модель шару може містити рівняння теплового балансу для твердої фази та газової фази. Для твердої фази враховуються акумулювання тепла у матеріалі, теплопровідність, теплообмін із газом, теплота горіння твердого палива, витрати тепла на випаровування вологи та теплові ефекти фізико-хімічних перетворень. Для газової фази враховуються перенесення тепла потоком газу, теплообмін із частинками шихти, зміна складу газу внаслідок горіння та взаємодія з вологою. У спрощеному вигляді такі процеси можуть бути подані системою диференціальних рівнянь, що описують зміну температури по висоті шару та в часі.

Перевагою фізико-хімічних моделей є їхня висока інформативність. Вони дають змогу досліджувати вплив висоти шару, вологості, вмісту твердого палива, швидкості руху палетної стрічки, розрідження у вакуум-камерах і властивостей сировини на температурний профіль та завершеність спікання. Такі моделі можуть використовуватися для оптимізації технологічних режимів, аналізу причин порушень процесу та оцінювання потенційних ефектів від модернізації обладнання [6-8].

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Водночас повні теплофізичні моделі мають суттєві обмеження з погляду практичного застосування у системах автоматичного керування. Вони потребують значної кількості параметрів, частина з яких важко вимірюється у промислових умовах: коефіцієнти теплообміну, ефективна теплопровідність шару, пористість, кінетичні параметри горіння, локальний вміст палива й вологи. Крім того, такі моделі є обчислювально складними, особливо якщо описують процес у дво- або тривимірній постановці. Тому їх безпосереднє використання у контурі керування в реальному часі є ускладненим [24, 26].

Окреме місце займають моделі теплового балансу зони запалювання. Вони не описують детально весь просторовий температурний профіль шару, але дозволяють встановити зв'язок між кількістю теплоти, що надходить від пальників, і тепловими витратами на нагрівання верхнього шару шихти, втратами через футерування та винесенням теплоти з продуктами горіння. У найпростішому вигляді тепловий баланс зони запалювання може бути записаний як:

$$Q_c + Q_{m0} = Q_m + Q_{pg} + Q_l, \quad (1.2)$$

де Q_c – теплота, що виділяється під час згоряння газового палива; Q_{m0} – фізичне тепло шихти, що надходить у зону запалювання; Q_m – теплота, яка витрачається на нагрівання верхнього шару шихти; Q_{pg} – теплота, що виноситься продуктами горіння; Q_l – втрати тепла через футерування та конструктивні елементи горна.

Теплота згоряння газу визначається витратою палива, його нижчою теплотою згоряння та коефіцієнтом повноти горіння:

$$Q_c = Q_g \cdot Q_n \cdot \eta_c, \quad (1.3)$$

де Q_g – витрата газового палива; Q_n – нижча теплота згоряння газу; η_c – коефіцієнт повноти згоряння.

З рівняння (1.3) видно, що навіть при незмінній витраті газу фактичний теплоприток може змінюватися внаслідок коливання теплоти згоряння палива. Це особливо актуально для умов, коли в горні використовується не лише природний газ, а й суміші газоподібних палив різного складу [11, 12].

Теплові балансові моделі є зручними для інженерного аналізу та попереднього оцінювання впливу основних параметрів на температуру під горном. Вони дозволяють визначити, як зміна витрати газу, температури шихти, вологості матеріалу або коефіцієнта надлишку повітря впливає на тепловий стан зони запалювання. Однак такі моделі у статичному вигляді не описують повністю динаміку процесу, тобто не враховують інерційність футерування, газового об'єму горна, верхнього шару шихти та запізнення у каналі керування. Тому для задач автоматичного регулювання їх доцільно доповнювати динамічними моделями.

Для опису динаміки температурного контуру часто використовуються спрощені моделі зосереджених параметрів. У такому випадку об'єкт розглядається не як розподілена система з температурним полем по висоті й довжині шару, а як динамічна ланка, що зв'язує керуючий вплив із вимірюваною температурою. Для каналу «витрата газу — температура під горном» така модель повинна враховувати принаймні три ключові властивості: статичне підсилення, теплову інерційність і транспортне запізнення. Найпоширенішим варіантом такого опису є модель першого порядку із запізненням — FOPDT:

$$G(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau p}}{Tp + 1}, \quad (1.4)$$

де K – статичний коефіцієнт підсилення; T – постійна часу об'єкта; τ – час запізнення; p – оператор Лапласа.

Модель типу FOPDT не відображає всієї складності процесів горіння та тепломасообміну, однак є дуже зручною для синтезу систем автоматичного керування. Вона дозволяє врахувати головні динамічні властивості температурного контуру: повільну реакцію температури на зміну витрати газу та затримку між зміною положення клапана і фіксацією відповідної зміни температури. Саме тому такі моделі широко застосовуються для налаштування промислових регуляторів і синтезу практично орієнтованих прогнозуючих алгоритмів [13, 14, 16].

Параметри FOPDT-моделі можуть визначатися експериментально за кривою розгону або розрахунково на основі теплового балансу та конструктивних характеристик об'єкта. У першому випадку на стабільному режимі вноситься невелика ступінчаста зміна витрати газу, після чого фіксується реакція температури під горном. За отриманою кривою визначаються усталене відхилення температури, час початку реакції та швидкість наближення до нового усталеного значення. У другому випадку параметри оцінюються за відомими тепловими характеристиками горна, футерування, газового об'єму та верхнього шару шихти.

Крім температурної моделі горна, для опису процесу запалювання важливою є модель співвідношення газ/повітря. Вона базується на стехіометрії горіння газового палива та визначає необхідну витрату повітря для забезпечення повного згоряння палива. Для природного газу, основним компонентом якого є метан, теоретична потреба у повітрі визначається реакцією повного згоряння метану. На практиці повітря подається з невеликим надлишком, що характеризується коефіцієнтом α . Розрахунково цей коефіцієнт може бути поданий як:

$$\alpha = \frac{Q_a}{V_{a0} \cdot Q_g}, \quad (1.5)$$

де Q_a – фактична витрата повітря; V_{a0} – теоретично необхідний об'єм повітря для згоряння одиниці об'єму газу; Q_g – витрата газового палива.

Модель співвідношення газ/повітря зазвичай є простішою та швидшою порівняно з температурною моделлю. Вона може бути реалізована у вигляді ratio-регулювання, коли завдання витрати повітря автоматично формується пропорційно до витрати газу з урахуванням заданого коефіцієнта надлишку повітря. Така модель не замінює температурного регулювання, але є необхідною складовою ефективного та безпечного керування горінням [10- 12].

Для опису подальшого розвитку процесу спікання важливими є моделі точки закінчення спікання – Burn-Through Point. ВТР характеризує положення фронту горіння в кінцевій частині агломераційної машини та використовується

для оцінювання завершеності процесу. Моделі ВТР можуть базуватися на температурному профілі у вакуум-камерах, складі відхідних газів, інфрачервоній термографії або комбінації декількох інформаційних ознак. Такі моделі особливо важливі для верхнього рівня керування, оскільки дозволяють оцінити не лише локальний стан горна, а й результат розвитку процесу по довжині агломераційної машини [23-25; 27].

Зв'язок між запалюванням і ВТР є принциповим. Якість запалювання визначає початкові умови для формування фронту горіння, а отже, впливає на те, де і коли цей фронт досягне нижньої частини шару. Якщо запалювання є недостатнім або нерівномірним, фронт горіння може рухатися нестабільно, що призводить до зміщення ВТР, порушення завершеності спікання та погіршення якості агломерату. Водночас ВТР є запізненим показником відносно зони горна, тому він не може повністю замінити локальне керування температурою запалювання [23-25].

У сучасних дослідженнях дедалі більшого поширення набувають data-driven моделі, що будуються на основі виробничих даних. Такі моделі не обов'язково потребують детального фізичного опису всіх процесів, а встановлюють залежності між виміряними параметрами та цільовими показниками на основі статистичного аналізу або машинного навчання. До цієї групи належать регресійні моделі, моделі на основі методів опорних векторів, нейронні мережі, рекурентні мережі, LSTM-моделі та гібридні архітектури [22, 26].

Прикладом сучасного data-driven підходу є прогнозування температури запалювання на основі CNN-LSTM моделі з механізмом уваги. Така модель поєднує здатність згорткових нейронних мереж виділяти локальні ознаки у вхідних даних і здатність LSTM-мереж враховувати часові залежності. Механізм уваги дозволяє підсилити вплив найбільш інформативних ознак. Перевагою такого підходу є можливість прогнозування температури на горизонті кількох хвилин, що потенційно може використовуватися для випереджаючого керування процесом запалювання [22].

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Разом з тим data-driven моделі мають низку обмежень. Вони потребують великих масивів якісних виробничих даних, що охоплюють різні режими роботи агломації. Необхідними є попередня обробка даних, усунення пропусків, фільтрація аномалій, відбір ознак і регулярна перевірка актуальності моделі. Крім того, нейромережеві моделі часто мають складну внутрішню структуру, що ускладнює їх пояснення та промислову валідацію. Для бакалаврської роботи та практичної реалізації на рівні ПЛК такі моделі доцільно розглядати як перспективний напрям, але не як основний інструмент синтезу регулятора [22, 26].

З позиції автоматичного керування важливо розрізняти моделі для аналізу процесу та моделі для синтезу регулятора. Деталізовані фізико-хімічні або data-driven моделі можуть забезпечувати високу точність опису складних взаємозв'язків, але бути надмірно складними для використання у реальному часі. Навпаки, редуковані динамічні моделі, наприклад FOPDT, не відображають усіх деталей процесу, але добре підходять для розроблення регуляторів, оскільки мають невелику кількість параметрів, зрозумілу фізичну інтерпретацію та просту дискретну реалізацію [13, 14, 16].

У межах цієї роботи доцільним є використання комбінованого підходу. На рівні теоретичного аналізу враховуються фізичні особливості процесу запалювання та спікання: тепловий баланс, горіння палива, рух фронту горіння, вплив висоти шару та швидкості палетної стрічки. Однак для синтезу прогнозуючого регулятора температури під горном використовується спрощена динамічна модель каналу «витрата газу — температура під горном» у формі FOPDT. Такий підхід дозволяє поєднати фізичну обґрунтованість із практичною придатністю для реалізації у складі промислової системи автоматизації.

Порівняльну характеристику основних типів математичних моделей процесів запалювання та спікання наведено у таблиці 1.4.

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Таблиця 1.4 – Основні типи математичних моделей процесів запалювання та спікання шихти

Тип моделі	Призначення	Переваги	Обмеження
Фізико-хімічна модель шару	Опис тепломасообміну, горіння, сушіння та руху фронту спікання	Висока фізична обґрунтованість, можливість аналізу температурного поля	Велика кількість параметрів, складність реалізації в реальному часі
Теплова балансова модель горна	Оцінювання теплопритоку, теплових втрат і потреби в паливі	Простота, інженерна наочність, зв'язок із витратою газу	Обмежений опис динаміки та просторового розподілу температур
FOPDT-модель температурного контуру	Синтез регуляторів і прогнозуючого керування	Простота, врахування інерційності й запізнення, придатність для ПЛК	Лінеаризований опис у межах робочої точки
Модель співвідношення газ/повітря	Підтримання раціонального коефіцієнта надлишку повітря	Простота реалізації, важливість для енергоефективного горіння	Залежність від складу газу та точності вимірювання витрат
Модель ВТР	Оцінювання завершеності процесу спікання	Орієнтація на кінцевий результат процесу	Запізнений характер відносно зони запалювання
Data-driven модель	Прогноз температури, ВТР або якості агломерату за виробничими даними	Можливість опису складних нелінійних залежностей	Потреба у великих масивах даних і складність валідації

Таким чином, математичні моделі процесів запалювання та спікання можуть мати різний рівень деталізації – від повних фізико-хімічних моделей шару до спрощених динамічних моделей, орієнтованих на керування. Для задачі прогнозуючого керування температурою під горном найбільш доцільною є модель, яка враховує головні динамічні властивості об'єкта: статичне підсилення, теплову інерційність і транспортне запізнення.

Саме тому в подальшій частині роботи температурний контур зони запалювання буде описано моделлю першого порядку із запізненням, на основі якої буде синтезовано алгоритм прогнозуючого керування.

1.7 Теоретичні основи прогнозуючого керування

Прогнозуюче керування є одним із сучасних підходів до автоматичного керування складними технологічними об'єктами, для яких характерні інерційність, запізнення, обмеження на керуючі впливи та дія збурень. На відміну від класичних регуляторів, які формують керуючу дію переважно за поточним або минулим значенням похибки, прогнозуючий регулятор використовує математичну модель об'єкта для оцінювання його майбутньої поведінки. На основі цього прогнозу визначається такий керуючий вплив, який забезпечує наближення вихідної величини до заданого значення або заданої траєкторії на певному часовому горизонті [13-16].

Загальна ідея прогнозуючого керування полягає у повторюваному розв'язанні задачі керування на кожному дискретному кроці часу. У поточний момент система отримує виміряне значення регульованої величини, оновлює внутрішній стан моделі, прогнозує поведінку об'єкта на декілька майбутніх кроків і визначає послідовність майбутніх керуючих дій. Однак на реальний об'єкт подається лише перше значення цієї послідовності. На наступному кроці процедура повторюється з урахуванням нового виміряного стану об'єкта. Такий принцип називається керуванням із рухомим горизонтом прогнозування [15, 16].

Для процесу запалювання шихти прогнозуюче керування є доцільним через наявність запізнення у каналі «витрата газу – температура під горном». Зміна витрати газу не приводить до миттєвої зміни температури, оскільки між положенням регульовального клапана, зміною інтенсивності горіння, передачею тепла до шихти та реакцією датчика температури проходить певний час. Якщо керування здійснюється лише за поточною похибкою, регулятор

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

фактично реагує на вже сформоване відхилення. Прогнозуючий підхід дає змогу врахувати очікувану майбутню зміну температури й сформувати керуючий вплив більш завчасно.

Основними елементами прогнозуючого керування є математична модель об'єкта, горизонт прогнозування, критерій якості, обмеження на керуючі впливи та алгоритм оновлення керування. Математична модель використовується для розрахунку прогнозованого значення вихідної величини. Для температурного контуру горна такою вихідною величиною є температура під горном, а основним керуючим впливом – витрата газового палива.

У дискретному вигляді прогнозована поведінка об'єкта може бути подана як послідовність майбутніх значень виходу:

$$y_p(k+1), y_p(k+2), \dots, y_p(k+H), \quad (1.6)$$

де y_p – прогнозоване значення вихідної величини; k – поточний дискретний момент часу; H – горизонт прогнозування, тобто кількість майбутніх кроків, на яких оцінюється поведінка об'єкта.

Для температурного контуру зони запалювання величина y_p відповідає прогнозованій температурі під горном. Якщо як керуючий вплив використовується витрата газу, то прогноз залежить від поточного стану моделі, попередніх значень витрати газу та майбутніх значень керуючої дії. У загальному вигляді це можна подати як:

$$y_p(k+i) = f_m(x_m(k), u(k), u(k+1), \dots, u(k+i-1)), \quad (1.7)$$

де f_m – функція моделі об'єкта; $x_m(k)$ – поточний стан внутрішньої моделі; $u(k)$ – керуючий вплив у поточний момент; i – номер кроку прогнозування.

Важливою особливістю прогнозуючого керування є наявність опорної траєкторії. Вона визначає бажаний характер наближення вихідної величини до заданого значення. На відміну від миттєвого переходу до уставки, опорна траєкторія задає плавну зміну бажаного виходу, що дозволяє уникати різких керуючих дій і зменшувати перерегулювання.

Для теплових об'єктів це особливо важливо, оскільки надто швидка зміна витрати газу може бути небажаною з погляду стабільності горіння та ресурсу обладнання.

Опорну траєкторію можна подати у вигляді послідовності значень:

$$r(k+1), r(k+2), \dots, r(k+H), \quad (1.8)$$

де r – бажане значення вихідної величини на відповідному кроці прогнозування.

Для об'єкта запалювання шихти опорна траєкторія описує бажану зміну температури під горном від поточного значення до заданої температури. У спрощеному вигляді плавне наближення до завдання можна описати співвідношенням:

$$r(k+i) = y(k) + (1 - \lambda_r^i) \cdot (w(k) - y(k)), \quad (1.9)$$

де $r(k+i)$ – значення опорної траєкторії на i -му кроці прогнозування; $y(k)$ – поточне виміряне значення температури; $w(k)$ – задане значення температури; λ_r – коефіцієнт згладжування опорної траєкторії, який лежить у межах від 0 до 1.

Чим меншим є значення λ_r , тим швидше опорна траєкторія наближається до завдання. Чим ближчим λ_r є до одиниці, тим плавнішою є бажана зміна температури. Для процесу запалювання шихти доцільно використовувати достатньо плавну траєкторію, оскільки об'єкт має значну теплову інерційність, а різкі зміни витрати газу можуть погіршувати стабільність режиму.

У класичному Model Predictive Control керуючий вплив визначається шляхом мінімізації критерію якості. Такий критерій зазвичай враховує відхилення прогнозованого виходу від опорної траєкторії та величину зміни керуючого впливу. У спрощеному вигляді критерій може бути записаний як:

$$J = \sum_{i=1}^H \left(r(k+i) - y_p(k+i) \right)^2 + \lambda_u \cdot \sum_{i=0}^{H_u-1} \Delta u(k+i)^2, \quad (1.10)$$

де J – критерій якості керування; H – горизонт прогнозування; H_u – горизонт керування; $r(k+i)$ – значення опорної траєкторії; $y_p(k+i)$ – прогнозоване

значення виходу; $\Delta u(k+i)$ – зміна керуючого впливу; λ_u – ваговий коефіцієнт, що визначає ступінь штрафування різких змін керуючої дії.

Перша складова критерію (1.9) відповідає за точність підтримання заданої температури, а друга — за плавність керування. Для процесу запалювання шихти друга складова має важливе практичне значення, оскільки витрата газу не повинна змінюватися надто різко. Плавна зміна керуючого впливу сприяє стабільнішому горінню, зменшує навантаження на виконавчі механізми та знижує ризик коливального режиму.

Однією з головних переваг прогнозуючого керування є можливість явного врахування обмежень. У промислових системах витрата газу не може бути меншою за технологічно допустиме мінімальне значення і не може перевищувати максимальне значення, визначене пропускною здатністю обладнання та вимогами безпеки. Крім того, обмежується швидкість зміни положення клапана або витрати газу. Такі обмеження можна подати у вигляді:

$$u_{min} \leq u(k) \leq u_{max}, \quad (1.11)$$

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{max} \quad (1.12)$$

де $u(k)$ – керуючий вплив у поточний момент часу; u_{min} і u_{max} – мінімально та максимально допустимі значення керуючого впливу; $\Delta u(k)$ – зміна керуючого впливу; Δu_{min} і Δu_{max} – допустимі межі зміни керуючого впливу за один крок.

Для температурного контуру горна запалювання керуючим впливом $u(k)$ є витрата газу $Q_g(k)$. Тому обмеження (1.10) і (1.11) мають безпосередній технологічний зміст: вони не дозволяють регулятору сформувати небезпечне або фізично неможливе значення витрати газу, а також запобігають надто різким змінам режиму горіння.

Повна реалізація Model Predictive Control може бути обчислювально складною, оскільки на кожному кроці потребує розв’язання оптимізаційної задачі. Для великих багатовимірних систем це виправдано, але для локального температурного контуру горна запалювання може бути надмірним. Тому для промислових об’єктів із відносно простою динамікою часто застосовуються

спрощені варіанти прогнозуючого керування, зокрема Predictive Functional Control або Model Functional Control [14, 16].

Predictive Functional Control базується на тих самих загальних принципах, що й MPC: використанні моделі, прогнозі майбутнього виходу, опорній траєкторії та врахуванні обмежень. Проте у PFC керуючий вплив зазвичай обчислюється за спрощеними аналітичними співвідношеннями, без розв'язання складної оптимізаційної задачі на кожному кроці. Це робить PFC зручним для реалізації на промислових програмованих логічних контролерах, де важливими є передбачуваність часу виконання алгоритму, простота програмної реалізації та зрозумілість налаштування.

У задачі керування температурою під горном можна використати спрощену логіку PFC. На кожному кроці внутрішня модель прогнозує температуру через певну кількість кроків N . Потім прогнозоване значення порівнюється з бажаним значенням опорної траєкторії на цьому ж горизонті. За різницею між ними розраховується така зміна витрати газу, яка повинна наблизити температуру до бажаного значення. У спрощеному вигляді це можна подати як:

$$\Delta u(k) = \frac{r(k+N) - y_f(k+N)}{S_N}, \quad (1.13)$$

де $\Delta u(k)$ – розрахована зміна керуючого впливу; $r(k+N)$ – значення опорної траєкторії на горизонті N ; $y_f(k+N)$ – прогноз вільної реакції об'єкта без додаткової зміни керування; S_N – коефіцієнт чутливості моделі на горизонті N .

Після розрахунку зміни керуючого впливу визначається нове значення витрати газу:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k), \quad (1.14)$$

де $u(k)$ – нове значення керуючого впливу; $u(k-1)$ – значення керуючого впливу на попередньому кроці; $\Delta u(k)$ – розрахована зміна керуючого впливу.

Після цього до отриманого значення застосовуються технологічні обмеження за мінімальною та максимальною витратою газу, а також за допустимою швидкістю зміни керування. У реальній системі це є обов'язковим

етапом, оскільки прогнозуючий регулятор не повинен формувати команду, яка виходить за межі можливостей виконавчих механізмів або порушує умови безпечної роботи горна.

Важливою властивістю прогнозуючого керування є можливість компенсації помилки моделі. Оскільки будь-яка математична модель є наближенням реального об'єкта, прогнозована температура може відрізнятись від вимірної. Для зменшення впливу цієї похибки у PFC часто використовується корекція прогнозу за поточною помилкою між реальним об'єктом і моделлю:

$$e_m(k) = y(k) - y_m(k), \quad (1.15)$$

де $e_m(k)$ – поточна помилка моделі; $y(k)$ – виміряне значення температури; $y_m(k)$ – значення температури, розраховане внутрішньою моделлю.

Скоригований прогноз може бути поданий як:

$$y_p(k+i) = y_m(k+i) + e_m(k), \quad (1.16)$$

де $y_p(k+i)$ – скориговане прогнозоване значення температури; $y_m(k+i)$ – прогноз моделі на i -му кроці; $e_m(k)$ – поточна помилка моделі.

Структурну схему системи керування на базі алгоритму Predictive Functional Control наведено на рис. 1.2.

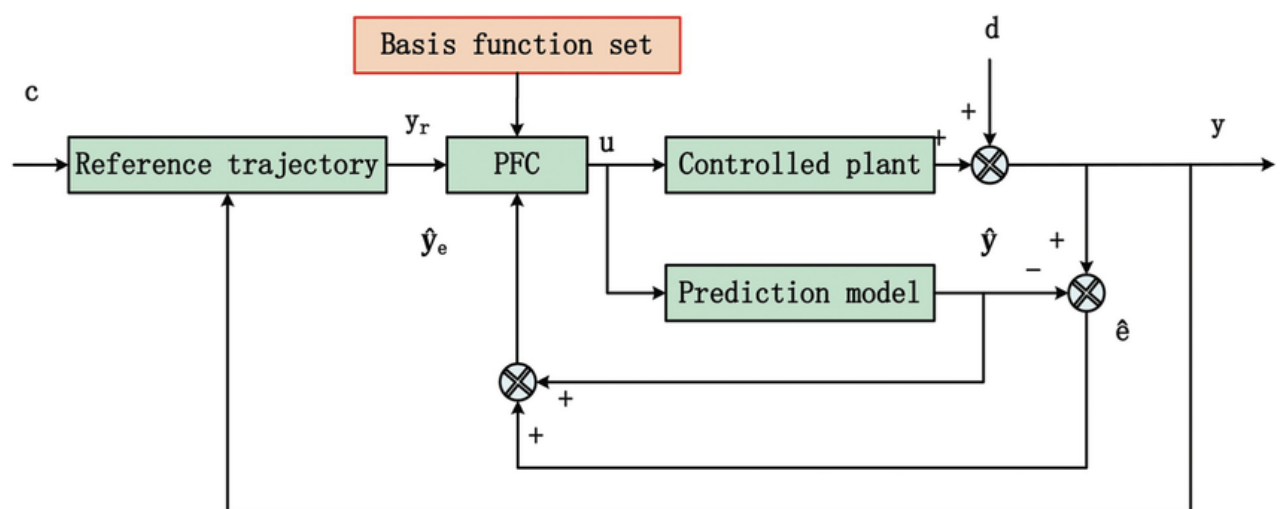


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи автоматичного керування, що функціонує за алгоритмом Predictive Functional Control

Таке коригування дає змогу зменшити вплив неточності моделі, повільної зміни параметрів об'єкта або неврахованих збурень. Для процесу запалювання шихти це є важливим, оскільки властивості об'єкта можуть змінюватися залежно від стану футерування, складу газу, висоти шару, вологості шихти та режиму роботи агломераційної машини.

Для практичної реалізації прогнозуючого керування необхідно правильно вибрати період дискретизації, горизонт прогнозування та параметри опорної траєкторії. Період дискретизації має бути достатньо малим, щоб відображати динаміку температурного контуру, але не створювати надмірного обчислювального навантаження на контролер. Горизонт прогнозування має бути співмірним із постійною часу та запізненням об'єкта. Якщо горизонт занадто короткий, регулятор не встигатиме врахувати майбутню реакцію температури. Якщо горизонт занадто довгий, керування може стати менш чутливим до поточних змін.

У контексті процесу запалювання шихти прогнозуючий регулятор доцільно використовувати як основний регулятор температурного контуру. Водночас контур співвідношення газ/повітря може бути реалізований за класичним ratio- або ПІ-принципом, оскільки він є швидшим і простішим за температурний контур. Така структура дозволяє поєднати переваги прогнозуючого керування для повільного теплового об'єкта з надійністю традиційних промислових регуляторів для допоміжних контурів.

Порівняно з класичним ПІД-регулюванням прогнозує керування має низку переваг для процесу запалювання. Воно дозволяє враховувати запізнення, формувати більш плавні керуючі дії, обмежувати витрату газу, прогнозувати майбутню температуру та зменшувати ризик перерегулювання. Разом з тим ефективність такого підходу залежить від якості математичної моделі та правильності налаштування параметрів регулятора. Тому наступним етапом роботи є формалізація об'єкта керування та побудова динамічної моделі температурного контуру, яка буде використана для синтезу прогнозуючого регулятора у другому розділі.

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Таким чином, прогнозує керування є доцільним підходом для керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині, оскільки воно відповідає основним особливостям об'єкта: інерційності, запізненню, наявності технологічних обмежень і дії збурень. Для бакалаврської роботи найбільш раціональним є використання спрощеного варіанта прогнозує керування типу PFC/MFC, який забезпечує достатню якість керування та водночас залишається придатним для реалізації на рівні промислового програмованого логічного контролера.

1.7 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз технологічного процесу агломерації, особливостей роботи зони запалювання шихти, існуючих систем автоматизації та методів керування показав, що процес запалювання є однією з ключових стадій роботи агломераційної машини. Саме у зоні горна формуються початкові умови для подальшого розвитку фронту горіння, від яких залежать рівномірність спікання, положення точки закінчення процесу, якість готового агломерату та енергоефективність роботи агрегату [6, 7, 10].

З погляду автоматичного керування зона запалювання є складним теплотехнічним об'єктом. Для неї характерні теплова інерційність, транспортне запізнення, залежність температури від витрати та теплотворної здатності газового палива, вплив співвідношення газу й повітря, а також дія зовнішніх технологічних збурень. До таких збурень належать коливання тиску газу, зміна складу палива, висоти шару шихти, швидкості руху палетної стрічки, вологості та гранулометричного складу матеріалу [10-12].

Існуючі системи автоматизації агломераційних машин переважно базуються на локальних контурах регулювання температури, витрати газу, витрати повітря, розрідження та швидкості палетної стрічки. Такі рішення є надійними та технологічно зрозумілими, однак їхні можливості обмежуються в умовах значної інерційності та запізнення температурного контуру. Класичне

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

регулювання за поточною похибкою не завжди дає змогу завчасно компенсувати збурення, що може призводити до коливань температури під горном, перевитрати газу або погіршення умов запалювання [10, 13, 14].

Аналіз сучасних методів керування показав, що перспективним напрямом удосконалення системи автоматизації зони запалювання є використання прогнозуючих алгоритмів. На відміну від класичних регуляторів, прогнозує керування використовує математичну модель об'єкта для оцінювання майбутньої поведінки температури на певному горизонті часу. Це дозволяє враховувати інерційність, запізнення, технологічні обмеження на витрату газу та допустиму швидкість зміни керуючого впливу [13-16].

У межах цієї бакалаврської роботи доцільно зосередитися на розробленні системи прогнозуючого керування температурою під горном запалювання. При цьому повна деталізована модель агломераційного процесу не є необхідною для досягнення поставленої мети, оскільки основним завданням є не моделювання всього процесу спікання, а синтез практично придатного алгоритму керування локальним температурним контуром. Тому як основу для подальшого проектування доцільно використати спрощену динамічну модель каналу «витрата газу – температура під горном» у вигляді ланки першого порядку із запізненням.

Об'єктом дослідження у роботі є процес запалювання шихти на агломераційній машині.

Предметом дослідження є математична модель, структура та алгоритм прогнозуючого керування температурним режимом горна запалювання агломераційної машини.

Метою бакалаврської роботи є розроблення та апробація системи прогнозуючого керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині, спрямованої на підвищення стабільності температури під горном і забезпечення раціонального використання газового палива.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати технологічний процес агломерації та визначити роль зони запалювання шихти у формуванні якості агломерату;
- розглянути зону запалювання як об'єкт автоматизації та визначити основні керуючі впливи, регульовані величини, контрольовані параметри й технологічні збурення;
- проаналізувати існуючі системи автоматизації агломераційних машин і визначити їхні переваги та обмеження для задачі керування температурою під горном;
- виконати огляд методів керування процесом запалювання шихти та обґрунтувати доцільність застосування прогнозуючого керування;
- сформувати математичний опис температурного контуру горна запалювання з урахуванням інерційності та запізнення;
- обґрунтувати структуру системи керування з основним прогнозуючим контуром температури та підлеглим контуром підтримання співвідношення газ/повітря;
- розробити алгоритм прогнозуючого керування температурою під горном на основі спрощеної динамічної моделі об'єкта;
- виконати імітаційне дослідження роботи запропонованої системи керування та оцінити якість перехідних процесів;
- запропонувати варіант практичної реалізації системи на рівні промислового програмованого логічного контролера та верхнього рівня АСУ ТП.

У роботі приймається, що основним керуючим впливом температурного контуру є витрата газового палива до пальникових пристроїв горна. Основною регульованою величиною є температура під горном, яка характеризує інтенсивність теплового впливу на верхній шар шихти. Додатковим важливим параметром є коефіцієнт надлишку повітря, що визначає якість формування газоповітряної суміші та умови повного згоряння палива.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Для спрощення задачі проєктування передбачається декомпозиція системи керування на два взаємопов'язані контури. Перший контур є основним і відповідає за прогнозує керування температурою під горном шляхом зміни витрати газу. Другий контур є підлеглим і відповідає за підтримання раціонального співвідношення газу й повітря. Такий підхід дозволяє зменшити складність задачі керування та водночас зберегти технологічно важливий зв'язок між тепловим режимом і умовами горіння.

Під час розроблення системи керування необхідно врахувати такі технологічні обмеження:

- витрата газу не повинна виходити за мінімально та максимально допустимі межі;
- зміна витрати газу має бути достатньо плавною для забезпечення стабільного горіння та зменшення навантаження на виконавчі механізми;
- коефіцієнт надлишку повітря повинен підтримуватися у технологічно допустимому діапазоні;
- алгоритм керування має враховувати запізнення температурної реакції на зміну витрати газу;
- система повинна бути придатною для реалізації на промисловому контролері у реальному часі.

Очікуваним результатом роботи є структура системи прогнозного керування процесом запалювання шихти, математична модель температурного контуру, алгоритм розрахунку керуючого впливу та результати імітаційного дослідження, які підтверджують працездатність запропонованого підходу. Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманих результатів як основи для модернізації локальної системи керування горном запалювання у складі АСУ ТП агломераційної машини.

Таким чином, подальша частина буде спрямована на проєктування системи прогнозного керування процесом запалювання шихти. У другому розділі буде виконано формалізацію об'єкта керування, побудовано динамічну модель температурного контуру, обґрунтовано структуру системи керування,

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

розроблено алгоритм прогнозуючого регулювання та проведено його апробацію засобами імітаційного моделювання.

Висновки за розділом:

У першому розділі було розглянуто технологічні особливості процесу агломерації та визначено роль зони запалювання шихти у формуванні подальшого теплового режиму агломераційної машини. Встановлено, що саме на стадії запалювання створюються початкові умови для розвитку фронту горіння твердого палива у шарі шихти. Від стабільності температури під горном, рівномірності прогріву верхнього шару та правильності формування газоповітряної суміші залежать якість спікання, положення точки закінчення процесу, міцність готового агломерату та ефективність використання газового палива.

Проаналізовано зону запалювання шихти як об'єкт автоматизації. Показано, що основними керуючими впливами є витрата газового палива та витрата повітря на горіння, а основними регульованими величинами — температура під горном і коефіцієнт надлишку повітря. До основних збурень належать коливання тиску та теплотворної здатності газу, зміна висоти шару шихти, швидкості палетної стрічки, вологості та властивостей матеріалу. Таке поєднання керованих і некерованих факторів обумовлює складність підтримання стабільного температурного режиму.

Розглянуто існуючі системи автоматизації агломераційних машин. Встановлено, що сучасні АСУ ТП агломераційного процесу зазвичай мають багаторівневу структуру та включають підсистеми дозування компонентів шихти, завантаження, запалювання, підтримання вакуумного режиму, керування швидкістю палетної стрічки, контролю точки закінчення спікання, охолодження та газоочищення. Показано, що традиційні локальні контури регулювання забезпечують базову стабілізацію параметрів, однак мають обмеження при керуванні інерційними тепловими об'єктами із запізненням.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Виконано аналіз методів керування процесом запалювання шихти. Розглянуто ручне та напівавтоматичне керування, класичне ПД-регулювання, каскадне та ratio-регулювання, нечіткі регулятори, нейромережеві та адаптивні підходи, гібридні інтелектуальні системи, керування за прогнозом ВТР, а також методи прогнозуючого керування. Визначено, що класичні регулятори залишаються ефективними для швидких локальних контурів, однак для температурного контуру горна запалювання, який має інерційність і запізнення, доцільним є використання модельно-орієнтованого прогнозуючого підходу.

Розглянуто основні типи математичних моделей процесів запалювання та спікання. Показано, що повні фізико-хімічні моделі шару забезпечують детальний опис процесів тепломасообміну, горіння та руху фронту спікання, однак є складними для безпосереднього використання у контурі керування в реальному часі. Для задач синтезу промислового регулятора більш придатними є редуковані динамічні моделі, зокрема модель першого порядку із запізненням, яка дозволяє врахувати головні властивості температурного контуру: статичне підсилення, теплову інерційність і транспортне запізнення.

Обґрунтовано доцільність застосування прогнозуючого керування для процесу запалювання шихти. Такий підхід дозволяє використовувати математичну модель об'єкта для прогнозування майбутньої температури під горном, враховувати запізнення, обмеження на витрату газу та допустиму швидкість зміни керуючого впливу. Для умов бакалаврської роботи найбільш раціональним є використання спрощеного варіанта прогнозуючого керування типу PFC/MFC, який поєднує достатню якість керування з можливістю практичної реалізації на промисловому програмованому логічному контролері.

У результаті проведеного аналізу сформульовано постановку задачі бакалаврської роботи. Подальше дослідження має бути спрямоване на формалізацію процесу запалювання шихти як об'єкта автоматичного керування, побудову динамічної моделі температурного контуру, обґрунтування структури системи з основним прогнозуючим контуром температури та підлеглим контуром співвідношення газ/повітря, розроблення

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алгоритму прогнозуючого керування й перевірку його працездатності засобами імітаційного моделювання.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
						54
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ТА АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАПАЛЮВАННЯ ШИХТИ НА АГЛОМЕРАЦІЙНІЙ МАШИНІ

2.1 Формалізація процесу запалювання як об'єкта автоматичного керування

Проектування системи керування процесом запалювання шихти доцільно розпочати з формалізації об'єкта автоматичного керування. Така формалізація передбачає визначення меж об'єкта, керуючих впливів, регульованих величин, контрольованих параметрів, збурень і основних взаємозв'язків між ними. Це дозволяє перейти від технологічного опису процесу до структурної та математичної моделі, придатної для синтезу алгоритму прогнозуючого керування.

Об'єктом керування у межах цієї роботи є зона запалювання шихти агломераційної машини. Її основним технологічним призначенням є нагрівання верхнього шару шихти до температури, достатньої для займання твердого палива. Після виходу палет із-під горна подальше горіння відбувається вже за рахунок твердого палива, що міститься у шихті, а фронт горіння поступово переміщується вниз по висоті шару під дією розрідження у вакуум-камерах.

Зона запалювання включає горн із футерованим корпусом, пальникові пристрої, газовий і повітряний колектори, регулювальні органи подачі газу й повітря, засоби вимірювання температури, тиску та витрати, а також елементи технологічного захисту. Межі об'єкта доцільно визначити від точки регулювання подачі газу та повітря до пальників до виходу палет із зони безпосереднього теплового впливу горна.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Тарасенко Б. С.			РОЗДІЛ 2				Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Харламенко В.Ю.									25	37
Н. Контр.		Маринич І.А.			КНУ АКІТ-22							
Затверд.		Маринич І.А.										

З погляду автоматичного керування зона запалювання є тепловим об'єктом, у якому зміна витрати газу впливає на кількість теплоти, що виділяється під час горіння, а отже – на температуру під горном. Однак ця залежність не є миттєвою. Між зміною положення регулювального клапана, зміною витрати газу, зміною інтенсивності горіння, передачею тепла до газового об'єму горна, футерування та верхнього шару шихти існує певна затримка. Саме тому температурний контур має інерційний характер і транспортне запізнення.

Основним керуючим впливом для температурного режиму горна є витрата газового палива до пальникових пристроїв. Збільшення витрати газу приводить до збільшення теплопритоку в зону запалювання, а зменшення – до його зниження. У подальшому математичному описі цей вплив позначається як Q_g .

Другим важливим керуючим впливом є витрата повітря на горіння. Вона визначає умови згоряння газового палива та впливає на коефіцієнт надлишку повітря. У подальшому описі витрата повітря позначається як Q_a . Надмірна подача повітря може охолоджувати факел і знижувати температуру продуктів горіння, тоді як недостатня подача повітря може призводити до неповного згоряння палива. Тому витрата повітря повинна змінюватися узгоджено з витратою газу.

Основною регульованою величиною у зоні запалювання є температура під горном T_g . Вона характеризує інтенсивність теплового впливу на верхній шар шихти та безпосередньо пов'язана з якістю запалювання твердого палива. Саме стабілізація температури під горном є головною задачею системи керування.

Другою важливою регульованою або розрахунковою величиною є коефіцієнт надлишку повітря α . Він визначає співвідношення фактичної витрати повітря до теоретично необхідної для повного згоряння газового палива. Підтримання α у технологічно допустимому діапазоні забезпечує стабільне та енергоефективне горіння.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Узагальнено вектор керуючих впливів можна подати у вигляді:

$$u = [Q_g; Q_a], \quad (2.1)$$

де u – вектор керуючих впливів; Q_g – витрата газового палива; Q_a – витрата повітря на горіння.

Вектор регульованих величин має вигляд:

$$y = [T_g; \alpha], \quad (2.2)$$

де y – вектор регульованих величин; T_g – температура під горном; α – коефіцієнт надлишку повітря.

Крім керуючих і регульованих величин, у процесі запалювання необхідно враховувати збурення. До основних збурюючих впливів належать коливання тиску газу перед пальниками, зміна нижчої теплоти згоряння палива, зміна висоти шару шихти, швидкості палетної стрічки, вологості та гранулометричного складу матеріалу. Частина цих величин може вимірюватися або оцінюватися, однак вони не регулюються безпосередньо локальною системою керування горном.

Вектор основних збурень можна подати так:

$$f = [P_g; Q_n; h; v_s; W], \quad (2.3)$$

де f – вектор збурень; P_g – тиск газу перед пальниками; Q_n – нижча теплота згоряння газового палива; h – висота шару шихти; v_s – швидкість палетної стрічки; W – вологість шихти.

Окрему групу становлять контрольовані параметри, які не обов'язково використовуються як безпосередні регульовані величини, але необхідні для діагностики, контролю якості процесу та роботи технологічних захистів. До них належать температури у вакуум-камерах, розрідження під палетами, склад відхідних газів, наявність полум'я, положення регулювальних органів, аварійні сигнали та стан виконавчих механізмів.

Загальний взаємозв'язок між керуючими впливами, збуреннями та вихідними величинами можна подати у вигляді:

$$y(t) = G(p) \cdot u(t) + G_f(p) \cdot f(t), \quad (2.4)$$

де $y(t)$ – вектор регульованих величин; $u(t)$ – вектор керуючих впливів; $f(t)$ – вектор збурень; $G(p)$ – матриця передавальних функцій каналів керування; $G_f(p)$ – матриця передавальних функцій каналів збурень; p – оператор Лапласа.

У розгорнутому вигляді матриця каналів керування має вигляд:

$$G(p) = [[G_{11}(p), G_{12}(p)]; [G_{21}(p), G_{22}(p)]], \quad (2.5)$$

де $G_{11}(p)$ – канал впливу витрати газу Q_g на температуру під горном T_g ; $G_{12}(p)$ – канал впливу витрати повітря Q_a на температуру T_g ; $G_{21}(p)$ – канал впливу витрати газу Q_g на коефіцієнт надлишку повітря α ; $G_{22}(p)$ – канал впливу витрати повітря Q_a на коефіцієнт надлишку повітря α .

З фізичного погляду найбільш важливим є канал $G_{11}(p)$, тобто канал «витрата газу – температура під горном». Саме він визначає основну динаміку температурного режиму горна та є базовим для синтезу прогнозуючого регулятора. Цей канал має значну інерційність і запізнення, оскільки зміна теплопритоку проявляється у виміряній температурі не миттєво.

Канал $G_{22}(p)$, тобто «витрата повітря – коефіцієнт надлишку повітря», є швидшим і простішим. Він пов'язаний переважно з пневматичною динамікою повітропроводу, виконавчого механізму та витратоміра. Тому для цього каналу доцільно використовувати класичне ПІ- або ratio-регулювання.

Перехресні канали $G_{12}(p)$ і $G_{21}(p)$ також існують, однак їхній вплив у межах нормального робочого діапазону можна вважати другорядним. Зміна витрати повітря певною мірою впливає на температуру факела, але цей вплив значно слабший за вплив витрати газу. Зміна витрати газу впливає на розрахункове значення α , однак цей зв'язок може бути компенсований за рахунок автоматичного формування завдання витрати повітря пропорційно до витрати газу.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

З урахуванням цього доцільно виконати декомпозицію початкової багатовимірної задачі на два локальні контури:

– основний температурний контур « $Q_g \rightarrow T_g$ », у якому прогнозуючий регулятор формує завдання витрати газу для підтримання температури під горном;

– підлеглий контур співвідношення « $Q_a \rightarrow \alpha$ », у якому забезпечується підтримання раціонального співвідношення газу й повітря.

Така структура дозволяє зменшити складність системи керування та водночас зберегти технологічно важливий зв'язок між температурним режимом і умовами горіння. Основний прогнозуючий контур компенсує повільну теплову динаміку та запізнення, а підлеглий контур забезпечує швидке підтримання необхідного газоповітряного співвідношення.

Для подальшого синтезу алгоритму керування основну увагу необхідно зосередити на температурному каналі. Саме він визначає якість запалювання та є найбільш складним з погляду автоматичного регулювання. У подальших підрозділах цей канал буде описано спрощеною динамічною моделлю першого порядку із запізненням, яка має достатню точність для задачі прогнозуючого керування та може бути реалізована у дискретному вигляді на промисловому програмованому логічному контролері.

Таким чином, формалізація процесу запалювання шихти як об'єкта автоматичного керування дозволила визначити основні входи, виходи, збурення та контрольовані параметри системи. Встановлено, що для задачі бакалаврської роботи доцільно використовувати двоконтурну структуру: основний прогнозуючий температурний контур за витратою газу та підлеглий контур підтримання співвідношення газ/повітря. Така постановка створює основу для подальшого обґрунтування структури системи керування та побудови математичної моделі температурного контуру.

2.2 Формалізація процесу запалювання як об'єкта автоматичного керування

На основі формалізації процесу запалювання шихти як об'єкта автоматичного керування необхідно обґрунтувати структуру системи, яка буде використана для подальшого синтезу алгоритму прогнозного керування. Вихідна постановка задачі передбачає наявність двох основних керуючих впливів – витрати газового палива Q_g та витрати повітря на горіння Q_a , а також двох основних вихідних величин – температури під горном T_g та коефіцієнта надлишку повітря α . Тому у загальному випадку зона запалювання може розглядатися як багатовимірний об'єкт типу МІМО.

Повна МІМО-структура системи керування передбачала б одночасний розрахунок двох керуючих впливів з урахуванням усіх прямих і перехресних зв'язків між входами та виходами. Такий підхід є найбільш загальним з теоретичного погляду, однак для практичної реалізації у складі промислової АСУ ТП він може бути надмірно складним. Крім того, для задачі бакалаврської роботи важливо отримати структуру, яка є достатньо обґрунтованою, але водночас придатною для реалізації на рівні програмованого логічного контролера.

Як було показано у підрозділі 2.1, матриця каналів керування для зони запалювання може бути подана у вигляді формули (2.5).

З фізичного погляду найбільш суттєвим є канал $G_{11}(p)$, оскільки саме витрата газу визначає основну частину теплопритоку до горна. Збільшення Q_g приводить до збільшення кількості теплоти, що виділяється під час горіння, і після певного запізнення спричиняє підвищення температури T_g . Цей канал є повільним, інерційним і має транспортне запізнення, тому саме він є основним об'єктом для застосування прогнозного керування.

Канал $G_{22}(p)$, який описує вплив витрати повітря Q_a на коефіцієнт надлишку повітря α , є значно швидшим.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Його динаміка визначається переважно інерційністю повітропроводу, регулювального органу та витратоміра. На відміну від температурного каналу, цей контур не має значної теплової інерційності, тому для нього доцільним є використання простішого ПІ або ratio-регулювання.

Перехресний канал $G_{12}(p)$, тобто вплив витрати повітря на температуру під горном, існує, але у робочому діапазоні є відносно слабким. Зміна витрати повітря може впливати на температуру факела через зміну коефіцієнта надлишку повітря, однак цей вплив значно менший порівняно з впливом витрати газу. Якщо коефіцієнт надлишку повітря підтримується у технологічно допустимому діапазоні, зміна Q_a не є головним фактором формування температурного режиму горна.

Перехресний канал $G_{21}(p)$, тобто вплив витрати газу на коефіцієнт надлишку повітря, має більш очевидний характер: при фіксованій витраті повітря збільшення Q_g зменшує α , а зменшення Q_g – збільшує α . Однак цей зв'язок може бути ефективно компенсований структурно, якщо завдання витрати повітря формувати пропорційно до поточної або заданої витрати газу. Саме на цьому базується принцип ratio control.

Для кількісного обґрунтування доцільності декомпозиції багатовимірного об'єкта на окремі контури може використовуватися матриця відносних підсилень Брістола, або RGA. Її елементи характеризують ступінь взаємодії між входами й виходами багатовимірної системи. У спрощеному вигляді елемент RGA можна подати як:

$$\lambda_{ij} = \frac{K_{ij_o}}{K_{ij_c}}, \quad (2.6)$$

де λ_{ij} – елемент матриці відносних підсилень; K_{ij_o} – підсилення каналу при розімкнених інших контурах; K_{ij_c} – підсилення каналу при замкнених інших контурах.

Якщо діагональні елементи RGA-матриці близькі до одиниці, відповідне сполучення вхідної та вихідної величини є доцільним, а взаємодія між контурами є слабкою. Якщо ж діагональні елементи суттєво відрізняються від

одиниці або мають від'ємні значення, це свідчить про сильну взаємодію між каналами та необхідність повноцінного багатовимірного керування.

Для зони запалювання шихти на основі аналізу фізичних зв'язків між параметрами та оцінки статичних підсилень можна прийняти таку RGA-матрицю:

$$\Lambda = [[0,92, 0,08]; [0,08, 0,92]], \quad (2.7)$$

де Λ – матриця відносних підсилень для об'єкта керування; діагональні елементи 0,92 відповідають прямим каналам $Q_g \rightarrow T_g$ та $Q_a \rightarrow \alpha$; позадіагональні елементи 0,08 характеризують слабкі перехресні зв'язки.

Отримана матриця показує, що діагональні елементи є близькими до одиниці, а позадіагональні – малими. Це означає, що для зони запалювання доцільно обрати такі пари керування:

$$Q_g \rightarrow T_g, \quad Q_a \rightarrow \alpha. \quad (2.8)$$

Перша пара відповідає основному температурному контуру, у якому витрата газу використовується для підтримання температури під горном. Друга пара відповідає контуру співвідношення газ/повітря, у якому витрата повітря використовується для підтримання заданого коефіцієнта надлишку повітря.

На основі цього можна обґрунтувати декомпозицію початкової МІМО-задачі на два слабо взаємодіючі SISO-контури. Такий підхід має кілька важливих переваг. По-перше, він суттєво спрощує математичний опис і синтез регуляторів. По-друге, він відповідає фізичній природі процесу, оскільки основний тепловий вплив реалізується через витрату газу, а якість горіння забезпечується через співвідношення газу й повітря. По-третє, така структура є більш зрозумілою та прийнятною для промислової експлуатації, оскільки базується на типовій логіці побудови локальних контурів АСУ ТП.

У межах цієї роботи пропонується структура системи керування, що складається з двох взаємопов'язаних рівнів. Зовнішній, або головний, контур відповідає за керування температурою під горном T_g .

У ньому прогнозуючий регулятор на основі моделі температурного каналу формує завдання витрати газу Q_{gset} . Внутрішній, або підлеглий, контур відповідає за підтримання співвідношення газ/повітря. Він формує та реалізує завдання витрати повітря Q_{aset} відповідно до поточного завдання витрати газу та заданого коефіцієнта надлишку повітря α_{set} .

Завдання витрати повітря у контурі співвідношення може бути розраховане за виразом:

$$Q_{aset} = \alpha_{set} \cdot V_{a0} \cdot Q_{gset}, \quad (2.9)$$

де Q_{aset} – задана витрата повітря на горіння; α_{set} – заданий коефіцієнт надлишку повітря; V_{a0} – теоретично необхідний об'єм повітря для згоряння одиниці об'єму газу; Q_{gset} – завдання витрати газу, сформоване температурним регулятором.

Формула (2.9) показує, що контур повітря структурно підпорядковується температурному контуру. Якщо прогнозуючий регулятор збільшує завдання витрати газу, завдання витрати повітря автоматично збільшується пропорційно. Якщо завдання витрати газу зменшується, відповідно зменшується й завдання витрати повітря. Така структура дозволяє підтримувати стабільне співвідношення газу й повітря в усьому робочому діапазоні.

Загальна логіка роботи системи керування може бути описана так. Оператор або верхній рівень АСУ ТП задає бажану температуру під горном T_{gset} та бажаний коефіцієнт надлишку повітря α_{set} . Прогнозуючий регулятор температури порівнює задану температуру з виміряною, використовує внутрішню модель температурного каналу та розраховує необхідне значення витрати газу Q_{gset} . Далі блок ratio control на основі Q_{gset} і α_{set} формує завдання витрати повітря Q_{aset} . Локальні регулятори витрати газу й повітря реалізують ці завдання через відповідні виконавчі механізми.

Для практичної реалізації доцільно передбачити такі функціональні блоки системи (рис. 2.1):

- блок вимірювання та фільтрації температури під горном;
- блок прогнозуючого регулятора температури;
- блок обмеження витрати газу та швидкості її зміни;
- блок формування завдання витрати повітря за принципом ratio control;
- локальний регулятор витрати газу;
- локальний регулятор витрати повітря;
- блок контролю коефіцієнта надлишку повітря;
- блок технологічних захистів і блокувань;
- блок обміну даними з SCADA/HMI.

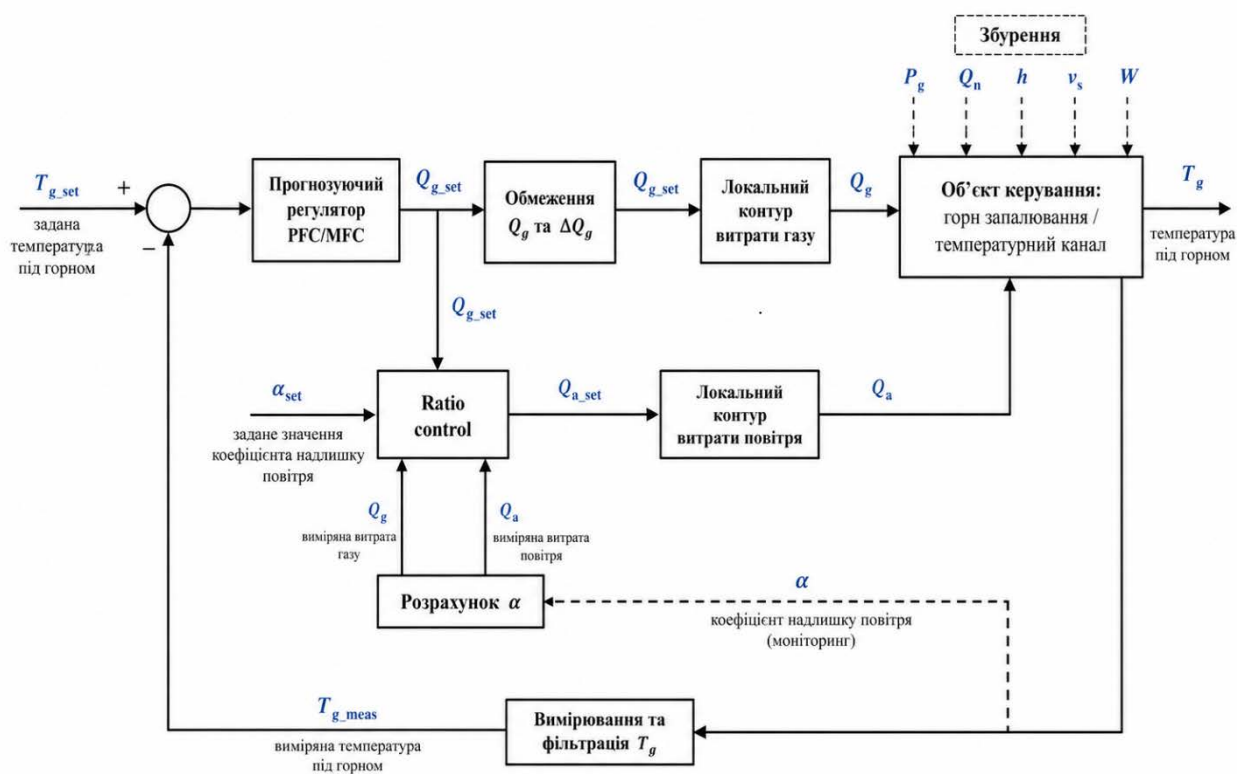


Рисунок 2.1 – Структури системи прогнозуючого керування процесом запалювання шихти

У запропонованій структурі прогнозуючий регулятор не керує безпосередньо всіма параметрами горна, а формує завдання для головного енергетичного впливу – витрати газу. Це відповідає фізичній природі процесу,

оскільки саме витрата газу визначає основну кількість теплоти, що надходить у зону запалювання. Водночас контур повітря забезпечує правильні умови згоряння та запобігає порушенню газоповітряного співвідношення при зміні Q_{gset} .

Важливою перевагою запропонованої структури є можливість урахування технологічних обмежень. На виході прогнозуючого регулятора необхідно встановити блок обмеження, який не дозволяє сформувати завдання витрати газу нижче мінімально допустимого або вище максимально допустимого значення. Крім того, доцільно обмежити швидкість зміни витрати газу за один такт керування. Це забезпечує плавність зміни теплового режиму та зменшує навантаження на регулювальний клапан.

Обмеження на завдання витрати газу можна подати у вигляді:

$$Q_{gmin} \leq Q_{gset}(k) \leq Q_{gmax}, \quad (2.10)$$

де Q_{gmin} , Q_{gmax} – мінімально та максимально допустимі витрати газу відповідно; $Q_{gset}(k)$ – завдання витрати газу на поточному кроці керування.

Обмеження на швидкість зміни завдання витрати газу має вигляд:

$$\Delta Q_{gmin} \leq \Delta Q_{gset}(k) \leq \Delta Q_{gmax}, \quad (2.11)$$

де $\Delta Q_{gset}(k)$ – зміна завдання витрати газу за один крок; ΔQ_{gmin} і ΔQ_{gmax} – допустимі межі зменшення та збільшення витрати газу за один крок.

Крім обмежень на витрату газу, необхідно контролювати допустимий діапазон коефіцієнта надлишку повітря:

$$\alpha_{min} \leq \alpha(k) \leq \alpha_{max}, \quad (2.12)$$

де α_{min} і α_{max} – мінімально та максимально допустимі значення коефіцієнта надлишку повітря; $\alpha(k)$ – поточне розрахункове значення коефіцієнта надлишку повітря.

У разі виходу α за допустимі межі система повинна формувати попередження оператору або виконувати коригувальні дії у контурі повітря. Якщо ж порушення пов'язане з несправністю витратоміра, клапана,

вентилятора або датчика, повинна спрацьовувати логіка технологічного захисту.

Порівняльну характеристику можливих структур керування для зони запалювання наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння можливих структур системи керування зоною запалювання

Структура керування	Основна ідея	Переваги	Обмеження
Один локальний ПІД-регулятор температури	Зміна витрати газу за похибкою температури	Простота реалізації, наявність стандартних ПЛК-блоків	Не враховує прогноз, запізнення та обмеження у явному вигляді
Каскадна система ПІД + регулятор витрати	Температурний регулятор формує завдання витрати газу	Краща стабілізація витрати, менший вплив швидких збурень	Температурний контур залишається чутливим до запізнення
МІМО-регулятор для Q_g і Q_a	Одночасне керування температурою та α з урахуванням усіх зв'язків	Теоретично повний опис взаємодії каналів	Висока складність моделі, налаштування та реалізації
Прогнозуючий регулятор температури + ratio control	PFC/MFC формує Q_{gset} , а Q_{aset} розраховується за співвідношенням газ/повітря	Врахування запізнення температурного контуру, простота реалізації, технологічна зрозумілість	Потребує моделі температурного каналу та налаштування горизонту прогнозу

З аналізу таблиці видно, що структура з прогнозуючим регулятором температури та підлеглим контуром ratio control є раціональним компромісом між складністю й ефективністю. Вона дозволяє врахувати головну динамічну особливість об'єкта – запізнення температурної реакції на зміну витрати газу – і водночас не потребує побудови повної багатовимірної оптимізаційної системи.

Запропонована структура також добре узгоджується з ієрархією промислової автоматизації. Прогнозуючий алгоритм може бути реалізований на рівні програмованого логічного контролера як функціональний блок, що працює з періодом дискретизації, достатнім для температурного контуру. Локальні контури витрати газу й повітря можуть працювати з меншим періодом циклу та забезпечувати швидку реалізацію завдань. Верхній рівень SCADA/HMI використовується для завдання уставок, візуалізації температури, витрат, коефіцієнта надлишку повітря, трендів і аварійних повідомлень.

Таким чином, обґрунтовано доцільність побудови системи керування процесом запалювання шихти у вигляді двоконтурної структури. Основний контур виконує прогнозує керування температурою під горном шляхом зміни витрати газу, а підлеглий контур забезпечує підтримання заданого співвідношення газу й повітря. Така структура враховує фізичні властивості об'єкта, результати аналізу взаємодії каналів, технологічні обмеження та вимоги до промислової реалізації. У наступному підрозділі буде побудовано математичну модель температурного контуру, необхідну для синтезу прогнозуючого регулятора.

2.3 Формалізація процесу запалювання як об'єкта автоматичного керування

Після обґрунтування структури системи керування побудуємо математичну модель основного температурного контуру, який описує вплив витрати газового палива на температуру під горном запалювання. Саме цей контур є найбільш важливим для задачі прогнозуючого керування, оскільки температура під горном визначає якість запалювання верхнього шару шихти, а зміна витрати газу є основним способом впливу на тепловий режим горна.

Температурний контур «витрата газу – температура під горном» є інерційним тепловим об'єктом із запізненням. Зміна положення

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювального клапана газу спочатку приводить до зміни витрати газу в магістралі, потім змінений потік надходить до пальникових пристроїв, змінюється інтенсивність горіння, після чого теплота передається газовому об'єму горна, футеруванню та верхньому шару шихти. Лише через певний час зміна теплового стану фіксується температурними датчиками. Тому модель температурного контуру повинна враховувати як теплову інерційність, так і транспортне запізнення.

З фізичного погляду акумулювання теплової енергії у зоні запалювання відбувається у декількох основних складових: газовому об'ємі робочого простору горна, футеруванні склепіння та бокових стінок, а також у верхньому шарі шихти, який нагрівається до температури запалювання твердого палива. Кожна з цих складових має власну теплоємність, тому реакція температури під горном на зміну витрати газу не може бути миттєвою.

Для попереднього аналізу процесу можна використати спрощений тепловий баланс зони запалювання. У цьому балансі прихід теплоти формується переважно за рахунок згоряння газового палива, а витрати теплоти пов'язані з нагріванням шихти, винесенням теплоти продуктами горіння та втратами через футерування горна. У спрощеному вигляді баланс можна записати у вигляді виразу (1.2).

З рівняння (1.3) видно, що температура під горном залежить не лише від витрати газу Q_g , але й від його теплотворної здатності Q_n та умов повноти згоряння. Це пояснює, чому коливання складу газового палива або порушення співвідношення газ/повітря можуть впливати на температуру навіть при незмінному положенні регулювального клапана.

Для задачі автоматичного керування повна теплофізична модель горна є надмірно складною. У контурі прогнозуючого керування доцільно використати спрощену динамічну модель, яка відображає головні властивості температурного каналу: статичне підсилення, теплову інерційність і запізнення. Для цього температурний контур описується моделлю першого порядку із запізненням, або FOPDT-моделлю, що описується виразом (1.4).

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Параметри моделі можуть бути визначені двома основними способами: теоретично, на основі теплового балансу та конструктивних характеристик горна, або експериментально, за реакцією об'єкта на ступінчасту зміну витрати газу. У промислових умовах більш практичним є метод кривої розгону, за якого на стабільному режимі виконується невелика зміна завдання витрати газу, після чого фіксується перехідний процес температури під горном.

Статичний коефіцієнт підсилення за кривою розгону визначається як відношення усталеної зміни температури до зміни витрати газу:

$$K_T = \frac{\Delta T_{g\infty}}{\Delta Q_g}, \quad (2.13)$$

де $\Delta T_{g\infty}$ – усталена зміна температури під горном після завершення перехідного процесу; ΔQ_g – зміна витрати газового палива.

Час запізнення τ_T визначається як проміжок від моменту зміни витрати газу до моменту початку помітної реакції температури. Постійна часу T_T може бути визначена за методом дотичної або як час, протягом якого вихідна величина досягає приблизно 63 % від усталеного приросту після віднімання часу запізнення. Такий підхід є типовим для ідентифікації об'єктів, які можуть бути наближено описані FOPDT-моделлю.

У межах цієї роботи для температурного контуру прийнято параметри, наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Прийняті параметри моделі температурного контуру

Параметр	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Статичний коефіцієнт підсилення	K_T	°С·год/м³	0,85
Постійна часу	T_T	с	45
Час запізнення	τ_T	с	8
Відношення запізнення до постійної часу	$\frac{\tau_T}{T_T}$	–	0,18

Значення відношення $\frac{\tau_T}{T_T} = 0,18$ свідчить про те, що температурний контур належить до об'єктів із помірним запізненням. Для таких об'єктів використання FOPDT-моделі є доцільним, оскільки вона достатньо добре відтворює основну динаміку процесу і водночас залишається простою для подальшої дискретизації та реалізації у прогнозуючому регуляторі.

Підставляючи прийняті параметри у вираз (1.4), отримуємо конкретну передавальну функцію температурного контуру:

$$G_{T(p)} = \frac{0,85 \cdot e^{-8p}}{45p + 1}, \quad (2.14)$$

Отримана модель описує зміну температури під горном при зміні витрати газу в околі номінального робочого режиму. Слід зазначити, що модель (2.16) є лінеаризованою. Тому її доцільно використовувати не для опису всіх можливих режимів роботи горна, а для задачі стабілізації температури в межах нормального технологічного діапазону.

Для подальшого синтезу прогнозуючого регулятора необхідно перейти від безперервної моделі до дискретної. Це пов'язано з тим, що алгоритм PFC/MFC реалізується у програмованому логічному контролері та працює з певним періодом дискретизації. Вибір періоду дискретизації має забезпечити достатню точність відтворення динаміки температурного контуру та водночас не створювати надмірного обчислювального навантаження.

Для температурного контуру приймається період дискретизації:

$$T_s = 1 \text{ с}, \quad (2.15)$$

де T_s – період дискретизації алгоритму прогнозуючого керування.

Оскільки постійна часу температурного контуру становить 45 с, період дискретизації 1 с є достатньо малим для адекватного опису динаміки об'єкта. Такий період також є зручним для реалізації на промисловому контролері, оскільки температурний процес є повільним і не потребує надто малого циклу обчислення прогнозуючого алгоритму.

Дискретизація безперервної частини FOPDT-моделі без урахування чистого запізнення виконується методом фіксатора нульового порядку. Для

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аперіодичної ланки першого порядку коефіцієнт a дискретної моделі визначається як:

$$a = e^{-\frac{T_s}{T_T}}, \quad (2.16)$$

де a – коефіцієнт, що характеризує збереження попереднього стану моделі; T_s – період дискретизації; T_T – постійна часу температурного контуру.

Коефіцієнт b , який визначає вплив керуючого впливу на зміну виходу за один такт, обчислюється за формулою:

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

де b – коефіцієнт впливу витрати газу у дискретній моделі; K_T – статичний коефіцієнт підсилення температурного контуру.

Підставляючи числові значення $T_s = 1$ с та $T_T = 45$ с, отримаємо:

$$a = e^{-\frac{1}{45}} = 0,9780. \quad (2.18)$$

Тоді коефіцієнт b дорівнює:

$$b = 0,85 \cdot (1 - 0,9780) = 0,01867. \quad (2.19)$$

Чисте запізнення у дискретній моделі задається цілим числом тактів. Воно визначається як відношення часу запізнення до періоду дискретизації:

$$d = \text{round}\left(\frac{\tau_T}{T_s}\right), \quad (2.20)$$

де d – кількість тактів запізнення; τ_T – час чистого запізнення; T_s – період дискретизації.

Для прийнятих параметрів:

$$d = \text{round}\left(\frac{8}{1}\right) = 8. \quad (2.21)$$

Оскільки модель є лінеаризованою в околі робочої точки, надалі доцільно використовувати змінні відхилення. Позначимо:

$$\theta_g(k) = T_g(k) - T_{g0}, \quad (2.22)$$

$$q_g(k) = Q_g(k) - Q_{g0}, \quad (2.23)$$

де $\theta_g(k)$ – відхилення температури під горном від номінального значення; $T_g(k)$ – поточна температура під горном; T_{g0} – номінальна температура; $q_g(k)$

– відхилення витрати газу від номінального значення; $Q_g(k)$ – поточна витрата газу; Q_{g0} – номінальна витрата газу.

У змінних відхилення дискретна модель температурного контуру набуває вигляду:

$$\theta_g(k) = a \cdot \theta_g(k-1) + b \cdot q_g(k-d-1). \quad (2.24)$$

Після підстановки числових значень коефіцієнтів маємо різницеве рівняння:

$$\theta_g(k) = 0,9780 \cdot \theta_g(k-1) + 0,01867 \cdot q_g(k-9). \quad (2.25)$$

Використання індексу $k-9$ пояснюється тим, що в моделі враховується запізнення $d=8$ тактів і один такт дискретної аперіодичної ланки. Тобто поточна температура залежить не від поточного значення витрати газу, а від керуючого впливу, сформованого раніше.

Для переходу від змінних відхилення до фактичного значення температури використовується співвідношення:

$$T_g(k) = T_{g0} + \theta_g(k). \quad (2.26)$$

де $T_g(k)$ – фактична температура під горном; T_{g0} – номінальна температура під горном; $\theta_g(k)$ – відхилення температури від номінального значення.

Аналогічно фактична витрата газу визначається як:

$$Q_g(k) = Q_{g0} + q_g(k). \quad (2.27)$$

де $Q_g(k)$ – фактична витрата газового палива; Q_{g0} – номінальна витрата газу; $q_g(k)$ – відхилення витрати газу від номінального значення.

Для подальшого моделювання можна прийняти номінальну робочу точку:

$$T_{g0} = 1180 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2.28)$$

$$Q_{g0} = 1150 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (2.29)$$

Номінальна температура $1180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідає середині технологічного діапазону температури під горном, а номінальна витрата газу $1150 \text{ м}^3/\text{год}$ – середині прийнятого робочого діапазону витрати газового палива. Відхилення

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

від цієї точки вважаються достатньо малими, щоб лінеаризована модель залишалася придатною для синтезу регулятора.

Отримана дискретна модель є основою для прогнозування майбутньої температури під горном. На кожному кроці алгоритм прогнозуючого керування використовує поточне значення температури, внутрішній стан моделі та історію попередніх значень витрати газу, які зберігаються у буфері запізнення. Це дозволяє розрахувати прогноз температури на заданому горизонті та сформулювати нове завдання витрати газу.

Для реалізації запізнення у програмному алгоритмі необхідно використовувати кільцевий буфер керуючих впливів довжиною не менше $d + 1$. У цьому буфері зберігаються попередні значення q_g , а в рівнянні моделі використовується те значення, яке відповідає часу запізнення. Для прийнятих параметрів потрібно зберігати щонайменше 9 попередніх значень керуючого впливу.

Основні переваги отриманої моделі для задачі прогнозуючого керування полягають у такому:

- модель має невелику кількість параметрів і є зручною для інженерного налаштування;
- вона враховує головні динамічні властивості температурного контуру: інерційність і запізнення;
- модель легко переводиться у дискретну форму;
- реалізація моделі у програмованому логічному контролері не потребує складних обчислень;
- модель може бути використана для побудови прогнозу температури на горизонті PFC/MFC-регулятора.

Водночас необхідно враховувати обмеження такої моделі. Вона не описує просторовий розподіл температур у шарі шихти, не враховує детально зміну складу газу, вологості шихти, стану пальників і футерування. Ці фактори розглядаються як збурення або як причини можливої зміни параметрів об'єкта. Тому під час практичного застосування моделі доцільно передбачати корекцію

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

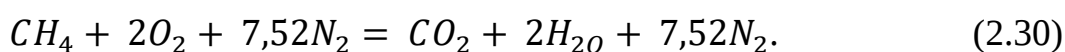
прогнозу за поточною помилкою між реальною температурою та температурою, розрахованою внутрішньою моделлю.

Таким чином, побудовано математичну модель температурного контуру зони запалювання шихти. Канал «витрата газу – температура під горном» описано передавальною функцією першого порядку із запізненням, прийнято параметри моделі, виконано її дискретизацію та отримано різницеве рівняння, придатне для програмної реалізації. Отримана модель буде використана у наступних підрозділах для синтезу алгоритму прогнозуючого керування температурою під горном.

2.4 Модель контуру співвідношення газ/повітря

У запропонованій структурі системи керування процесом запалювання шихти основний прогнозуючий контур формує завдання витрати газового палива, необхідне для підтримання температури під горном. Однак сама по собі зміна витрати газу не гарантує ефективного та безпечного горіння. Для повного згоряння палива необхідно забезпечити відповідну кількість повітря, тобто підтримувати раціональне співвідношення між витратою газу та витратою повітря. Тому підлеглий контур співвідношення газ/повітря є обов’язковою складовою системи керування горном запалювання.

Фізичною основою побудови цього контуру є стехіометрія горіння газового палива. Природний газ складається переважно з метану CH_4 з домішками етану, пропану, азоту, діоксиду вуглецю та інших компонентів. Для інженерного розрахунку потреби у повітрі природний газ часто наближено розглядають як паливо, еквівалентне метану за теплотворною здатністю. Реакція повного згоряння метану має вигляд:



З рівняння (2.30) видно, що для повного згоряння одного об’єму метану необхідно два об’єми кисню. Оскільки в атмосферному повітрі міститься

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

приблизно 21 % кисню, теоретична потреба у повітрі для згоряння одного об'єму метану становить:

$$V_{a0} = \frac{2}{0,21} = 9,52. \quad (2.31)$$

де V_{a0} – теоретично необхідний об'єм повітря для згоряння одиниці об'єму газу, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$.

Для реального природного газу з урахуванням наявності вищих вуглеводнів і домішок теоретична потреба у повітрі може дещо змінюватися. У практичних розрахунках для природного газу доцільно приймати:

$$V_{a0} = 9,5 \dots 9,7 \text{ нм}^3/\text{нм}^3. \quad (2.32)$$

У реальному технологічному процесі повітря подається не точно у стехіометричній кількості, а з певним надлишком. Це необхідно для забезпечення повнішого згоряння палива, компенсації нерівномірності змішування газу з повітрям і зменшення ризику утворення СО. Надлишок повітря характеризується коефіцієнтом α , який визначається як відношення фактичної витрати повітря до теоретично необхідної.

Фактична витрата повітря для заданої витрати газу може бути записана як:

$$Q_a = \alpha \cdot V_{a0} \cdot Q_g, \quad (2.33)$$

де Q_a – фактична витрата повітря на горіння; α – коефіцієнт надлишку повітря; V_{a0} – теоретично необхідний об'єм повітря для згоряння одиниці об'єму газу; Q_g – витрата газового палива.

Звідси коефіцієнт надлишку повітря визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{Q_a}{V_{a0} \cdot Q_g}. \quad (2.34)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря; Q_a – виміряна витрата повітря; Q_g – виміряна витрата газу; V_{a0} – теоретично необхідний об'єм повітря для згоряння одиниці об'єму газу.

Для процесу запалювання шихти коефіцієнт α повинен підтримуватися у технологічно допустимому діапазоні.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Недостатнє значення α призводить до дефіциту кисню, неповного згоряння газу, зниження теплової ефективності та можливого утворення чадного газу. Надмірне значення α також є небажаним, оскільки надлишкове повітря охолоджує факел, знижує температуру продуктів горіння і може погіршувати умови запалювання верхнього шару шихти. Для горна запалювання доцільним є підтримання α у межах приблизно 1,05–1,15.

У системі керування коефіцієнт α може використовуватися у двох режимах: як розрахункова контрольована величина для моніторингу повноти горіння та як цільова величина для формування завдання витрати повітря. У межах цієї роботи використовується другий підхід, за якого задана витрата повітря формується автоматично залежно від завдання витрати газу, що надходить від прогнозуючого температурного регулятора.

Принцип ratio control полягає у тому, що одна змінна вважається провідною, а друга – підлеглою. У даному випадку провідною змінною є завдання витрати газу Q_{gset} , оскільки саме воно формується основним прогнозуючим регулятором температури. Підлеглою змінною є завдання витрати повітря Q_{aset} , яке повинно змінюватися пропорційно до витрати газу.

Завдання витрати повітря визначається за формулою (1.5).

Для зручності реалізації у програмі ПЛК вираз (1.5) можна подати через коефіцієнт співвідношення k_R :

$$Q_{aset} = k_R \cdot Q_{gset}, \quad (2.35)$$

$$k_R = \alpha_{set} \cdot V_{a0}. \quad (2.36)$$

де k_R – коефіцієнт співвідношення газ/повітря.

Наприклад, якщо прийняти $\alpha_{set} = 1,10$ та $V_{a0} = 9,6 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$, то коефіцієнт співвідношення становитиме:

$$k_R = 1,10 \cdot 9,6 = 10,56. \quad (2.37)$$

За номінальної витрати газу $Q_{gset} = 1150 \text{ м}^3/\text{год}$ задана витрата повітря дорівнюватиме:

$$Q_{aset} = 10,56 \cdot 1150 = 12144 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (2.38)$$

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримане значення відповідає типовому робочому діапазону витрати повітря на горіння для зони запалювання агломераційної машини. Це підтверджує узгодженість прийнятих параметрів із технологічними умовами роботи горна.

Динамічно контур витрати повітря є значно швидшим за температурний контур. Якщо температурний канал має постійну часу порядку десятків секунд, то повітряний контур визначається переважно інерційністю регулювального клапана, повітропроводу та витратоміра. Тому для опису динаміки повітряного контуру може бути використана спрощена модель першого порядку із запізненням:

$$G_a(p) = \frac{K_a \cdot e^{-\tau_a p}}{T_a p + 1}. \quad (2.39)$$

де $G_a(p)$ – передавальна функція контуру витрати повітря; K_a – статичний коефіцієнт підсилення; T_a – постійна часу повітряного контуру; τ_a – час запізнення; p – оператор Лапласа.

Для подальшого моделювання приймаються параметри повітряного контуру, наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Прийняті параметри моделі контуру витрати повітря

Параметр	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Статичний коефіцієнт підсилення	K_a	–	1,0
Постійна часу	T_a	с	2,5
Час запізнення	τ_a	с	0,8
Заданий коефіцієнт надлишку повітря	α_{set}	–	1,10
Теоретична потреба у повітрі	V_{a0}	нм ³ /нм ³	9,6

Підставляючи параметри з таблиці 2.3 у вираз (2.39), отримаємо:

$$G_a(p) = \frac{1,0 \cdot e^{-0,8p}}{2,5p + 1}. \quad (2.40)$$

Порівняння постійних часу температурного та повітряного контурів показує, що повітряний контур є значно швидшим. Для прийнятих параметрів:

$$\frac{T_T}{T_a} = \frac{45}{2,5} = 18. \quad (2.41)$$

де T_T – постійна часу температурного контуру; T_a – постійна часу повітряного контуру.

Отже, повітряний контур приблизно у 18 разів швидший за температурний. Це є важливою передумовою використання каскадної структури керування: підлеглий контур витрати повітря встигає відпрацювати зміну завдання, сформованого основним температурним контуром, значно швидше, ніж істотно зміниться температура під горном.

Для цілей імітаційного дослідження всієї системи керування можливі два варіанти врахування повітряного контуру. У першому варіанті його можна моделювати динамічно за передавальною функцією (2.40). У другому варіанті, якщо основна увага приділяється температурному прогнозуючому регулятору, повітряний контур можна вважати достатньо швидким і наближено описати статичним співвідношенням:

$$Q_a(k) \approx Q_{a_{set}}(k). \quad (2.42)$$

де $Q_a(k)$ – фактична витрата повітря на поточному кроці; $Q_{a_{set}}(k)$ – задана витрата повітря, сформована блоком ratio control.

У цій роботі для проєктування структури системи керування контур співвідношення газ/повітря розглядається як швидкий підлеглий контур, який забезпечує реалізацію заданого коефіцієнта надлишку повітря. Основна задача прогнозуючого керування при цьому зосереджується у температурному контурі, оскільки саме він має значну інерційність і запізнення.

У програмній реалізації алгоритм контуру співвідношення може бути поданий у такій послідовності:

- зчитування поточного завдання витрати газу $Q_{g_{set}}$, сформованого прогнозуючим регулятором температури;
- зчитування заданого коефіцієнта надлишку повітря α_{set} ;
- розрахунок коефіцієнта співвідношення k_R ;
- формування завдання витрати повітря $Q_{a_{set}}$;
- передача $Q_{a_{set}}$ до локального регулятора витрати повітря;
- зчитування вимірених витрат Q_g та Q_a ;
- обчислення поточного коефіцієнта надлишку повітря α ;
- контроль перебування α у допустимому діапазоні;
- формування попереджень або аварійних сигналів у разі виходу параметра за допустимі межі.

Для безпечної роботи горна необхідно передбачити обмеження на витрату повітря:

$$Q_{a_{min}} \leq Q_{a_{set}}(k) \leq Q_{a_{max}}. \quad (2.43)$$

де $Q_{a_{min}}$ – мінімально допустима витрата повітря; $Q_{a_{max}}$ – максимально допустима витрата повітря; $Q_{a_{set}}(k)$ – завдання витрати повітря на поточному кроці керування.

Також необхідно контролювати допустимий діапазон коефіцієнта надлишку повітря:

$$\alpha_{min} \leq \alpha(k) \leq \alpha_{max}. \quad (2.44)$$

де α_{min} і α_{max} – мінімально та максимально допустимі значення коефіцієнта надлишку повітря; $\alpha(k)$ – поточне розрахункове значення коефіцієнта надлишку повітря.

У межах нормального режиму можна прийняти:

$$\alpha_{min} = 1,05, \quad (2.45)$$

$$\alpha_{max} = 1,15. \quad (2.46)$$

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

Якщо поточне значення α виходить за ці межі, система повинна сформулювати попередження оператору. Якщо відхилення є значним або супроводжується іншими аварійними ознаками, наприклад падінням тиску газу, втратою полум'я або несправністю витратоміра, повинна спрацювати логіка технологічного захисту.

Контур співвідношення газ/повітря також має важливе значення для енергоефективності процесу запалювання. Підтримання надлишку повітря у допустимих межах дозволяє уникати як неповного згоряння палива, так і надмірного охолодження факела. Це сприяє стабілізації температури під горном, зменшенню непродуктивних втрат теплоти та покращенню умов запалювання верхнього шару шихти.

Порівняно з температурним контуром, модель співвідношення газ/повітря є простішою. Вона базується на стехіометричному розрахунку та швидкій динаміці локального контуру витрати повітря. Саме тому у запропонованій структурі системи прогнозуючого керування застосовується до повільного температурного каналу, а контур газ/повітря реалізується за класичним принципом ratio control (контроль співвідношення) з локальним регулятором витрати повітря.

Таким чином, побудовано модель контуру співвідношення газ/повітря. Визначено стехіометричну потребу у повітрі для згоряння газового палива, наведено формули для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря та завдання витрати повітря, описано динаміку повітряного контуру і прийнято його параметри. Показано, що контур витрати повітря є значно швидшим за температурний контур, тому може розглядатися як підлеглий стабілізуючий рівень у загальній системі прогнозуючого керування процесом запалювання шихти.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

2.5 Розробка алгоритму прогноуючого керування температурою

Після побудови математичної моделі температурного контуру та опису підлеглого контуру співвідношення газ/повітря необхідно синтезувати алгоритм прогноуючого керування температурою під горном. Основним завданням цього алгоритму є формування такого завдання витрати газу $Q_{g_{set}}$, яке забезпечує наближення температури під горном T_g до заданого значення $T_{g_{set}}$ з урахуванням інерційності, запізнення та технологічних обмежень.

Для температурного контуру у попередньому підрозділі було отримано дискретну модель першого порядку із запізненням. Вона описує зв'язок між відхиленням витрати газу $q_g(k)$ та відхиленням температури під горном $\theta_g(k)$ від номінальної робочої точки. У загальному вигляді модель має вигляд:

$$\theta_g(k) = a \cdot \theta_g(k-1) + b \cdot q_g(k-d-1). \quad (2.47)$$

де $\theta_g(k)$ – відхилення температури під горном від номінального значення; $q_g(k)$ — відхилення витрати газу від номінального значення; a і b – дискретні коефіцієнти моделі; d – кількість тактів запізнення; k – номер поточного дискретного кроку.

Для прийнятих у роботі параметрів температурного контуру:

$$a = 0,9780, \quad (2.48)$$

$$b = 0,01867, \quad (2.49)$$

$$d = 8. \quad (2.50)$$

Задача прогноуючого регулятора полягає у використанні цієї моделі для оцінювання майбутньої температури під горном та розрахунку такого значення керуючого впливу, яке забезпечить наближення температури до заданої траєкторії. У роботі використовується спрощений варіант прогноуючого керування типу PFC/MFC. Його перевагою є те, що закон керування може бути записаний в аналітичній формі без розв'язання складної оптимізаційної задачі на кожному кроці.

Основними елементами алгоритму PFC/MFC є:

- внутрішня дискретна модель температурного контуру;
- буфер запізнення для врахування транспортної затримки;
- корекція прогнозу за помилкою між моделлю та реальним об'єктом;
- опорна траєкторія наближення температури до завдання;
- розрахунок керуючого впливу на горизонті прогнозування;
- обмеження витрати газу та швидкості її зміни.

Для зручності реалізації у програмі ПЛК у внутрішній моделі використовується модель без явного запізнення, а саме:

$$\theta_g(k) = a \cdot \theta_g(k-1) + b \cdot q_g(k-d-1), \quad (2.51)$$

де $\theta_m(k)$ – вихід внутрішньої моделі без урахування запізнення; $\theta_m(k-1)$ – попереднє значення виходу моделі; $q_g(k-1)$ – попереднє значення керуючого впливу у змінних відхилення.

Запізнення враховується окремо за допомогою кільцевого буфера. У буфер записуються попередні значення виходу внутрішньої моделі, а для порівняння з реальною температурою використовується затримане значення:

$$\theta_{md}(k) = \text{delay}_d(\theta_m(k)), \quad (2.52)$$

де $\theta_{md}(k)$ – вихід моделі з урахуванням запізнення; delay_d – оператор затримки на d дискретних тактів.

Оскільки реальний об'єкт завжди відрізняється від моделі, у PFC/MFC-алгоритмі вводиться помилка моделі. Вона визначається як різниця між виміряною температурою та затриманим виходом моделі:

$$e_m(k) = \theta_g(k) - \theta_{md}(k), \quad (2.53)$$

де $e_m(k)$ – поточна помилка моделі; $\theta_g(k)$ – виміряне відхилення температури під горном; $\theta_{md}(k)$ – затримане значення виходу внутрішньої моделі.

Помилка $e_m(k)$ використовується для корекції прогнозу. Завдяки цьому регулятор частково компенсує неточність параметрів моделі, дію неврахованих збурень і повільну зміну властивостей об'єкта. Це є важливим для процесу запалювання шихти, оскільки температура під горном може

змінюватися під впливом коливань теплотворної здатності газу, висоти шару, вологості шихти та стану паликових пристроїв.

Прогнозуючий регулятор виконує розрахунок керуючого впливу на горизонті прогнозування H . У цій роботі приймається:

$$H = 45 \text{ тактів.} \quad (2.54)$$

Оскільки період дискретизації $T_s = 1$ с, горизонт прогнозування відповідає 45 с. Таке значення є співмірним із постійною часу температурного контуру $T_T = 45$ с і дозволяє оцінювати майбутню поведінку температури на характерному інтервалі зміни об'єкта.

Для прогнозу на горизонті H використовується коефіцієнт:

$$a_H = a^H. \quad (2.55)$$

де a_H – коефіцієнт загасання вільної реакції моделі на горизонті прогнозування; a – дискретний коефіцієнт моделі; H – горизонт прогнозування.

З урахуванням безперервних параметрів об'єкта цей коефіцієнт також можна записати як:

$$a_H = e^{-H \cdot \frac{T_s}{T_T}}. \quad (2.56)$$

де T_s – період дискретизації; T_T – постійна часу температурного контуру.

Для прийнятих параметрів:

$$a_H = e^{-45 \cdot \frac{1}{45}} = e^{-1} = 0,3679. \quad (2.57)$$

Другим важливим параметром є коефіцієнт чутливості моделі на горизонті прогнозування:

$$g_s = K_T \cdot (1 - a_H). \quad (2.58)$$

де g_s – статична чутливість моделі на горизонті H ; K_T – статичний коефіцієнт підсилення температурного контуру; a_H – коефіцієнт загасання вільної реакції.

Підставляючи числові значення, отримаємо:

$$g_s = 0,85 \cdot (1 - 0,3679) = 0,5373. \quad (2.59)$$

Коефіцієнт g_s показує, наскільки зміниться прогнозоване значення температури на горизонті H при зміні витрати газу. Саме цей коефіцієнт використовується у законі розрахунку керуючого впливу.

Для забезпечення плавного наближення температури до завдання вводиться опорна траєкторія. Вона задає бажане значення температури на горизонті прогнозування. У роботі використовується експоненційна опорна траєкторія, яка визначається виразом:

$$T_{rH}(k) = T_{gset}(k) - (T_{gset}(k) - T_g(k)) \cdot \alpha_H, \quad (2.60)$$

де $T_{rH}(k)$ – бажане значення температури на горизонті H ; $T_{gset}(k)$ – задана температура під горном; $T_g(k)$ – поточна виміряна температура; α_H – коефіцієнт наближення до завдання на горизонті H .

Коефіцієнт α_H визначається через бажану сталу часу замкненої системи λ :

$$\alpha_H = e^{-H \cdot \frac{T_s}{\lambda}}, \quad (2.61)$$

де λ – бажана стала часу замкненої системи; H – горизонт прогнозування; T_s – період дискретизації.

У цій роботі приймається:

$$\lambda = 20 \text{ с.} \quad (2.62)$$

Тоді:

$$\alpha_H = e^{-45 \cdot \frac{1}{20}} = 0,1054. \quad (2.63)$$

Це означає, що на горизонті прогнозування бажана температура повинна пройти значну частину шляху від поточного значення до заданого. При цьому перехід залишається достатньо плавним і не потребує різких змін витрати газу.

Для використання у законі керування значення $T_{rH}(k)$ доцільно перевести у змінні відхилення:

$$\theta_{rH}(k) = T_{rH}(k) - T_{g0}, \quad (2.64)$$

де $\theta_{rH}(k)$ – бажане відхилення температури на горизонті H ; $T_{rH}(k)$ – бажане абсолютне значення температури на горизонті; T_{g0} – номінальна температура під горном.

Вільний прогноз моделі на горизонті H без додаткової зміни керуючого впливу визначається як:

$$\theta_{fH}(k) = a_H \cdot \theta_m(k) + e_m(k), \quad (2.65)$$

де $\theta_{fH}(k)$ – скоригований вільний прогноз температури на горизонті H ; $\theta_m(k)$ – поточний стан внутрішньої моделі; a_H – коефіцієнт загасання моделі на горизонті H ; $e_m(k)$ – поточна помилка моделі.

Різниця між бажаним значенням температури на горизонті та вільним прогнозом визначає, наскільки потрібно змінити керуючий вплив. У спрощеному PFC/MFC-законі керування відхилення витрати газу розраховується як:

$$q_{g_{raw}}(k) = \frac{\theta_{rH}(k) - \theta_{fH}(k)}{g_s}, \quad (2.66)$$

де $q_{g_{raw}}(k)$ – необмежене розрахункове відхилення витрати газу; $\theta_{rH}(k)$ – бажане відхилення температури на горизонті H ; $\theta_{fH}(k)$ – скоригований вільний прогноз температури на горизонті H ; g_s – чутливість моделі на горизонті прогнозування.

Після цього розраховане відхилення витрати газу переводиться у фактичне завдання витрати:

$$Q_{g_{raw}}(k) = Q_{g0} + q_{g_{raw}}(k), \quad (2.67)$$

де $Q_{g_{raw}}(k)$ – необмежене завдання витрати газу; Q_{g0} – номінальна витрата газу; $q_{g_{raw}}(k)$ – розраховане відхилення витрати газу від номінального значення.

Отримане значення $Q_{g_{raw}}(k)$ не можна безпосередньо подавати на виконавчий механізм, оскільки воно може вийти за технологічно допустимі межі або змінитися надто різко. Тому в алгоритмі обов'язково застосовуються обмеження.

Спочатку визначається необмежена зміна керуючого впливу:

$$\Delta Q_{g_{raw}}(k) = Q_{g_{raw}}(k) - Q_{g_{set}}(k-1), \quad (2.68)$$

де $\Delta Q_{g_{raw}}(k)$ – розрахована зміна завдання витрати газу; $Q_{g_{raw}}(k)$ – необмежене нове значення завдання; $Q_{g_{set}}(k-1)$ – завдання витрати газу на попередньому кроці.

Далі застосовується обмеження швидкості зміни витрати газу:

$$\Delta Q_g(k) = \min(\max(\Delta Q_{g_{raw}}(k), -\Delta Q_{g_{max}}), \Delta Q_{g_{max}}), \quad (2.69)$$

де $\Delta Q_g(k)$ – обмежена зміна завдання витрати газу; $\Delta Q_{g_{max}}$ – максимально допустима зміна витрати газу за один крок.

У цій роботі приймається:

$$\Delta Q_{g_{max}} = 50 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (2.70)$$

Після обмеження швидкості зміни формується проміжне значення завдання:

$$Q_{g_{tmp}}(k) = Q_{g_{set}}(k-1) + \Delta Q_g(k), \quad (2.71)$$

де $Q_{g_{tmp}}(k)$ – проміжне значення завдання витрати газу після обмеження швидкості зміни.

Потім застосовується обмеження за мінімальною та максимальною витратою газу:

$$Q_{g_{set}}(k) = \min(\max(Q_{g_{tmp}}(k), Q_{g_{min}}), Q_{g_{max}}), \quad (2.72)$$

де $Q_{g_{set}}(k)$ – остаточне завдання витрати газу; $Q_{g_{min}}$ – мінімально допустима витрата газу; $Q_{g_{max}}$ – максимально допустима витрата газу.

У межах цієї роботи приймаються такі обмеження:

$$Q_{g_{min}} = 800 \text{ м}^3/\text{год}, \quad (2.73)$$

$$Q_{g_{max}} = 1500 \text{ м}^3/\text{год} , \quad (2.74)$$

Обмеження (2.69) – (2.74) мають важливе практичне значення. Вони не дозволяють регулятору сформувати фізично неможливе або небезпечне завдання витрати газу, а також забезпечують плавність зміни теплового режиму горна. Це особливо важливо для промислових пальникових систем, де різкі зміни витрати палива можуть погіршувати стабільність полум'я та створювати додаткове навантаження на виконавчі механізми.

Загальна послідовність роботи прогнозуючого регулятора на одному кроці дискретного часу може бути подана так (рис. 2.2):

1. Зчитується задана температура $T_{g_{set}}(k)$.
2. Зчитується виміряна температура під горном $T_g(k)$.
3. Обчислюється відхилення температури від номінального значення $\theta_g(k)$.
4. Оновлюється внутрішня модель температурного контуру.
5. Оновлюється кільцевий буфер запізнення та визначається затримане значення виходу моделі.
6. Обчислюється помилка моделі $e_m(k)$.
7. Формується опорна траєкторія $T_{rH}(k)$ на горизонті прогнозування.
8. Обчислюється скоригований вільний прогноз $\theta_{fH}(k)$.
9. За законом PFC/MFC визначається необмежене завдання витрати газу $Q_{g_{raw}}(k)$.
10. Застосовується обмеження швидкості зміни витрати газу.
11. Застосовується обмеження за мінімальною та максимальною витратою газу.
11. Остаточне значення $Q_{g_{set}}(k)$ передається до локального контуру витрати газу та до блоку ratio control для формування завдання витрати повітря.

Основні налаштувальні параметри прогнозуючого регулятора наведено у таблиці 2.4.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

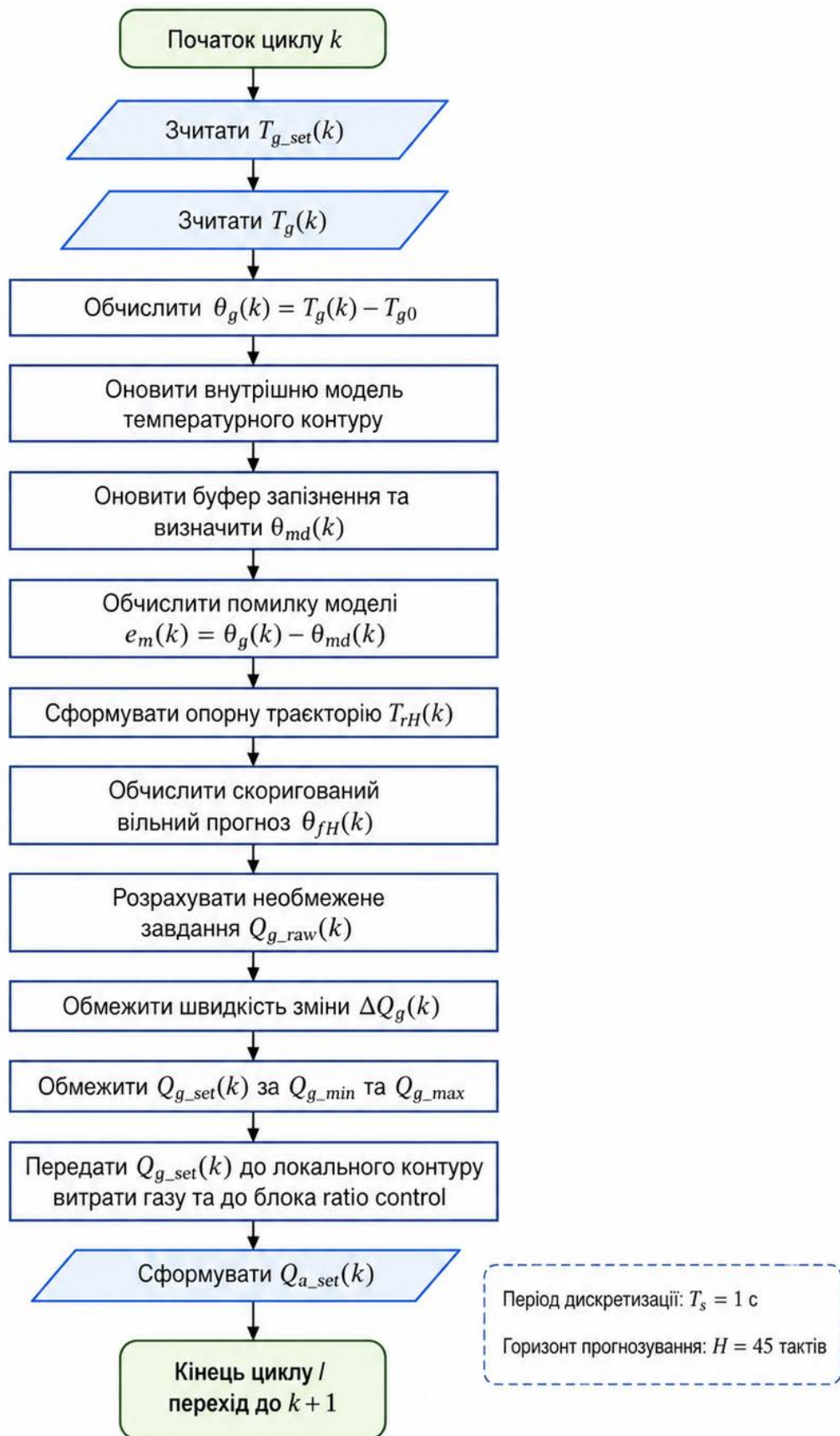


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму загальної послідовності роботи прогнозуючого регулятора на одному кроці дискретного часу

Таблиця 2.4 – Параметри алгоритму прогноуючого керування температурою

Параметр	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Період дискретизації	T_s	с	1
Горизонт прогнозування	H	тактів	45
Бажана стала часу замкненої системи	λ	с	20
Статичний коефіцієнт підсилення моделі	K_T	°С·год/м³	0,85
Постійна часу температурного контуру	T_T	с	45
Час запізнення	τ_T	с	8
Мінімальна витрата газу	Q_{gmin}	м³/год	800
Максимальна витрата газу	Q_{gmax}	м³/год	1500
Максимальна зміна витрати за крок	ΔQ_{gmax}	м³/год	50

Вибір горизонту прогнозування $H = 45$ тактів обумовлений тим, що цей інтервал відповідає одній постійній часу температурного контуру. За такий час об'єкт встигає проявити основну частину своєї реакції на зміну витрати газу. Значення $\lambda = 20$ с задає бажану швидкість наближення температури до завдання. Якщо λ зменшити, регулятор працюватиме агресивніше, але може формувати різкіші зміни витрати газу. Якщо λ збільшити, система стане більш плавною, але повільнішою.

Запропонований алгоритм є придатним для реалізації на промисловому програмованому логічному контролері. Він не потребує розв'язання задачі квадратичного програмування, використовує лише елементарні арифметичні операції, експоненціальну функцію для ініціалізації коефіцієнтів та просту логіку обмежень. Основні розрахунки виконуються один раз за період дискретизації, тобто з кроком 1 с, що є достатнім для повільного температурного контуру горна.

Важливою перевагою алгоритму є можливість роботи з обмеженнями. На відміну від класичного ПІД-регулятора, який формує дію за поточною похибкою, PFC/MFC-регулятор розраховує керуючий вплив з урахуванням майбутньої поведінки температури. Це дозволяє уникати надмірного перерегулювання, зменшувати коливання температури та забезпечувати більш плавну зміну витрати газу.

Разом з тим ефективність прогнозуючого регулятора залежить від адекватності математичної моделі. Якщо параметри K_T , T_T або τ_T суттєво відрізняються від реальних властивостей об'єкта, якість прогнозу може погіршуватися. Для зменшення цього впливу в алгоритмі використовується корекція за помилкою моделі $e_m(k)$. У подальшому така структура може бути доповнена онлайн-ідентифікацією параметрів або перемиканням наборів параметрів для різних режимів роботи горна.

У результаті синтезу отримано алгоритм прогнозуючого керування температурою під горном, який використовує дискретну FOPDT-модель температурного контуру, експоненційну опорну траєкторію, корекцію за помилкою моделі та технологічні обмеження на витрату газу. Отриманий алгоритм формує завдання $Q_{g_{set}}$ для локального контуру витрати газу, а також передає це значення до блоку ratio control, який визначає завдання витрати повітря. У наступному підрозділі доцільно виконати імітаційне дослідження роботи запропонованої системи керування та оцінити якість перехідних процесів.

2.6 Імітаційне моделювання та дослідження системи прогнозуючого керування процесом запалювання шихти

Після синтезу алгоритму прогнозуючого керування було виконано імітаційне дослідження роботи запропонованої системи. Метою дослідження є перевірка працездатності PFC/MFC-регулятора температури під горном,

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оцінювання якості перехідних процесів та порівняння отриманих результатів із класичним PI-регулятором, який може використовуватися у традиційних локальних контурах АСУ ТП.

Моделювання виконувалося на основі дискретної FOPDT-моделі температурного контуру, отриманої у попередніх розділах. Об'єкт моделювання описував канал «витрата газу – температура під горном» з урахуванням інерційності та запізнення. Для PFC/MFC-регулятора використовувалися параметри, прийняті у підрозділі 2.5: період дискретизації $T_s = 1$ с, горизонт прогнозування $H = 45$ тактів, бажана стала часу замкненої системи $\lambda = 20$ с, обмеження витрати газу 800–1500 м³/год та обмеження швидкості зміни витрати газу.

Для порівняння було змодельовано роботу класичного ПІ-регулятора. Його параметри прийнято за методом Зіглера–Нікольса для FOPDT-об'єктів. У моделі ПІ-регулятора також використовувалися ті самі обмеження за мінімальною та максимальною витратою газу, що дозволяє порівнювати саме якість алгоритмів керування.

Для кількісної оцінки якості регулювання використано такі показники: інтегральна абсолютна похибка IAE, інтегральна квадратична похибка ISE, час перехідного процесу t_n , максимальне відхилення температури та перерегулювання σ . Інтегральна абсолютна похибка визначається як:

$$IAE = \sum |e_T(k)| \cdot T_s, \quad (2.73)$$

де IAE – інтегральна абсолютна похибка; $e_T(k)$ – похибка температури на k -му кроці; T_s – період дискретизації.

Похибка температури визначається за формулою:

$$e_T(k) = T_{gset}(k) - T_g(k), \quad (2.73)$$

де $T_{gset}(k)$ — задана температура під горном; $T_g(k)$ — поточна температура під горном.

У межах дослідження розглянуто чотири сценарії:

- відстеження ступінчастої зміни завдання температури з 1180 °С до 1220 °С;
- реакція на падіння тиску природного газу на 10 %;
- реакція на зниження теплотворної здатності газу на 5,7 %;
- комплексний сценарій, у якому послідовно виникають зміна завдання, падіння тиску газу та зменшення теплотворної здатності.

Перший сценарій імітує перехід агломераційної машини на новий температурний режим.

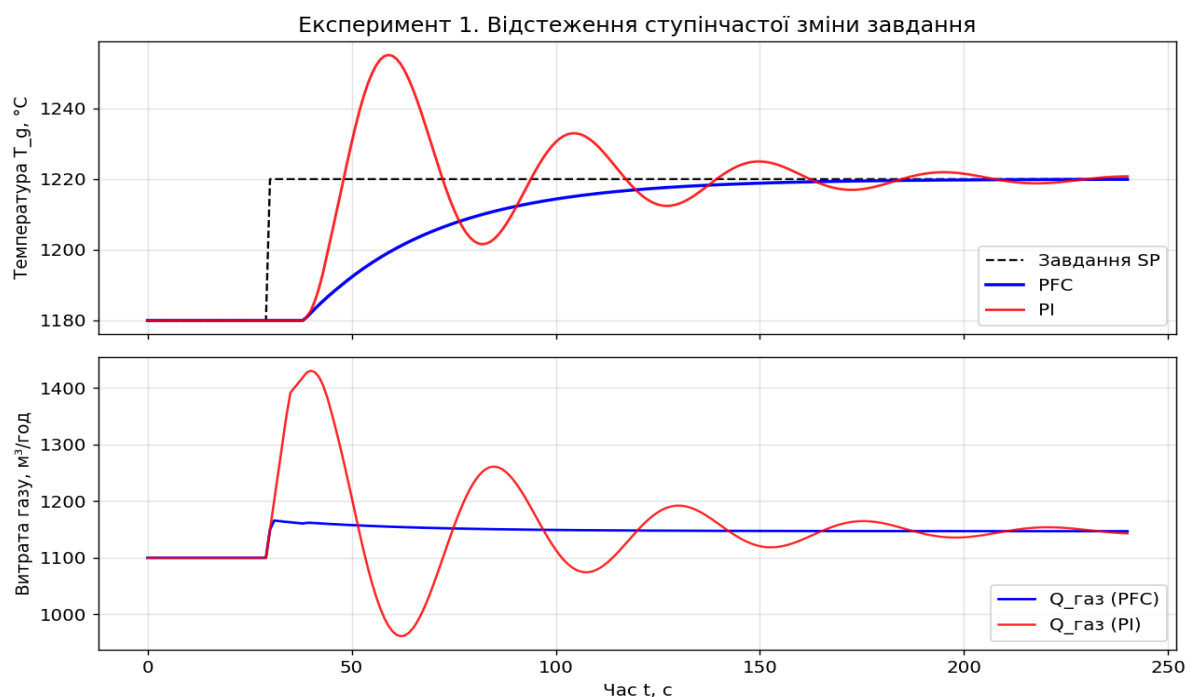


Рисунок 2.3 – Графіки порівняння перехідних процесів при використанні алгоритму прогнозуючого керування та ПІ-регулятора за сценарієм 1 (ступінчаста зміна завдання)

За результатами моделювання PFC/MFC-регулятор забезпечує плавне монотонне наближення температури до нового завдання без перерегулювання. Час перехідного процесу становить 131 с.

ПІ-регулятор реагує швидше на початковому етапі, однак через агресивне налаштування формує значне перерегулювання: температура піднімається приблизно до 1255 °С при заданому значенні 1220 °С. Перерегулювання становить 87,8 %, що для високотемпературного процесу запалювання є небажаним, оскільки може спричиняти перепал верхнього шару шихти та прискорений знос футерування горна.

Другий сценарій відповідає раптовому зниженню тиску газу в магістралі на 10 % (рис. 2.4). У цьому випадку фактична витрата газу через пальники зменшується, що викликає падіння температури під горном. ПІ-регулятор швидше компенсує збурення та має менше максимальне падіння температури, однак його керуючий вплив має коливальний характер. PFC/MFC-регулятор реагує повільніше, оскільки компенсує збурення через помилку внутрішньої моделі, але забезпечує більш плавну зміну витрати газу без різких рухів виконавчого механізму.

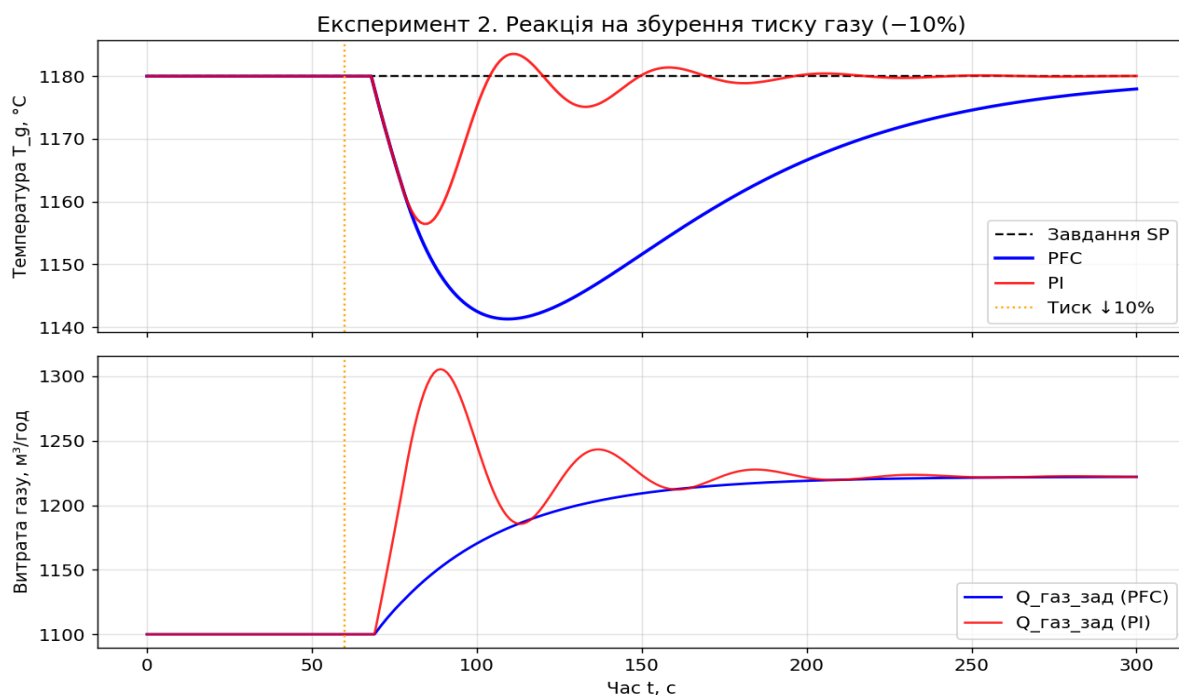


Рисунок 2.4 – Графіки порівняння перехідних процесів при використанні алгоритму прогнозуючого керування та ПІ-регулятора за сценарієм 2 (падіння тиску природного газу на 10 %)

Третій сценарій моделює зниження теплотворної здатності газу на 5,7 %, що може виникати при зміні компонентного складу газового палива. За відсутності регулювання таке збурення призвело б до суттєвого зменшення рівноважної температури (рис. 2.5).

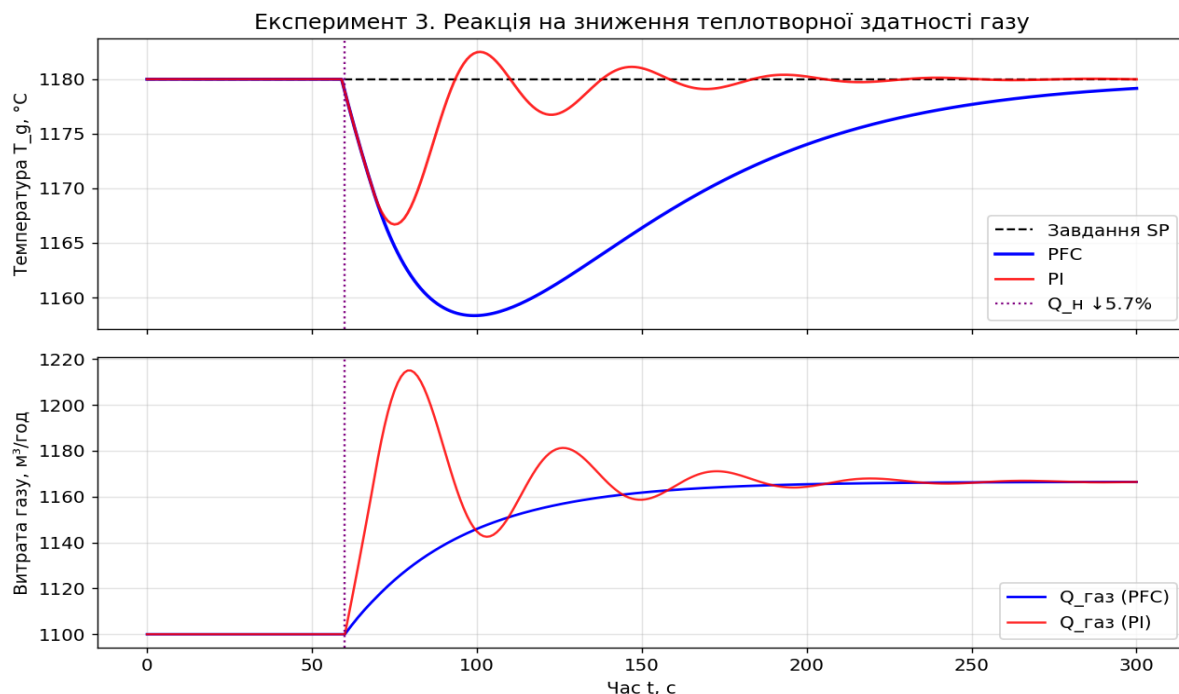


Рисунок 2.5 – Графіки порівняння перехідних процесів при використанні алгоритму прогнозуючого керування та ПІ-регулятора за сценарієм 2 (зниження теплотворної здатності газу на 5,7 %)

У моделі обидва регулятори компенсують це відхилення, проте характер їхньої роботи відрізняється: ПІ-регулятор забезпечує швидше відновлення, але з коливаннями, тоді як PFC/MFC-регулятор забезпечує плавніше, хоча й повільніше повернення температури до заданого рівня.

Четвертий сценарій є найбільш наближеним до реальних умов експлуатації, оскільки передбачає послідовне накладання кількох подій: зміну завдання температури, падіння тиску газу та зниження теплотворної здатності (рис. 2.6). У цьому режимі PFC/MFC-регулятор зберігає стабільний і монотонний характер керування без перерегулювання після зміни завдання. ПІ-регулятор, навпаки, демонструє швидку, але коливальну реакцію, а після

послідовного введення збурень коливання температури та витрати газу стають більш вираженими.

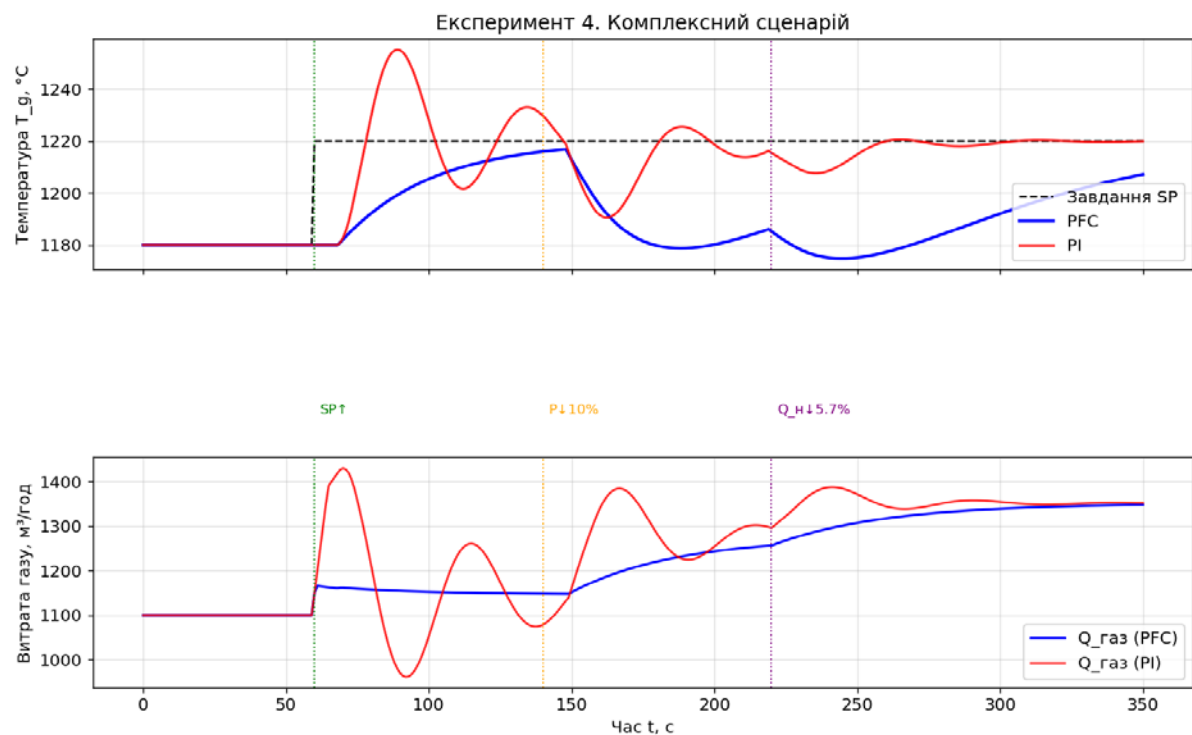


Рисунок 2.6 – Графіки порівняння перехідних процесів при використанні алгоритму прогнозуючого керування та ПІ-регулятора за сценарієм 2 (комплексний сценарій із послідовними збуреннями)

Зведені результати імітаційного дослідження наведено в таблиці 2.5.

Аналіз результатів показує, що ПІ-регулятор із налаштуванням за методом Зіглера–Нікольса забезпечує швидку реакцію на збурення, що відображається у менших значеннях ІАЕ та часу відновлення у сценаріях падіння тиску й зниження теплотворної здатності газу. Однак така швидкодія досягається за рахунок агресивного керування, яке супроводжується значними коливаннями витрати газу та великим перерегулюванням при зміні завдання температури.

РФС/МФС-регулятор має більш помірну реакцію на збурення, але забезпечує принципово важливу для теплового процесу властивість – відсутність перерегулювання при зміні температурного завдання. Керуючий вплив формується плавно, з урахуванням обмеження швидкості зміни витрати

газу, що є важливим для стабільності горіння, зменшення навантаження на регулювальний клапан і безпечної експлуатації горна.

Таблиця 2.5 – Зведені результати імітаційного дослідження системи керування

Сценарій	Регулятор	IAE, °C·с	max	Δy	, °C
Зміна завдання 1180 → 1220 °C	PFC/MFC	1612	40,0	131	0,0
Зміна завдання 1180 → 1220 °C	PI	1833	40,0	193	87,8
Збурення тиску газу –10 %	PFC/MFC	4170	38,7	194	–
Збурення тиску газу –10 %	PI	673	23,6	39	–
Зниження теплотворної здатності –5,7 %	PFC/MFC	2283	21,7	149	–
Зниження теплотворної здатності –5,7 %	PI	397	13,3	27	–
Комплексний сценарій	PFC/MFC	8059	45,2	290	0,0
Комплексний сценарій	PI	2673	40,0	238	87,8

Таким чином, результати імітаційного дослідження підтверджують працездатність запропонованої системи прогнозного керування. Порівняно з класичним ПІ-регулятором PFC/MFC-регулятор забезпечує більш безпечний і технологічно прийнятний характер перехідних процесів: без перерегулювання, з плавною зміною витрати газу та стійкою поведінкою у комплексному сценарії. Це дає підстави вважати прогнозує керування доцільним для застосування у температурному контурі горна запалювання агломераційної машини.

2.7 Методика практичної реалізації алгоритму прогнозного керування процесом запалювання шихти

Після синтезу та імітаційної перевірки алгоритму прогнозного керування необхідно розглянути можливість його практичної реалізації у

складі промислової автоматизованої системи керування. Для цього запропоновану систему доцільно подати як багаторівневу структуру, що поєднує польовий рівень датчиків і виконавчих механізмів, рівень програмованого логічного контролера, рівень візуалізації та рівень збереження й аналізу технологічних даних.

У межах цієї роботи як цільову платформу реалізації доцільно використати промисловий контролер PLCnext AXC F 1152 у поєднанні з верхнім рівнем на базі Node-RED або SCADA/HMI-системи. Такий підхід дозволяє розмістити критичні функції керування безпосередньо на ПЛК, а функції налаштування, моніторингу, архівування та інтеграції з іншими інформаційними системами винести на верхній рівень автоматизації [29-31].

Запропонована архітектура реалізації системи прогнозуючого керування містить чотири основні рівні:

- польовий рівень;
- рівень програмованого логічного контролера;
- рівень візуалізації та диспетчеризації;
- рівень історизації та інтеграції з виробничими інформаційними системами.

Польовий рівень включає датчики температури під горном, витратоміри газу й повітря, датчики тиску, датчики наявності полум'я, газоаналізатори, а також виконавчі механізми регулювання подачі газу та повітря. Саме на цьому рівні формується первинна інформація про стан процесу та реалізуються фізичні керуючі дії, сформовані системою автоматичного керування.

Основними сигналами, що надходять із польового рівня до ПЛК, є виміряна температура під горном T_g , витрата газу Q_g , витрата повітря Q_a , тиск газу P_g , сигнал наявності полум'я F_l та аварійні сигнали від технологічного обладнання.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До основних вихідних сигналів ПЛК належать завдання або керуючі сигнали на регулювальний клапан газу FCV-1 та регулювальний орган повітряного тракту FCV-2.

Рівень програмованого логічного контролера є основним рівнем реалізації алгоритмів реального часу. На цьому рівні виконуються:

- зчитування та фільтрація сигналів від датчиків;
- розрахунок температурного прогнозуючого регулятора PFC/MFC;
- формування завдання витрати газу Q_{gset} ;
- розрахунок завдання витрати повітря Q_{aset} за принципом ratio control;
- реалізація локальних контурів витрати газу та повітря;
- обчислення коефіцієнта надлишку повітря α ;
- контроль технологічних обмежень;
- реалізація аварійних блокувань і міжконтурних захистів.

Алгоритм прогнозуючого керування реалізовано у вигляді окремого функціонального блоку мовою ST (Structured Text) відповідно до стандарту ІЕС 61131-3. Функціональний блок має входи для заданої температури, вимірної температури, ручного завдання, сигналу дозволу автоматичного режиму та параметрів моделі. На виході блок формує завдання витрати газу Q_{gset} , яке передається до локального регулятора витрати газу та до блока ratio control.

Структурно функціональний блок прогнозуючого регулятора містить такі частини:

- ініціалізацію параметрів моделі та налаштувальних коефіцієнтів (рис. 2.7);
- оновлення внутрішньої дискретної моделі температурного контуру;
- реалізацію кільцевого буфера для врахування запізнення;
- розрахунок помилки моделі;
- формування опорної траєкторії на горизонті прогнозування;
- обчислення необмеженого значення керуючого впливу;

```

73 (* ===== ОСНОВНИЙ ЦИКЛ ===== *)
74 IF ENABLE THEN
75
76     (* 1. Оновлення внутрішньої моделі без затримки *)
77     y_model := a * y_model + b * u_prev;
78
79     (* 2. Запис у кільцевий буфер *)
80     y_buffer[buf_idx] := y_model;
81
82     (* 3. Отримання затриманого значення моделі *)
83     y_m_del := y_buffer[(buf_idx - d + 21) MOD 21];
84
85     (* 4. Інкремент індексу буфера *)
86     buf_idx := (buf_idx + 1) MOD 21;
87
88     (* 5. Помилка моделі (model mismatch) *)
89     E_MODEL := PV - y_m_del;
90
91     (* 6. Опорна траєкторія на горизонті *)
92     Y_REF_H := SP - (SP - PV) * alpha_H;
93
94     (* 7. Замкнений закон керування PFC *)
95     u_raw := (Y_REF_H - a_H * y_model - E_MODEL) / g_s;
96
97     (* 8. Обмеження за швидкістю зміни *)
98     IF (u_raw - cv_prev) > DU_MAX THEN
99         u_raw := cv_prev + DU_MAX;
100     ELSIF (cv_prev - u_raw) > DU_MAX THEN
101         u_raw := cv_prev - DU_MAX;
102
103     END_IF;
104     (* 9. Обмеження за насиченням *)
105     IF u_raw < U_MIN THEN
106         CV := U_MIN;
107         SATURATED := TRUE;
108     ELSIF u_raw > U_MAX THEN
109         CV := U_MAX;
110         SATURATED := TRUE;
111     ELSE
112         CV := u_raw;
113         SATURATED := FALSE;
114     END_IF;
115     (* 10. Збереження для наступного циклу *)
116     u_prev := CV;
117     cv_prev := CV;
118     ERR := SP - PV;
119 ELSE
120     (* Manual режим - bumpless transfer *)
121     CV := U_MAN;
122     u_prev := U_MAN;
123     cv_prev := U_MAN;
124     y_model := PV;
125     ERR := 0.0;
126     E_MODEL := 0.0;
127     SATURATED := FALSE;
128 END_IF;
Y_MODEL_OUT := y_model;

```

Рисунок 2.7 – Фрагмент реалізації функціонального блока прогнозуючого регулятора

- обмеження витрати газу за мінімальним і максимальним значеннями;
- обмеження швидкості зміни завдання витрати газу;
- підтримку ручного й автоматичного режимів роботи.

Період виконання прогнозуючого регулятора приймається $T_s = 1$ с. Такий період відповідає динаміці температурного контуру, постійна часу якого становить десятки секунд. Оскільки алгоритм PFC/MFC не потребує розв'язання складної оптимізаційної задачі, його реалізація на ПЛК не створює значного обчислювального навантаження. Основні операції алгоритму зводяться до оновлення внутрішньої моделі, роботи з буфером запізнення, обчислення кількох арифметичних виразів і перевірки обмежень.

Для організації роботи програми ПЛК доцільно використати кілька циклічних задач із різними періодами виконання. Швидка задача може використовуватися для опитування критичних дискретних сигналів і технологічних захистів. Окрема задача з періодом 1 с виконує розрахунок прогнозуючого регулятора. Задача обміну даними забезпечує передавання параметрів на верхній рівень, а діагностична задача виконує періодичну перевірку стану обладнання та формування службових повідомлень.

Верхній рівень системи може бути реалізований у середовищі Node-RED або у складі промислової SCADA-системи. Його основними функціями є візуалізація температури під горном, витрат газу й повітря, коефіцієнта надлишку повітря, стану регулятора, режиму роботи та аварійних повідомлень. Крім того, на цьому рівні оператор може задавати температуру $T_{g_{set}}$, коефіцієнт α_{set} , межі допустимих значень, параметри моделі та параметри налаштування прогнозуючого регулятора.

Для обміну даними між ПЛК і верхнім рівнем доцільно використовувати протокол OPC UA. Він забезпечує структурований доступ до технологічних змінних, підтримує стандартні механізми адресації, дозволяє реалізувати взаємодію між контролером, SCADA/HMI, Node-RED та іншими програмними компонентами.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливу увагу під час практичної реалізації необхідно приділити режимам роботи системи. У нормальному автоматичному режимі прогнозуючий регулятор формує завдання витрати газу на основі заданої та вимірної температури. У ручному режимі оператор задає витрату газу безпосередньо, а прогнозуючий регулятор не впливає на виконавчий механізм. При переході між ручним і автоматичним режимами необхідно забезпечити безударне перемикавання, щоб уникнути різкої зміни завдання витрати газу.

Технологічні захисти повинні мати вищий пріоритет порівняно з регулятором. Якщо виникає аварійна ситуація, наприклад втрата полум'я, недопустиме падіння тиску газу, відмова датчика температури або вихід витрати газу за безпечні межі, система повинна перейти у захищений стан відповідно до логіки безпеки. У такому випадку команда прогнозуючого регулятора блокується, а керування передається аварійній логіці або оператору.

Для верхнього рівня доцільно передбачити такі екрани або інформаційні блоки:

- мнемосхему горна запалювання;
- тренди температури T_g , завдання T_{gset} і витрати газу Q_g ;
- тренди витрати повітря Q_a та коефіцієнта α ;
- панель налаштування параметрів PFC/MFC-регулятора;
- журнал аварій і попереджень;
- індикатори режимів Manual/Auto, стану блокувань і доступності датчиків.

Запропонована архітектура дозволяє поєднати переваги промислового ПЛК і верхнього рівня візуалізації. ПЛК виконує критичні задачі керування в реальному часі, тоді як Node-RED або SCADA забезпечує зручний інтерфейс оператора, архівування даних і можливість подальшого аналізу режимів роботи. Такий розподіл функцій є доцільним для системи прогнозуючого керування, оскільки алгоритм регулятора залишається надійно прив'язаним до

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промислового рівня, а аналітичні й інформаційні функції можуть розвиватися незалежно.

Важливою перевагою запропонованого підходу є можливість поетапного впровадження. На першому етапі PFC/MFC-регулятор може працювати у режимі “порадника”, коли він розраховує рекомендоване значення Q_{gset} , але не впливає безпосередньо на клапан. Оператор або інженер АСУ ТП може порівнювати рекомендації алгоритму з діями штатної системи. На другому етапі можливе включення регулятора у замкнений контур на обмеженому діапазоні режимів. На третьому етапі після перевірки стабільності та безпеки система може бути переведена у штатний автоматичний режим.

Таким чином, запропонований алгоритм прогнозуючого керування може бути реалізований на промисловому рівні автоматизації без принципової зміни структури існуючої АСУ ТП. Основний розрахунок PFC/MFC-регулятора виконується на програмованому логічному контролері, підлеглі контури витрати газу й повітря реалізуються стандартними засобами ПЛК, а верхній рівень забезпечує візуалізацію, налаштування, архівування та діагностику. Така архітектура підтверджує практичну придатність розробленої системи прогнозуючого керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині.

Висновки до розділу:

У другому розділі виконано проєктування та апробацію системи прогнозуючого керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині. На основі технологічного аналізу процес запалювання формалізовано як об’єкт автоматичного керування, для якого визначено основні керуючі впливи, регульовані величини, контрольовані параметри та збурення.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		102

Основними керуючими впливами прийнято витрату газового палива Q_g та витрату повітря Q_a , а основними регульованими величинами – температуру під горном T_g та коефіцієнт надлишку повітря α .

Обґрунтовано структуру системи керування з декомпозицією початкової багатовимірної задачі на два взаємопов'язані контури. Основний контур призначений для прогнозуючого керування температурою під горном шляхом зміни витрати газу, а підлеглий контур забезпечує підтримання раціонального співвідношення газу й повітря. Така структура відповідає фізичній природі процесу: витрата газу визначає основний теплоприток у зону запалювання, а витрата повітря забезпечує необхідні умови повного та енергоефективного горіння.

Для температурного контуру побудовано математичну модель каналу «витрата газу — температура під горном». Об'єкт описано передавальною функцією першого порядку із запізненням, яка враховує статичне підсилення, теплову інерційність і транспортне запізнення. Розроблено модель підлеглого контуру співвідношення газ/повітря. На основі стехіометрії горіння природного газу визначено розрахунок коефіцієнта надлишку повітря та завдання витрати повітря. Показано, що контур витрати повітря є значно швидшим за температурний контур, тому його доцільно реалізувати за принципом ratio control з локальним регулятором витрати повітря. Це дає змогу автоматично узгоджувати подачу повітря зі зміною завдання витрати газу, сформованого прогнозуючим регулятором.

Синтезовано алгоритм прогнозуючого керування температурою під горном на основі підходу PFC/MFC. Алгоритм використовує дискретну модель температурного контуру, внутрішню модель без запізнення, буфер затримки, корекцію прогнозу за помилкою моделі, опорну траєкторію та обмеження на керуючий вплив. Передбачено обмеження мінімальної та максимальної витрати газу, а також обмеження швидкості зміни витрати, що є важливим для безпечної роботи пальникової системи та зменшення навантаження на виконавчі механізми.

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ	Арк.
						103
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконано імітаційне дослідження роботи запропонованої системи керування. Розглянуто чотири сценарії: відстеження ступінчастої зміни завдання температури, реакцію на падіння тиску газу, реакцію на зниження теплотворної здатності газу та комплексний сценарій із послідовним накладанням збурень. Для порівняння змодельовано роботу класичного ПІ-регулятора з налаштуванням за методом Зіглера–Нікольса.

Результати моделювання показали, що PFC/MFC-регулятор забезпечує плавне відпрацювання зміни завдання температури без перерегулювання. При переході від 1180 °С до 1220 °С перерегулювання для прогнозуючого регулятора становить 0 %, тоді як для ПІ-регулятора воно досягає 87,8 %. Це є суттєвою перевагою для високотемпературного процесу запалювання, оскільки надмірне перевищення температури може спричиняти перепал верхнього шару шихти, прискорений знос футерування та нераціональну витрату палива.

При дії збурень ПІ-регулятор забезпечує швидше відновлення температури та менші значення інтегральної похибки, однак така реакція супроводжується коливаннями керуючого впливу. PFC/MFC-регулятор реагує повільніше, але формує більш плавну зміну витрати газу та зберігає стійкий характер процесу. У комплексному сценарії прогнозуючий регулятор не допускає перерегулювання після зміни завдання та демонструє стабільну поведінку при послідовному накладанні збурень.

Запропоновано варіант промислової реалізації системи прогнозуючого керування на базі програмованого логічного контролера PLCnext AXС F 1152 та верхнього рівня SCADA/HMI або Node-RED. Критичні функції керування, включаючи PFC/MFC-регулятор, ratio control, локальні контури витрати та технологічні блокування, доцільно реалізувати на рівні ПЛК. Верхній рівень призначений для візуалізації, налаштування параметрів, архівування даних, побудови трендів і діагностики стану системи.

Практичне значення запропонованої системи полягає у можливості підвищення стабільності температурного режиму горна запалювання,

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						104
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшення ризику перерегулювання, забезпечення плавнішої зміни витрати газу та покращення умов роботи виконавчих механізмів. Розроблена структура може бути використана як основа для модернізації локальної системи керування горном запалювання у складі АСУ ТП агломераційної машини.

Таким чином, у другому розділі підтверджено працездатність і практичну доцільність застосування прогнозуючого керування для температурного контуру процесу запалювання шихти. Отримані результати свідчать, що PFC/MFC-регулятор є раціональним компромісом між якістю керування, обчислювальною простотою та придатністю до промислової реалізації.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						105
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розглянуто задачу підвищення якості керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині шляхом застосування прогнозуючого керування. Актуальність роботи зумовлена тим, що зона запалювання є критичною початковою стадією агломераційного процесу, від якої залежить формування фронту горіння, рівномірність спікання, якість готового агломерату та ефективність використання газового палива.

У першому розділі проаналізовано технологічний процес агломерації та визначено роль горна запалювання у загальній структурі агломераційної машини. Показано, що недостатня температура під горном може призводити до неповного займання твердого палива та недопалу шихти, тоді як надмірна температура спричиняє перепал поверхневого шару, погіршення газопроникності, прискорений знос футерування та перевитрату газу.

Розглянуто зону запалювання шихти як об'єкт автоматизації. Визначено основні керуючі впливи, регульовані величини, контрольовані параметри та збурення. Основними керуючими впливами є витрата газового палива та витрата повітря на горіння, а основними регульованими величинами — температура під горном і коефіцієнт надлишку повітря. До основних збурень належать коливання тиску та теплотворної здатності газу, зміна висоти шару шихти, швидкості палетної стрічки, вологості та властивостей матеріалу.

Виконано аналіз існуючих систем автоматизації агломераційних машин і методів керування процесом запалювання шихти. Встановлено, що традиційні локальні контури на основі класичних регуляторів забезпечують базову стабілізацію параметрів, однак мають обмеження при роботі з інерційними тепловими об'єктами із запізненням.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ВИСНОВКИі</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Тарасенко Б. С.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Харламенко В.Ю.</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

Обґрунтовано доцільність використання прогнозуючого керування, яке дозволяє враховувати математичну модель об'єкта, майбутню поведінку температури, технологічні обмеження та запізнення у каналі керування.

У другому розділі виконано формалізацію процесу запалювання як об'єкта автоматичного керування та обґрунтовано структуру системи керування. Запропоновано двоконтурну структуру, у якій основний контур виконує прогнозує керування температурою під горном шляхом зміни витрати газу, а підлеглий контур забезпечує підтримання раціонального співвідношення газ/повітря за принципом ratio control.

Побудовано математичну модель температурного контуру «витрата газу – температура під горном». Об'єкт описано моделлю першого порядку із запізненням, яка враховує статичне підсилення, теплову інерційність і транспортне запізнення.

Розроблено алгоритм прогнозуючого керування температурою під горном на основі підходу PFC/MFC. Алгоритм використовує внутрішню дискретну модель об'єкта, буфер запізнення, корекцію прогнозу за помилкою моделі, опорну траєкторію та обмеження на керуючий вплив. Передбачено обмеження мінімальної та максимальної витрати газу, а також обмеження швидкості її зміни, що є важливим для стабільної та безпечної роботи паливкової системи.

Виконано імітаційне дослідження роботи запропонованої системи керування. Розглянуто сценарії зміни температурного завдання, падіння тиску газу, зниження теплотворної здатності палива та комплексний сценарій із послідовним накладанням збурень. Для порівняння змодельовано роботу класичного ПІ-регулятора з налаштуванням за методом Зіглера–Нікольса.

Результати моделювання показали, що PFC/MFC-регулятор забезпечує плавне відпрацювання зміни завдання температури без перерегулювання. При переході від 1180 °С до 1220 °С перерегулювання для прогнозуючого регулятора становить 0 %, тоді як для ПІ-регулятора воно досягає 87,8 %. Це підтверджує перевагу прогнозуючого підходу для високотемпературного

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесу, де перевищення температури може призводити до перепалу шихти, зносу футерування та нераціональної витрати газу.

Встановлено, що при дії окремих збурень ПІ-регулятор забезпечує швидше відновлення температури, однак така реакція супроводжується коливаннями керуючого впливу. PFC/MFC-регулятор реагує більш плавно, не допускає різких змін витрати газу та зберігає стійкий характер процесу в комплексному сценарії. Така поведінка є технологічно доцільною для промислового теплового об'єкта, оскільки сприяє стабільності горіння та зменшенню навантаження на виконавчі механізми.

Запропоновано варіант практичної реалізації системи прогнозуючого керування на промисловому рівні автоматизації. Основні функції керування доцільно реалізувати на базі програмованого логічного контролера PLCnext AXC F 1152, а функції візуалізації, налаштування, архівування та діагностики – на рівні SCADA/HMI або Node-RED. Такий підхід дозволяє інтегрувати прогнозуючий регулятор у структуру сучасної АСУ ТП без принципової зміни її архітектури.

Практичне значення роботи полягає у розробленні структури та алгоритму системи прогнозуючого керування, які можуть бути використані як основа для модернізації локального керування горном запалювання агломераційної машини. Очікуваний ефект від застосування запропонованої системи полягає у підвищенні стабільності температурного режиму, зменшенні ризику перерегулювання, плавнішій зміні витрати газу, покращенні умов горіння та потенційному зниженні нераціональних витрат палива.

Таким чином, у роботі досягнуто поставленої мети: розроблено та апробовано систему прогнозуючого керування процесом запалювання шихти на агломераційній машині. Отримані результати підтверджують доцільність використання PFC/MFC-регулятора для температурного контуру горна запалювання як практично реалізованого, простого та технологічно обґрунтованого рішення.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						108
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Руденко М. Р. Металургія чорних металів : методичні матеріали з дисципліни. Розділ 1 / Дніпровський державний технічний університет. Кам'янське, [б. р.]. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/23/5-23-kl54.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).

2. Абросімов К. Д. Проєкт автоматизації агломераційної машини в умовах металургійного підприємства. Система автоматичного регулювання запалювання шару шихти : кваліфікаційна робота бакалавра : спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Запорізький національний університет. Запоріжжя, 2023. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/12597> (дата звернення: 30.05.2026).

3. Єфремов Б. Б. Проєкт автоматизації шихтопідготовки для агломераційного виробництва підприємств чорної металургії. Система автоматичного регулювання дозування компонентів шихти : кваліфікаційна робота бакалавра : спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / наук. керівник М. Ю. Пазюк ; Запорізький національний університет. Запоріжжя, 2023. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/12306> (дата звернення: 30.05.2026).

4. Спосіб автоматичного регулювання процесу спікання шихти на агломераційній машині : пат. 65470 Україна : МПК C22B 1/16. № u201106384 ; заявл. 23.05.2011 ; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23. URL: <https://uapatents.com/4-65470-sposib-avtomatichnogo-regulyuvannya-procesu-spikannya-shikhti-na-aglomeracijnijj-mashini.html> (дата звернення: 30.05.2026).

5. Агломераційні машини. SN Technology : офіційний сайт. URL: <http://sn-technology.com/ua/aglomeratsionnye-mashini/> (дата звернення: 30.05.2026).

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Тарасенко Б. С.			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Харламенко В.Ю.								66	3
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затвердив		Маринич І.А.									

6. Cores A., Verdeja L. F., Ferreira S., Ruiz-Bustanza I., Mochón J., Robla J. I., González Gasca C. Iron ore sintering. Part 3: Automatic and control systems. DYNA. 2015. Vol. 82, no. 190. P. 227–236. DOI: 10.15446/dyna.v82n190.44054. URL: https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532015000200029&script=sci_arttext (дата звернення: 30.05.2026).

7. Cores A., Verdeja L. F., Ferreira S., Ruiz-Bustanza I., Mochón J. Iron ore sintering. Part 1. Theory and practice of the sintering process. DYNA. 2013. Vol. 80, no. 180. P. 152–171. URL: https://www.researchgate.net/publication/265477115_Iron_ore_sintering_Part_1_Theory_and_practice_of_the_sintering_process (дата звернення: 30.05.2026).

8. Mochón J., Cores A., Ruiz-Bustanza I., Verdeja L. F., Robla J. I., García-Carcedo F. Iron ore sintering. Part 2: Quality indices and productivity. DYNA. 2014. Vol. 81, no. 183. P. 168–177. DOI: 10.15446/dyna.v81n183.41568. URL: https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532014000100019&script=sci_arttext (дата звернення: 30.05.2026).

9. Sintering Technology for Iron ores and Optimization of Sinter Machine Design. IspatGuru : website. URL: <https://www.ispatguru.com/sintering-technology-for-iron-ores-and-optimization-of-sinter-machine-design/> (дата звернення: 30.05.2026).

10. Automation and Control System of Sinter Plant. IspatGuru : website. URL: <https://www.ispatguru.com/automation-and-control-system-of-sinter-plant/> (дата звернення: 30.05.2026).

11. Мотало А. В. Температура горіння природного газу як критерій енергоефективності. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2018. № 1 (66). URL: <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/237> (дата звернення: 30.05.2026).

12. Мотало А. В. Вплив компонентного складу природного газу на його якість. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2017. № 2 (63). URL: <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/272> (дата звернення: 30.05.2026).

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
						110
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Richalet J., Rault A., Testud J. L., Papon J. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes. Automatica. 1978. Vol. 14, no. 5. P. 413–428. DOI: 10.1016/0005-1098(78)90001-8.

14. Richalet J., O'Donovan D. Predictive Functional Control: Principles and Industrial Applications. London : Springer, 2009. 224 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-493-5.

15. Camacho E. F., Bordons C. Model Predictive Control. 2nd ed. London : Springer, 2007. 405 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-398-5.

16. Rossiter J. A. Model-Based Predictive Control: A Practical Approach. Boca Raton : CRC Press, 2003. 344 p. DOI: 10.1201/9781315272610.

17. Wu M., Du S., Chen X., Cao W. Intelligent Control of Sintering Process. Cham : Springer, 2020. 245 p. DOI: 10.1007/978-3-030-62147-6.

18. Du S., Wu M., Chen X., Cao W. An intelligent control strategy for iron ore sintering ignition process based on the prediction of ignition temperature. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. Vol. 67, no. 2. P. 1233–1241. DOI: 10.1109/TIE.2019.2898581.

19. Ying Y. Q., Lu J. G., Chen J. S., Sun Y. X. PIDNN based intelligent control of ignition oven. Advanced Materials Research. 2012. Vol. 396–398. P. 493–497. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.396-398.493.

20. Endiyarov S. V. Adaptive control of the ignition of sintering batch. Steel in Translation. 2016. Vol. 46, no. 10. P. 728–732. DOI: 10.3103/S0967091216100053.

21. Cen Y., An J. Intelligent control strategy based on PSO-Elman prediction model for ignition temperature in sintering process. Proceedings of the 2019 Chinese Control Conference (CCC), Guangzhou, China, 27–30 July 2019. P. 2846–2851. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8865286.

22. Xiong D.-L., Ning H.-Y., Xie M., Pan C.-Y., Chen L.-J., Yu Z.-W., Long H.-M. A predictive model for sintering ignition temperature based on a CNN-LSTM neural network with an attention mechanism. Processes. 2024. Vol. 12, no. 10. Article 2185. DOI: 10.3390/pr12102185.

					<i>KHY KPB.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Wu M., Duan P., Cao W., She J., Xiang J. An intelligent control system based on prediction of the burn-through point for the sintering process of an iron and steel plant. Expert Systems with Applications. 2012. Vol. 39, no. 5. P. 5971–5981. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.11.118.

24. Rodriguez M. J. P., Rodriguez I. J. S., Ayala J. S. D. Burn-through point modelization in sintering process. Revista de Metalurgia. 2009. Vol. 45, no. 6. P. 225–233. DOI: 10.3989/revmetalm.0904.

25. Usamentiaga R., García D. F., Molleda J., Sainz F. J., Bulnes F. G. Monitoring sintering burn-through point using infrared thermography. Sensors. 2013. Vol. 13, no. 8. P. 10287–10305. DOI: 10.3390/s130810287.

26. Yan F., Yang C., Zhang X. Data-driven modelling methods in sintering process: Current research status and perspectives. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2023. Vol. 101, no. 7. P. 4506–4522. DOI: 10.1002/cjce.24790.

27. Mochón J., Cores A., Ruiz-Bustanza I., Verdeja L. F., Robla J. I., García-Carcedo F. Non-linear state estimator for the on-line control of a sinter plant. ISIJ International. 2013. Vol. 53, no. 9. P. 1658–1667. DOI: 10.2355/isijinternational.53.1658.

28. Expert System for Sintering Process Control. Iron and Steel Technologies / ed. by N. Kumar. Rijeka : IntechOpen, 2010. P. 109–132. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/6699> (дата звернення: 14.06.2026).

29. AXC F 1152 — Controller. Phoenix Contact : product documentation. URL: <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products/controller-axc-f-1152-1151412> (дата звернення: 30.05.2026).

30. PLCnext Engineer — Programming software. Phoenix Contact : product documentation. URL: <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products/software-plcnext-engineer-1046008> (дата звернення: 30.05.2026).

31. IEC 61131-3:2025. Programmable controllers — Part 3: Programming languages. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2025. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/68533> (дата звернення: 30.05.2026).

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
						112
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

32. Рішення для агломераційного виробництва. ДГМ ГРУП. URL: <https://dhmgroup.com/virobnictvo/rishennja-dlja-aglomeracijnogo-virobnictva/> (дата звернення: 30.05.2026).

33. 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.

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

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

36. 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).

37. 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.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
						113
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		