

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Форма навчання Заочна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**до випускної кваліфікаційної роботи
бакалавра**

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Мухи Вікторії Миколаївни

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.

Електропривод агломашины в умовах агломераційного цеху

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

(повна назва теми)

за матеріалами агломераційного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

доцент, к.т.н

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Чорний О.П.

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 16.06.2026р. № 405-ст

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.

Наук. ступень, вчене звання

Є.О. Модло

Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ(КИ)

Мухи Вікторії Миколаївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод агломашини в умовах агломераційного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

керівник випускної роботи Чорний Олексій Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «06» квітня 2026 року
№ 237-ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 03.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи

Об'єкт автоматизації – електропривод аглострічки агломашини агломераційного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; тип приводу – асинхронний двигун з частотним перетворювачем (ПЧ); напруга живлення – 380 В; діапазон регулювання кутової швидкості аглострічки – 0...100 р/с (відносно значення завдання 0...1 в.о.); час пуску/гальмування (розгону/вибігу) – 2,5 с; струм двигуна в номінальному режимі – до 30 А, пусковий (пікова перевантажувальна) дія – до 70-75 А; час циклу роботи в моделі – 10 с (ділянки розгону, сталого режиму, реверсу/зниження швидкості, зупинки); контрольовані параметри – швидкість аглострічки, струм двигуна, температура поверхні шихти під запалювальним горном, співвідношення «газ-повітря» на горні і в барабан-огрудковувач, співвідношення «шихта-вода», висота шару шихти на аглострічці; обмін даними з верхнім рівнем АСУТП – по інтерфейсу RS-485; кількість рівнів системи автоматизації – 3 (нижній, середній/контролерний, верхній); кількість режимів керування ПЧ – 5 (HND – ручне, REMOTE – дистанційне, AUT – автоматична стабілізація швидкості, KAS – температурний пошук, SUPER – супервізорне); вимоги – забезпечення

безударного переходу між режимами керування, відповідність стандартам безпеки та надійності.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 4.1 Аналітична частина: Особливості технологічного процесу спікання агломераційної шихти на агломашині. Аналіз існуючої системи керування електроприводом аглострічки. Вимоги до модернізованої системи автоматизації. 4.2 Основна частина: Технічне завдання на створення АСУТП електропривода агломашини. Вибір та розрахунок технічних засобів (двигун, частотний перетворювач, датчики). Розробка математичної моделі електропривода та дослідження перехідних процесів. Програмний алгоритм керування САР спікання шихти. Заходи з охорони праці. Аналіз шкідливих та небезпечних факторів агломераційного цеху. Пожежна безпека. Впровадження засобів захисту.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
ВРБ.141.237-ст.05.E1.1 - Структурна схема АСУТП; ВРБ.141.237-ст.05.E2 - Схема електрична функціональна; ВРБ.141.237-ст.05.E3 - Схема електрична принципова; ВРБ.141.237-ст.05.E1.2 - Схема електрична структурна математичної моделі; ВРБ.141.237-ст.05.E0.1 - Графіки перехідних процесів; ВРБ.141.237-ст.05.E0 - Алгоритм роботи САР спікання шихти

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Чорний О.П.	10.04.2026	10.04.2026
Основна частина	Чорний О.П.	10.04.2026	10.04.2026

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	01.05.2026	
2.	Основна частина	22.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	01.06.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	03.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	18.06.2026	

Студент

(підпис)

Муха В.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

(підпис)

Чорний О.П.
(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення	Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.		
1	A3	ВРБ.141.237-см.05.Е1.1	Структурна схема	1				
2			АСУТП					
3								
4	A3	ВРБ.141. 237-см.05.Е2	Схема електрична	1				
5			функціональна					
6								
7	A3	ВРБ.141. 237-см.05.Е3	Схема електрична	1				
8			принципова					
9								
10	A3	ВРБ.141. 237-см.05.Е1.2	Схема електрична	1				
11			структурна					
12			математичної моделі					
13								
14	A3	ВРБ.141. 237-см.05.Е0.1	Графіки перехідних	1				
15			процесів					
16								
17	A3	ВРБ.141. 237-см.05.Е0	Алгоритм роботи САР	1				
18			спікання шихти					
19								
20	A4	ВРБ.141.237-см.05.ПЗ	Пояснювальна записка	91				
21								
22								
23								
				ВРБ.141.237-см.05.ВР				
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис				Дата	
Розроб.		Муха В.М.						
Пров.		Чорний О.П.						
					Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод агломашини в умовах агломераційного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	Літера	Аркуш	Аркушів
							4	1
Н.контр.		Чорний О.П.				ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. ЗЕПА-22		
Затв.		Модло Є.О.						
				Відомість роботи				

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра: 91 с, 22 рис., 15 табл., 59 джерел.

Об'єкт розробки - автоматизований електропривод агломераційної машини.

Мета роботи - електроенергетичне та електромеханічне проєктування системи регульованого електропривода агломераційної машини за схемою ПЧ-АД із синтезом двоконтурного підпорядкованого регулятора, що забезпечує задані статичні та динамічні характеристики замкненої системи керування швидкістю.

Методи дослідження - аналітичний розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна за каталожними даними; синтез ПЧ-регуляторів струму та швидкості методом технічного оптимуму; комп'ютерне моделювання перехідних процесів замкненої системи ПЧ-АД у середовищі Matlab/Simulink.

Обґрунтовано вибір системи ПЧ-АД як найраціональнішого рішення для умов аглоцеху. Розраховано параметри схеми заміщення двигуна Siemens 1LE1003-1CB43-4FA4. Синтезовано регулятори струму та швидкості методом технічного оптимуму. Моделювання підтвердило: пусковий струм $\leq 2I_n$, час розгону 2,7 с, статична похибка за швидкістю $\leq 3\%$.

Ключові слова: агломашина, асинхронний двигун, електропривод, перетворювач частоти, підпорядковане регулювання, система автоматичного регулювання, скалярне керування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Технологія процесу спікання агломерату	9
1.2 Вимоги до електропривода агломашини як виконавчого механізму	13
1.3 Порівняння систем регульованого електропривода для агломашин	15
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	18
2.1 Структура АСУ ТП «Спікання шихти»	18
2.1.1 Підсистема «Завантаження»	19
2.1.2 Підсистема «Грудкування»	21
2.1.3 Підсистема «Запалення»	24
2.1.4 Підсистема «Спікання»	28
2.2 Підсистеми верхнього рівня АСУТП	32
2.2.1 Підсистема «Діалог»	32
2.2.2 Підсистема «Попереджувальні повідомлення»	32
2.2.3 Підсистема «Звітність»	33
2.3 Автоматичний контроль закінчення процесу спікання агломерату	33
2.3.1 Огляд існуючих методів і вибір раціонального методу контролю закінченості спікання агломерату	33
2.3.1.1 γ -метод	34
2.3.1.2 Метод магнітної проникності	34
2.3.1.3 Метод освітленості	34
2.3.1.4 Метод температури газів, що відходять	35
2.3.2 Агломераційна машина як об'єкт автоматизації	36
2.3.3 Статичні характеристики процесу	37
2.4 Система автоматичного регулювання закінчення процесу спікання шихти	45

2.4.1 Електропривод машини як виконавчий елемент АСУТП спікання шихти. Вимоги, що пред'являються до виконавчого елементу агломашини	45
2.4.2 Вибір електродвигуна і перетворювача частоти.....	47
2.4.3 Розробка функціональної схеми автоматичного контролю	50
2.4.4 Алгоритм роботи САР спікання шихти і схема включення датчиків температури	54
2.4.5 Розрахунок передатних функцій регуляторів та моделювання динамічних режимів замкненої системи.....	57
2.4.5.1 Розрахунок регулятора струму	63
2.4.5.2 Розрахунок регулятора швидкості	64
2.5 Вибір частоти знімання сигналів датчиків.....	69
2.5.1 Частота знімання сигналів з датчика ваги	69
2.5.2 Частота знімання сигналів струму якоря двигуна	70
2.6 Вибір технічних засобів реалізації САК	70
2.6.1 Вибір програмованого логічного контролера для реалізації алгоритму керування.....	70
2.6.2 Вибір блоку живлення	74
2.6.3 Вибір клемно-блочного з'єднувача.....	75
2.6.4 Вибір засобів індикації	75
2.6.5 Вибір датчиків	76
2.6.5.1 Вибір термоперетворювача	76
2.6.5.2 Вибір датчика швидкості.....	77
2.7 Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.....	78
2.7.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів.....	78
2.7.2 Заходи щодо зниження й усунення шкідливих і небезпечних	82
2.7.3 Пожежна безпека	85
ВИСНОВКИ.....	87
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	88

ВСТУП

Металургійний комплекс України вимагає системного оновлення енергоємного обладнання, зокрема приводних систем агломераційних машин. Від точності узгодження горизонтальної швидкості стрічки з вертикальною швидкістю просування фронту горіння безпосередньо залежать вихід товарного агломерату, питомі витрати електроенергії та ресурс механічних вузлів. У сучасних умовах заміщення застарілих систем тиристорний перетворювач-двигун постійного струму доцільно реалізовувати через частотно-регульовані приводи з асинхронними двигунами, що поєднують високу надійність, низькі експлуатаційні витрати та розширений діапазон регулювання.

Ключовим інженерним завданням стає не лише програмна реалізація контурів регулювання, а й електроенергетичне обґрунтування вибору силових компонентів, розрахунок параметрів схеми заміщення, синтез регуляторів струму та швидкості за критерієм технічного оптимуму, а також перевірка динаміки приводу в перехідних режимах. Саме електромеханічні характеристики системи визначають її здатність обмежувати пускові струми, стабілізувати швидкість при збуреннях навантаження та забезпечувати енергоефективну роботу в умовах підвищеного пилоутворення та вібрацій аглоцеху.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

Характеристика технологічного процесу, постановка завдання і мета розробки автоматизованої системи управління процесом спікання шихти

1.1 Технологія процесу спікання агломерату

В агломераційному виробництві для термічної обробки залізорудної шихти методом просмоктування гарячих газів крізь шар матеріалу застосовують стрічкові агломераційні машини безперервної дії. Конструктивно такі машини являють собою замкнений ланцюг палет (спікальних візків), що переміщуються по нерухомій рамі. У процесі руху палети послідовно проходять ділянки завантаження шихти, запалення та спікання, після чого розвантажуються й повертаються у вихідне положення.

Загальний вид агломераційної машини безперервної дії стрічкового типу приведений на рис.1.1

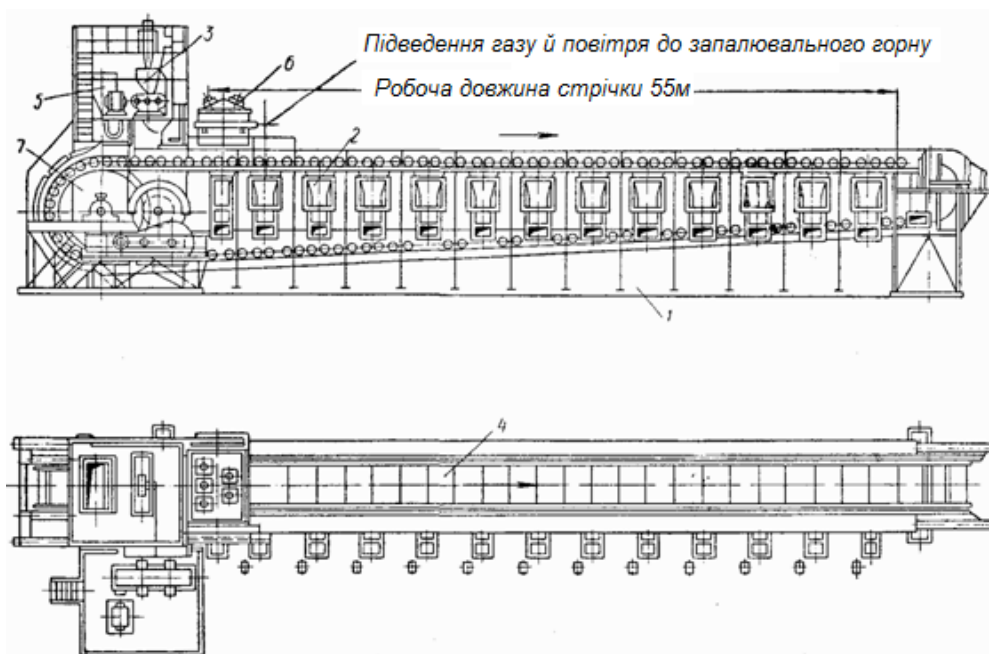


Рис.1.1. Агломераційна машина с площею всмоктування 50 мм²:

- 1 - рама; 2 - камера розрідження; 3 - живильник для шихти; 4 - палета; 5 - живильник для постілі; 6- запалювальний горн; 7 - приводна зірочка
(розроблено автором з використанням [1],[2])

Рух палет забезпечується приводною зірочкою, яка через пальці зачіплює ланки ланцюга та переводить їх на верхню робочу гілку рами. Перед потраплянням під завантажувальний вузол на дно палети укладається захисна підстилка із дрібного зворотного агломерату, що запобігає пригоранню шихти до колосникових ґрат. Поверх підстилки барабанним живильником подається агломераційна суміш; рівномірність розподілу шихти по ширині стрічки досягається поєднанням маятникового та барабанного живильників.

Наповнена шихтою палета надходить під запальний горн (сурму), де відбувається займання твердого палива (коксику) у верхньому шарі суміші. Як теплоносії для запалення використовують газоподібні види палива: доменний, коксівний, генераторний газ або їх суміші. Перша вакуумна камера, розташована безпосередньо під горном, забезпечує просмоктування продуктів горіння донизу за рахунок розрідження, створюваного екстаустером.

Пройшовши зону запалення, палета переходить до основної зони спікання, де горіння вуглецю підтримується виключно за рахунок атмосферного повітря, що просмоктується крізь шар шихти під дією розрідження у вакуумних камерах. Технологічним завданням є повне вигорання вуглецю до моменту досягнення палетою передостанньої вакуумної камери, що відповідає завершенню процесу спікання.

Частка твердого палива в агломераційній суміші є ключовим технологічним параметром. Відхилення від оптимального значення в обидва боки негативно позначається на характеристиках готового продукту: нестача палива спричиняє недопикання та зниження міцності агломерату, тоді як його надлишок призводить до оплавлення, укрупнення пор і, як наслідок, до погіршення відновлюваності. Оптимальний вміст твердого палива знаходиться в діапазоні 2,5-5,5% і визначається індивідуально для кожного складу шихти з урахуванням вологості, гранулометричного складу та висоти шару.

Зовнішніми ознаками, які дозволяють судити про вміст вуглецю, є: довжина розжареної поверхні агломерату після сурми (2-3 палети), вигляд зламу агломерату на розвантаженні (при нормі розжарена зона на 1/4 висоти,

немає язиків полум'я; при надлишку - до 1/2 висоти з синіми язиками полум'я, агломерат оплавлений та крупнопористий; при нестачі - бурі ділянки неспеченої шихти, агломерат дрібнопористий і розсипається). Для контролю вмісту вуглецю регулярно відбираються проби шихти згідно з діючою методикою.

Стабільний склад та характеристики підготовленої шихти є передумовою рівномірної роботи машини при постійних значеннях швидкості та висоти шару. Швидкість переміщення спікальних палет встановлюється такою, щоб зона завершення горіння збігалася з положенням передостанньої вакуумної камери. Підтвердженням правильності обраного режиму є характерний температурний профіль відхідних газів у трьох кінцевих камерах (180-250°C залежно від складу суміші та висоти шару).

При відхиленнях від нормального перебігу процесу вдаються до тимчасового зниження швидкості аглострічки. Підставами для цього є: відхилення вологості шихти від оптимуму, порушення вмісту твердого палива, погіршення якості грудкування, нестабільність температури запалення, засмічення колосникових ґрат або збої у роботі завантажувального тракту. Після усунення причини порушення швидкість відновлюється до проектного значення.

Контроль процесу спікання здійснюється за сукупністю параметрів: рівнем розрідження у вакуумних камерах і збірному колекторі, температурою відхідних газів, а також зовнішнім виглядом готового продукту. Для агломашин типу АЦ-2 нормовані значення розрідження: у збірному колекторі - не менше 6865 Па, після першого ступеня газоочистки - 8826-9007 Па, перед ексгаустером після другого ступеня - 10297-11768 Па. Температура газів перед циклонами не повинна перевищувати 150°C, на всмоктуванні ексгаустера вона знаходиться в межах 70-150°C.

Зменшення розрідження відносно норми свідчить або про підвищену газопроникність шихти, або про підсмоктування повітря крізь нещільності. Навпаки, підвищений вакуум характеризує знижену проникність - наслідок

оплавлення або надлишку коксикю. Тривале поступове падіння розрідження є ознакою наростання підсмоктувань. У зоні готового агломерату (кінцеві камери) розрідження природно знижується через підвищену газопроникність спеченого матеріалу, а різкий спад у районі передостанньої камери є індикатором завершення процесу спікання.

Температура відхідних газів зазвичай становить 50-60°C у перших 8 камерах. Її підвищення в колекторі відбувається при зупинках машини або збільшенні проникності шихти. Зниження температури спостерігається при нестачі палива, перезволоженні/недозволоженні шихти, переоплавленні поверхні з втратою проникності, наявності значних підсмоктувань, підвищенні швидкості візків або висоти шару без зміни швидкості.

Наприкінці робочої гілки спечений пиріг скидається на гуркіт, де агломерат розвантажується і передається на дробарку для первинного дроблення та класифікації. Розвантажена палета під власною вагою переміщується по нижній холостій гілці до завантажувальної частини, де знову підхоплюється зірочкою - і цикл повторюється.

Відношення розрідження на вході ексгаустера до розрідження перед циклоном є діагностичним показником стану газоочисної системи і в нормі складає приблизно 1,5. Перевищення цього значення вказує на зростання гідравлічного опору циклонного апарата внаслідок налипання пилу на стінках або підсмоктування повітря. Зниження відношення нижче норми є ознакою ерозійного зносу елементів циклону.

Підсумовуючи, стабільна робота агломераційної машини та висока якість готового продукту досягаються комплексним виконанням вимог на кожному етапі: від якісної підготовки шихти з дотриманням оптимального вмісту палива - до точного регулювання швидкості аглострічки та безперервного контролю технологічних параметрів. Порушення хоча б одного з них неминуче призводить до зниження продуктивності або якості агломерату.

Оперативне виявлення та усунення відхилень - порушень вологості шихти, нерівномірності грудкування, засмічення колосників тощо - є

обов'язковою умовою підтримання технологічного режиму. Основним інструментом корегування служить зміна швидкості аглострічки, що дозволяє компенсувати порушення без зупинки машини.

Неперервне спостереження за станом шихти на різних ділянках машини - за зовнішнім виглядом, структурою зламу спеченого пирога, розподілом температур і розрідження по камерах - дає можливість своєчасно розпізнавати відхилення та приймати коректувальні рішення ще до погіршення якості продукту.

Лише комплексний підхід з дотриманням усіх технологічних вимог на кожній стадії - від ретельної підготовки шихти до завершального розвантаження агломерату - здатен забезпечити стабільну та безперебійну роботу агломераційної машини в заданому режимі. Саме такий підхід є запорукою отримання якісного агломерату з необхідними фізико-механічними властивостями при максимально можливій продуктивності устаткування.

1.2 Вимоги до електропривода агломашини як виконавчого механізму

Ефективність процесу спікання визначається багатьма взаємопов'язаними параметрами: хімічним складом і вологістю шихти, висотою шару на палеті, режимом запалення та газопроникністю. Центральним виконавчим органом, що дозволяє коригувати хід спікання в реальному часі, є привод аглострічки. Регулюючи швидкість руху палет, система електропривода узгоджує горизонтальне переміщення шихти по стрічці з вертикальною швидкістю просування фронту горіння.

Електропривод аглострічки є виконавчим органом нижнього рівня замкненої системи керування якістю спікання. Через нього реалізується коректувальна дія за результатами аналізу температурного поля відхідних газів у кінцевих вакуумних камерах.

Виходячи з технологічних вимог процесу спікання, до електропривода агломашины ставляться такі основні вимоги:

- підвищення якості агломерату шляхом оптимізації технологічних параметрів;
- збільшення продуктивності агломашины;
- зниження питомих витрат енергоресурсів за рахунок стабілізації режимів зволоження, підігріву та запалення шихти;
- подовження терміну експлуатації агрегатів, зменшення аварійних ситуацій через використання безпечних режимів та контроль критичних параметрів обладнання;
- забезпечення персоналу точнішою оперативною інформацією про хід процесу замість діаграмних реєстраторів;
- видача рекомендацій з управління процесом спікання;
- поліпшення умов праці за рахунок відмови від ручної обробки документації.

Базовим критерієм ефективності роботи електропривода є забезпечення завершення процесу спікання точно над передостанньою вакуумною камерою при мінімальних відхиленнях швидкості від заданого значення.

Для реалізації перелічених вимог у процесі проектування вирішуються такі завдання:

- доведення вологості шихти до оптимального значення;
- стабілізація температурного режиму запалення шихти;
- стабілізація вертикальної швидкості (газопроникності) шихти;
- забезпечення аналізу якості ведення технологічного процесу.

Виконання перелічених завдань дозволить отримати технічно обґрунтоване проектне рішення електропривода агломашины, що відповідає сучасним вимогам металургійного виробництва.

1.3 Порівняння систем регульованого електропривода для агломашин

Вибір системи регульованого електропривода є ключовим проектним рішенням, що визначає конструктивне виконання, технічне обслуговування та показники надійності всього механічного комплексу. Для агломашин стрічкового типу на практиці застосовуються дві основні системи: тиристорний перетворювач - двигун постійного струму (ТП-ДПС) та перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-АД).

Система ТП-ДПС має такі характеристики:

- вимірювання технологічних параметрів процесу;
- попередню обробку вимірюваних величин (масштабування, цифрова фільтрація, математичні перетворення);
- автоматичне регулювання окремих технологічних параметрів;
- автоматичне логічне керування виконавчими механізмами та арматурою;
- світлову та звукову сигналізацію при відхиленні параметрів від норми;
- візуалізацію низки технологічних параметрів;
- контроль роботи обладнання;
- автоматичне формування та підтримку локальних баз даних нижнього рівня в реальному часі;
- діагностику стану технологічних засобів системи, включно з каналами вводу аналогових сигналів;
- формування та передачу даних на верхній рівень.

Порівняння систем наведено з урахуванням специфіки роботи агломераційного цеху. Умови підвищеного запилення та вібрації є вирішальним чинником: потреба частої заміни щіток у системі ТП-ДПС суттєво збільшує витрати на обслуговування та ризик незапланованих простоїв. З цих міркувань для даного проекту обрано систему ПЧ-АД зі скалярним керуванням, яка реалізує такі контури регулювання:

- внутрішній контур стабілізації струму статора для обмеження пускового струму та захисту обмоток;

- зовнішній контур регулювання кутової швидкості ротора для підтримання заданої швидкості аглострічки.

Загалом система повинна забезпечувати контроль та керування технологічним процесом на виробничій ділянці з можливістю обміну інформацією між різними рівнями системи.

- САР співвідношення "шихта-вода" для регулювання витрати води на грудкування згідно з вологістю шихти з урахуванням запізнювання;

- САР температури шихти після грудкування для підігріву до "точки роси" і підвищення початкової газопроникності шару;

- САР співвідношення "газ-повітря" в грудковий барабан для повного згоряння газу;

- САР співвідношення "газ-повітря" на сурму для повного згоряння газу регулюванням витрати повітря вентилятора.

Завершеність спікання оцінюється за температурою та розрідженням у трьох останніх камерах. При відхиленнях видаються рекомендації щодо зміни співвідношення "шихта-вода", температури поверхні шихти та швидкості агломації. Використовується математична модель управління вертикальною швидкістю спікання, яка має бути задокументована.

Двоконтурна система підпорядкованого регулювання забезпечує обмеження струму на рівні 2In під час пуску та відпрацювання збурень за навантаженням. Зв'язок перетворювача частоти з верхнім рівнем керування забезпечується такими функціями:

- прийом даних з нижнього рівня та контроль їх достовірності.
- формування оперативних відеокadrів, графіків для спостереження за ходом процесу.

- формування та представлення протоколів роботи обладнання, звітної інформації про роботу агломації, зокрема формування, зберігання та друк змінного журналу, технічного звіту за добу, місяць, рік з обліком ресурсів.

- автоматичне виявлення передаварійних відхилень параметрів, формування попереджень про вихід за допустимі межі, розпізнавання причин аварійних ситуацій.

- введення інформації від старшого агломератника в діалоговому режимі для впливу на керування з контролем достовірності.

- видача рекомендацій старшому агломератнику щодо ведення процесу в режимі порадника.

Таким чином, система ПЧ-АД зі скалярним керуванням є технічно та економічно обґрунтованим рішенням для приводу аглострічки в умовах агломераційного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Структура АСУ ТП «Спікання шихти»

Для розуміння місця електропривода в загальній структурі технологічного комплексу наведемо стислий опис агрегатів, що входять до складу агломераційної машини. До основних технологічних вузлів відносяться:

- приймальний бункер з тарілчастим живильником (ТЖШ): дозує шихту зміною частоти обертання тарілки;
- барабан-грудкувач: гомогенізує вологість шихти через розпилення води та підігріває суміш згорянням газоповітряної суміші;
- човниковий розподільник (ЧРШ): рівномірно завантажує бункер барабанного живильника (БЖШ);
- завантажувальний бункер з БЖШ: підтримує буферний запас шихти не менше $1/3$ ємності для стабільного живлення аглострічки;
- чотирипальниковий запальний горн: зовнішнім нагрівом ініціює горіння коксиду в поверхневому шарі;
- спікальний тракт: основна робоча зона, де за рахунок регульованої швидкості палет і вирівнювання поверхні гладилкою забезпечується постійна висота шару та рівномірне спікання по всій ширині стрічки - ключовий об'єкт регулювання приводом;
- система вакуум-камер і газовідвідний тракт: забезпечують просмоктування повітря та відведення продуктів горіння; температура в кінцевих камерах є зворотним зв'язком для регулятора швидкості.

Перелічені агрегати утворюють єдиний технологічний ланцюг, що функціонує в умовах підвищеного запилення та вібрацій, - факторів, що безпосередньо впливають на вибір конструктивного виконання електродвигуна та перетворювача частоти.

Ключовим елементом технологічного комплексу є регульований електропривод спікального тракту, що розглядається як виконавчий орган замкненої системи керування.

До підсистем нижнього рівня належать такі алгоритмічно пов'язані підсистеми: «Завантаження»; «Грудкування»; «Запалення»; «Спікання».

2.1.1 Підсистема «Завантаження»

Підсистема «Завантаження» відповідає за безперебійну подачу шихти на аглострічку з приймального та проміжного бункерів, підтримання буферного запасу в проміжному бункері (мінімум 1/3 об'єму) та стабілізацію висоти шару на стрічці. Стабільність висоти шару безпосередньо пов'язана з вибором уставки швидкості аглострічки: при зміні висоти шару необхідна відповідна корекція швидкості електропривода.

Ці завдання вирішуються системами автоматичного регулювання (САР):

- САР завантаження шихти на агломашину для підтримки заданого рівня в проміжному бункері БЖШ;

- САР висоти шару шихти на агломашині для забезпечення оптимальної вертикальної швидкості спікання шихти (газопроникності) шляхом зміни швидкості руху спікальних візків агломашини.

Для реалізації цих контурів підсистема виконує інформаційні, обчислювальні та керуючі функції.

Інформаційні функції підсистеми:

- контроль рівня шихти в приймальному бункері ТЖШ;
- контроль наявності/відсутності шихти перед стрічковим живильником шихти (ЛЖШ);

- вимірювання ваги шихти на ЛЖШ;

- вимірювання рівня шихти в проміжному бункері БЖШ;

- вимірювання поточних швидкостей БЖШ та ТЖШ;

- вимірювання висоти шару шихти на агломашині;

- контроль режимів керування ("ручний/автоматичний") ТЖШ;

- контроль стану електроприводів механізмів.

Розрахункові функції підсистеми:

- визначення моменту видачі команди на зміну швидкості обертання ТЖШ;

- підготовка даних для візуалізації технологічного процесу;

- підготовка даних для сигналізації відхилення технологічних параметрів від норми (рівні в приймальному та проміжному бункерах).

Керуюча функція полягає у видачі команди для зміни швидкості обертання ТЖШ ("більше/менше").

Підсистема підтримує два режими роботи: ручний дистанційний (з пульта оператора) та автоматичний (від ПЛК).

Структурна схема системи автоматичного завантаження шихти зображена на рис. 2.1. Схема реалізує каскадне регулювання: зовнішній контур підтримує задану висоту шару шихти на аглострічці, формуючи завдання для внутрішнього контуру рівня в проміжному бункері. При відхиленні висоти шару або рівня в бункері ПЛК коригує завдання швидкості ТЖШ. Зміна швидкості аглострічки автоматично спричиняє пропорційне коригування витрати шихти з бункера спікального відділення, що забезпечує баланс мас у всьому ланцюгу завантаження.

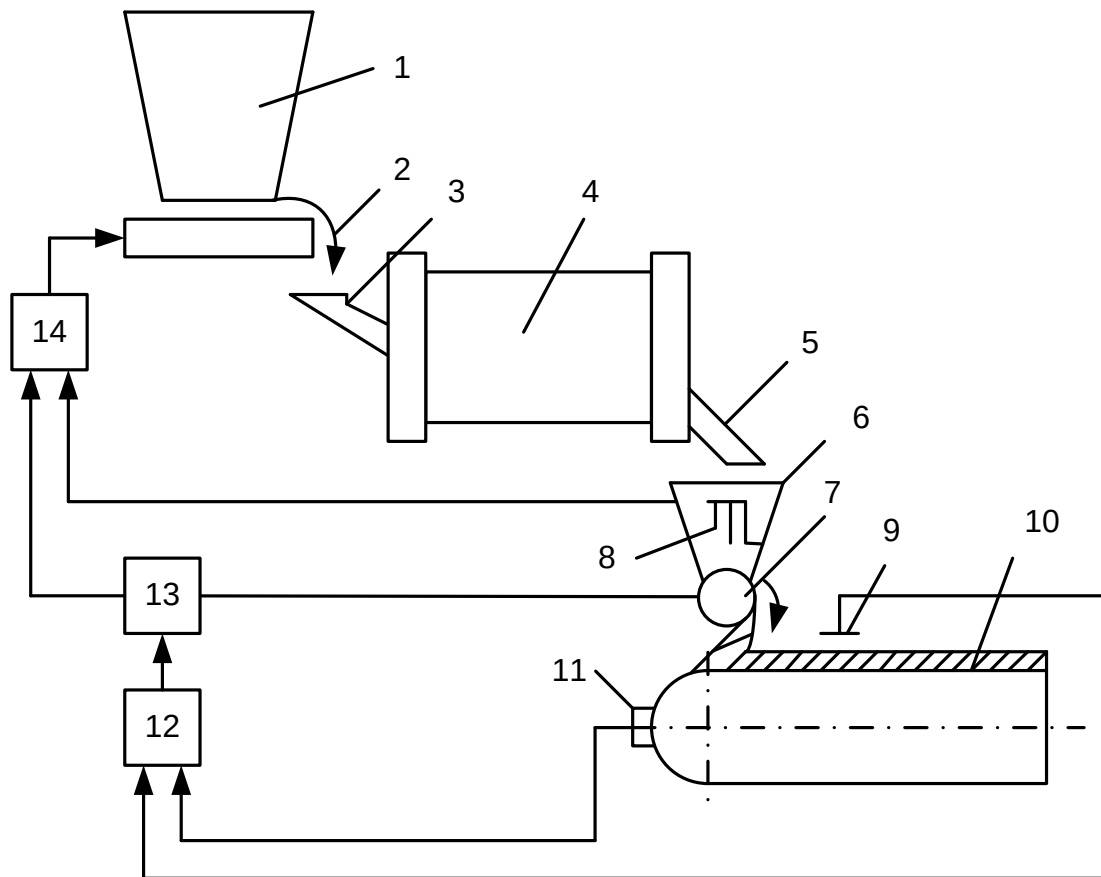


Рис. 2.1. Структурна схема автоматичного завантаження шихти на агломераційну машину:

1 - бункер спікального відділення; 2 - живильник; 3,5 - стрічкові транспортери (тічки); 4 - грудкоутворювач (грудковач); 6 - проміжний бункер; 7 - барабан-живильник проміжного бункера; 8 - датчик рівня шихтив проміжному бункері; 9 - датчик висоти шару шихти на агломашині; 10 - шар шихти на агломашині; 11 - датчик швидкості аглострічки; 12 - пристрій для розрахунку добутку висоти шару та швидкості агломашини; 13 - коректор (регулятор) подачі шихти з бункерів 1 і 6; 14 - синхронізатор кількості шихти на виході бункерів 1 і 6.

(розроблено автором з використанням [1],[2])

2.1.2 Підсистема «Грудкування»

Підсистема грудкування виконує декілька ключових функцій для забезпечення оптимального процесу агломерації. Перш за все, вона відповідає за отримання однорідної суміші всіх шихтових матеріалів з високим ступенем

газопроникності. Це досягається ретельним змішуванням та зволоженням компонентів шихти. Крім того, підсистема стабілізує режим підігріву шихти в барабані-грудкувачі, оптимізуючи процес спікання.

Для виконання цих завдань задіяно низку систем автоматичного регулювання (САР):

- САР співвідношення «шихта-вода» регулює витрату технічної води відповідно до маси шихти та її вологості у бункері готового продукту. Це допомагає досягти оптимального зволоження суміші.

- САР температури шихти на виході з барабана-грудкувача забезпечує попередній підігрів шихти вище температури точки роси. Це сприяє підвищенню початкової газопроникності шару на агломераційній стрічці, оскільки виключає надмірне перезволоження.

- САР співвідношення «газ-повітря» на барабан-грудкувач регулює подачу газу та повітря у потрібному співвідношенні для повного згоряння газу, забезпечуючи необхідний рівень нагріву.

Інформаційне забезпечення підсистеми охоплює вимірювання витрат газу, повітря та технічної води, контроль температури шихти та димових газів на виході барабана, безперервне вимірювання вологості в проміжному бункері, а також моніторинг стану всіх виконавчих механізмів.

Обчислювальний блок підсистеми розраховує витрати газу і повітря, визначає необхідну корекцію завдання витрати води за поточними показниками вологоміра, а також формує дані для відображення на мнемосхемі.

Керуючі функції реалізуються видачею уставок або дискретних команд на регулюючі клапани витрати води, газу та повітря в ручному чи автоматичному режимах.

Додатково реалізовано низку допоміжних функцій безпеки: аварійне відсічення газу при падінні тиску, обмеження мінімальної подачі газу при зупинці барабана, закриття подачі води при відсутності шихти або зупинці обладнання.

Підсистема «Грудкування» є невід'ємним елементом технологічного ланцюга: підготована нею шихта з рівномірною вологістю та підвищеною газопроникністю надходить на аглострічку, безпосередньо визначаючи умови роботи регульованого електропривода спікального тракту.

Структурна схема системи автоматичного регулювання вологості шихти показана на рис. 2.2. Система реалізує двоконтурне регулювання з основним сигналом від конвеєрних ваг та коригуючим сигналом від вологоміра.

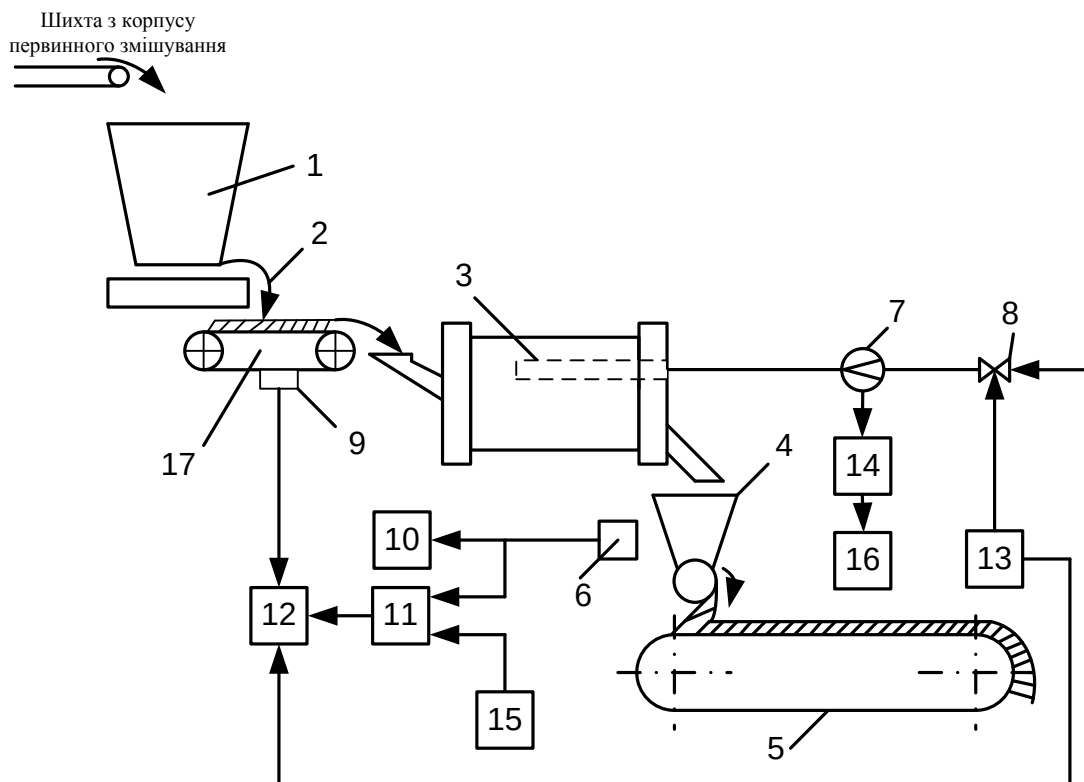


Рис. 2.2. Структурна схема системи автоматичного регулювання співвідношення “шихта-вода”

(розроблено автором з використанням [1],[2])

Принцип роботи схеми полягає в наступному.

Для підтримки заданої вологості шихти витрата води повинна змінюватися пропорційно витраті шихти. Витрата шихти контролюється за допомогою конвеєрних вагів (9) типу ВЕМ-08 фірми «SCHENCK» - Германія, встановлених під стрічковим живильником шихти (17). Сигнал з виходу вагів

пропорційний вазі шихти, що подається в грудковач (3) поступає на 1-й вхід регулятора вологості шихти. Із зміною кількості шихти отримуємо нову витрату води, необхідну для заданого значення вологості шихти. Зволожена шихта з грудковача в проміжний бункер (4) і далі на агломашину (5). Для коректування заданої вологості служить другий контур регулювання. Поточна вологість контролюється вологоміром (6) типу ВПН-01М з блоком УНО-01М, датчика (10) який встановлений в проміжному бункері агломашини. Інформація про поточну вологість шихти поступає на вхід регулятора (11) датчика (15), що порівнює із заданим значенням вологості, і у разі розбалансу поступає на другий вхід цифрового регулятора. Сигнал з виходу регулятора (12) поступає на виконавчий механізм (13) і вентиль (2).

Облік витрати технічної води виконується ультразвуковим витратоміром «Взлет РС-У» в комплекті з акустичним перетворювачем ПЕА-002ТП та вторинним перетворювачем сигналу.

Моніторинг роботи підсистеми та ручне коригування параметрів забезпечується з робочої станції та панелі оператора.

2.1.3 Підсистема «Запалення»

Підсистема «Запалення» підтримує задані теплові умови в зоні горна, забезпечуючи стабільне займання коксик у поверхневому шарі шихти. Функція реалізується двома взаємопов'язаними контурами автоматичного регулювання.

Перший контур - регулювання температури поверхні шихти під горном: вимірювальний пірометр фіксує температуру розжареного шару, а регулятор коригує витрату газового палива таким чином, щоб підтримати оптимальні умови для займання коксик.

Друга - САР співвідношення "газ-повітря" на сурму. Вона регулює подачу газу та повітря в необхідному співвідношенні для повного згоряння газу.

Правильне співвідношення цих компонентів є критично важливим для оптимального процесу спалювання.

Автоматичне регулювання співвідношення газ/повітря (кисень) дозволяє виконати ключові вимоги до процесу спалювання палива:

1. Економічна ефективність згоряння палива.
2. Забезпечення оптимальних умов теплообміну між факелом, металом та футерівкою печі.
3. Створення газової атмосфери необхідного складу в печі.

Залежно від типу плавильного агрегату, система регулювання вирішує одне або кілька з цих завдань.

Числове співвідношення паливо-повітря визначається коефіцієнтом витрати повітря - відношенням фактичної витрати повітря до теоретично необхідної для повного згоряння палива. Цей коефіцієнт залежить від складу палива та його витрати.

$$\alpha = \frac{V_e}{V_{0e}} = \frac{V_e}{V_{0e} \cdot B_T}, \quad (2.1)$$

де V_e - дійсна витрата повітря;

V_{0e} - теоретична витрата повітря, необхідна для повного спалювання палива;

V_{0e} - теоретична кількість повітря, необхідна для повного спалювання одиниці палива;

B_T - витрата палива.

За даними виробничої практики, для газоподібного палива максимальна температура факела досягається при коефіцієнті надлишку повітря 1,05-1,15, для рідкого - в межах 1,15-1,25.

Підсистема виконує повний цикл управляючих функцій: збирає вимірювальну інформацію (витрата і тиск газу та повітря, температура поверхні

шихти, стан клапанів і пальників), виконує обчислення поточних витрат і формує уставки для регулюючих органів.

Стабільна робота підсистеми «Запалення» гарантує якісне займання твердого палива по всій ширині стрічки, що є необхідною передумовою рівномірного горіння по довжині спікального тракту і, відповідно, коректного функціонування регульованого електропривода в режимі автоматичного регулювання швидкості.

На рис. 2.3 зображено структурну схему вузла автоматичного регулювання запалення шихти.

Замкнена система підтримує задане співвідношення витрат газу і повітря. Через теплові втрати в тракті або підсмоктування повітря фактичний коефіцієнт надлишку може відхилятися від заданого, знижуючи ефективність горіння. Критерієм оптимальності є температура факела T° , яка має максимум при оптимальному коефіцієнті надлишку. Вбудований оптимізатор безперервно коригує завдання регулятора співвідношення витрат так, щоб виконувалась умова $T^\circ = T^\circ(x) = \max$.

При зміні продуктивності горна або умов теплообміну крива $T^\circ(x)$ зміщується, однак оптимізатор автоматично відстежує зміщення максимуму, гарантуючи збереження оптимального режиму горіння без ручного втручання оператора.

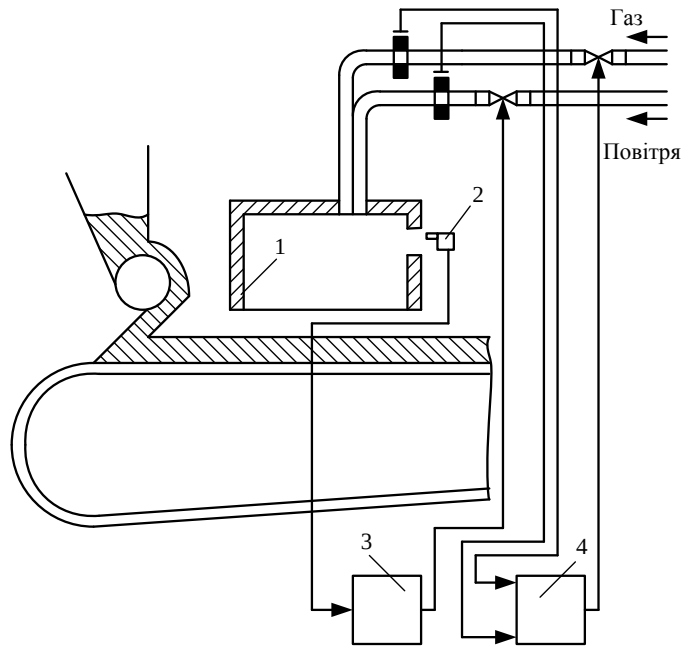


Рис. 2.3. Схема вузла автоматичного регулювання запалення шихти:

1 - сурма; 2 - радіаційний пірометр (або термопара); 3 - регулятор температури; 4 - регулятор співвідношення витрат газу і повітря

(розроблено автором з використанням [1],[2])

Виконавчі команди підсистеми формуються як цифрові сигнали «Більше/Менше» або аналогові уставки для регулюючих клапанів витрати газу та повітря.

Регулювання здійснюється за допомогою блоків ручного управління і виконується в двох режимах:

- ручному (дистанційному);
- автоматичному.

У дистанційному - блоком управління з пульта агломератника на робочому майданчику:

- у автоматичному - контролером за завданням старшого агломератника що вводиться з робочої станції.

Підсистемою передбачені допоміжні функції:

- аварійне відсічення газу (при падінні його тиску нижче допустимого);

- закриття подачі газу при зупинці аглострічки регулюючим пристроєм (мінімально допустима витрата) з подальшим зняттям блокування («зупинка аглострічки») при включенні (пуску) аглострічки.

На рис. 2.4 зображено принципову схему управління відсічним клапаном змішаного газу, а на рис. 2.5 - схему регулювання співвідношення «газ-повітря». Регулювання виконується через регулюючий клапан, вал якого механічно з'єднано з виконавчим механізмом МЕО-100/25, що керується блоком ручного управління типу БРУ-42.

Моніторинг роботи підсистеми та ручне коригування параметрів забезпечується з робочої станції та панелі оператора.

2.1.4 Підсистема «Спікання»

Підсистема «Спікання» є центральною з точки зору функціонування регульованого електропривода: вона формує завдання швидкості аглострічки на основі контролю завершеності процесу горіння в шарі шихти.

Реалізація завдання досягається системою автоматичного регулювання (САР) швидкості аглострічки, яка коригує завдання на перетворювач частоти таким чином, щоб зона завершення горіння знаходилась над передостанньою вакуум-камерою.

Ознакою правильного завершення спікання є характерний розподіл температур відхідних газів у трьох кінцевих вакуум-камерах: максимум у передостанній та зниження в останній.

Для реалізації функції регулювання підсистема виконує наступні функції.

До інформаційних функцій відноситься:

- вимірювання параметрів димових газів, що відходять, у вакуум - камерах і газовідвідному тракті; (загальний колектор, перед газоочисткою, перед екстаустером);
- вимірювання швидкості руху аглоленти;
- контроль режимів управління («руч.- авт.») БПШ і аглострічкою;

- контроль стану електроприводу аглострічки.

Розрахункові функції підсистеми включають:

- визначення моменту видачі команди на зміну швидкості руху аглострічки;

- підготовку даних для візуалізації технологічного процесу.

Керуюча функція: передача аналогового сигналу (4-20 мА або 0-10 В) на аналоговий вхід перетворювача частоти як завдання швидкості аглострічки.

Управління здійснюється ключем вибору режимів управління і виконується двох режимах:

- ручному (дистанційному);

- автоматичному.

У дистанційному режимі управління виконується ключами з пульта агломератника.

У автоматичному - контролером згідно завдання, що вводиться старшим агломератником з робочої станції.

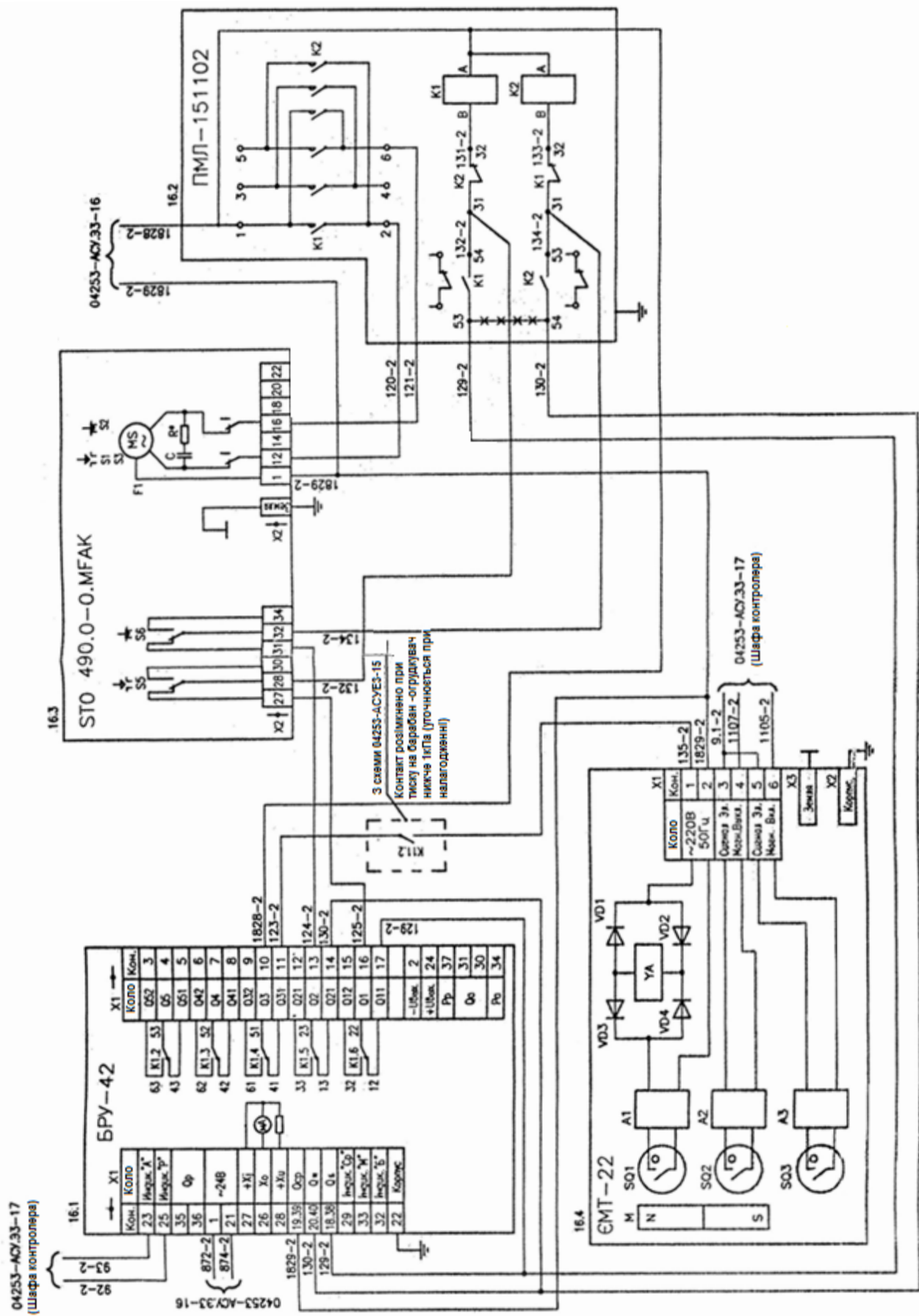


Рис. 2.4. Схема управління відсічним клапаном змішаного газу
(розроблено автором)

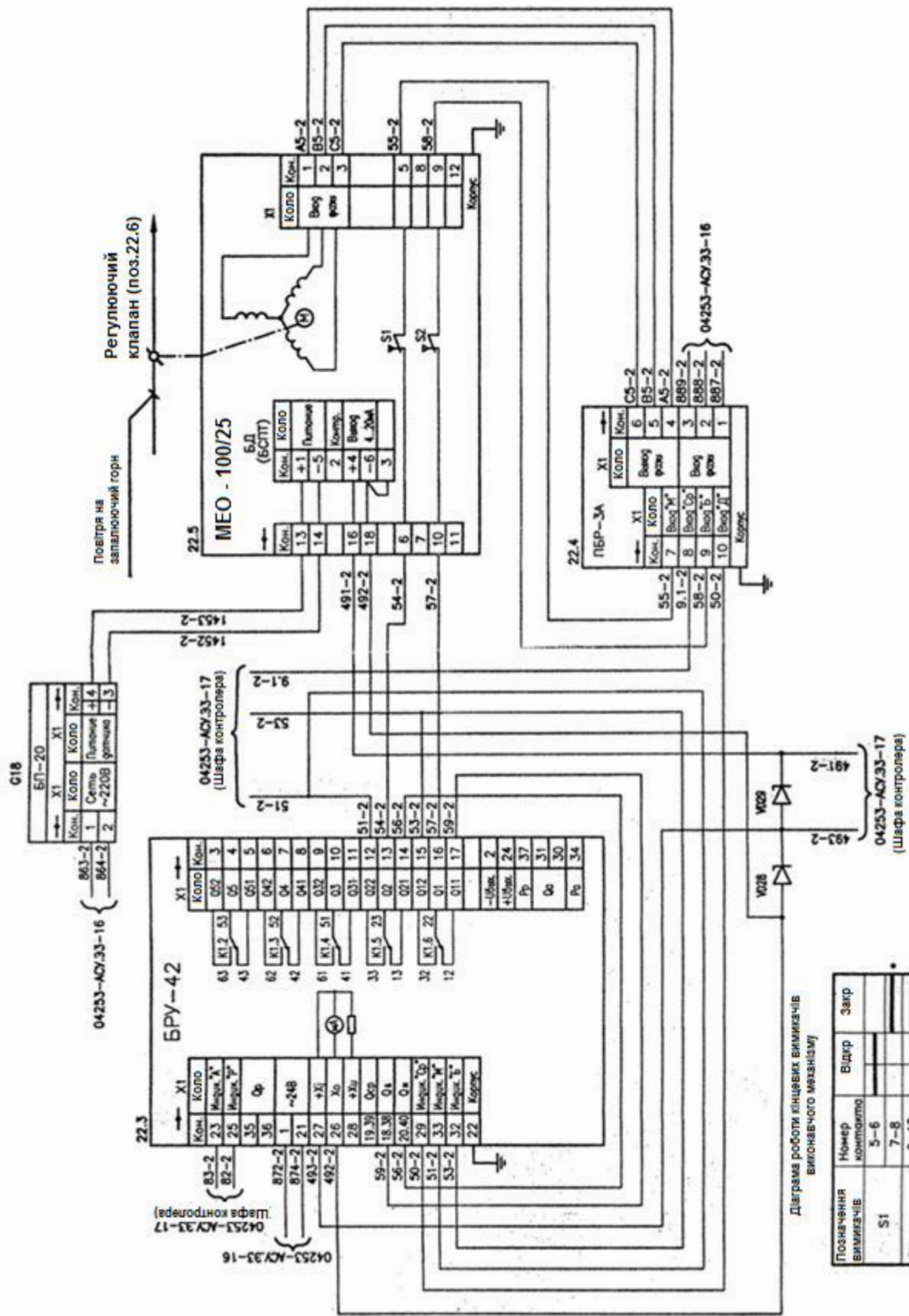


Рис. 2.5. Схема регулювання співвідношень „газ-повітря”
(розроблено автором)

2.2 Підсистеми верхнього рівня АСУТП

Верхній рівень АСУТП агломераційного виробництва складається з взаємопов'язаних підсистем: "Діалог", "Попереджувальні повідомлення" та "Звітність". Вони забезпечують інформаційну підтримку технологічного персоналу та документування процесів.

2.2.1 Підсистема «Діалог»

Ця підсистема відіграє ключову роль в інформуванні операторів про перебіг технологічного процесу та надає можливість приймати управлінські рішення. Її основні функції:

- збір інформації від підсистем нижнього рівня;
- перевірка достовірності вхідних даних та формування зручного відображення процесу;
- передача керуючих впливів (встановлення параметрів) на нижні рівні системи.

2.2.2 Підсистема «Попереджувальні повідомлення»

Дана підсистема відстежує відхилення технологічних параметрів від норми та інформує персонал за допомогою попереджувальних повідомлень. Її функції:

- автоматичне виявлення відхилень основних параметрів від заданих значень;
- формування та видача попереджень про небажані зміни параметрів;
- створення та друк за запитом протоколів попереджень та аварійних ситуацій.

2.2.3 Підсистема «Звітність»

Ця підсистема відповідає за формування, зберігання та надання звітної інформації про роботу агломераційної машини. Її функціонал:

- збір даних від нижніх рівнів системи, що характеризують процес;
- довготривале архівування вхідних даних та повідомлень для подальшого аналізу;
- формування та друк звітів про роботу агломації у визначеному форматі;
- візуалізація взаємозв'язків між технологічними параметрами за запитом.

Передбачено також інтеграцію АСУТП з суміжними системами цеху через промисловий протокол обміну даними.

Верхній рівень АСУТП є важливою складовою загальної системи керування агломераційною машиною, забезпечуючи оперативне відображення параметрів роботи електропривода, своєчасне інформування персоналу про відхилення та документування виробничих даних для наступного аналізу.

2.3 Автоматичний контроль закінчення процесу спікання агломерату

2.3.1 Огляд існуючих методів і вибір раціонального методу контролю закінченості спікання агломерату

Для побудови системи автоматичного регулювання швидкості аглострічки критично важливим є вибір методу контролю завершеності спікання, що дозволяє формувати достовірний і чутливий зворотний зв'язок. Нижче розглянуто відомі методи контролю та обґрунтовано вибір найбільш прийняттого для умов агломераційного виробництва.

2.3.1.1 γ -метод

Метод ґрунтується на відмінності між коефіцієнтами поглинання γ -випромінювання агломераційною шихтою та готовим агломератом: шихта поглинає γ -промені інтенсивніше. Джерела радіоактивного випромінювання розміщуються під стрічкою перед горном і поблизу розвантажувального кінця, а лічильники Гейгера - над стрічкою. Зіставлення ступенів ослаблення вимірюного потоку з еталонним значенням дозволяє кількісно оцінити рівень завершеності спікання та формувати коригуючу дію на швидкість аглострічки. Недоліком методу є необхідність роботи з джерелами іонізуючого випромінювання, що ускладнює обслуговування та підвищує вимоги до безпеки персоналу.

2.3.1.2 Метод магнітної проникності

В основі методу лежить суттєва різниця між магнітними проникностями сирої шихти та спеченого агломерату. П-подібний магнітопровід з феромагнітного матеріалу притискається роликми до поверхні агломераційного пирога. У міру просування лінії горіння до колосникових ґрат частка спеченого матеріалу (з вищою магнітною проникністю) зростає, що відображається на індуктивності датчика. Вимірюючи зміну індуктивності, можна безперервно відстежувати положення зони спікання вздовж стрічки та коригувати її швидкість. Метод чутливий до вібрацій та механічного зносу контактних роликів.

2.3.1.3 Метод освітленості

Параметром регулювання в системі є різниця освітленості, вимірювана спеціальними датчиками, встановленими у вакуум-камерах агломашини, над якими закінчується процес спікання. Для вимірювання освітленості вибрано

безконтактний метод, оскільки вимірювання проводять у запиленому і насиченому газами середовищі при високій температурі. На освітленість у вакуум-камерах не впливають ні просмоктування повітря через нещільності, які складають 50-60 відсотків, ні характер газового потоку. Освітленість визначається лише розташуванням зони спікання. Чим ближче зона спікання до колосникових ґрат, тим більше розжарених частинок вилітає з-під неї, тим більша освітленість у вакуум-камерах. Таким чином, освітленість у вакуум-камері створюється випромінюванням пролітаючих іскор і фоном, створюваним цими іскрами і свіченням зони спікання через колосники.

Отже, рівень освітленості в камері є інтегральним показником положення зони спікання відносно колосникових ґрат. Справедливість цього висновку підтверджена промисловими дослідженнями на агломераційних фабриках. Оскільки сигнал освітленості змінюється швидко, вимірювальний прилад повинен мати малу інерційність та високу чутливість. Цим вимогам відповідає германієвий фотодіод: спектральна характеристика збігається з діапазоном випромінювання розжарених частинок, фото-ЕРС діодів типу ФД-3А в діапазоні освітленості 0-5 лк складає 0-30 мВ, а стала часу вимірювання є незначною.

2.3.1.4 Метод температури газів, що відходять

Якщо припустити, що спікання в основному закінчується над передостанньою вакуум-камерою, то цій камері повинні відповідати і найбільш нагріті гази, що відходять. Над останньою вакуум-камерою відбувається лише догорання залишків вуглецю шихти, спікання тут вже завершене і температура газів, що відходять, знижується на 25-40°C. Як датчики використовують термопари, за допомогою яких визначається різниця температур між передостанньою та останньою камерами. Для нормальних умов вона складає 25-40°C.

Цей метод характеризується простотою і надійністю в роботі. Він набув достатньо широкого поширення на підприємствах. Тому в даній кваліфікаційній роботі застосовано цей метод контролю закінченості спікання шихти.

2.3.2 Агломераційна машина як об'єкт автоматизації

Регульованою (стабілізуючою) величиною системи автоматичного регулювання є ступінь завершеності спікання шихти у визначеній точці по довжині аглострічки. Відхилення від заданого ступеня допикання виникає внаслідок варіацій вхідних параметрів: зміни хімічного складу шихтових компонентів, коливань вологості, відхилень у ступені грудкування тощо. Всі ці збурення зводяться до єдиного узагальненого показника - вертикальної швидкості спікання, яка характеризує підготовленість шихти до термічної обробки. Крім вертикальної швидкості спікання, на об'єкт впливають висота шару на палеті та горизонтальна швидкість аглострічки. Точний математичний опис взаємодії між цими параметрами ускладнений через велику кількість важко формалізованих чинників, тому при аналізі об'єкта вводяться спрощуючі припущення.

У ході агломераційного процесу в спікаємому шарі (рис. 2.6) одночасно існують наступні зони: недопеченої шихти (Ш), сушки (ЗС), горіння (ЗГ) і готового агломерату (А). Ця класифікація визначає зону сушки як ділянку шару шихти, в якій температура починає зростати від початкової (50-60°C) до температури початку горіння палива (700-800°C). В даному випадку доцільно розглядати ділянку підйому температури від початкової до максимальної як область спікання, а ділянку зниження температури - як область охолодження. При цьому, з певним допущенням, можна прийняти, що з наближенням області спікання до колосників аглострічки температура газів, що відходять, також зростає від початкової до максимальної і потім починає знижуватися, характеризуючи охолодження спеченого агломерату.

Для спрощення математичного опису приймається припущення про лінійний розподіл зони горіння по довжині стрічки при незмінних технологічних параметрах, що еквівалентно сталості вертикальної швидкості спікання в ході процесу. Замість розподіленої зони горіння вводиться поняття «лінія спікання» - умовна ізотерма максимальних температур, що узагальнено описує положення фронту горіння в шарі шихти.

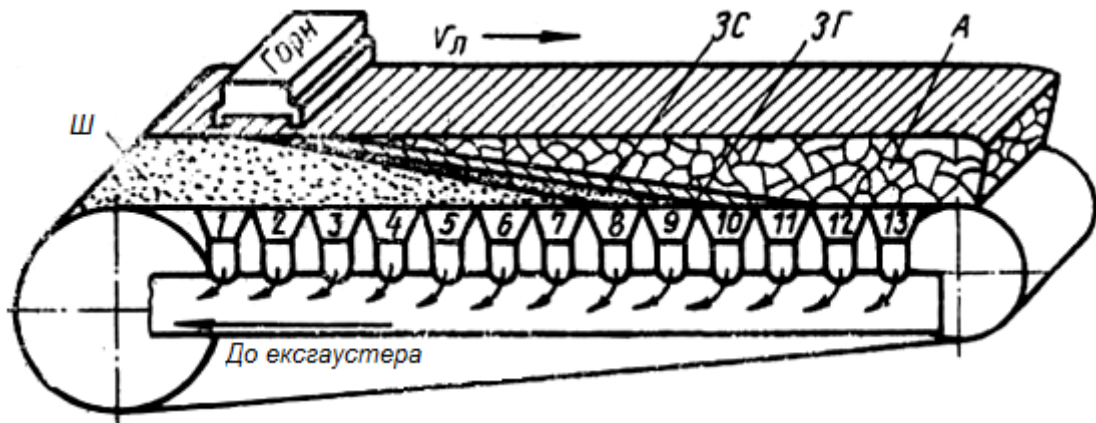


Рис. 2.6. Схема спікання шихти
(розроблено автором з використанням [1],[2])

2.3.3 Статичні характеристики процесу

Статичні характеристики процесу спікання описують залежності між вихідними показниками та вхідними параметрами при усталеному режимі роботи. До найважливіших характеристик відносяться: просторовий розподіл температур і складу відхідних газів по довжині аглострічки для різних значень вологості шихти та вмісту палива, а також залежність розрідження під спікальним шаром від газопроникності матеріалу.

В даному випадку розглядаються функціональні залежності між температурою газів t° , що відходять, як одним з показників ступеня допікання початковими параметрами процесу: швидкістю спікання шихти, швидкістю аглострічки V_c і висотою шарують шихти на аглострічці H . Певні утруднення при становленні вказаних залежностей виникають у зв'язку з взаємним впливом вхідних параметрів процесу. Так, зміна швидкості аглострічки або висоти шару

шихти одночасно приводить і до зміни швидкості спікання. Це явище здійснюється за допомогою зміни вакуумного режиму процесу спікання і, отже, для його обліку необхідно привертати закономірності газодинаміки процесу. Проте в даний час ця швидкість процесу досліджена ще недостатньо повно. Якщо ж розглядати обмежені зміни вхідних параметрів процесу, що не приводять до значних порушень вакуумного режиму, то їх взаємним впливом можна нехтувати без великої помилки.

Однією із статичних характеристик процесу є характер розподілу температури по довжині аглострічки. Зв'язок температурного, графіка з лінією спікання представлено на рис.2.8. Положення ліній спікання OK визначається висотою шару шихти H і співвідношенням швидкостей спікання V_{cn} і аглострічки V_a . Температура газів, що відходять, залишається постійною t_I° на ділянці стрічки Ol_1 , де лінія спікання знаходиться далі певної відстані h_{II} від колосників паллет. На ділянці стрічки $\Delta l = l_{II} - l_I$, де лінія спікання наближається до колосників, температура газів, що відходять, росте до максимальної t_{II}° . Таким чином, ділянку шару h_{II} і ділянку аглострічки Δl визначають область пропорційної зміни температури.

Розглянемо сталий процес спікання. Очевидно, що за час, протягом якого шихта проходить відстань l_T від місця запалення до точки установки термopару T , вона спікається на величину $h_{сп}$. З цього виходить, що

$$\frac{h_{сп}}{V_{сп}} = \frac{l_T}{V_c} \quad (2.2)$$

Зокрема, якщо процес контролюється і закінчується в кінці аглострічки, тобто при $l_T = l_{заг}$ і $h_{сп} = H$, рівняння (2.2) приймає загальновідомий вигляд:

$$\frac{H}{V_{сп}} = \frac{l_{заг}}{V_c} \quad (2.3)$$

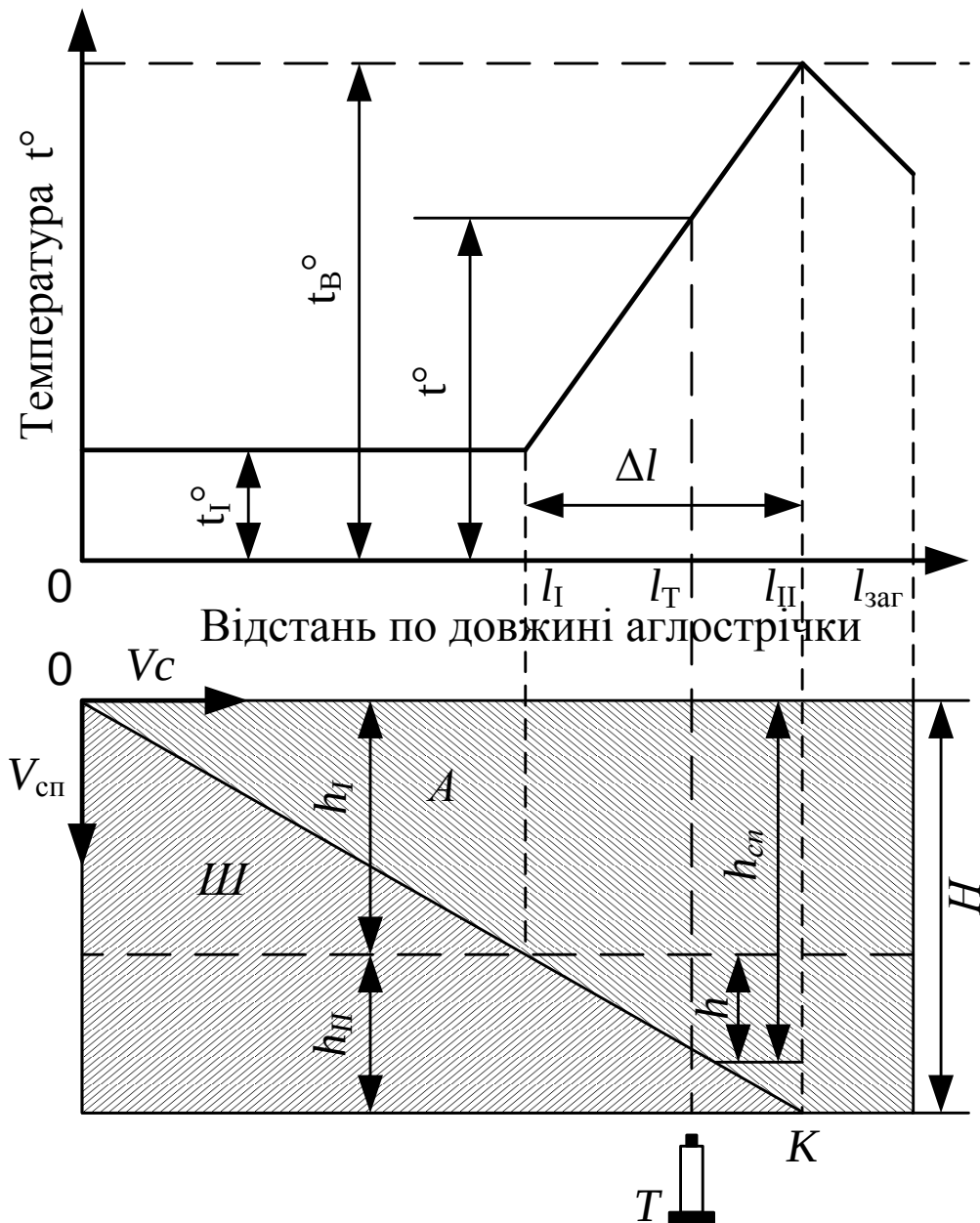


Рис. 2.7. Зв'язок температурного графіка з лінією спікання:

III - шихта; A - агломерат; $L_{заг}$ - робоча довжина аглострічки

(розроблено автором з використанням [1],[2])

Виразимо лінійні розміри температурного графіка через основні параметри процесу спікання. Координату, що характеризує положення температурного максимуму, знайдемо, вважаючи $l_T = l_{II}$ і $h_{сп} = H$. Аналогічно знаходиться вираз для координати l_I , що визначає положення точки підйому температури. Для цього в рівняння (2.1) підставимо $l_T = l_I$ і $h_{сп} = h_I$, де

$h_I = H - h_{II}$. В результаті отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} l_{II} &= H \frac{V_L}{V_{сп}}, \quad l_I = \frac{V_c}{V_{сп}} \\ \Delta l &= h_{II} \frac{V_c}{V_{сп}} \end{aligned} \right\}$$

З даних рівнянь (2.3) виходить, що при зміні параметрів процесу спікання (тобто при різному ступені допікання або при зміні висоти шару) істотно міняється характер розподілу температури по довжині аглострічки. Область підйому температури Δl , що характеризує крутизну висхідної гілки температурного графіка, і величини l_I і l_{II} , що визначають розташування висхідної гілки по довжині аглострічки, міняються прямо пропорційно швидкості стрічки і обернено пропорційно до швидкості спікання. Крім того, l_I і l_{II} лінійно залежать від висоти шару.

Відповідно до рівнянь (2.3) на рис. 2.8 показані положення лінії спікання і температурного графіка при різному ступені допікання. Неважко бачити, що сама лінія спікання в межах області пропорційної зміни температури, в певному масштабі виражає графік розподілу температури по довжині стрічки. Це зіставлення дає можливість наочно представити вказані залежності. При зміні ступеню допікання (тобто при зміні співвідношення $V_{сп}$ і V_c) лінія спікання повертається щодо точки O . При цьому висхідна гілка температурного графіка також обертається щодо точки O' на вісі температури. Відстань цієї точки від початку координат відповідає висоті шару шихти. Зміну висоти шару викликає паралельне переміщення графіка температури.



Рис. 2.8. Характер зміни лінії спікання і температурного графіка при різному ступені допикання:

а, б - температурні графіки, відповідні положенням лінії спікання
(розроблено автором з використанням [1],[2])

Згідно прийнятим допущенням, можна вважати, що температура газів t° в даному місці вимірювання l_T однозначно відповідає лінійній координаті h в межах шару пропорційності h_{II} (див. рис. 2.7). Інакше кажучи, температура t° лінійно росте від t°_I до t°_{II} при зміні h від нуля до h_{II} :

$$t^{\circ} = Ch + t^{\circ}_I, \quad (2.4)$$

де Ch - коефіцієнт пропорційності між температурою газів і лінійною координатою по висоті шару,

t°_I градієнт температури, град/м.

Підставивши в останнє рівняння $h_{сп} = h_{II}$ і $t^{\circ} = t^{\circ}_I$ і позначивши діапазон зміни температури $\Delta t^{\circ} = t^{\circ}_{II} - t^{\circ}_I$ отримаємо, що градієнт температури визначається як:

$$C = \frac{\Delta t^{\circ}}{h_{II}}, \quad (2.5)$$

Поточну координату можна виразити як $h = h_{сп} - h_I$. У свою чергу $h_{сп}$

виражається у виді $h_{\text{сп}} = l_T \frac{h_{\text{сп}}}{h_c}$. При підстановці цих значень в рівняння (2.4) отримаємо вираз статичної характеристики процесу:

$$t^\circ = Cl_T \frac{V_{\text{сп}}}{V_c} - Ch_I + t^\circ_I \quad (2.6)$$

Тепер перетворимо отримане рівняння, підставивши $h_I = H - h_{II}$ і маючи на увазі, що $Ch_{II} = t^\circ_{II} - t^\circ_I$. Остаточно отримаємо

$$t^\circ = Cl_T \frac{V_{\text{сп}}}{V_c} - Ch_I + t^\circ_{II} \quad (2.7)$$

Статична характеристика процесу спікання виражає залежність температури газів, що відходять, від швидкості спікання, швидкості аглострічки і висоти шару шихти. Як постійні коефіцієнти, окрім l_T , в рівнянні (2.7) на першому етапі прийняті величини C і t° . Рівняння статичної характеристики залишається справедливим тільки в області пропорційної зміни температури, тобто в межах від t° до t°_{II} . Ці межі визначають граничні умови для кожного з аргументів рівняння (V_c , $V_{\text{сп}}$, H).

Швидкість аглострічки є основною регулюючою дією в системі. При синтезі регулятора швидкості необхідно знати статичну залежність між температурою відхідних газів (вихідна величина об'єкта) та швидкістю стрічки (регульовальна дія), а також коефіцієнт підсилення об'єкта і допустимий хід регулюючого органу.

З рівняння (2.7) випливає, що температура відхідних газів пов'язана зі швидкістю аглострічки зворотнопропорційною залежністю. У формі

$$(t^\circ + CH - t^\circ_{II}) = \frac{Cl_I V_{\text{сп}}}{V_c} \quad (2.8)$$

залежність представиться рівнобічною гіперболою з асимптотами, співпадаючими з осями координат, і віддаленою від початку координат O' (рис. 2.9) на величину a , пропорційну коефіцієнту $Cl_T V_{сп}$. Фактично ж, як впливає з рівняння (2.7), вісь швидкості виявляється зміщеною на величину, визначувану вільним членом $(-CH + t^\circ_{II})$. Величина $(-CH + t^\circ_{II})$ характеризує ту властивість процесу, що температура газів починає підвищуватися тільки досягнувши величини спеченого шару, а до цього залишається незмінною і рівною t°_I .

З рис. 2.9 видно, що температура досягає своїх граничних значень при визначених значеннях швидкості аглострічки. Виразив з рівняння (2.7) швидкість аглострічки через решту параметрів процесу:

$$V_c = Cl_T \frac{Cl_T \cdot V_{сп}}{CH + t^\circ - t^\circ_I} \quad (2.9)$$

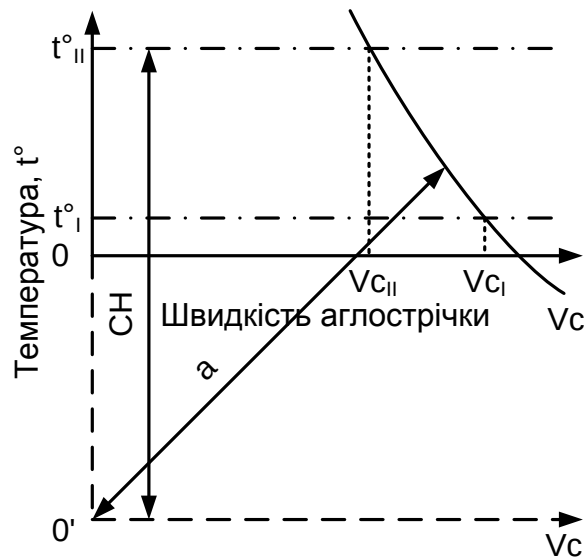


Рис. 2.9. Залежність температури від швидкості аглострічки

(розроблено автором з використанням [1],[2])

і підставивши граничні значення температури $t^\circ = t^\circ_I$ і $t^\circ = t^\circ_{II}$, отримаємо вирази для граничних швидкостей аглострічки:

$$\left. \begin{aligned} V_{cl} &= \frac{l_T \cdot V_{сп}}{h_I} \\ V_{cl} &= \frac{l_T \cdot V_{сп}}{H} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Граничні значення швидкості аглострічки пропорційні вертикальній швидкості спікання та відстані до точки вимірювання, і обернено пропорційні висоті шару. Діапазон регулювання (допустимий хід регулюючого органу) визначається як різниця граничних швидкостей:

$$\Delta V_{с,доп} = V_{cl} - V_{clI} = V_{сп} \cdot l_T \frac{h_{II}}{H \cdot h_{II}} \quad (2.11)$$

На практиці при визначенні діапазону регулювання використовують усереднені значення вертикальної швидкості спікання та висоти шару шихти.

Статичний коефіцієнт посилення процесу може бути знайдений як похідна від температури за швидкістю аглострічки: $K_y = \frac{d \cdot t^\circ}{d \cdot V_c}$. Продифференціювавши рівняння статичної характеристики (2.7), отримаємо, що

$$K_y = -C h_{II} \frac{V_{сп}}{V_c^2} \quad (2.12)$$

Таким чином, коефіцієнт підсилення є зворотною квадратичною функцією швидкості аглострічки. Від'ємний знак відображає зворотнопропорційний характер залежності: зростання швидкості стрічки знижує температуру відхідних газів.

Практично для невеликих змін швидкості аглострічки ΔV_c коефіцієнт посилення можна визначити як $K_y = \frac{\Delta t^\circ}{\Delta V_{cl}}$ де Δt° - відповідна мала зміна температури. Віднявши почленно два рівняння статички (2.7). Для різних значень швидкості аглострічки V_{cl} і V_{clI} , отримаємо:

$$\Delta t^{\circ} = t^{\circ}_{II} - t^{\circ}_I = -C \cdot l_T \cdot V_{\text{сп}} \frac{\Delta V_c}{V_{cl} \cdot V_{cII}} \quad (2.13)$$

Звідси вираз для коефіцієнта підсилення набуває вигляду:

$$K_y = -C \cdot l_T \cdot V_{\text{сп}} \frac{\Delta V_c}{V_{cl} \cdot V_{cII}} \quad (2.14)$$

Нелінійний характер статичної залежності зумовлює те, що коефіцієнт підсилення об'єкта змінюється залежно від поточного значення швидкості аглострічки - цей факт необхідно враховувати при налаштуванні регулятора швидкості.

2.4 Система автоматичного регулювання закінчення процесу спікання шихти

2.4.1 Електропривод машини як виконавчий елемент АСУТП спікання шихти. Вимоги, що пред'являються до виконавчого елементу агломашини

Як силовий виконавчий елемент системи автоматичного регулювання завершеності спікання застосовано регульований асинхронний електропривод. Якість агломерату та продуктивність машини визначаються точністю узгодження горизонтальної швидкості стрічки з вертикальною швидкістю фронту горіння. Невчасне завершення спікання призводить до повернення недопеченого нижнього шару у шихту, тоді як передчасне - до втрати корисної довжини спікального тракту. Обидва випадки знижують ККД обладнання та збільшують питому енергоспоживчу складову.

- контроль швидкості аглострічки;
- управління електроприводом;

- контроль температури димових газів, що відходять.

Аналіз виробничих режимів роботи агломашини показує, що система електропривода аглострічки є визначальним елементом у ланцюзі «якість шихти - швидкість стрічки - якість агломерату». Відхилення швидкості від оптимуму у будь-який бік спричиняє або перевитрату електроенергії, або погіршення виходу товарної фракції.

Ключовим електромеханічним завданням є автоматичне підтримання умови завершення спікання над передостанньою вакуумною камерою шляхом оперативної зміни вихідної частоти перетворювача на підставі сигналу зворотного зв'язку по температурному перепаду відхідних газів.

До електропривода аглоленти пред'являються такі електромеханічні вимоги:

- діапазон регулювання швидкості 5:1 у зв'язку з можливими змінами часу спікання шихти при змінах її складу, вологості;
- точність підтримки швидкості у всьому діапазоні регулювання 5%;
- повинні бути забезпечені також автоматична підтримка величини гальмівного моменту;
- попередній вибір зазору між спікальними візками у верхній гілці стрічки;
- фіксація спікальних візків на зірочках під час зупинки машини.

Для реалізації зазначених вимог прийнята система частотно-регульованого електропривода ПЧ-АД зі скалярним керуванням $U/f=\text{const}$ та двоконтурною системою підпорядкованого регулювання (контур струму + контур швидкості).

Обраний асинхронний двигун конструктивно позбавлений ковзних контактів, що визначає суттєво вищий ресурс та мінімальні витрати на технічне обслуговування в умовах запиленого середовища аглоцеху порівняно з двигуном постійного струму.

2.4.2 Вибір електродвигуна і перетворювача частоти

Потужність приводного двигуна агломації приймаємо згідно діючої установки

Вибираємо двигун Siemens 1LE1003-1CB43-4FA4 з такими параметрами [3]:

- номінальна потужність - 22 кВт;
- номінальна напруга - 380 В;
- номінальний струм статора - 45 А;
- ККД - 89 %;
- коефіцієнт потужності - 0,84;
- номінальна частота обертання - 981 хв⁻¹;
- кратність пускового струму - 7,0;
- кратність пускового моменту - 2,2;
- $M_{\text{макс}} / M_{\text{ном}}$ - 2,4;
- момент інерції - 0,66 кг · м²;
- ступінь захисту - IP54;
- режим роботи - S1.
- активний опір статора $R_c = 0,088 \text{ Ом}$
- активний опір ротора $R_p = 0,085 \text{ Ом}$
- індуктивність статора $L_c = 0,05 \text{ Гн}$
- індуктивність ротора $L_p = 0,05 \text{ Гн}$
- індуктивність розсіювання статора $L_{pc} = 9,22 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$
- індуктивність розсіювання ротора $L_{pp} = 9,22 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$
- взаємна індуктивність $L_m = 0,049 \text{ Гн}$
- номінальна швидкість $W_n = \frac{\pi \cdot 980}{30} = 102,73 \text{ P / c}$
- номінальний момент $M_n = \frac{22000}{102,6} = 214,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$

- пусковий момент $M_n = 2,2 \cdot M_n = 2,2 \cdot 214 = 470 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Перетворювач частоти тип Danfoss VLT FC302 P30K з наступними параметрами [4]:

Номінальна напруга, В.....	380
Номінальна частота, Гц.....	50
Номінальний струм, А.....	63
Максимально допустима потужність двигуна, кВт.....	30
Діапазон установки початкової частоти, Гц.....	0,5-400
Рівень струмообмеження.....	1,5 In

Принципова схема системи керування розроблена відповідно до технічної документації на перетворювач частоти [4]. Для живлення датчика швидкості задіяно вбудоване джерело +24 В постійного струму перетворювача, що виключає потребу в окремому блоці живлення. Принципова схема системи керування наведена на рис. 2.10.

Силова схема живлення реалізована через трифазну мережу 380 В із захисним автоматом QF1. Гальванічну ізоляцію кіл керування забезпечує трансформатор 380/220 В (вимикач QF2). При спрацюванні кнопки S1 втягується контактор КМ1, подаючи живлення на перетворювач та активуючи дискретний вхід LI1. Внутрішня схема утримання перетворювача реалізована через контакт R1A-R1C. Для зменшення рівня вищих гармонік струму в мережі встановлено вхідний дросель L1. Усі корпуси заземлено відповідно до вимог ПУЕ. Передача технологічних даних на верхній рівень SCADA здійснюється через промисловий інтерфейс Modbus RTU. Принципова схема керування наведена на рис. 2.10.

Корпуси всіх установок заземлюються. Параметри роботи перетворювача можуть передаватися до ЕОМ верхнього рівня за протоколом Modbus.

2.4.3 Розробка функціональної схеми автоматичного контролю закінченості спікання агломерату

Основними техніко-економічними показниками роботи агломераційної машини є питома продуктивність (т/год на м² площі спікання) та якість отриманого агломерату. Якість характеризується хімічним складом, механічною міцністю та відновлюваністю спеченого продукту.

Забезпечення стабільних показників продуктивності та якості безпосередньо визначається точністю регулювання процесу спікання. Складність цього процесу як об'єкта регулювання пов'язана з його залежністю від значної кількості технологічних чинників: хімічного та гранулометричного складу шихти, вмісту твердого палива, умов запалення тощо.

Регулювання процесу спікання полягає в автоматичній підтримці завершеності горіння над передостанньою вакуум-камерою шляхом зміни швидкості аглострічки відповідно до поточних характеристик шихти.

Найпростішим і найнадійнішим показником завершеності спікання є перепад температур відхідних газів між передостанньою та останньою вакуум-камерами. Значення перепаду 30-40°C відповідає нормальному завершенню горіння над передостанньою камерою.

На підставі описаного принципу синтезовано замкнену систему автоматичного регулювання швидкості аглострічки, де сигналом зворотного зв'язку є різниця температур відхідних газів у передостанній та останній вакуум-камерах. Функціональна схема розробленої системи наведена на рис. 2.12.

Для вимірювання температури відхідних газів у кінцевих вакуум-камерах встановлено два термоперетворювачі ТХКУ-205. Різниця їх термо-

ЕРС, пропорційна різниці температур, підсилюється операційним підсилювачем до рівня аналогового входу ПЛК (0-10 В або 4-20 мА). Принципова схема підключення термопар наведена на рис. 2.11.

Різниця термо-ЕРС двох термопар є вхідним сигналом зворотного зв'язку замкненого контуру регулювання. При відхиленні виміряного перепаду від уставки 30-40°C ПЛК формує коригуючу дію на вихідну частоту перетворювача.

ПЛК за алгоритмом ПІ-регулятора обчислює відхилення виміряного температурного перепаду від уставки (30-40°C) та формує аналоговий вихідний сигнал 4-20 мА на аналоговий вхід перетворювача частоти. Перетворювач змінює вихідну частоту відповідно до характеристики $U/f=\text{const}$, що призводить до зміни швидкості аглострічки та відновлення нормального температурного профілю у кінцевих вакуум-камерах. Функціональна схема наведена на рис. 2.12.

Схема підключення термопар наведена на рис. 2.11.

Таким чином, запропонована система забезпечує автоматичне регулювання швидкості стрічки на основі точного контролю завершеності спікання шихти, що дозволяє оптимізувати продуктивність та якість агломерату.

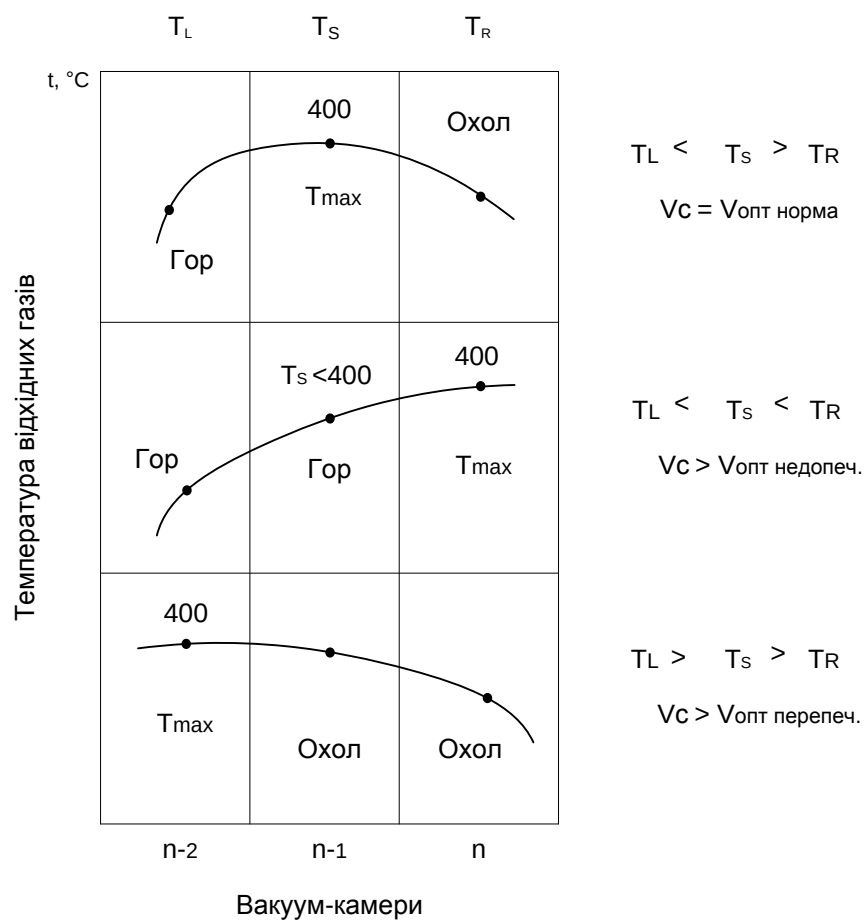


Рис. 2.11. Схема включення термопар
(розроблено автором)

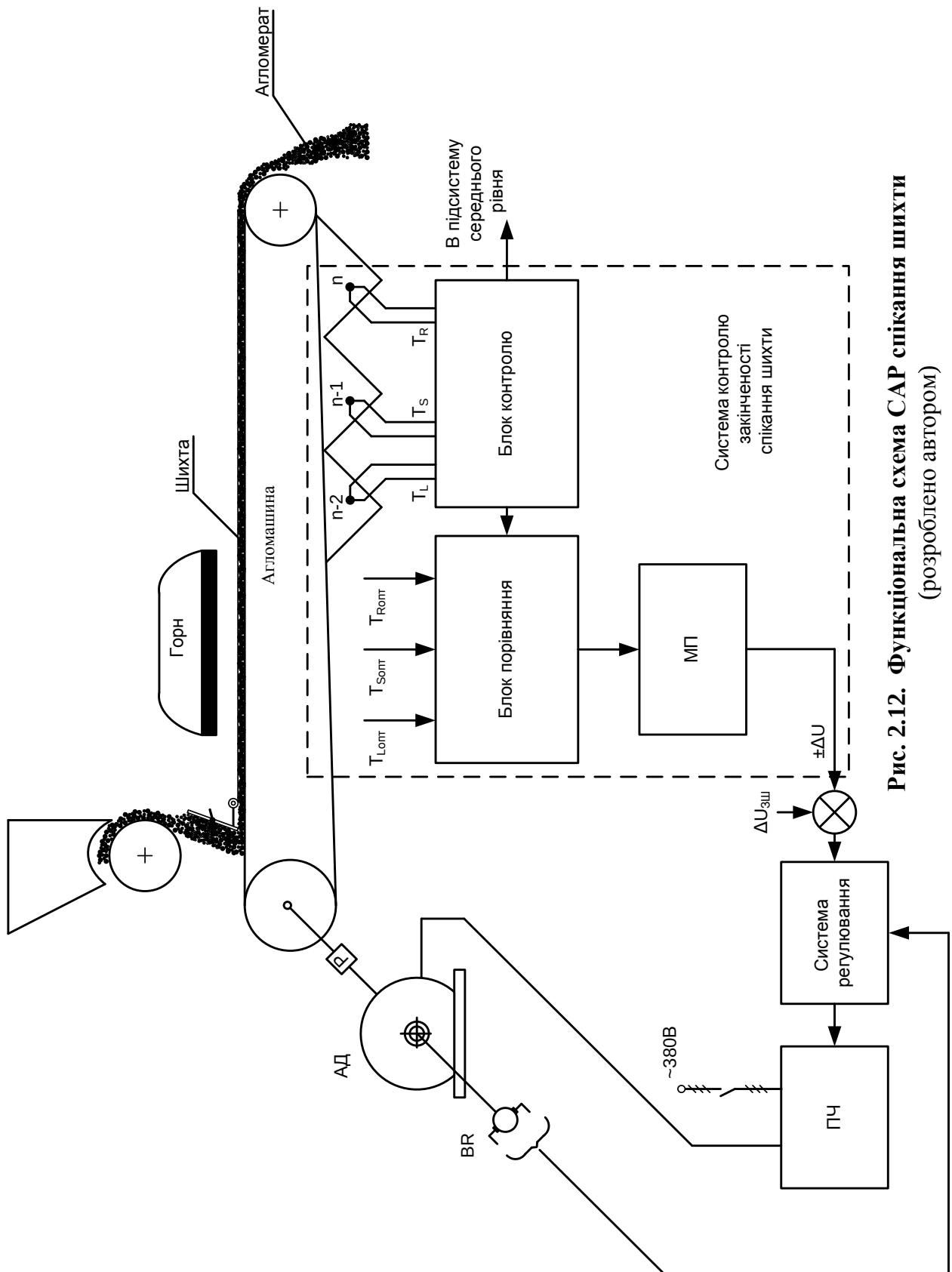


Рис. 2.12. Функціональна схема САР спікання шихти
(розроблено автором)

2.4.4 Алгоритм роботи САР спікання шихти і схема включення датчиків температури

Алгоритм роботи системи автоматичного регулювання завершеності спікання шихти наведено на рис. 2.13. ПЛК циклічно зчитує сигнали двох термоперетворювачів і обчислює різницю температур $\Delta T = T_{n-1} - T_n$, де T_{n-1} - температура в передостанній, T_n - в останній вакуум-камері.

При відхиленні ΔT від заданого значення (30-40°C) регулятор формує пропорційно-інтегральну керуючу дію. Недопікання ($\Delta T < \Delta T_{\text{зад}}$): зменшення завдання частоти перетворювача уповільнює стрічку, збільшує час перебування шихти в зоні горіння, переміщує фронт завершення до передостанньої камери і підвищує ΔT до норми. При перепіканні ($\Delta T > \Delta T_{\text{зад}}$): завдання частоти збільшується, стрічка прискорюється, ΔT знижується. Підтримання встановленого значення частоти в стаціонарному режимі забезпечується внутрішнім регулятором перетворювача.

Контроль температури газів, що відходять, здійснюється за допомогою термопар, встановлених в трьох передостанніх камерах (рис. 2.14).

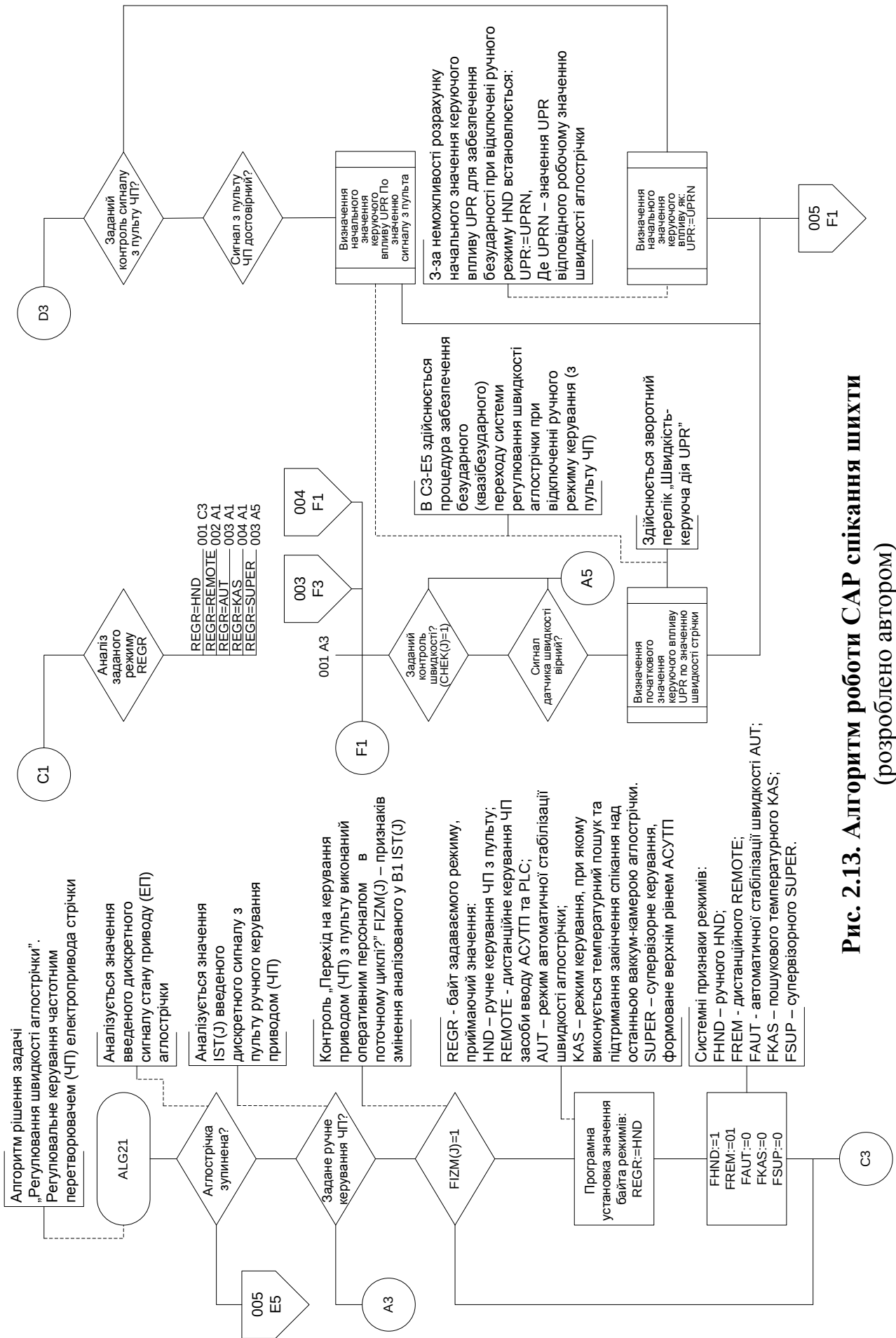


Рис. 2.13. Алгоритм роботи САР спікання шихти
(розроблено автором)

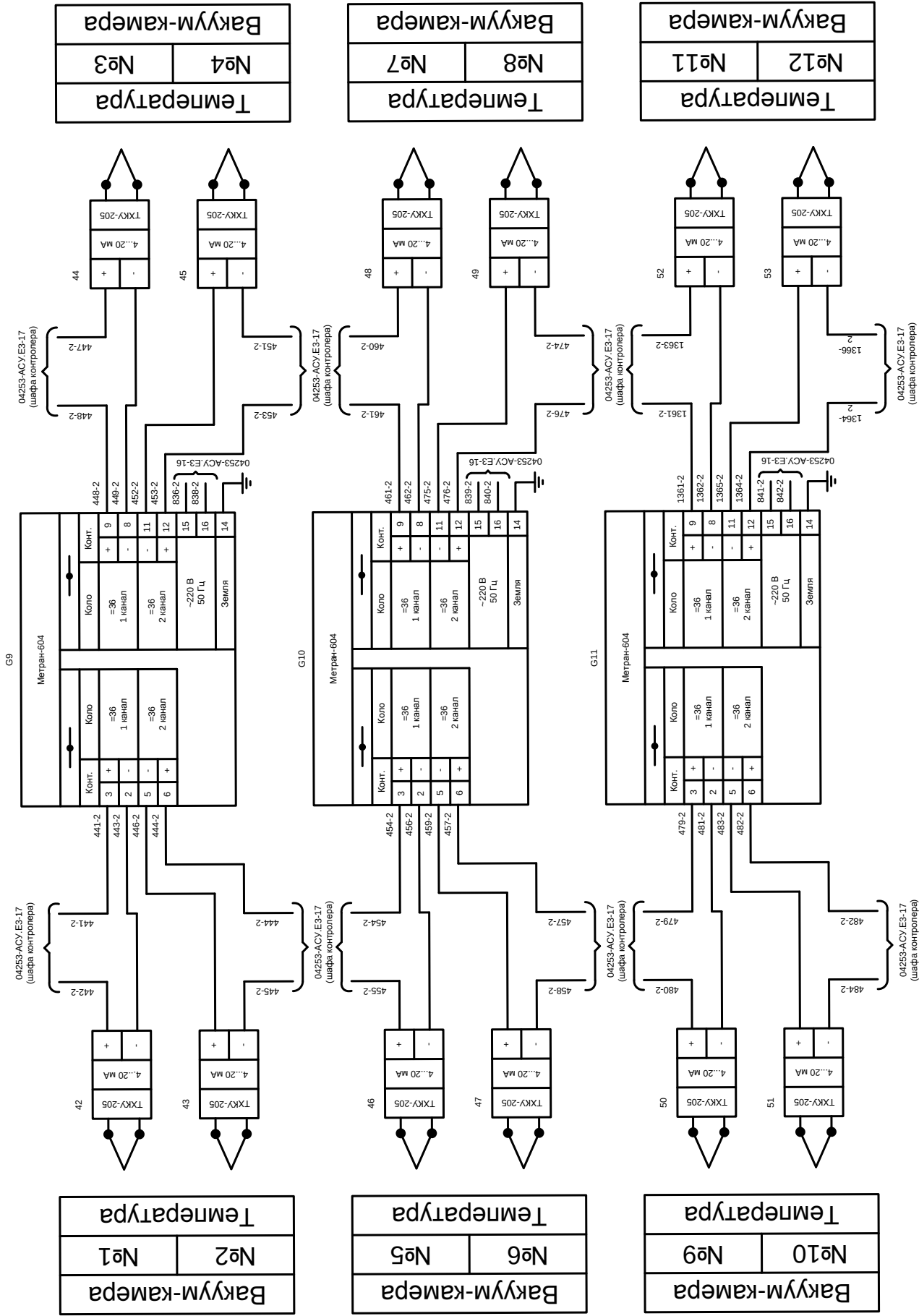


Рис. 2.14. Принципова схема включення терморар

2.4.5 Розрахунок передатних функцій регуляторів та моделювання динамічних режимів замкненої системи

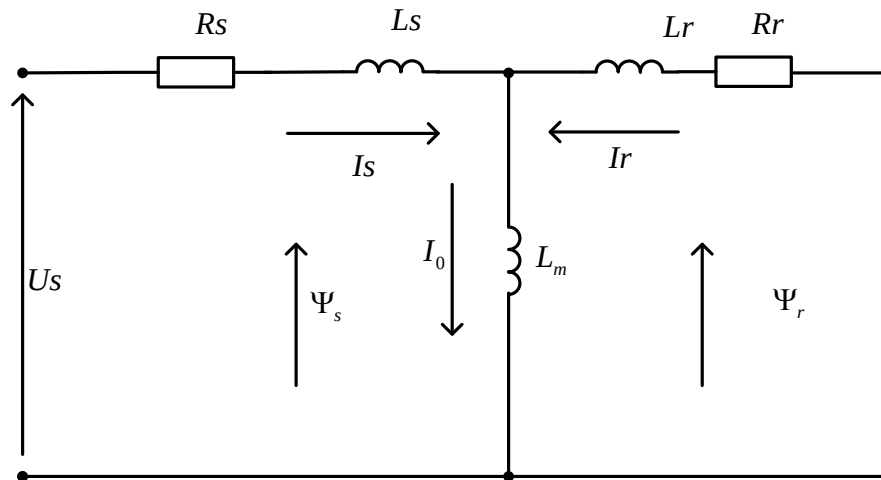


Рис. 2.15. Т- образна схема заміщення асинхронного двигуна
(розроблено з використанням [5])

Номінальна швидкість, рад/с

$$\omega_{\text{ном}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot \omega_0 = (1 - 0,019) \cdot 104,72 = 102,73 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \quad (2.15)$$

Номінальний момент, Нм

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{22000}{102,73} = 214,153 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.16)$$

Пусковий момент, Нм

$$M_{\text{п}} = 214,153 \cdot 1,9 = 406,892 \text{ Нм} \quad (2.17)$$

Номінальний струм статорної обмотки, А

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{н}}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \cos \varphi} = \frac{22000}{3 \cdot 3464,1 \cdot 0,9 \cdot 0,85} = 43,694 \text{ А} \quad (2.18)$$

$$I_{\mu} = I_{\text{ном}} \left(\sin \varphi_{\text{н}} - \frac{\cos \varphi}{K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}} \right) = 43,694 \cdot \left(0,527 - \frac{0,85}{2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}} \right) = 15,266 \text{ A} \quad (2.19)$$

Струм намагнічування, А

$$I_0 = I_{\mu} = 15,266 \text{ A} \quad (2.20)$$

Приймаємо коефіцієнт твердості

$$\beta = 1,5$$

Конструктивний коефіцієнт

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot K_i \cdot I_{\text{н}}} = 1 + \frac{15,266}{2 \cdot 6,5 \cdot 43,694} = 1,027 \quad (2.21)$$

Критичне ковзання

$$S_{\text{к}} = S_{\text{н}} \cdot \frac{K_m + \sqrt{K_m^2 - [1 - 2 \cdot S_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (K_m - 1)]}}{1 - 2 \cdot S_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (K_m - 1)} \quad (2.22)$$

$$= 0,019 \cdot \frac{2,5 + \sqrt{2,5^2 - [1 - 2 \cdot 0,019 \cdot 1,5 \cdot (2,5 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,019 \cdot 1,5 \cdot (2,5 - 1)} = 0,099 \text{ в. о.}$$

Номинальний струм ротора, А

$$I_r' = I_{\text{н}} \cdot \cos \varphi = 43,694 \cdot 0,85 = 37,14$$

(2.23)

Активний опір роторного кола, Ом

$$R_r = \frac{M_{\text{н}} \cdot \omega_0 \cdot S_{\text{н}}}{3 \cdot I_r'^2} = \frac{214,153 \cdot 104,72 \cdot 0,019}{3 \cdot 37,14^2} = 0,103 \text{ Ом} \quad (2.24)$$

Активний опір статорного кола, Ом

$$R_s = R_r \cdot \beta \cdot C_1 = 0,103 \cdot 1,5 \cdot 1,027 = 0,159 \text{ Ом} \quad (2.25)$$

Знаходимо коефіцієнти квадратного рівняння відносно β

$$A_0 = \frac{(I_{\text{н}} \cdot \cos \varphi - I_0)}{U_{\phi}} = 0,1$$

$$A_1 = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot C_1 \cdot K_m \cdot P_H} = 1,254$$

$$B = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{S_K} - \frac{2 \cdot A_0 \cdot A_1}{S_H} = 49,477$$

$$C = \frac{1}{S_H \cdot S_K} - \left(\frac{1}{S_H^2} + \frac{1}{S_K^2} \right) \cdot A_0 \cdot A_1 = 167,795$$

$$\beta_1 = \frac{-B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} - C} = -3,663$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_K^2} - \beta_1^2} = 9,313$$

Повний індуктивний опір, Ом

$$X_H = \gamma \cdot C_1 \cdot R_r = 9,313 \cdot 1,027 \cdot 0,103 = 0,985 \text{ Ом} \quad (2.26)$$

Знайдемо індуктивні опори розсіювання фаз статора і ротора

$$X'_{2\sigma} = \frac{0,58 \cdot X_H}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,985}{1,027} = 0,556 \quad (2.27)$$

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_H = 0,42 \cdot 0,985 = 0,414 \quad (2.28)$$

ЕДС ланки намагнічування, В

$$E_1 = \sqrt{(U_{\phi} \cdot \cos \varphi - R_s \cdot I_H)^2 + (U_{\phi} \cdot \sin \varphi_H - X_{1\sigma} \cdot I_H)^2} = 3,252 \cdot 10^3 \quad (2.29)$$

Індуктивний опір галузі намагнічування, Ом

(2.30)

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{204,319}{15,266} = 13,38 \text{ Ом}$$

$$X_m = X_{\mu} = 13,384 \text{ Ом}$$

Повний індуктивний опір статорного кола, Ом

$$X_s = X_{\mu} + X_{1\sigma} = 13,384 + 0,414 = 13,798 \text{ Ом} \quad (2.31)$$

Повний індуктивний опір роторного кола, Ом

$$X_r = X_{\mu} + X'_{2\sigma} = 13,384 + 0,556 = 13,94 \text{ Ом} \quad (2.32)$$

Індуктивність статорного кола, Гн

$$L_s = \frac{X_s}{\omega_0} = 0,132 \text{ Гн} \quad (2.33)$$

Індуктивність роторного кола, Гн

$$L_r = \frac{X_r}{\omega_0} = 0,133 \text{ Гн} \quad (2.34)$$

Індуктивність контура намагнічення, Гн

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_0} = 0,128 \text{ Гн} \quad (2.35)$$

Коефіцієнт розсіювання

$$\delta = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \right) = 0,069 \quad (2.36)$$

Сумарний момент енергії

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} = 0,66 + 8,52 = 9,18 \text{ кгм}^2 \quad (2.37)$$

Електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0}{M_{\Pi}} = \frac{9,18 \cdot 104,72}{406,892} = 2,36 \text{ с} \quad (2.38)$$

Для перевірки параметрів синтезованих регуляторів та оцінки якості перехідних процесів системи ПЧ-АД виконано комп'ютерне моделювання в середовищі Matlab/Simulink. Модель реалізує двоконтурну структуру підпорядкованого регулювання: внутрішній контур струму з ПІ-регулятором, що обмежує пусковий струм, та зовнішній контур швидкості з задавачем інтенсивності.

Для даної системи реалізовано скалярне керування $U/f=\text{const}$ зі зворотним зв'язком за кутовою швидкістю ротора. Перетворювач частоти на підставі сигналу датчика швидкості виконує корекцію вихідної частоти, підтримуючи стабілізовану швидкість двигуна незалежно від зміни навантаження.

Лінеаризована структурна схема двоконтурної системи регулювання зображена на рис. 2.16. Параметри схеми заміщення двигуна розраховані за каталожними даними і внесені до моделі. Задавач інтенсивності формує лінійно наростаюче завдання швидкості, що обмежує початковий стрибок струму до допустимого рівня.

На підставі розрахованих параметрів схеми заміщення визначено коефіцієнти структурної схеми:

Коефіцієнт передачі перетворювача по напрузі й постійна часу:

$$K_{\text{ПЧ}} = \frac{f_c}{U_{\text{зmax}}} = \frac{50}{10} = 5 \frac{\text{Гц}}{\text{В}} \quad (2.39)$$

Постійна часу перетворювача приймається рівною $T_{\text{п}} = 0,001\text{с}$

Базовий опір

$$Z_{\text{б}} = \frac{P_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \frac{22000}{43,694} = 503,502\text{Ом} \quad (2.40)$$

Повний опір

$$R_{\text{к}} = R_{\text{с}} + R_{\text{р}} = 0,159 + 0,103 = 0,262\text{ Ом} \quad (2.41)$$

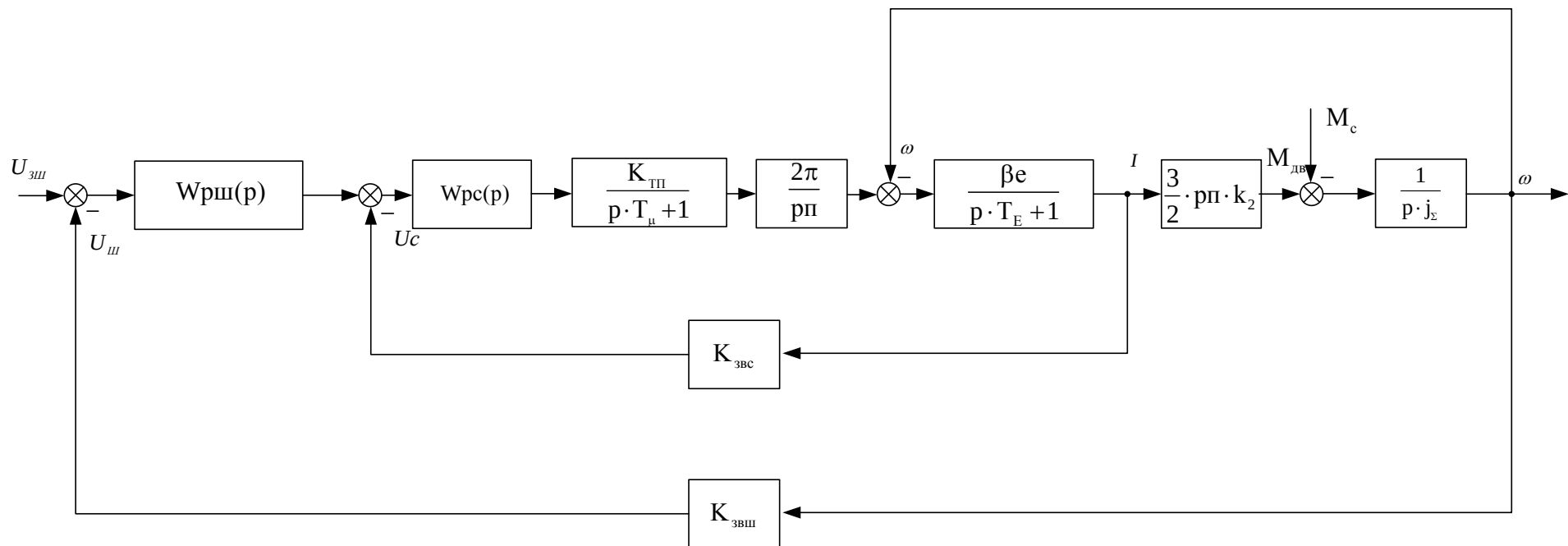


Рис. 2.16. ПЧ-АД (Лінеаризована структурна схема)
 (розроблено автором з використанням [6]-[14])

Повний опір у в.о.:

$$r\Sigma = \frac{R_k}{Z_6} = \frac{0,262}{503,502} = 0,00051 \quad (2.42)$$

Електромагнітна твердість:

$$\beta_e = \frac{1}{r\Sigma} = \frac{1}{0,00051} = 1925 \quad (2.43)$$

Електромагнітна постійна:

$$T_e = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s_k} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,1} = 0,032c \quad (2.44)$$

2.4.5.1 Розрахунок регулятора струму

Запишемо передатну функцію розімкнутого контуру стабілізації струму:

$$W_{розстабI}(p) = W_{рс}(p) \cdot \frac{K_{пч}}{T_{п} \cdot p + 1} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{p_{п}} \cdot \frac{\beta_e}{T_e \cdot p + 1}, \quad (2.45)$$

Бажана передатна функція розімкнутого контуру стабілізації струму:

$$W_{бажрозстабI}(p) = \frac{\frac{1}{K_c}}{a_c \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}, \quad (2.46)$$

де K_c - коефіцієнт зворотного зв'язку по струму

$$K_c = \frac{U_{зстmax}}{2,5 \cdot I_H} = \frac{10}{109,235} = 0,114 \quad (2.47)$$

Приймаємо $a_c=2$ у відповідності з настроюванням регулятора на МО,

$$T_{\mu} = 0,001c$$

Обчислимо передатну функцію регулятора:

Позначимо:

$$W_{pc}(p) = \frac{T_e \cdot p + 1}{T_i \cdot p} \quad (2.48)$$

$$T_i = \frac{r_p}{2 \cdot T_\mu \cdot K_{пч} \cdot \pi \cdot \beta_e \cdot K_c} = \frac{3}{2 \cdot 0,01 \cdot 5 \cdot 3,14 \cdot 1925 \cdot 0,114} = 0,434 \quad (2.49)$$

Тоді вираження (2.10) прийме вид:

$$W_{pc}(p) = \frac{T_e \cdot p + 1}{T_i \cdot p} = \frac{0,032 \cdot p + 1}{0,43 \cdot p} \quad (2.50)$$

2.4.5.2 Розрахунок регулятора швидкості

Запишемо передатну функцію розімкнутого контуру стабілізації швидкості:

$$\begin{aligned} W_{розстабШ}(p) &= W_{рш}(p) \cdot W_{замкстабШ}(p) \cdot \frac{3}{2} \cdot r_p \cdot K_r \cdot \frac{1}{J \Sigma \cdot p} = \\ &= W_{рш}(p) \cdot \frac{\frac{1}{K_{ш}}}{a_c \cdot T_{\mu c} \cdot p \cdot (T_{\mu c} \cdot p + 1)} \cdot \frac{3}{2} \cdot r_p \cdot K_r \cdot \frac{1}{J \Sigma \cdot p}, \end{aligned} \quad (2.51)$$

Бажана передатна функція розімкнутого контуру стабілізації швидкості:

$$W_{бажрозстабШ}(p) = \frac{\frac{1}{K_{ш}}}{a_c \cdot T_{\mu c} \cdot p \cdot (T_{\mu c} \cdot p + 1)}, \quad (2.52)$$

Приймаємо $a_c=2$ та $a_{ш}=2$ у відповідності з налаштуванням регулятора на МО,

$$T_{\mu ш} = a_{ш} \cdot T_{п} = 2 \cdot 0,001 = 0,002с \quad (2.53)$$

$$K_{ш} = \frac{U_{зшmax}}{\omega_0} = \frac{10}{104,72} = 0,095 \quad (2.54)$$

$$K_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0,128}{0,133} = 0,96 \quad (2.55)$$

Обчислимо передатну функцію регулятора:

$$W_{рш}(p) = \frac{K_{ш} \cdot J\Sigma}{3 \cdot p_{п} \cdot K_r \cdot 4 \cdot T_{п} \cdot T_{\mu}} = \frac{0,095 \cdot 9,18}{3 \cdot 3 \cdot 0,96 \cdot 4 \cdot 0,001} = 25,363 \quad (2.56)$$

Після визначення всіх параметрів структурної схеми їх внесено до моделі в Matlab/Simulink (рис. 2.17). Виконано моделювання в режимах пуску на номінальне навантаження та ступінчастого накидання навантаження на усталеній швидкості. Отримано графіки перехідних процесів струму та швидкості.

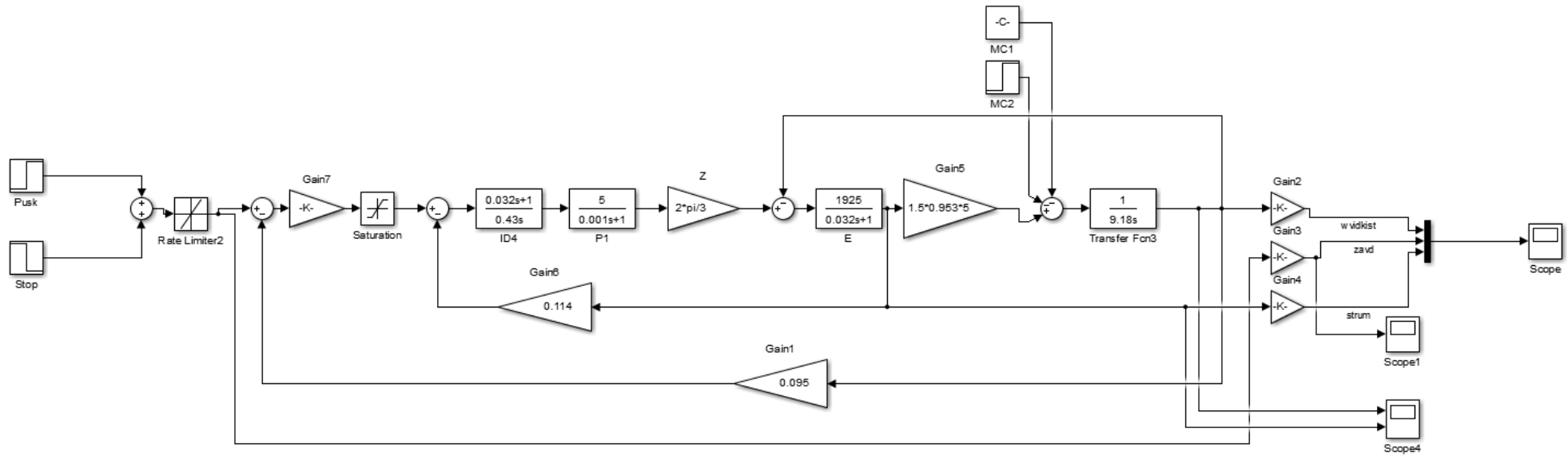


Рис. 2.17. Лінеаризована структурна схема скалярної системи керування ПЧ-АД в програмі Matlab Simulink
(розроблено автором)

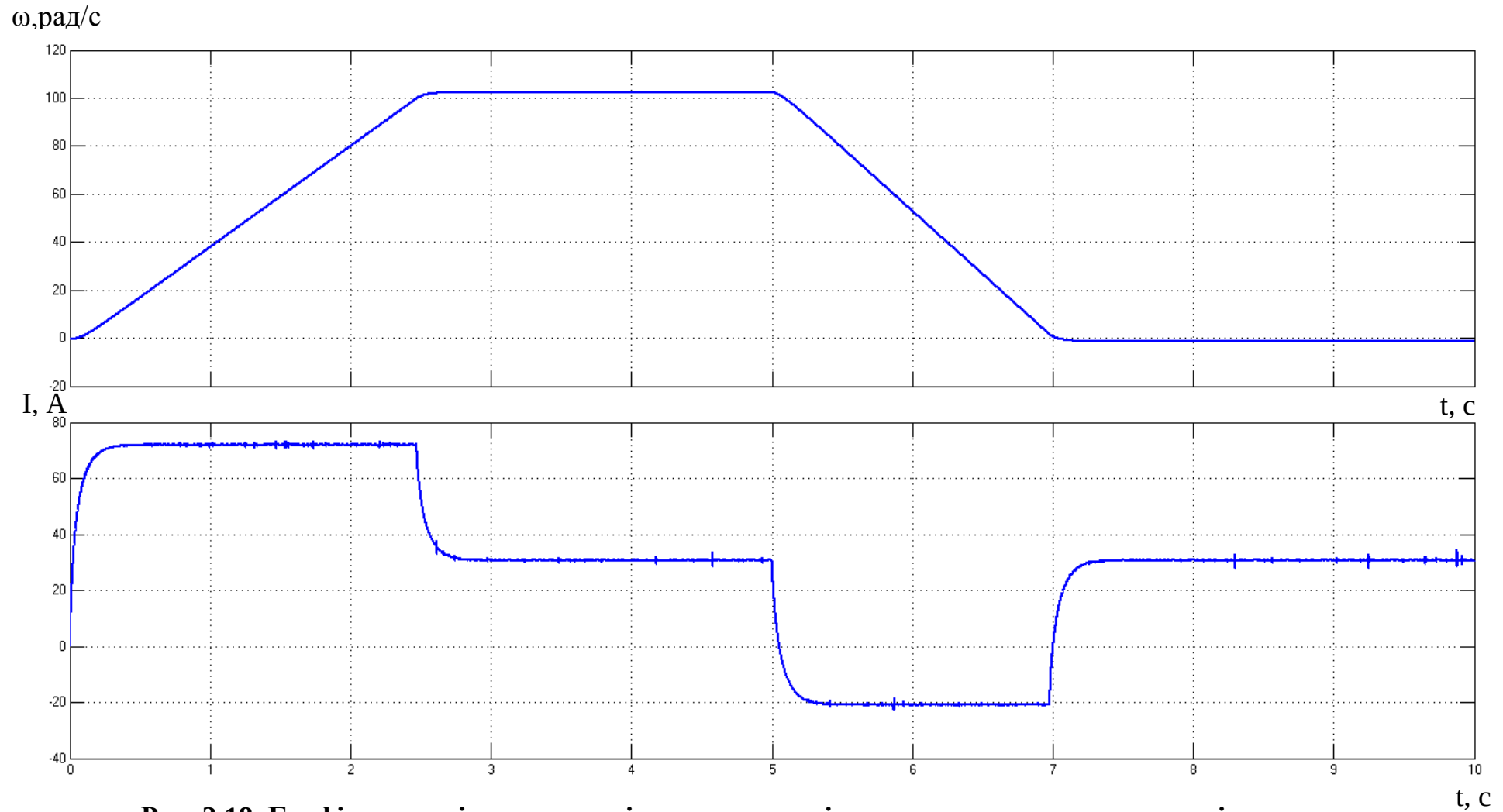


Рис. 2.18. Графіки перехідних процесів по швидкості та струму електроприводу під час пуску та гальмування з навантаженням
(розроблено автором)

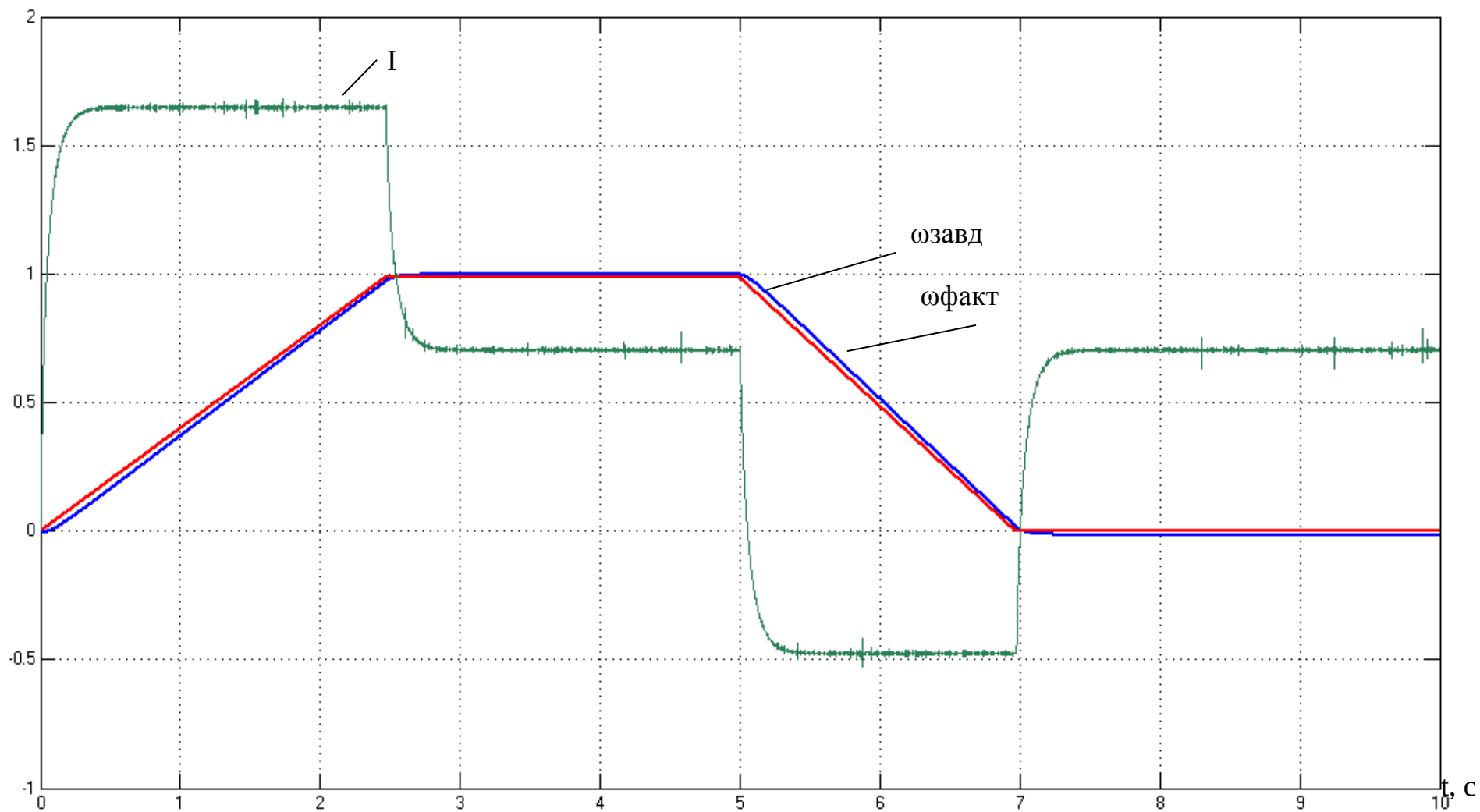
$\omega, I, \text{ в.о.}$ 

Рис. 2.19. Графіки перехідних процесів по швидкості та струму у відносних одиницях

(розроблено автором)

Аналіз графіків показує, що пусковий струм вигуна не перевищує $2I_n$. Час пуску з задавачем інтенсивності становить 2,7с., що відповідає вимогам технології. Статизм по навантаженню в межах 3%. Тобто данна система регулювання відповідає вимогам до приводу конвейера агломашины.

2.5 Вибір частоти знімання сигналів датчиків

2.5.1 Частота знімання сигналів з датчика ваги

Агломераційний процес є відносно повільним порівняно, наприклад, із прокатним виробництвом. Проте для коректного розрахунку частоти опитування датчиків необхідно виконати аналіз похибок вимірювання. Розглянемо сумарну відносну похибку δ_v визначення маси шихти в контролері:

$$\delta_v = \delta_{dv} + \delta_{aцп} + \delta_m, \quad (2.57)$$

де δ_{dv} - погрішність датчика ваги (0,5%),

$\delta_{aцп}$ - погрішність АЦП контролера (0,5%),

δ_m - методична погрішність, обумовлена природою роботи контролера, тобто дискретизацією вхідного аналогового сигналу й наступним його відновленням.

Приймемо такі значення похибок: датчика ваги - не більше 0,5%; АЦП контролера - 0,15%; допустима методична похибка - 1%.

Для одержання методичної погрішності в 1% необхідно визначити частоту знімання сигналів датчика ваги виходячи з максимальної швидкості руху стрічки конвеєра по наступному вираженню:

$$f = 1/t = 1 \times \delta_m / V_{сmax} = 1 \times 0,01/2 = 0,005 = 1/0,005 = 200 \text{ Гц}, \quad (2.58)$$

де f - частота звертання контролера до датчиків сигналів об'єкта керування;

t - період знімання сигналів, сек,

$V_{смах}$ - максимальна швидкість руху стрічки конвеєра, м/сек

2.5.2 Частота знімання сигналів струму якоря двигуна

Визначимо частоту знімання сигналів з якірного шунта двигуна з номінальним струмом 80 А і di/dt 2,9 кА/сек аналогічно (2.58):

$$\begin{aligned} f = 1/t &= 1 \times \delta m_A / di/dt = 1000 \times 0,8/2900 = 0,28 \text{ мсек} = \\ &= 1/0,00028 = 3,56 \text{ кГц}, \end{aligned} \quad (2.59)$$

де δm_A - задана абсолютна погрішність виміру струму, обумовлена з вираження:

$$\delta m_A = 0,01 \times I_n = 0,01 \times 80 = 0,8 \text{ А.}$$

1000 - кількість мсек в 1-й сек.

2 900 - похідна струму (швидкість зміни струму привода в перехідних режимах), А/сек

Знайдена з (2.59) частота визначає вимоги до швидкодії АЦП контролера.

2.6 Вибір технічних засобів реалізації САК

2.6.1 Вибір програмованого логічного контролера для реалізації алгоритму керування

Для виконання алгоритму регулювання завершеності спікання шихти в складі системи застосовано ПЛК CompactLogix 5370 L3 з такими модулями введення/виведення:

Модулі аналогового введення:

1769-IF8 - Модуль аналогового введення з 8 каналами для підключення термопар для контролю температури газів у трьох передостанніх камерах.

Модулі аналогового виведення:

1769-OF8V - Модуль аналогового виведення з 8 каналами струмового сигналу 4-20 мА для керування частотним перетворювачем приводу аглострічки.

Модулі дискретного введення/виведення:

1769-IQ16 - Модуль дискретного введення з 16 каналами 24В постійного струму для введення дискретних сигналів від додаткових датчиків та кінцевих вимикачів.

1769-OB16 - Модуль дискретного виведення з 16 каналами 24В постійного струму для керування дискретними виконавчими механізмами.

Для зв'язку з SCADA системою та людино-машинним інтерфейсом:

1769-L33ER - Модуль EtherNet/IP з двома портами для підключення до промислової мережі Ethernet.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики ПЛК CompactLogix 5370 L3 [15]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Параметр
1	Тип процесора	-	1,1 ГГц, двоядерний
2	Обсяг пам'яті	ГБ	1
3	Вбудований веб-сервер	-	Так
4	Вбудовані порти	-	Ethernet/IP, серійний порт
5	Мови програмування	-	Лестерні діаграми, структурований текст тощо
6	Конструкція	-	Модульна, розширювана
7	Робоча температура	°C	0...60

Таблиця 2.2

Технічні характеристики модуля аналогового введення 1769-IF8 [15]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Параметр
1	Кількість каналів	-	8
2	Тип датчиків	-	Термопари
3	Діапазон вимірювання температури	°C	-210...+760
4	Роздільна здатність АЦП	біт	16
5	Час перетворення	мс	75 (всі канали)
6	Гальванічна ізоляція	-	500В постійного струму
7	Діагностика	-	Діагностика модуля/каналів

Таблиця 2.3

Технічні характеристики модуля аналогового виведення 1769-OF8V [15]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Параметр
1	Кількість каналів	-	8
2	Вихідний сигнал	-	Струм 4-20 мА
3	Роздільна здатність ЦАП	біт	16
4	Час перетворення	мс	1
5	Навантаження на канал	Ом	0-600
6	Гальванічна ізоляція	-	500В постійного струму
7	Діагностика	-	Діагностика модуля/каналів

Таблиця 2.4

Технічні характеристики модуля дискретного введення 1769-IQ16 [15]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Параметр
1	Кількість каналів	-	16
2	Номінальна напруга входу	В пост.ст.	24
3	Номінальний струм входу	мА	4
4	Час фільтрації входу	мс	0-12,8 (налаштовуваний)
5	Гальванічна ізоляція	-	500В постійного струму
6	Діагностика	-	Діагностика модуля/каналів

Таблиця 2.5

Технічні характеристики модуля дискретного виведення 1769-OB16 [15]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Параметр
1	Кількість каналів	-	16
2	Номінальна напруга виходу	В пост.ст.	24
3	Максимальний струм навантаження	А	0,5 на канал
4	Гальванічна ізоляція	-	500В постійного струму
5	Діагностика	-	Діагностика модуля/каналів

Таблиця 2.6

Технічні характеристики комунікаційного модуля 1769-L33ER [15]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Параметр
1	Кількість портів	-	2 x RJ-45
2	Швидкість передачі	Мбіт/с	10/100
3	Промисловий протокол	-	EtherNet/IP
4	Вебконфігуратор	-	Так
5	DPI/ODVA сертифікація	-	Так
6	Автоматичний перехресний зв'язок	-	Так
7	Діагностика	-	Світлодіодна індикація стану

2.6.2 Вибір блоку живлення

Таблиця 2.7

Технічні характеристики блоку живлення Weidmuller PRO ECO 480W [16]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Параметр
1	Вхідна напруга змінного струму	В	100...240
2	Вихідна напруга постійного струму	В	24
3	Номінальний вихідний струм	А	20
4	Ефективність	%	92
5	Паралельне з'єднання	-	Так, для резервування
6	Робоча температура	°C	-25...+60
7	Ступінь захисту	-	IP20

2.6.3 Вибір клемно-блочного з'єднувача

Таблиця 2.8

Технічні характеристики клемно-блочного з'єднувача Weidmuller WDU 2.5 [16]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Параметр
1	Кількість клемних колодок	шт.	10
2	Кількість з'єднань на клемний роз'єм	шт.	2
3	Поперечний переріз проводів	мм ²	0,08...2,5
4	Номінальний струм	А	24
5	Номінальна напруга	В	500
6	Тип монтажу	-	На DIN-рейку 35x7,5
7	Ступінь захисту	-	IP20

2.6.4 Вибір засобів індикації

Таблиця 2.9

Технічні характеристики операторської панелі PanelView 800 [17]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Параметр
1	Діагональ дисплея	"	8
2	Роздільна здатність дисплея	пікс.	800x600
3	Тип дисплея	-	Кольоровий TFT, сенсорний резистивний
4	Інтерфейси	-	Ethernet, серійні порти
5	Функції відображення	-	Тренди, анімації, повідомлення
6	Програмне забезпечення	-	TerminalView SE
7	Робоча температура	°C	0...50
8	Ступінь захисту	-	IP66/IP67/NEMA4X

2.6.5 Вибір датчиків

2.6.5.1 Вибір термоперетворювача

Для контролю за температурою шихти в передостанній вакуум-камері вибираємо термоперетворювач ТХКУ-205 з уніфікованим вихідним сигналом (див. рис.2.20).

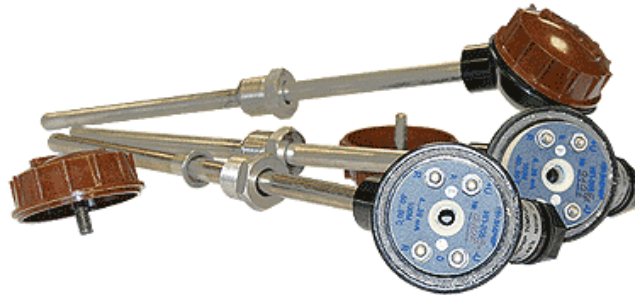


Рис. 2.20. Термоперетворювач ТХКУ-205 [18]

Прилад перетворює температуру в стандартний струмовий сигнал і призначений для застосування в системах автоматичного контролю та регулювання технологічних процесів.

Конструктивне виконання приладу - пилово-вологозахищене, ступінь захисту оболонки IP54, що відповідає умовам роботи в агломераційному цеху.

Таблиця 2.10

Технічні дані термоперетворювача

Тип термо- перетворювача	Діапазон вихідного сигналу, мА	Діапазон перетворення температури, °С	Клас точності
1	2	3	4
ТХКУ-205	4...20	0.....600	1,0

Напруга живлення постійного струму: 18...36В;

Споживана потужність: 0,8 ВА.

2.6.5.2 Вибір датчика швидкості

Для вимірювання кутової швидкості вала двигуна аглострічки обрано інкрементальний енкодер серії E6C2-C виробництва Omron Corporation (Японія).



Рис. 2.21. Датчик швидкості серії E6C2-C [19]

Параметри датчика:

- промислового призначення з підвищеним ступенем захисту і високою стійкістю до ударів і вібрації;
- число імпульсів на оберт від 10 до 2000;
- максимальна швидкість обертання вала 6000 об/хв;
- максимальна частота імпульсів 100 кГц;
- напруга живлення від 5 до 24 В постійного струму;
- ступінь захисту IP64;
- діапазон робочих температур $-10 + 70^{\circ}\text{C}$;
- вихідні сигнали: A, B та Z (реверсивний);
- розміри: 50× 40 мм, діаметр валу 6 мм.

2.7 Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності

2.7.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Агломераційний цех ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» віднесено до підприємств I класу небезпеки з санітарно-захисною зоною 1000 м згідно з [20]. Планування цеху виконано з урахуванням переважаючого напрямку вітрів (північно-захід), що мінімізує вплив виробничих викидів на прилеглі житлові квартали. Розташування відповідає санітарним вимогам до природної вентиляції та освітлення виробничих приміщень [21].

Технологічний процес спікання офлюсованої шихти супроводжується виділенням пилу, токсичних газів та надлишкового тепла, рівень яких перевищує гігієнічні нормативи [22, 23]. За ступенем важкості праці корпус спікання відноситься до III класу (важка праця), що зумовлено значним тепловиділенням обладнання та пилоутворенням [24].

В умовах спікального відділення присутні шкідливі виробничі чинники, фактичні значення яких перевищують встановлені гігієнічні нормативи [25]:

Таблиця 2.11

Шкідливі виробничі чинники спікального відділення

Найменування чинника	Одиниця виміру	Фактичне значення	Нормативне значення
Підвищена запиленість повітря виробничої зони	мг/м ³	22,2	4
Підвищена температура повітря робочої зони	°C	38	18 - 27
Підвищений шум	дБ	97	80
Шкідливі хімічні речовини:			
SiO ₂	%	2 - 10	2,8
SO ₂	%	8	10
CO	%	6,8	20

До найбільш небезпечних чинників спікального відділення відносяться запиленість, шум, теплове навантаження та токсичне газовиділення [26].

Пил у цеху класифікується на видимий (розмір частинок >10 мкм) та мікроскопічний (<10 мкм). Пил, що здатний деякий час перебувати в повітрі, називається аерозолем, а осілий - аерогелем. Склад пилу різноманітний і залежить від джерела пилоутворення [27].

Паливом для запальних горнів агломашин є суміш доменного та природного газу, що містить горючі компоненти (CO , H_2 , CH_4 та вищі вуглеводні) й негорючі (N_2 , CO_2 , H_2O , O_2). Небезпечним аспектом застосування газового палива є токсичність продуктів неповного та повного згоряння [27]. Оксид вуглецю, сірчистий ангідрид, оксиди азоту чинять негативний вплив на організм людини, причому ступінь отруєння визначається концентрацією газу та тривалістю контакту [27].

Генераторами виробничого шуму в спікальному відділенні є ексгаустери, редукторні передачі, вентилятори, насоси та конвеєри, а також газові пальники запальних горнів [28].

Теплонадходження в цеху формуються за рахунок конвективної складової від нагрітого технологічного газу та інфрачервоного випромінювання від розжарених поверхонь і готового агломерату [29].

Параметри мікроклімату спікального відділення (температура повітря, відносна вологість, швидкість повітряного потоку, атмосферний тиск) нормуються відповідними гігієнічними документами [30]. Оптимальні та допустимі значення параметрів мікроклімату для різних категорій важкості праці визначені згідно з [30].

Для захисту працівників від надлишкового тепловиділення необхідне забезпечення належної вентиляції, особливо в літній сезон [29].

Штучне освітлення корпусу спікання реалізовано світильниками НО-500 та НР-200. Рівень освітленості на більшості робочих місць відповідає нормативному значенню ≥ 150 лк, за винятком ділянки гарячого повернення, де видимість знижена через інтенсивне пароутворення [21].

Чинники мікроклімату

Найменування чинника	Одиниця виміру	Фактичне значення	Норматив [22]
Відносна вологість	%	65	40 - 60
Температура повітря:	-	-	-
- теплий період	°C	36	18 - 21
- холодний період	°C	18 - 20	16 - 18
Швидкість руху повітря:	-	-	-
- теплий період	м/с	0,3	0,5
- холодний період	м/с	0,3	0,3
Інтенсивність теплового випромінювання	кал/см ² хв	до 250	250 - 560

До небезпечних виробничих чинників у спікальному відділенні належать газонебезпечні місця та роботи, електричний струм, частини обладнання, що обертаються та рухаються, а також вантажопідйомні механізми [23].

Через спалювання газової суміші в горнах агломашин значну небезпеку становлять газонебезпечні місця III та IV груп і виконання в них газонебезпечних робіт [33].

Електричний струм небезпечний тим, що при проходженні через життєво важливі органи (мозок, серце тощо) може призвести до важких та смертельних наслідків. Струм 0,01-0,02 А для змінного струму частотою 50 Гц та 0,05 А для постійного струму вважається небезпечним для життя, а 0,1 А та вище - смертельним [32].

Електрообладнання спікального відділення переважно працює під напругою 0,4 кВ, за винятком екстаустерів, що працюють під напругою 6 кВ.

Для запобігання ураженню електричним струмом необхідно дотримуватись вимог [33,35]:

- електроустаткування має бути надійно заземленим, ізольованим та захищеним огороженнями;
- експлуатація, ремонт та обслуговування електроустаткування повинні виконуватись відповідно до діючих норм персоналом, що має відповідну кваліфікаційну групу з електробезпеки;
- усі розподільні пристрої електроустановок мають знаходитись у спеціальних приміщеннях з обмеженим доступом.

Небезпеку травмування становлять частини обладнання, що обертаються або рухаються [34,35]. Для запобігання травмам необхідно огорожувати відкриті рухомі елементи обладнання на висоті до 2,5 м від рівня підлоги або в зонах можливого випадкового дотику, за винятком тих, огорожа яких не дозволена їх функціональним призначенням.

У спікальному відділенні також експлуатуються вантажопідйомні механізми: три електромостових крани вантажопідйомністю 7,5 т, 10 т та 16 т [35]. Безпечна експлуатація кранів забезпечується дотриманням вимог [35]:

- персонал, який обслуговує крани, має пройти відповідне навчання та інструктажі;
- вантажопідйомні механізми мають пройти випробування та періодичні огляди відповідно до графіку;
- зона дії вантажопідйомних механізмів має бути позначена відповідними знаками безпеки;
- забороняється перебування людей під вантажем, що піднімається або переміщується.

Отже, у спікальному відділенні агломераційного цеху присутня низка шкідливих та небезпечних виробничих чинників, для запобігання негативному впливу яких необхідно дотримуватись відповідних норм та правил безпеки.

2.7.2 Заходи щодо зниження й усунення шкідливих і небезпечних факторів

Комплексний захист персоналу від шкідливих і небезпечних чинників є обов'язковою умовою безпечної експлуатації агломераційних машин. Заходи безпеки охоплюють технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні рішення, спрямовані на зниження ризику травматизму та розвитку професійних захворювань.

Теплове випромінювання запальних горнів є одним із найсуттєвіших шкідливих чинників. Зниження теплового навантаження на персонал досягається футеруванням горнів сучасними вогнетривкими матеріалами, що зменшують тепловтрати в навколишнє середовище [24]. Додатковим засобом захисту є металеві екрани, покриті торкрет-масою, що встановлюються у зоні виходу спікальних візків з-під горна та суттєво знижують рівень теплового випромінювання в робочу зону [36].

Витяжні зонти над запальними горнами забезпечують відведення продуктів горіння від робочої зони. При введенні горна в експлуатацію подача газу здійснюється виключно на відкритий вогонь; герметичність газопроводів перевіряється відповідними службами. Регулярний відбір проб повітря газовою службою підприємства дозволяє виявляти витіки на ранніх стадіях. Обслуговуючий персонал проходить обов'язкове навчання правилам безпечної роботи з газовим обладнанням та застосуванню засобів газового захисту [37].

По боках запальних горнів монтуються теплозахисні екрани з металевих листів, що знижують рівень інфрачервоного випромінювання в напрямку робочих місць [22].

Для зниження теплового впливу на працівників газоходи екстаустерів, живильники гарячого повернення, трубопроводи та арматура газоочисної системи мають бути теплоізовані. Температура поверхні зовнішнього шару теплоізоляції не повинна перевищувати 45°C [32]. Для видалення конвективних потоків горнів рекомендується встановлювати витяжний зонд з ежектором.

Відвід повітря для найбільш ефективного виділення тепла слід робити над зоною запалення [36]. Необхідно також передбачати вид стінок горна з перенесенням тепла через відкритий повітряний канал з природною циркуляцією повітря, що йде під зонти. Трубопроводи, що виводять гази з високою температурою, повинні бути укриті теплоізоляційними матеріалами [38].

Очищення повітря робочої зони від пилу забезпечується системою витяжної вентиляції з циклонним апаратом [38]. Параметри циклону розраховуються виходячи з об'єму видаленого запиленого повітря, гранулометричного складу пилу та нормованого ступеня очищення.

Електробезпека персоналу забезпечується комплексом організаційно-технічних заходів: унеможливленням контакту з провідними частинами під напругою, зняттям напруги перед проведенням технічного обслуговування та застосуванням діелектричних засобів захисту [33].

Перевагу слід надавати закритим електродвигунам зі ступенем захисту IP54 та вище. Провідники живлення повинні мати надійну ізоляцію і механічний захист від пошкоджень. Клемні коробки двигунів закриваються захисними кришками, а корпуси обов'язково заземлюються або зануляються відповідно до ПУЕ [32].

Значна частина нещасних випадків при роботі з електрорубильниками спричиняється контактом з неізольованими струмопровідними частинами або електричною дугою при відключенні навантаження. Для запобігання цьому рубильники розміщуються в закритих кожухах, а конструкція забезпечує відключення рухом рукоятки зверху вниз (унеможливлення мимовільного спрацювання під власною вагою). Для дистанційного управління електрообладнанням застосовуються магнітні пускачі з потайними кнопками пуску [32].

Технічне обслуговування та ремонт електроустановок допускаються лише навченим персоналом з відповідною кваліфікаційною групою допуску, встановленою нормативними документами [32].

Для захисту від дії шкідливих і небезпечних чинників, які виникають в процесі експлуатації агломашин, агломератники забезпечуються засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) згідно з [39]. Річна потреба агломератників в ЗІЗ наведена в Таблиці 1.

Таблиця 2.13

Річна потреба агломератників в засобах індивідуального захисту

Професія	К-ть чоловік	Засіб індивідуального захисту	Термін носки	Загальна к-ть, шт
Агломератник	50	Костюм суконний	12 місяців	50
		Черевики шкіряні	12 місяців	50
		Капелюх повстяний	12 місяців	50
		Каска пластмасова захисна	до зносу	50
		Рукавиці брезентові	1 пара у місяць	600
		Окуляри захисні від механічних пошкоджень	до зносу	50
		Респіратор	23 шт. у місяць	13800
		Вушні вкладиші шумо-захистні	23 шт. у місяць	13800

2.7.3 Пожежна безпека

В агломераційному виробництві ризики виникнення пожежі пов'язані з такими основними чинниками:

- витоки горючих газів (доменного, природного, змішаного): при змішуванні з повітрям утворюються вибухонебезпечні суміші [40, 41];
- займання пально-мастильних матеріалів (мастил, олив та інших горючих рідин), що використовуються при технічному обслуговуванні [42];
- коротке замикання в електрообладнанні або кабельних трасах, що спричиняє перегрів або займання ізоляції [43, 44];
- поширення вогню кабельними каналами екстаустерного відділення [45];
- займання в складах горючих матеріалів та витратних ресурсів [46];
- порушення вимог пожежної безпеки під час зварювання, різання або інших вогневих робіт [47];
- недотримання правил поведінки з відкритим вогнем та іншими джерелами займання [48].

Небезпечні чинники, що супроводжують пожежу в агломераційному цеху:

- відкрите полум'я, іскри та підвищена температура довкілля [49];
- токсичні продукти згоряння (CO, NO_x, важкі метали) [50];
- погіршення видимості внаслідок задимлення [51];
- можливе руйнування несучих конструкцій та обвалення споруд [52];
- вибухи газоповітряних сумішей у технологічних трубопроводах і вентиляційних каналах [53].

Система пожежної безпеки агломераційного цеху включає такі складові:

- організаційні заходи: інструктажі, навчання з питань пожежної безпеки, система дозволів на проведення вогневих робіт [54];
- будівельно-планувальні рішення: протипожежні відсіки, захищені евакуаційні виходи, протипожежні перегородки [55];
- технічні засоби пожежогасіння (табл. 2.14) [56];

- автоматична система пожежної сигналізації та оповіщення [57];
- плани евакуації та інструкції з пожежогасіння для кожного цеху [58];
- первинні засоби пожежогасіння (табл. 2.15) [58].

Таблиця 2.14

Технічні засоби протипожежного захисту

Засіб	Призначення
Пожежні гідранти	Для під'єднання пожежних рукавів і гасіння
Пожежний водопровід	Для постачання води на гасіння
Пожежні крани, рукави, шафи	Для використання води з водопроводу
Резервуари з водою	У разі відсутності водопроводу

Таблиця 2.15

Первинні засоби пожежогасіння

Засіб	Призначення
Вуглекислотні вогнегасники ВВ-5	Для гасіння невеликих осередків пожежі
Порошкові вогнегасники ВП-6(3)	Для гасіння невеликих осередків пожежі
Ящики з піском 0,6 м ³	Для гасіння невеликих осередків пожежі
Пожежні щити з комплектом засобів	Для гасіння на початковій стадії

Виробництво агломерату є вибухо- та пожежонебезпечним, тому вимагає ретельного дотримання комплексу заходів пожежної безпеки відповідно до чинних в Україні нормативних документів. Особливу увагу слід приділяти запобіганню витокам та вибухам горючих газових сумішей, дотриманню правил експлуатації електроустановок та належного зберігання пожежонебезпечних матеріалів.

ВИСНОВКИ

У випускній роботі виконано електроенергетичне та електромеханічне проектування системи регульованого приводу агломераційної машини за схемою ПЧ-АД. Обґрунтовано перевагу частотно-регульованого приводу перед системою ТП-ДПС в умовах агломераційного цеху: відсутність щіткового апарату, вища надійність в запиленому середовищі, менші витрати на обслуговування. Вибрано та розраховано параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна Siemens 1LE1003-1CB43-4FA4 (22 кВт, 981 об / хв.) та перетворювача частоти Danfoss VLT FC302 P30K.

Синтезовано регулятори струму та швидкості методом технічного оптимуму. Розроблено функціональну схему контролю завершеності спікання шихти на основі різниці температур відхідних газів у вакуум-камерах (норма 30-40°C), інтегровану з контуром регулювання швидкості приводу. За допомогою Matlab/Simulink виконано моделювання динаміки замкненої системи у режимах пуску та набору навантаження. Отримані перехідні процеси підтверджують: пусковий струм не перевищує 2 І_н, час розгону становить 2,7 с, статична похибка за швидкістю не виходить за межі 3%, що повністю відповідає вимогам до електроприводів аглострічок.

Проаналізовано умови експлуатації приводу в аглоцеху: підвищене запилення, теплове навантаження, вібрації. Обґрунтовано заходи з електробезпеки та захисту персоналу від шкідливих виробничих чинників, підібрано технічні засоби системи керування (ПЛК Allen-Bradley CompactLogix, перетворювач частоти Danfoss FC302, термоперетворювачі ТХКУ-205, енкодер Omron E6C2-C). Запропоноване технічне рішення забезпечує підвищення енергоефективності, зниження механічного зносу обладнання та стабільну якість агломерату на підприємстві ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Довідник агломератника: Астахов О.Г., Мачковський А.І. та ін. - К.: Техніка, 1986. - 448 с.
2. Дорошенко В.О., Жилін В.Г., Федоришин М.М. Електрообладнання промислових підприємств. - Київ: Техніка, 2003. - 328 с.
3. <https://vent-a.com.ua/pr4297-trehfaznyj-yelektrodvigatel-air225m6-37-kvt-1000-obmin/> (дата звернення 28.04.2026)
4. <https://chint.ua/uk-ua/peretvoryuvach-chastoti-nvf2g-30ts4-30kvt-380v-3f-zagalniy-tip> (дата звернення 28.04.2026)
5. Мощинський Ю.А. та ін., "Визначення параметрів схеми заміщення асинхронних машин за каталожними даними". Ж.: "Електрика" у №4/98. 1998, стор. 38-42.
6. Blaschke F. The principle of field orientation as applied to the new Transvektor closed-loop control system for rotating-field machines // Siemens Review. - 1972. - Vol. 39, No 5. - P. 217–220.
7. Довідник з електротехніки та електрообладнання: Алієв І.І. - 3-е вид. - М.: Вища школа, 2002. - 324 с.
8. Файнштейн В.Г. Теорія електропривода: методичний посібник. - Кривий Ріг: НМетАУ, 2002. - 129 с.
9. Файнштейн В.Г. Розв'язання задач з теорії електропривода: методичний посібник. - Кривий Ріг: НМетАУ, 2002. - 23 с.
10. Chapman S.J. Electric Machinery Fundamentals. - 5th ed. - New York: McGraw-Hill, 2012. - 688 p.
11. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. - Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. - 711 p.
12. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. - Oxford: Oxford University Press, 1998. - 729 p.
13. Finney D. Variable Frequency AC Motor Drive Systems. - London: IEE Power Engineering Series, 1988. - 300 p.

14. Boldea I., Nasar S.A. Vector Control of AC Drives. - Boca Raton: CRC Press, 1992. - 245 p.
15. <https://iteu.com.ua/uk/products/kontrolleri-compactlogix-5370/> (дата звернення 29.04.2026)
16. <https://ua.uniset.ua/product/pro-eco-480w-24v-20a-dzherelo-zhivlennja/> (дата звернення 29.04.2026)
17. <https://trade-control.com.ua/catalog/paneli-operatora-allen-bradley> (дата звернення 29.04.2026)
18. <https://regmik.ua/uk/product/datchiki-temperature-205/> (дата звернення 29.05.2024)
19. <https://trade-control.com.ua/ua/omron-e6c2-cwz6c> (дата звернення 29.05.2024)
20. ДСП 173-96 "Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів".
21. ДБН В.2.5-28-2018 "Природне і штучне освітлення".
22. ДСН 3.3.6.042-99 "Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень".
23. ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування".
24. НПАОП 0.00-1.24-10 "Правила охорони праці в металургійній промисловості".
25. ДСТУ 7239:2011 "Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту".
26. НПАОП 0.00-1.28-10 "Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин".
27. НПАОП 0.00-1.76-15 "Правила безпеки під час збирання, переробки та утилізації відходів виробництва та спалювання паливно-мастильних матеріалів".
28. ДСН 3.3.6.037-99 "Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку".

29. ДБН В.2.5-28-2018 "Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення".

30. НПАОП 63.21-1.01-09 "Правила охорони праці під час ремонту устаткування на підприємствах чорної металургії".

31. ДСТУ 7237:2011 "Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту".

32. НПАОП 40.1-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів".

33. НПАОП 40.1-1.32-01 "Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок".

34. НПАОП 0.00-1.62-12 "Правила охорони праці на автомобільному транспорті".

35. НПАОП 0.00-1.83-18 "Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання".

36. НПАОП 0.00-1.81-18 Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском.

37. ДСТУ EN 13779:2007 Вентиляція приміщень нежитлових будівель. Вимоги до систем вентиляції та опалення.

38. ДСТУ 3973-2000 Ресурсозбереження. Вторинні матеріали. Терміни та визначення.

39. Довідник типових галузевих норм видачі засобів індивідуального захисту (затверджено Наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 16.04.2009 № 139).

40. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні.

41. НАПБ Б.03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень за вибухопожежною небезпекою.

42. ДСТУ 4163-2020 Рідини нафтові. Пожежовибухобезпечність.

43. ДСТУ 7237:2020 Система стандартів безпеки праці. Електробезпека.

44. ПУЕ (редакція 2017 року) Правила улаштування електроустановок.

45. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва.
46. НАПБ Б.03.017-2009 Правила пожежної безпеки на об'єктах зберігання матеріальних цінностей.
47. НПАОП 0.00-1.81-18 Правила охорони праці під час експлуатації вогневих об'єктів.
48. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні (п.3.8).
49. НАПБ Б.03.001-2004 Типові норми належності вогнегасників.
50. ДСТУ 4632:2019 Промислова емісія забруднюючих речовин.
51. ДСТУ 7237:2020 Система стандартів безпеки праці. Електробезпека (п.1.4.5).
52. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів.
53. НПАОП 0.00-4.12-05 Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці.
54. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва (розділ 5).
55. НАПБ Б.06.004-2005 Автоматичні системи протипожежного захисту.
56. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту.
57. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні (п.1.8).
58. НАПБ Б.03.001-2004 Типові норми належності вогнегасників.
59. С. Гушко. Вимоги з оформлення письмових робіт у державному університеті економіки і технологій. Затверджено Науково-методичною радою Державного університету економіки і технологій (протокол №2 від «08» грудня 2020р.). Навч. посібник. Кривий Ріг, 2020.-53с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-33-2026вр6

Автор

141-33-2026вр6

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ІД документу

334133545

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/2/2026

Дата редагування

—

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1

14407

Кількість слів



КЦ

97710

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		63
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		1
Парафрази (SmartMarks)		92

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копію тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Копію тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	--	--

ЗГОДА здобувачки вищої освіти
Державного університету економіки і технологій про перевірку
кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії Університету

Я, *Муха Вікторія Миколаївна*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод агломашини в умовах агломераційного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомена. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформована, що відповідно до «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» зазначена робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ). З умовами такого розміщення ознайомена.

01.06.2026