

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, електромеханіка»
Форма навчання Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Бабича Миколи Юрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.
Електропривод підйому кисневої фурми конвертера №2 ПАТ «АрселорМіттал
Кривий Ріг».

(повна назва теми)

за матеріалами зі сталеплавильного департаменту ПАТ «АрселорМіттал
Кривий Ріг».

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник доцент, к.п.н. Модло Є.О.
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри
від 15.01. 2026 р. № 6

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.
Наук. ступінь, вчене звання

Є.О. Модло
Ініціали, прізвище

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

Освітньо-кваліфікаційний рівень _____ магістр _____

Спеціальність _____ 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка» _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«_____» _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ Бабичу Миколі Володимировичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод підйому кисневої фурми конвертера №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

керівник випускної роботи _____ Модло Євгеній Олександрович, доцент, к.п.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» жовтня 2025 року
№ 726-ст _____

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи
12.01.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи: Об'єкт автоматизації – електропривод переміщення кисневої фурми сталеплавильного конвертера №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; двигун Д806 (22 кВт, постійного струму); швидкість переміщення – 0,1–0,6 м/с; точність позиціонування – ±2 см; контроль параметрів – положення фурми, тиск і витрата кисню, температура води охолодження, струм і напруга якоря; вимоги – автоматичне визначення моменту торкання сопла розплавом, адаптивне позиціонування у зоні продувки, раннє виявлення свищів, інтеграція з АСУ ТП, забезпечення надійності та безпеки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити 4.1 Аналітична частина: особливості технологічного процесу виплавки сталі в кисневому конвертері; аналіз існуючої системи керування фурмою; обґрунтування необхідності модернізації. 4.2 Основна частина: технічне завдання на створення АСК; вибір та розрахунок електропривода; синтез системи підлеглого регулювання; розробка алгоритмів позиціонування та діагностики свищів; імітаційне моделювання; вибір технічних засобів автоматизації; розрахунок економічної ефективності. Заходи з охорони праці:

аналіз небезпечних факторів; заходи щодо електробезпеки, пожежної безпеки та захисту персоналу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
ВРМ.141.726-ст.01.Е7 – Схема розташування механізмів; ВРМ.141.726-ст.01.Е2.1 – Функціональна схема АСУ ТП виплавки сталі в кисневому конвертері; ВРМ.141.726-ст.01.Е3 – Схема електрична принципова; ВРМ.141.726-ст.01.Е1 – Схема електрична структурна; ВРМ.141.726-ст.01.Е0.1 – Графіки перехідних процесів; ВРМ.141.726-ст.01.Е0.2 – Алгоритм розпізнавання свищів продувної фурми; ВРМ.141.726-ст.01.ТЕП – Техніко-економічні показники.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Модло Є.О.	20.10.2025	20.10.2025
Основна частина	Модло Є.О.	20.10.2025	20.10.2025

7. Дата видачі завдання 20.10.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	28.11.2025	
2.	Основна частина	25.12.2025	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.12.2025	
4.	Виконання графічної частини	05.01.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	12.01.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	20.01.2026	

Студент _____
(підпис)

Бабич М.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Модло Є.О.
(прізвище та ініціали)

№ рядка	Формат	Позначення	Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.
1	A3	<i>BPM.141.726-см.01.E7</i>	Схема розташування	1		
2			механізмів			
3						
4	A3	<i>BPM.141.726-см.01.E2.1</i>	Функціональна схема	1		
5			АСУ ТП виплавки сталі			
6			в кисневому конвертері			
7						
8	A3	<i>BPM.141.726-см.01.E3</i>	Схема електрична	1		
9			принципова			
10						
11	A3	<i>BPM.141.726-см.01.E1</i>	Схема електрична	1		
12			структурна			
13						
14	A3	<i>BPM.141.726-см.01.E0.1</i>	Графіки перехідних	1		
15			процесів			
16						
17	A3	<i>BPM.141.726-см.01.E0.2</i>	Алгоритм розпізнавання	1		
18			свищів продувної фурми			
19						
20	A3	<i>BPM.141.726-см.01.ТЕП</i>	Техніко-економічні	1		
21			показники			
22						
23	A4	<i>BPM.141.726-см.01.ПЗ</i>	Пояснювальна записка	107		
24						
				<i>BPM.141.726-см.01.ВР</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Бабич М. В.</i>			<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>
<i>Пров.</i>		<i>Модло Є.О..</i>				<i>Аркушів</i>
<i>Н.контр.</i>		<i>Модло Є.О..</i>			<i>ННТІ ДУЕТ</i>	
<i>Затв.</i>		<i>Модло Є.О.</i>			<i>Каф.ЕІА</i>	
					<i>гр. ЕПА-24м</i>	
					<i>Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод підйому кисневої фурми конвертера №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Відомість роботи</i>	
					4	1

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської кваліфікаційної роботи: 107 с., 29 рис., 19 табл., 47 джерел.

Об'єкт дослідження – система автоматизованого керування положенням кисневої фурми сталеплавильного конвертера №2 на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Мета роботи – науково обґрунтувати та розробити мікропроцесорну автоматизовану систему керування (АСК) електроприводом переміщення кисневої фурми.

У роботі проведено комплексний аналіз існуючих систем керування приводами фурм, обґрунтовано доцільність застосування системи підлеглого регулювання з цифровим реалізаційним рівнем на базі комплектного тиристорного електропривода КТЕ-200/220-УХЛ4 та двигуна постійного струму Д806 (22 кВт). Виконано повний інженерний розрахунок параметрів системи, розроблено алгоритми керування положенням фурми та розпізнавання свищів на основі динаміки тиску кисню. Проведено імітаційне моделювання в середовищі Simulink, яке підтвердило стійкість, точність та швидкодію запропонованої системи.

Наукова (інженерна) новизна полягає у застосуванні методу активного експерименту (пробного підйому фурми) для діагностики свищів у газовому тракті, а також у використанні аналізу точки перегину на згладженій кривій тиску для автоматичного визначення моменту торкання сопла розплаву – це дозволяє забезпечити точну установку фурми у положенні продувки незалежно від довжини фурми, рівня металу та ступеня заметалювання.

Ключові слова: автоматизована система керування, алгоритм позиціонування, електропривод постійного струму, киснева фурма, мікропроцесорний регулятор, розпізнавання свищів, сталеплавильний конвертер, тиристорний перетворювач.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Характеристика технологічного процесу	10
1.2 Характеристика технологічного встаткування	15
1.3 Опис конструкції і принципу роботи механізму переміщення	17
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	23
2.1 Вибір роду струму й величини напруги електроприводу переміщення фурми	23
2.2 Розрахунок і вибір потужності двигуна переміщення фурми	24
2.3 Обґрунтування вибору системи автоматичного керування переміщення кисневої фурми	29
2.4 Розрахунок параметрів цифрової системи	34
2.4.1 Розрахунок регулятора струму	42
2.4.2 Розрахунок регулятора швидкості	44
2.4.3 Розрахунок коефіцієнтів настроювання регулятора струму збудження ..	45
2.4.4 Розрахунок коефіцієнтів настроювання регулятора ЕРС	46
2.4.5 Розрахунок параметрів регулятора положення	48
2.6 Моделювання системи керування електроприводом	49
2.6 Розробка алгоритмів роботи мікро-ЕОМ	57
2.6.1 Розробка алгоритму системи цифрового керування	58
2.6.2 Алгоритм лінійного задатчика інтенсивності	59
2.6.3 Алгоритм регулятора швидкості	61
2.6.4 Алгоритм регулятора струму	62
2.7 Розробка АСУ конвертера №2	64
2.7.1 Мета й призначення системи	64

	7
2.7.2 Аналіз існуючих засобів автоматизації.....	67
2.8 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	69
2.9 Принцип роботи системи управління положенням фурми під час продувки розплаву.....	71
2.10 Алгоритм розпізнавання свищів продувної фурми.....	74
2.11 Вибір технічних засобів автоматизації.....	78
2.11.1 Програмований логічний контролер та модулі розширення.....	83
2.11.2 Датчики технологічних параметрів (газовий тракт).....	86
2.11.3 Засоби контролю положення та швидкості.....	87
2.11.4 Панель оператора та блок живлення.....	88
2.11.4 Зведена специфікація обладнання.....	89
2.12 Економічне обґрунтування проекту.....	91
2.12.1 Вихідні дані.....	91
2.12.2 Розрахунок капітальних вкладень.....	91
2.12.3 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	94
2.12.4 Розрахунок економічного ефекту.....	95
2.12.5 Підсумкові техніко-економічні показники.....	96
2.13 Охорона праці при експлуатації модернізованої системи керування кисневою фурмою.....	98
2.13.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	98
2.13.2 Заходи щодо усунення або зменшення впливу НШВФ.....	100
2.13.3 Організація засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) та медичні огляди.....	101
2.13.4 Пожежна безпека модернізованої електроустановки.....	102
ВИСНОВКИ.....	104
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	106

ВСТУП

Сучасне сталеплавильне виробництво в Україні залишається стратегічно важливим сектором промисловості. Одним із найефективніших методів виплавки сталі є киснево-конвертерний процес, на який припадає близько третини всього обсягу сталі, що виробляється в країні. У цьому контексті ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» виступає лідером галузі, забезпечуючи виплавку мільйонів тонн високоякісної сталі щороку.

Ключовим технологічним елементом конвертерного процесу є киснева фурма – пристрій, через який до розплаву подається технічно чистий кисень. Якість сталі, стійкість футеровки конвертера, енергоефективність процесу та безпека експлуатації прямо залежать від точності позиціонування фурми, стабільності подачі кисню та оперативності реагування на нештатні ситуації, зокрема появу свищів або заметалювання сопел.

На сьогоднішній день багато сталеплавильних агрегатів експлуатують застарілі релейно-контакторні або аналогові системи керування, які не забезпечують достатньої точності, не мають засобів діагностики й адаптації, що призводить до збільшення браку, перевитрат ресурсів та ризику технологічних аварій.

У зв'язку з цим, актуальність даної магістерської роботи обумовлена необхідністю наукового обґрунтування та інженерної реалізації сучасної мікропроцесорної автоматизованої системи керування (АСК), яка відповідає сучасним вимогам до надійності, точності, енергоефективності та безпеки.

Мета роботи – розробити АСК електроприводом переміщення кисневої фурми конвертера №2, яка забезпечує:

- автоматичне визначення моменту торкання сопла розплавом на основі аналізу динаміки тиску кисню;
- адаптивне позиціонування фурми у зоні продувки незалежно від довжини фурми та рівня розплаву;

- раннє виявлення свищів у газовому тракті за допомогою активного експерименту;
- зниження питомих витрат кисню та скорочення частки бракованої продукції.

Об'єкт дослідження – киснева фурма конвертера №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Предмет дослідження – процеси керування та регулювання положення фурми в умовах змінних технологічних параметрів.

Методи дослідження: системний аналіз, математичне моделювання, імітаційне моделювання в Simulink, інженерний розрахунок параметрів електропривода, методи синтезу систем автоматичного керування підлеглого регулювання.

Практична цінність роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи на діючому виробництві, що забезпечує суттєвий економічний ефект при мінімальних капітальних витратах.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Характеристика технологічного процесу

Конвертерний цех є однією з основних структурних одиниць з виробництва сталі ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». До складу конвертерного цеху входять два міксерних відділення, у кожному з яких розташовано по два міксери ємністю 1300 т кожен, призначені для усереднення хімічного складу й температури чавуну; конвертерне відділення, що складається з двох блоків по три конвертери в кожному; розливочне відділення; два відділення з підготовки металошихти; відділення сипучих матеріалів; шлакове відділення; димососні відділення та ковшові.

Конвертер є основним технологічним агрегатом сучасного сталеварного виробництва. Він призначений для переробки рідкого чавуну на сталь заданого хімічного складу шляхом продувки киснем. У конвертерному цеху застосовуються конвертери ємністю 130 м³ (або 160 т металошихти). Перевагами киснево-конвертерного виробництва є висока інтенсивність процесу, порівняно невеликі витрати, добре керування технологічним процесом, можливість використання безперервного розливання сталі та застосування ЕОМ для оптимізації плавки.

Для виконання завдань, поставлених у дипломній роботі, необхідно дослідити такі об'єкти:

- конвертер №2 (ємністю 160 т металошихти) та пов'язані з ним механізми кисневої й торкрет-фурм;
- механізми дозування й подачі сипучих матеріалів у конвертер (від видаткових бункерів) та дозування й подачі розкислювачів у ковш;
- механізми подачі кисню, азоту й торкрет-маси в конвертер;
- тракт охолодження конвертерних газів (ОКГ) і систему газоочищення (ГО).

На конвертері виплавляють киплячі, напівспокійні, спокійні, леговані та низьколеговані марки сталі.



Рис. 1.1. Загальний вигляд конвертора [1]

Технологічний цикл плавки складається з таких етапів:

- завантаження лому;
- заливання чавуну;
- продувка розплаву киснем через кисневу фурму, що періодично переривається для видалення шлаку, експрес-аналізу й вимірювання температури металу в конвертері;
- подача сипучих матеріалів у конвертер під час продувки;
- випуск сталі, подача феросплавів у ковш та обробка аргоном;
- злив шлаку.

Підготовка сталевого лому, що завантажується в конвертер, здійснюється в шихтових відділеннях №1 й №2, а також у копровому цеху. Лом сортують за видами: легковаговий, у пакетах, великоваговий. Завантаження лому в спеціальні коробки здійснюється з дотриманням вимог до сортності. Допускається

використання твердого чавуну або скрапу в кількості не більше 15 т на одну плавку.

Масу лому, завантаженого в спецкороби, у першому відділенні визначають у русі на платформних вагах із залізничною колією (найбільша межа зважування – 120 т), у другому – на електронно-тензометричних вагах у статичному стані (НМЗ – 150 т). Допускається ситуація, коли спецкороби з ломом, підготовлені в другому шихтовому відділенні, доповнюють у першому. Також можлива подача спецкоробів з ломом на I блок, минаючи шихтове відділення №1, за допомогою крана №20, встановленого між першим і другим блоками конвертерів.

Номери візків, спецкоробів та відповідна їм маса лому передаються бригадиром шихтового двору майстрові основного виробництва, а далі – машиністові дистрибутора через селекторний зв'язок.

У кожному з двох міксерних відділень встановлено по два міксери ємністю 1300 т чавуну. Незливаємий залишок чавуну в міксері повинен бути не менше 550 т. Масу чавуну на плавку замовляє майстер основного виробництва з урахуванням того, щоб сума маси лому й чавуну не перевищувала 173 т. Нормальна шихта – 166 - 168 т на плавку. Маса лому визначається залежно від кількості тепла, що виділяється при окисненні вуглецю, кремнію, марганцю та за рахунок фізичного тепла чавуну.

Рідкий чавун надходить у міксери з доменних цехів після видалення шлаку й отримання хімічного аналізу. При заливанні чавуну з доменного цеху №1 допускається орієнтуватися на хімічний аналіз попереднього випуску з тієї ж печі.

До міксера й з міксера в конвертер дозволяється подавати чавун такого хімічного складу (у %):

- кремній – 0,50 - 1,20;
- марганець – 0,25 - 1,50;
- сірка – не більше 0,40;
- фосфор – не більше 0,15.

Перед заливанням доменного чавуну в міксер вимірюють його температуру термопарою занурення. Точка вимірювання – одна для обох міксерів. Температура чавуну при заливанні в міксер повинна бути не нижче 1320 °С. Показання температури відображаються на цифровому приладі, встановленому в приміщенні пульта керування міксером.

Для визначення маси чавуну, що заливається в конвертерні ковші, використовують платформні тензометричні ваги з НМЗ 250 т, встановлені під кожним міксером. Маса відображається на цифровому приладі біля пульта керування нахилом міксера. Маса чавуну, що заливається в ковш, – до 135 т. Маса порожнього ковша з візком (тара) – 68 т. У виняткових випадках можливий прямий перелив чавуну з доменного ковша в конвертерний з подальшим доливанням чавуну з міксера. Кількість конвертерних ковшів, що заповнюються протягом доби, – до 90.

Номери заповнених конвертерних ковшів та відповідна їм маса чавуну передаються майстрові основного виробництва по радіозв'язку, а від нього – машиністові дистрибутора.

На початку плавки (2 - 3 хв) продувку здійснюють при положенні фурми 2500 - 3000 мм над рівнем спокійної ванни. Надалі продувка ведеться при висоті 1000 - 1200 мм. Один раз на добу визначають фактичну відстань від головки фурми до рівня дзеркала металу.

Витрата кисню під час продувки становить 380 - 400 нм³/хв. Чистота кисню – не нижче 99,2 %. Тиск кисню в цеховій магістралі – 1,4-1,6 МПа. Момент завершення продувки визначають за обсягом витраченого кисню та тривалістю продувки.

Допускається ведення плавки з проміжним видаленням шлаку. Скачування шлаку проводять на 7-12-й хвилині продувки або після споживання 2800–3500 м³ кисню.

Після завершення продувки відбирають проби металу й вимірюють температуру термопарою занурення. Одночасно беруть проби кінцевого шлаку для визначення його основності та вмісту оксиду заліза.

Регулювання теплового й шлакового режимів здійснюють присадками вапна, плавикового шпату, вугілля, вапняку або сталеплавильного шлаку. Іноді використовують марганцевий агломерат.

Сипучі матеріали додають у такому порядку:

- вапно – рівномірно протягом перших 7 хв продувки;
- плавиковий шпат (до 2,5 кг на тону сталі) – на початку продувки за потреби;
- вугілля – при дефіциті тепла (сумарна витрата вуглевмісних матеріалів – не більше 2 т на плавку);
- марганцевий агломерат – для покращення шлакоутворення (не більше 2,5 т на плавку).

Доведення плавки за вмістом вуглецю здійснюють у ковші шляхом додавання меленого коксу або вугілля. Присадку починають із початку випуску й завершують до заповнення ковша наполовину.

Плавку випускають після отримання результатів експрес-аналізу й вимірювання температури. Тривалість випуску – від 4 до 8 хв. Температуру рідкої сталі вимірюють термопарою занурення як у конвертері, так і в ковші. Залежно від марки сталі, температура на випуску має бути в межах 1565–1650 °С, а в ковші від 1490 до 1575 °С.

Після випуску залишковий шлак повністю зливають через горловину конвертера в шлакову чашу. Допускається збереження частини кінцевого шлаку для нанесення гарнісажу на футеровку конвертера за допомогою азоту, що подається через кисневу фурму.

Розкислення сталі здійснюють присадкою феросплавів у сталерозливочному ковші: початок – після заповнення ковша на 1/5, завершення – при досягненні 2/3 його висоти. Як розкислювачі використовують силікомарганець, феромарганець, ферросиліцій, алюміній, феррохром, феротитан, ферроцирконій, ферробор тощо.

При виробництві сталі з обробкою аргонном у ковші, подачу газу починають із початку випуску, тривалістю 4-6 хв, поступово підвищуючи тиск до 1,2 МПа.

Обробку аргоном застосовують для всього асортименту виплавлених марок сталі.

1.2 Характеристика технологічного встаткування

Тракт подачі сипучих матеріалів (рис. 1.2) включає такі основні елементи:

- п'ять видаткових бункерів;
- три вагові бункери (найбільша межа зважування – 5 т), що використовуються для дозування сипучих матеріалів на одну плавку;
- віброживильники, призначені для подачі вапна, сталеплавильних шлаків, кільцевого вапна, плавикового шпату та вугілля з видаткових бункерів у вагові;
- стрічковий живильник, який подає вапно з обертових печей у ваговий бункер №1;
- віброживильники для розвантаження вагових бункерів №1 і №2;
- конвеєр №4, що транспортує сипучі матеріали до конвертера.

Керування віброживильниками – як при подачі матеріалів із видаткових бункерів у вагові, так і при їхньому розвантаженні на конвеєр – здійснюється за допомогою лінійно-контакторної схеми. У такому режимі машиніст дистрибутора має вмикати кожен дозатор окремо та постійно контролювати процес завантаження від початку до завершення, що не завжди забезпечує необхідну точність дозування.

Операційне керування механізмами тракту здійснюється з центрального пульта машиніста дистрибутора, а також передбачено можливість управління з місцевих пультів, розташованих безпосередньо біля обладнання.

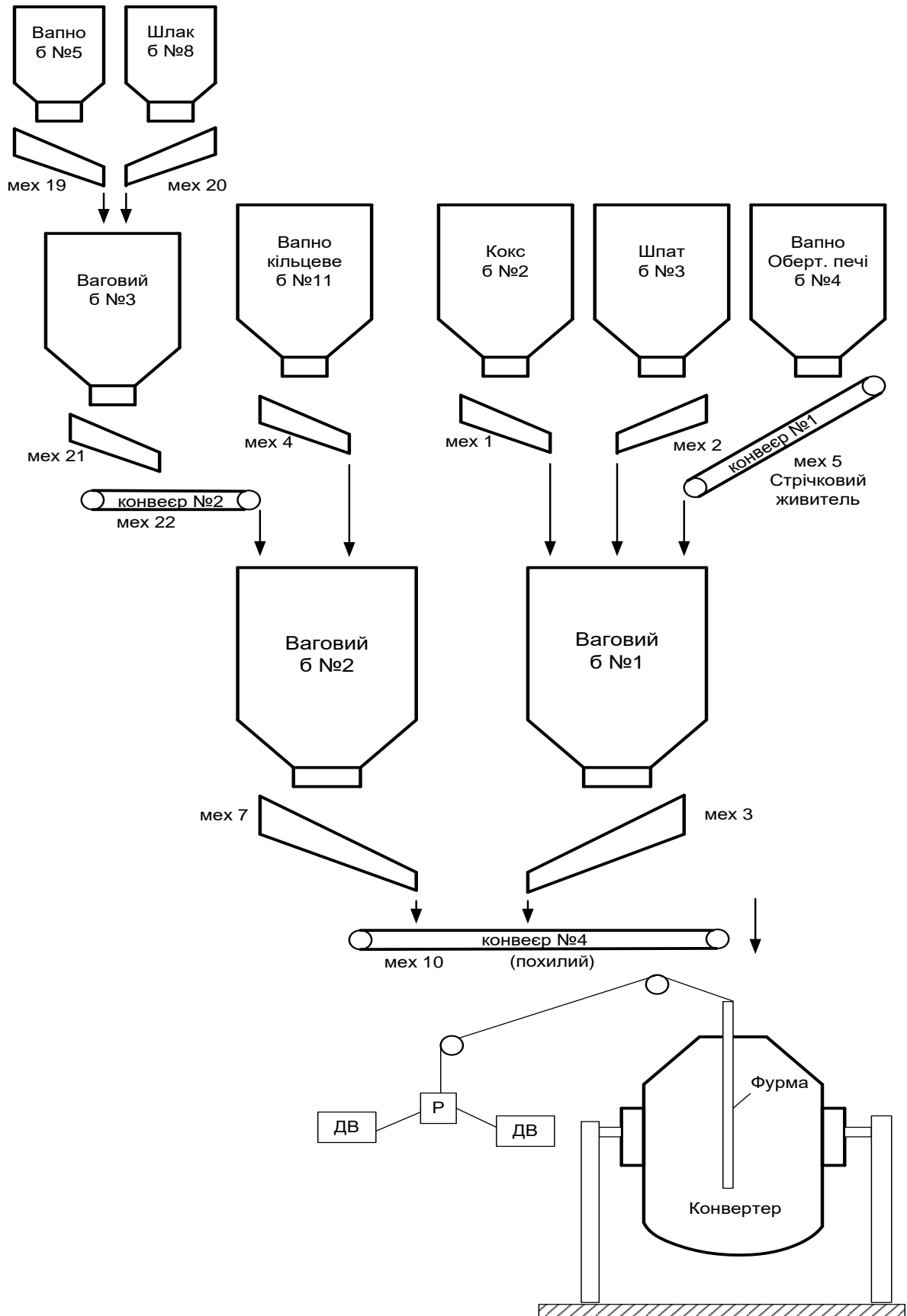


Рис.1.2. Схема тракту подачі сипучих матеріалів у конвертер

(розроблено автором з використанням [2-5])

1.3 Опис конструкції і принципу роботи механізму переміщення фурми

Визначальним фактором ефективності киснево-конвертерного процесу – це струмінь кисню. Основним обладнанням для здійснення плавки є машина подачі кисню, ключовим елементом якої є фурма.

Машина подачі кисню призначена для введення технічно чистого кисню в конвертер через водоохолоджувану фурму, а також для її вертикального та горизонтального переміщення – зокрема для опускання фурми в горловину конвертера, заміни несправної фурми на резервну тощо.

За конструктивним виконанням машини подачі кисню поділяються на два основні типи – верхнього (розташовані над конвертером) та нижнього (встановлені на рівні робочої площадки) розміщення. Машини верхнього типу можуть бути стаціонарними, пересувними або поворотними. Машини нижнього типу виконуються як консольно-поворотні або коливні.

У сучасних потужних конвертерних цехах переважно застосовують машини верхнього розміщення, встановлювані на спеціальних майданчиках над конвертерами. Машини нижнього типу використовують у цехах із низькою продуктивністю – зокрема при модернізації мартенівських печей або бесемерівських конвертерів, де будівельні конструкції не дозволяють розмістити обладнання на великій висоті.

Залежно від типу тягового органу фурменної каретки розрізняють машини канатного та ланцюгового типів. Перевагу надають канатним системам, оскільки контроль стану ланцюгів ускладнений і потребує частішого обслуговування.

Сучасні машини подачі кисню для великих конвертерів (100 - 160 т і більше) обладнують двома фурмами – робочою та резервною – і відповідними механізмами їх переміщення. Це дозволяє оперативно замінювати несправну фурму без тривалої зупинки технологічного процесу.

Приводи переміщення виконуються трьох типів – рейкові, гвинтові та гідравлічні. У вітчизняній практиці найпоширенішими є рейкові механізми з електроприводом, що забезпечують надійну та стабільну роботу.

Механізми вертикального переміщення фурми можуть бути виконані з противагою або без неї. Противаги частково компенсують масу каретки з фурмою, що дозволяє знизити потужність електропривода. У той же час їх використання збільшує загальну масу конструкції. Варіант без противаги спрощує конструювання, але вимагає більш потужного приводу.

Подальший розвиток машин подачі кисню спрямований на підвищення надійності, довговічності, ремонтпридатності, а також на покращення умов експлуатації та стійкості фурм до термічного впливу.

Фурма призначена для подачі кисню в розплав і формування його струменів у ванні конвертера. Сучасний рівень інтенсивності продувки становить 4,5 - 6,0 м³/(хв·т), із тенденцією до зростання до 8 м³/(хв·т).

Фурми виготовляють багатосопловими: для конвертерів місткістю 100 - 160 т – 4 - 5 сопел діаметром 65 - 95 мм, для більш потужних агрегатів – 6 - 7 сопел діаметром 75 - 85 мм. Вісі сопел нахилені під кутом 15 - 20° до осі фурми, а кінцева розширювальна частина сопла має кут 8 - 10°.

Охолодження головки та тіла фурми здійснюється протічною водою з температурою не вище 40 °С. Швидкість руху води має бути менше 6 м/с, щоб уникнути закипання та утворення накипу.

Існують два основні конструктивні типи фурм – із центральним підводом кисню та із центральним підводом охолоджувальної води. Перший тип поширений більше завдяки простішій технології виготовлення й кращій ремонтпридатності. Другий тип забезпечує ефективніше охолодження головки, дозволяє зменшити габарити та вагу, а також покращує умови інтенсивної продувки.

Головки фурм виготовляють зварними, кованими або литими. Найчастіше використовують зварні головки – вони дешевші, вимагають менше міді та забезпечують кращий відвід тепла. Зварна головка з центральним підводом

кисню складається з мідної основи й сопла, а також сталевих штуцера, переходника та змінної труби.

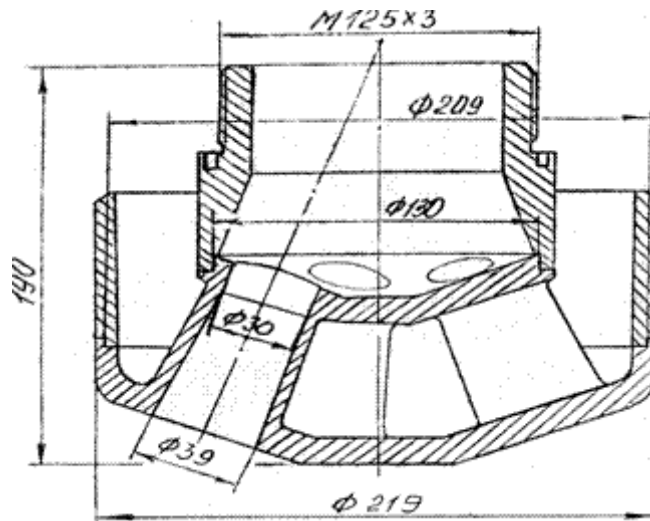


Рис. 1.3. Наконечник кисневої фурми, застосовуваної в конвертерному цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [2]

На сьогодні в конвертерному цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» експлуатуються фурми з суцільнолитими п'ятисопловими наконечниками. Сопла типу Лавалю розташовані симетрично навколо центральної осі й нахилені під кутом 20° до вертикалі. Кут розкриття сопла – 8° , критичний діаметр – 30 мм, вихідний – 39 мм, а радіальна відстань від осі сопла до осі фурми – 67,5 мм.

Така конструкція забезпечує швидкість струменя кисню на виході до 500 м/с при тиску в цеховій магістралі 1,6 МПа. Об'ємна витрата кисню становить 400 - 450 м³/хв, що відповідає інтенсивності продувки 2,5 - 2,8 м³/(т·хв).

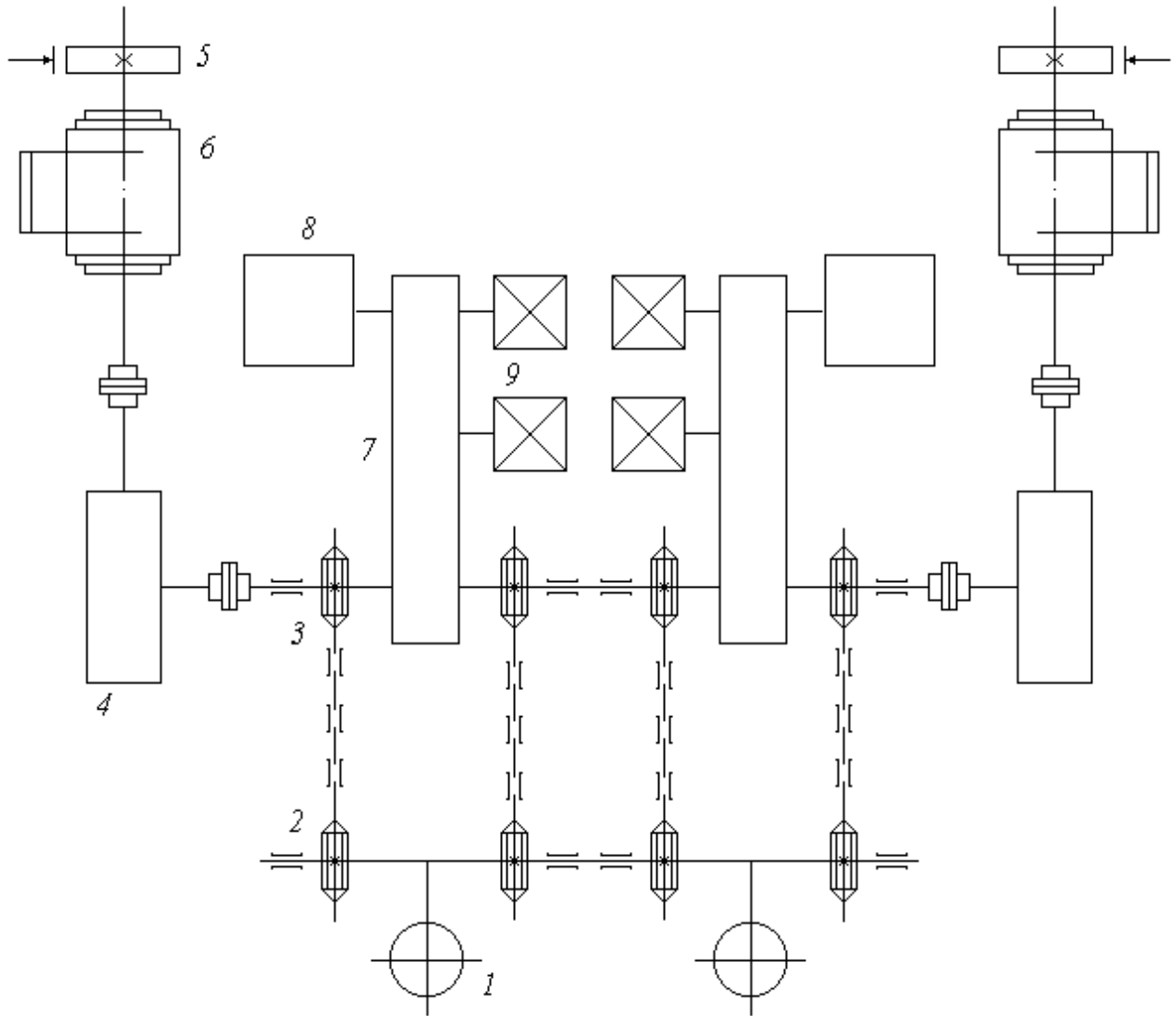


Рис.1.4. Кінематична схема привода фурми

(розроблено автором)

На кінематичній схемі позначено: 1 - фурма, 2 - обвідна зірочка (у старих конструкціях використовували ланцюгову передачу, сучасні моделі застосовують тросову), 3 - приводна зірочка, 4 - силовий редуктор, 5 - гальмівний пристрій, 6 - електродвигун, 7 - кінематичний редуктор, 8 - командоапарат, 9 - сельсин.

Сопла приварюють до основи головки та до штуцера. На штуцер також наварюють перехідник із зовнішньою різьбою. Під час збирання фурми перехідник накручують на центральну трубу, а основу – приварюють до змінної труби.

Серед основних недоліків зварних фурм – складність і трудомісткість виготовлення, а також порушення герметичності зварних швів через зміну структури міді під час термічного впливу. Для підвищення зносостійкості доцільно використовувати елементи головки, виготовлені методом рідинного штампування, та застосовувати електронно-променеє зварювання.

У каретці передбачено уловлювач, який автоматично фіксує її положення в разі обриву або послаблення підйомного каната. Конструкція уловлювача включає: два нерухомі клини, закріплені на корпусі каретки; два рухомі клини у направляючих пазах; штангу, з'єднану з підвіскою рухомого блоку; та важільну систему. Остання складається з двох плоских важільних механізмів, розташованих у взаємно перпендикулярних площинах і з'єднаних сферичними шарнірами.

Недоліком цієї системи є те, що вона спрацьовує не лише при обриві каната, а й при його послабленні, що може призводити до необґрунтованих зупинок.

Система контролю положення фурми та блокування механізмів містить блок командоапаратів із сельсин-датчиками, а також ланцюговий механізм, розташований на стаціонарній майданчику біля нерухомих направляючих каретки. Командоапарати забезпечують блокування руху механізмів, а сельсини передають інформацію про поточне положення фурми на пульт керування.

Ланцюговий механізм складається з допоміжної каретки, ланцюга та двох зірочок – направляючої й привідної (остання насаджена на вал черв'ячного редуктора командоапаратів). Один кінець ланцюга закріплений до допоміжної каретки, інший – з'єднаний із противагою. Під час опускання фурми каретка захоплює допоміжну каретку, яка через ланцюгову передачу обертає вали командоапаратів і сельсинів. Під час підйому допоміжна каретка піднімається за рахунок противаги.

Контроль за натягом підйомного каната здійснює вказівник, розташований на платформі біля канатних блоків. Він складається з одноплечового важеля з роликом, двоплечового важеля з противагою (обидва насажені на спільну вісь) та командоапарата. Ролик постійно притиснутий до каната завдяки моменту, що

створює противага. При послабленні або обриві каната контакт між роликом і канатом порушується, двоплечовий важіль повертається й замикає контакт командоапарата, що призводить до аварійного відключення електроприводу.

Маса фурми сягає 25 - 30 т при довжині до 25 м і низькій жорсткості конструкції, що робить її схильною до коливань під дією реактивних сил струменя кисню. Для зменшення амплітуди коливань передбачено механізм жорсткого центрування, розташований над кесоном.

Підвищення інтенсивності продувки понад 7-8 м³/(хв·т) практично не скорочує тривалість плавки, але значно погіршує умови шлакоутворення, збільшує димоутворення та викиди розплаву. Тому перспективним напрямком інтенсифікації киснево-конвертерного процесу є розосередження дуття за рахунок керованого переміщення фурми над поверхнею розплаву. У сучасних розробках використовують машини, які забезпечують рух головки фурми за складними траєкторіями – конічною, циліндричною, по архімедовій спіралі, а також обертання фурми навколо власної осі.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір роду струму й величини напруги електроприводу переміщення фурми

Фурма призначена для подачі кисню в конвертер з інтенсивністю до 1500 м³/хв і являє собою мідну трубу, виготовлену з міді через її високу теплопровідність. Кожен конвертер обладнаний двома водоохолоджуваними фурмами – робочою та резервною. Обидві фурми мають незалежні електроприводи. Маса фурми сягає 4 т, а маса противаги – 2,5 т. Максимальна швидкість її переміщення становить 0,6 м/с. Для точної зупинки на заданій відстані від дзеркала металу (так називають поверхню рідкого розплаву) швидкість опускання автоматично знижується до 0,1 м/с.

Електроустаткування приводів фурм належить до споживачів першої категорії надійності живлення – воно підключено до двох незалежних джерел електроенергії. Це обумовлено високою небезпекою аварій: у разі відмови системи охолодження або перегріву фурма, виготовлена з міді, може розплавитися. При цьому вода потрапляє у конвертер з температурою 1550–1600 °С, що може спричинити вибух. Тому надійність приводу має вирішальне значення. На закордонних підприємствах для підвищення безперервності живлення іноді застосовують акумуляторні системи безперебійного живлення двигунів.

У металургійному виробництві використовують електроприводи як змінного, так і постійного струму. Кожен із них має свої переваги й обмеження.

Привод змінного струму відрізняється простотою конструкції, високою надійністю, зручністю в експлуатації та легкістю підключення – адже мережа живлення в промисловості зазвичай має змінний струм частотою 50 Гц. Однак без застосування складного та дорогоцінного обладнання (наприклад, частотних перетворювачів) можливості регулювання швидкості обмежені, а плавне керування обертами ускладнене.

Привод постійного струму, навпаки, забезпечує гнучкість у керуванні: двигуни цього типу дозволяють здійснювати плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а також витримувати значні струмові перевантаження, що важливо для механізмів позиціонування. Проте такі двигуни мають складнішу конструкцію через наявність колектора, що ускладнює їх обслуговування та ремонт.

Згідно з технологічними вимогами, механізм подачі фурми має забезпечувати точне позиціонування (з похибкою кількох сантиметрів). На сьогодні цю умову найкраще виконують приводи постійного струму. Хоча існують спроби використання систем «частотний перетворювач – асинхронний двигун» (наприклад, із застосуванням безпосередніх перетворювачів частоти), вони поки що не забезпечують необхідної точності для даного застосування.

Очікувана потужність двигуна приводу фурми не перевищує 100 кВт (а в цілому – менше 250 кВт), тому для живлення достатньо напруги нижче 1 кВ. Згідно зі стандартним рядом промислових напруг, для таких приводів найчастіше використовують 220 В, 440 В або 660 В. У крановому та підйомно-опускному обладнанні зазвичай застосовують перші два значення. Оскільки потужність двигуна очікується меншою за 100 кВт, достатньо напруги 220 В.

Тому для приводу переміщення фурми приймається система постійного струму з номінальною напругою 220 В.

2.2 Розрахунок і вибір потужності двигуна переміщення фурми

На рис. 2.1 наведена тахограма роботи приводу фурми.

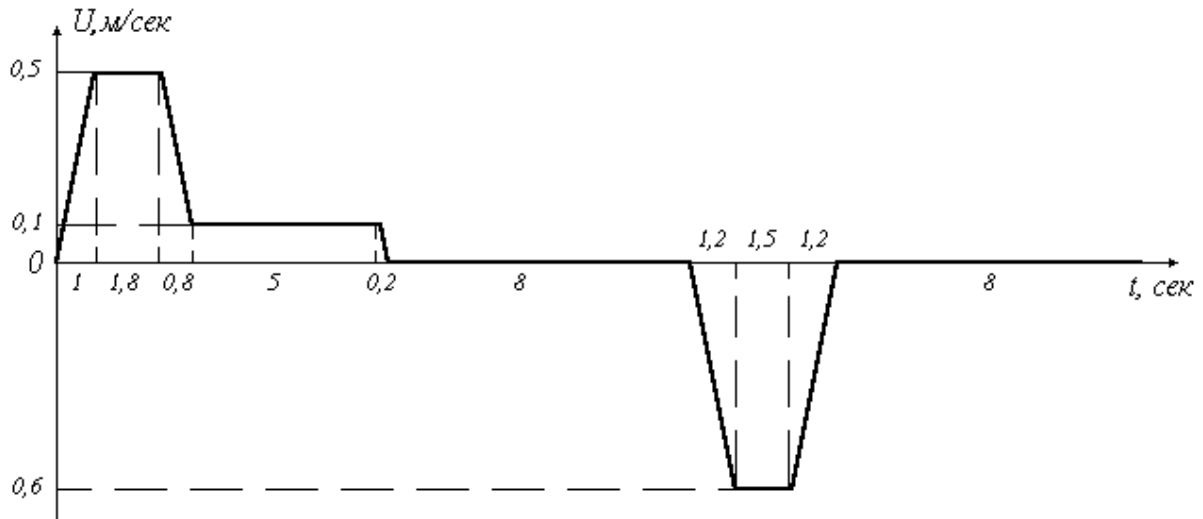


Рис. 2.1. Тахограма роботи привода фурми

(розроблено автором з використанням [3-11])

На рис. 2.2 наведена навантажувальна діаграма роботи привода.

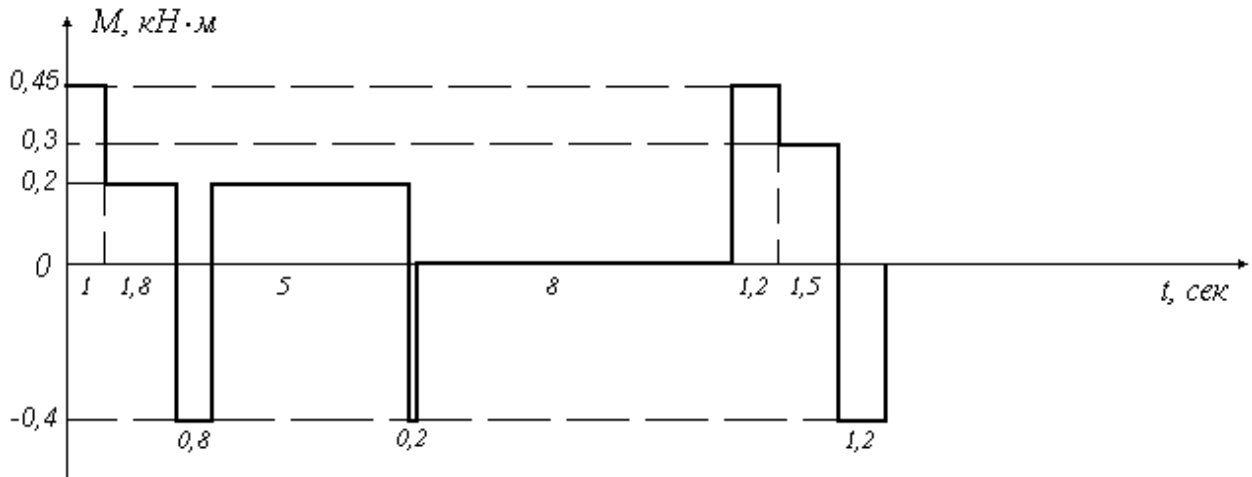


Рис. 2.2. Навантажувальна діаграма роботи привода

(розроблено автором з використанням [3-11])

Таким чином з наведених графіків маємо слідуючі значення $M_{\max}=0,45\text{кН}\cdot\text{м}$, $U_{\max} = 0,6\text{ м/с}$, $U_{\text{ср}} = 0,5\text{ м/с}$, $U_{\min} = 0,1\text{ м/с}$, темп розгону $=0,5\text{м/с}^2$.

Визначаємо еквівалентний момент двигуна, M_e

$$M_e = \sqrt{\frac{M_{\text{п}}^2(t_{\text{п1}} + t_{\text{п2}}) + M_{\text{р}}^2(t_{\text{р1}} + t_{\text{р2}} + t_{\text{р3}}) + M_{\text{с3}}^2 t + M_{\text{с1,2}}^2(t_{\text{с1}} + t_{\text{с2}})}{t_{\text{с1}} + t_{\text{с2}} + t_{\text{с3}} + \beta(t_{\text{п1}} + t_{\text{п2}} + t_{\text{р1}} + t_{\text{р2}} + t_{\text{р3}})}} \quad (2.1)$$

де $\beta = 0,7$ - коефіцієнт, що враховує погіршення умов охолодження під час перехідних процесів ;

$M_{\text{п}}$ - пускові моменти;

$M_{\text{г}}$ - гальмівні моменти;

$M_{\text{у}}$ - моменти сталих режимів;

Всі значення моментів взяті з конверторного цеху під час проходження виробничої практики.

$t_{\text{п}}$ - час пусків;

$t_{\text{г}}$ - час гальмівних режимів;

$t_{\text{с}}$ - час сталих режимів.

Всі значення часу беруться також з конверторного цеху під час проходження виробничої практики.

$$M_e = \sqrt{\frac{0,45^2(1+1,2) + 0,4^2(0,8+0,2+1,2) + 0,3^2 \cdot 1,5 + 0,2^2(1,8+5)}{1,8 + 5 + 1,5 + 0,7(1+1,2+0,8+0,2+1,2)}} = 0,392 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

Визначаємо швидкість двигуна, n , об/хв:

$$n = \frac{60 \cdot v \cdot i}{\pi \cdot D} \quad (2.2)$$

де i - передатне співвідношення редуктора;

D - діаметр барабана, м;

v - швидкість руху, м/сек.

Відповідно до наведеної на рис. 2.1 тахограми виділяємо 3 швидкості: максимальну (0,6 м/с), середню (0,4 м/с) і мінімальну (0,1 м/с).

$$n_{\text{max}} = \frac{60 \cdot 0,6 \cdot 20}{3,14 \cdot 0,5} = 416,9 \text{ об/хв}$$

$$n_{\text{сеп}} = \frac{60 \cdot 0,4 \cdot 20}{3,14 \cdot 0,5} = 277,9 \text{ об/хв}$$

$$n_{\text{min}} = \frac{60 \cdot 0,1 \cdot 20}{3,14 \cdot 0,5} = 69,48 \text{ об/хв}$$

Визначаємо тривалість включення привода:

$$TB = \frac{t_{\text{роб}}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

де $t_{\text{роб}}$ - загальний час роботи;

$t_{\text{ц}}$ - час циклу.

по тахограмі $t_{\text{ц}}=28,7$ сек, $t_{\text{роб}}=12,7$ сек.

$$TB = \frac{12,7}{28,7} \cdot 100\% = 44\%$$

Робимо перерахування моменту на стандартну тривалість включення:

$$Me1 = Me \cdot \sqrt{\frac{TB_{\text{розр}}}{TB_{\text{ст}}}} = 0,392 \cdot \sqrt{\frac{44}{40}} = 0,411 \text{кН} \cdot \text{м} \quad (2.4)$$

Визначаємо потужність двигуна, P , кВт

$$P = \frac{Me1 \cdot n_{\text{max}}}{9,55} = \frac{0,411 \cdot 416,9}{9,55} = 17,95 \text{кВт} \quad (2.5)$$

Через додаткове нагрівання пульсаціями випрямленого струму при системі ТП-Д збільшуємо потужність двигуна на 20%.

$$P_{\text{дв}} = P \cdot 1,2 = 17,95 \cdot 1,2 = 21,54 \text{кВт} \quad (2.6)$$

Вибираємо двигун постійного струму Д806, технічна характеристика приводного двигуна:

Серія	краново-металургійна;
Тип	Д-806, незалежного порушення зі стабілізуючою обмоткою;
Номінальна потужність P_n , кВт.....	22;
Номінальна напруга U_n , В.....	220;
Номінальний струм якоря $I_{\text{ян}}$, А.....	120;
Номінальний ККД η_n	0,90;
Номінальна частота обертання n_n , об/хв.....	650;
Максимальна частота обертання $n_{\text{макс}}$, об/хв.....	2600;
Момент інерції якоря двигуна $J_{\text{я}}$, кгм ²	1;
Максимальний момент $M_{\text{макс}}$, Нм.....	998;

Кратність перевантаження по струму λ2,5.

2.3 Обґрунтування вибору системи автоматичного керування переміщення кисневої фурми

Для керування електроприводом переміщення кисневої фурми обрано багатоконтурну систему автоматичного керування (САК) з принципом підлеглого регулювання. Такий підхід є доцільним завдяки високому рівню розвитку мікропроцесорних засобів, які дозволяють реалізувати практично всю систему керування у цифровому вигляді.

Застосування цифрових систем дає змогу подолати ряд обмежень, притаманних традиційним аналоговим рішенням:

- системи безпосереднього цифрового керування (БЦК) забезпечують високу гнучкість: структуру регулювальних контурів можна змінювати програмно, а параметри регуляторів – адаптувати в реальному часі залежно від змін у динаміці об'єкта керування;

- у цифрових системах можливі розрахункові методи визначення керованих величин, що дозволяє обійтися без прямих вимірювань у випадках, коли фізичне встановлення датчика неможливе або економічно недоцільне. Невимірювані змінні оцінюються на основі математичної моделі об'єкта, реалізованої в програмному коді;

- недоліки апаратури (нелінійність характеристик, зсув нуля, мертва зона датчиків) можуть бути компенсовані програмними засобами, що значно спрощує налагодження порівняно з аналоговими системами;

- архітектура БЦК дозволяє реалізувати розподілене керування, що підвищує живучість системи: у разі відмови однієї підсистеми інші можуть частково або повністю перебрати на себе її функції.

При проектуванні цифрової системи керування необхідно вирішити такі ключові завдання:

- розробити алгоритм керування;
- визначити оптимальний період квантування (частоту опитування датчиків та подачі керуючих сигналів);

- обрати тип мікроконтролера або промислового комп'ютера, здатного виконувати розрахунки у реальному часі;
- створити програмне забезпечення, включаючи модулі діагностики та самоконтролю;
- забезпечити надійний зв'язок із об'єктом керування через стандартизовані інтерфейси.

Сучасні системи підлеглого регулювання (СПР) побудовані за багатокоштурною структурою (див. рис. 2.3), сутність якої полягає у наступному:

а) Об'єкт керування (електропривод) уявляється як ланцюг послідовно з'єднаних динамічних ланок із передатними функціями $W_{01}(p)$, $W_{02}(p)$, ..., $W_{0_{i-1}}(p)$, $W_{0i}(p)$, вихідними координатами яких є напруга, струм, швидкість тощо.

б) Кількість регуляторів функціями $Wp_1(p)$, $Wp_2(p)$, ..., $Wp_i(p)$, відповідає кількості регульованих змінних. Вони з'єднані послідовно, а кожен має власний контур негативного зворотного зв'язку за відповідною координатою. Це формує вкладені один в одного контури регулювання.

в) Внутрішні контури є підлеглими зовнішнім: вихідний сигнал регулятора зовнішнього контуру формує завдання для внутрішнього. Таким чином, усі контури спрямовані на досягнення заданого значення вихідної змінної — наприклад, положення фурми.

г) Обмеження будь-якої регульованої координати (наприклад, струму) досягається шляхом обмеження завдання для відповідного регулятора.

д) На виході системи передбачено низькочастотний фільтр із сталою часу ТТ, яка визначає основні динамічні властивості системи.

є) Синтез регуляторів виконується методом послідовної корекції, починаючи з найвнутрішнішого контуру (наприклад, струму якоря) і закінчуючи зовнішнім (положенням фурми).

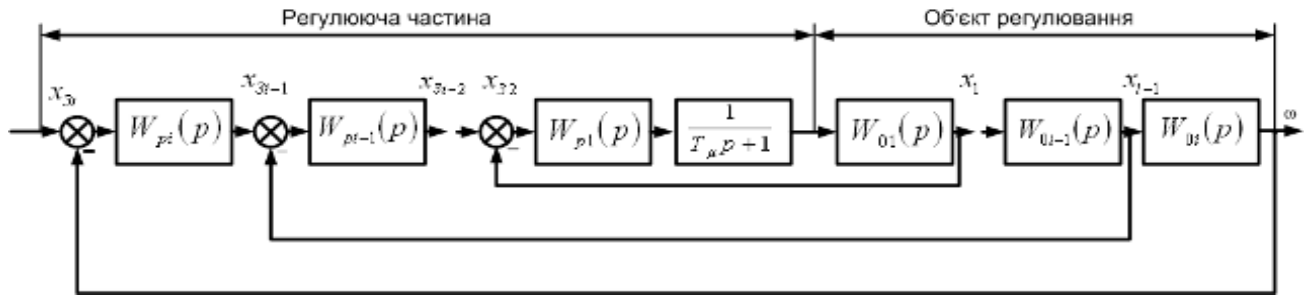


Рис. 2.3. Структурна схема системи регулювання

(розроблено автором з використанням [3-11])

При проектуванні кожного регулятора переслідуються дві мети:

1. Компенсація домінуючих інерційних елементів у контурі для підвищення швидкодії;
2. Забезпечення необхідного порядку астатизму шляхом введення інтегруючої дії.

Налаштування регуляторів виконується за критеріями модульного або симетричного оптимуму, що забезпечує оптимальне співвідношення між швидкодією, перерегулюванням і точністю.

Переваги систем підлеглого регулювання:

- простота розрахунку та налагодження регуляторів;
- високі статичні й динамічні показники;
- зручність обмеження координат;
- можливість застосування уніфікованого обладнання;
- чітка методика проектування.

Основний недолік – певне зниження швидкодії порівняно з оптимальними одноконтурними системами, однак у практичних застосуваннях це компенсується кращою стійкістю і надійністю.

З урахуванням технологічних вимог (висока точність позиціонування, плавне регулювання швидкості, надійність при аваріях) прийнято двоконтурну структуру керування:

- для якоря двигуна – контур струму якоря та контур швидкості;
- для обмотки збудження — контур струму збудження та контур ЕРС (що еквівалентний регулюванню магнітного потоку).

Прискорення приводу формують за допомогою лінійного задавача інтенсивності, який забезпечує плавне збільшення швидкості без стрибків.

Система автоматичного регулювання (САР) приводу кисневої фурми передбачає чотири ступені швидкості у напрямках «вгору» і «вниз»: $0,1 n_n$; $0,5 n_n$; $1 n_n$ й $2 n_n$. Це відрізняє її від системи керування торкрет-фурми, яка має лише дві ступені.

Особливості реалізації:

- 1-а ступінь швидкості (повільне позиціонування при підході до дзеркала металу) реалізується програмно;
- 4-а ступінь (висока швидкість підйому) досягається шляхом ослаблення магнітного поля двигуна після досягнення 80–90 % номінальної напруги на якорі.

Для підвищення надійності передбачено резервування: шафи перемикачів на резервні комплектні тиристорні електроприводи (КТЕ) для кисневої та торкрет-фурм, які містять силові перемикачі з блок-контактами та роз'єми для швидкого підключення дискретних сигналів.

Виходячи з наведених вимог та аналізу, обрано комплектний тиристорний електропривод КТЕ-200/220-УХЛ4, який повністю відповідає умовам експлуатації та забезпечує необхідні динамічні характеристики [12].

Нижче наведені основні технічні характеристики КТЕ, які можуть мати важливе значення при налагодженні й експлуатації виробу:

- номінальна випрямлена напруга, В.....220;
- номінальний випрямлений струм, А.....200 ;
- припустимі режими струмового завантаження.....див. табл. 2.1;
- номінальна напруга трифазних живильних мереж, В..... 380;
- припустимі відхилення напруги трифазних живильних мереж, не більше, %..... + 10 - 15;
- припустимі відхилення частоти живильних мереж, не більше, %.....2;
- коефіцієнт корисної дії, не менше..... 0,92;
- коефіцієнт потужності при номінальних вихідних параметрах КТЕ, не менше 0,8;
- діапазон регулювання швидкості двигуна при

зворотному зв'язку по ЕРС	25:1;
- те ж при зворотному зв'язку по швидкості	100:1;
- погрішність стабілізації швидкості двигуна:	
– при зворотному зв'язку по ЕРС, не більше, %.....	5;
– при зворотному зв'язку по тахогенераторові, більше, %.....	1;
– при зворотному зв'язку по імпульсному датчику	0,01;
- погрішність стабілізації випрямленого струму в режимі обмеження струму, не більше, %.....	
- характеристики мережного зв'язку:	
тип.....	ослідовний інтерфейс типу CAN;
апаратна організація.....	Full Can;
тип лінії зв'язку	2-х провідна кручена пара в екрані швидкість передачі даних, Кбіт/сек:
при довжині шини до 40 м.....	800;
до 100 м.....	500;
до 500 м	125;
- припустима температура навколишнього середовища:	
при експлуатації, °С.....	+1...+40;
при зберіганні, °С	-40...+60.

Таблиця 2.1

Припустимі режими струмового навантаження [12]

Режим	Навантаження у % до номінального струму	Тривалість навантаження, сек.
1	100	Тривало
2	150	120
3	175	60
4	200	15
5	225	10

Виберемо й приведемо технічні характеристики окремих складових частин КТЕ.

Струмообмежуючий реактор:

- типРТСТ - 820 – 0505У3;
- номінальний фазний струм I_n , А.....200;
- номінальна напруга U_n , В.....380;
- номінальна індуктивність L_p , мГн0,0505;
- активний опір R_p , мОм104

Згладжувачий дросель у ланцюзі постійного струму:

- тип.....ФРОС - 250/0,5У3;
- номінальний струм I_n , А.....500;
- номінальна напруга U_n , В.....230;
- номінальна індуктивність $L_{др}$, мГн0,35;
- активний опір $R_{др}$, мОм1,1.

2.4 Розрахунок параметрів цифрової системи

Основні параметри необхідні для розрахунку [13; 14]:

- Номінальна потужність двигуна типу Д806..... $P_n = 22\text{кВт}$
- Номінальна напруга..... $U_n = 220\text{В}$
- Номінальний струм якоря..... $I_n = 120\text{ А}$
- Номінальна швидкість обертання..... $n_n = 650\text{ об/хв}$
- Перевантаження по струму (в долях номінального)..... $K_p = 2,5$
- Максимальна швидкість обертання..... $n_{\text{макс}} = 2600\text{ об/хв}$
- Кількість полюсів..... $p = 4$
- Кількість витків обмотки збудження на полюс..... $\omega_v = 1400$
- Номінальний потік полюса..... $\Phi_p = 2,5\text{Вб}$
- Опір якоря..... $R_{я} = 0,0917\text{Ом}$
- Опір компенсуючої обмотки..... $R_{ко} = 0,02\text{Ом}$
- Опір обмотки додаткових полюсів..... $R_{дп} = 0,007\text{Ом}$
- Опір обмотки збудження..... $R_{оз} = 68,14\text{Ом}$

Момент інерції двигуна..... $J_D = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
 Момент інерції механізму..... $J_{\text{мех}}' = 4900$
 Температурний коефіцієнт..... $\beta_T = 1,35$

Опір якірного кола с урахуванням температурного коефіцієнта

$$R_a = \beta_T \cdot R_{я} = 1,35 \cdot 0,0917 = 0,1238 \text{ Ом} \quad (2.7)$$

$$U_k = 0,075 \quad U_{2f} = 106 \text{ В} \quad I_{dH} = I_H = 120 \text{ А}$$

$$K_{du} = 2,34$$

Втрати в міді

$$\Delta P_M = 0,02 \cdot P_H \cdot 10^3 = 0,02 \cdot 22000 = 440 \text{ Вт} \quad (2.8)$$

Активний опір трансформатора

$$R = \frac{\Delta P_M}{I_{dH}^2} = \frac{440}{120^2} = 0,031 \text{ Ом} \quad (2.9)$$

Максимальна ЕРС перетворювача якоря

$$E_{d0} = \kappa_{du} \cdot U_{2f} = 2,34 \cdot 106 = 248,04 \text{ В} \quad (2.10)$$

Еквівалентний опір трансформатора

$$R_{екв} = 0,5 \cdot U_k \cdot \frac{E_{d0}}{I_{dH}} = 0,5 \cdot 0,075 \cdot \frac{248,04}{120} = 0,078 \text{ Ом} \quad (2.11)$$

Активний опір головного кола

$$R_e = R_a + R + R_{екв} + 0,1 \cdot R_a + R_{ко} + R_{дп} = 0,2442 \text{ Ом} \quad (2.12)$$

Індуктивність якірного кола

$$L_a = 0,25 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot n_H \cdot p} \cdot \frac{U_H}{I_H} = \quad (2.13)$$

$$= 0,25 \cdot \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 650 \cdot 4} \cdot \frac{220}{120} = 0,001683 \text{ Гн}$$

Індуктивний опір фази тр-ра, приведений до вторинної обмотки

$$k_{di} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$$

$$x_T = U_k \cdot \frac{U_{2f}}{I_{dH} \cdot k_{di}} = 0,075 \cdot \frac{106}{120 \cdot 0,577} = 0,115 \text{ Ом} \quad (2.14)$$

Індуктивність розсіювання трансформатора

$$w_c = 314$$

$$L_T = 0,5 \cdot \frac{x_T}{w_c} = 0,5 \cdot \frac{0,115}{314} = 0,0001827 \text{ Гн} \quad (2.15)$$

Індуктивність головного кола

$$L_{dr} = 0,0015 \text{ Гн}$$

$$L_{dr} = 0,0019196 \text{ Гн}$$

$$\begin{aligned} L_e &= L_a + L_T + L_{dr} = \\ &= 0,001683 + 0,0001827 + 0,0019196 = 0,0037857 \text{ Гн} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Електромагнітна постійна часу двигуна та якірного кола

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0,001683}{0,1238} = 0,0136 \text{ с} \quad (2.17)$$

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,0037857}{0,2442} = 0,0155 \text{ с} \quad (2.18)$$

$$T_3 = \frac{L_3}{R_3} = \frac{84}{91,989} = 0,9132 \text{ с} \quad (2.19)$$

Падіння напруги під щітками $\Delta U_{щ} = 2\text{В}$

Номінальна ЕРС двигуна

$$E_H = U_H - I_H \cdot R_a - \Delta U_{щ} = 220 - 120 \cdot 0,1238 - 2 = 203,15 \text{ В} \quad (2.20)$$

Номинальний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_H \cdot 9,55 \cdot 10^3}{n_H} = \frac{22 \cdot 9,55 \cdot 10^3}{650} = 323,23 \text{ Нм} \quad (2.21)$$

Сумарний момент інерції

$$J_\Sigma = J_{\text{мех}} + J_d = 13,764 + 1 = 14,764 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.22)$$

Коефіцієнти двигуна

$$C_e \Phi_H = \frac{E_H}{n_H \cdot \frac{\pi}{30}} = \frac{203,15}{650 \cdot \frac{3,14}{30}} = 2,9845 \text{ В} \cdot \frac{\text{хВ}}{\text{об}} \quad (2.23)$$

$$C_m \Phi_H = \frac{M_H}{I_H} = \frac{323,23}{120} = 2,6936 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}} \quad (2.24)$$

Електромеханічна постійна часу

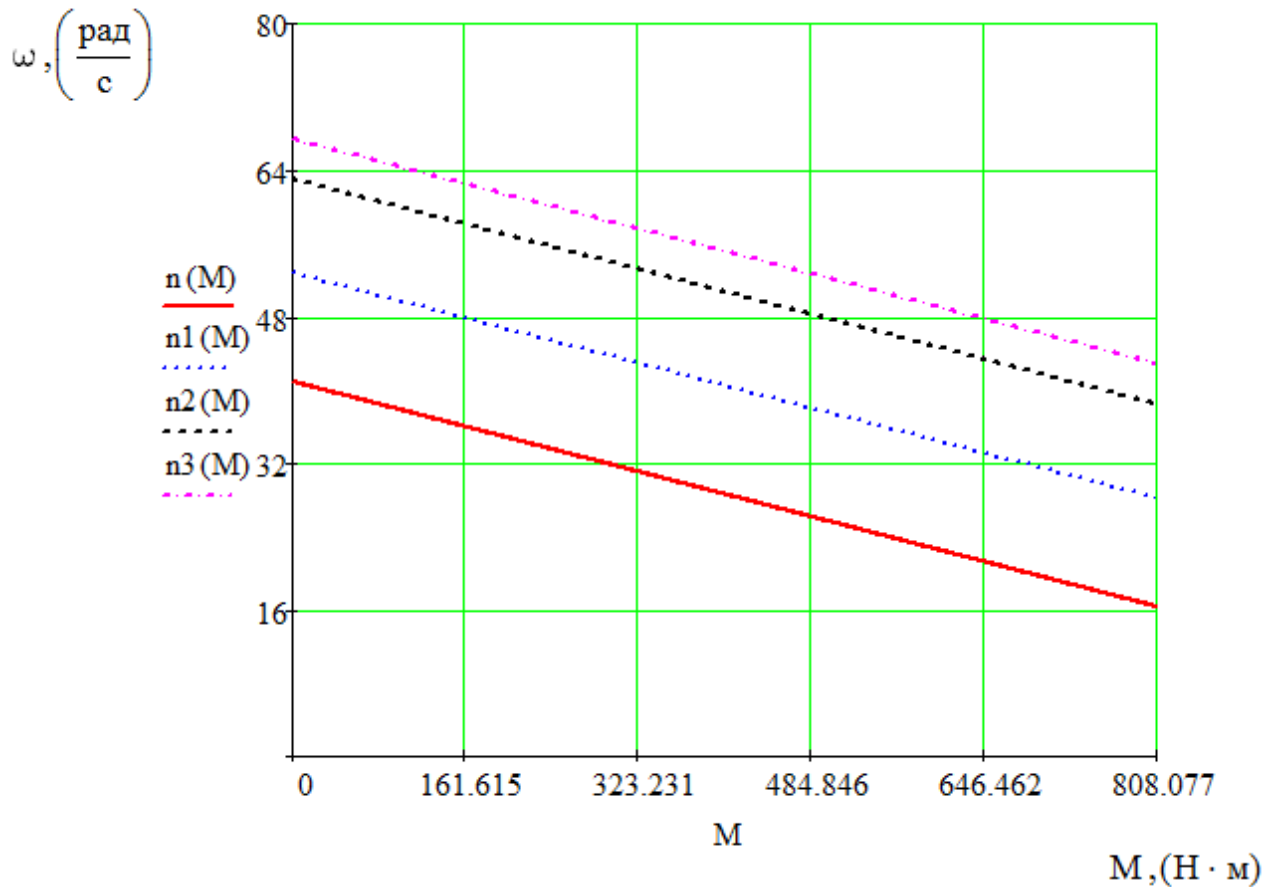
$$T_M = \frac{J_\Sigma \cdot R_e}{C_e \Phi_H \cdot C_m \Phi_H} = \frac{14,764 \cdot 0,2442}{2,9845 \cdot 2,6936} = 0,4485 \text{ с} \quad (2.25)$$

Побудуємо механічні характеристики електропривода

$$M = 0..k_n \cdot M_H$$

$$\alpha = 60^\circ \dots 35^\circ$$

$$\begin{aligned}
 \text{Для } \alpha &= 60^\circ & n(M) &= \frac{E_{d0} \cdot \cos(\alpha) - 2}{C_e \Phi_H} - \frac{R_e}{C_e \Phi_H \cdot C_m \Phi_H} \cdot M \\
 \text{Для } \alpha_1 &= 50^\circ & n_2(M) &= \frac{E_{d0} \cdot \cos(\alpha_2) - 2}{C_e \Phi_H} - \frac{R_e}{C_e \Phi_H \cdot C_m \Phi_H} \cdot M \\
 \text{Для } \alpha_2 &= 40^\circ & n_2(M) &= \frac{E_{d0} \cdot \cos(\alpha_2) - 2}{C_e \Phi_H} - \frac{R_e}{C_e \Phi_H \cdot C_m \Phi_H} \cdot M \\
 \text{Для } \alpha_3 &= 35^\circ & n_3(M) &= \frac{E_{d0} \cdot \cos(\alpha_3) - 2}{C_e \Phi_H} - \frac{R_e}{C_e \Phi_H \cdot C_m \Phi_H} \cdot M
 \end{aligned} \tag{2.26}$$



**Рис. 2.4. Статичні механічні характеристики електроприводу підйому
 кисневої фурми
 (розроблено автором)**

$$\Delta\omega = \frac{I_H \cdot R_e}{C_e \Phi_H} = 9,82 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \quad (2.27)$$

Статизм розімкненої системи при цьому

$$v = \frac{\Delta\omega}{\left(n_H \cdot \frac{\pi}{30}\right)} = 0,144 \quad (2.28)$$

Постійна часу вихрових струмів

$$T_{bc} = 0,1 \cdot T_z = 0,1 \cdot 0,9132 = 0,0913c \quad (2.29)$$

Перетворювач змінного струму в постійний зібраний по трифазній мостовій схемі, і тоді інтервал повторення обчислень вибираємо рівним

$$T_{\text{іпо}} = \frac{T}{6} = 0,00333 c, \quad (2.30)$$

де T – період мережі змінного струму

$$T = \frac{1}{50} = 0,02 c \quad (2.31)$$

Розрахунок коефіцієнтів передачі цифрових перетворювачів інформації.
Масштаб кута керування (визначається конструкцією пристрою)

$$M_a = \frac{512 \cdot 3}{\pi} = \frac{512 \cdot 3}{3,14} = 488,924 \frac{\text{од}}{\text{рад}} \quad (2.32)$$

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача якоря

$$K_{\text{ТПЯ}} = \frac{E_{d0}}{\frac{\pi}{2}} = 157,9072 \quad (2.33)$$

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача збудника

$$K_{\text{ТПЗ}} = \frac{E_{d0z}}{\frac{\pi}{2}} = \frac{233,9}{\frac{3,14}{2}} = 148,911 \quad (2.34)$$

Для виміру струму якоря проектом передбачено використання існуючого датчика струму на базі трансформаторів струму в колі живлення тиристорного перетворювача, тоді:

Максимальний струм якоря

$$I_{\text{макс}} = k_{\text{п}} \cdot I_{\text{н}} = 2,5 \cdot 120 = 300 \text{ А} \quad (2.35)$$

Масштаб датчика струму при налагодженні системи встановлюється рівним

$$k_{\text{дся1}} = \frac{10}{I_{\text{макс}}} = \frac{10}{300} = 0,0333 \quad (2.36)$$

Масштаб АЦП датчика струму якоря, установлений виготовлювачем

$$M_{\text{стр}} = 80 \frac{\text{Од}}{\text{В}} \quad (2.37)$$

Коефіцієнт передачі пристрою виміру струму якоря

$$k_{\text{дся}} = k_{\text{дся1}} \cdot M_{\text{стр}} = 0,0333 \cdot 80 = 2,6667 \frac{\text{Од}}{\text{А}} \quad (2.38)$$

Коефіцієнт передачі вузла виміру швидкості на базі тахогенератора.

Тахогенератор, установлений на двигуні електропривода фурми розрахований таким чином, що при 2600 об./хв двигуна вихід тахогенератора дорівнює 100 В.

Звідси:

$$U_{\text{тг}} = 100\text{В} \quad n_{\text{тг}} = 2600 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

коефіцієнт передачі тахогенератора

$$K_{\text{тг}} = \frac{U_{\text{тг}}}{n_{\text{тг}} \cdot \frac{\pi}{30}} = \frac{100}{2600 \cdot \frac{3,14}{30}} = 0,3673 \quad (2.39)$$

коефіцієнт дільника напруги тахогенератора

$$K_{\text{діл}} = 10$$

Масштаб АЦП датчика швидкості, установлений виготовлювачем

$$M_{\text{ш}} = 819 \frac{\text{Од}}{\text{В}}$$

Коефіцієнт передачі вузла виміру швидкості на базі тахогенератора

$$K_{\text{дш}} = \frac{M_{\text{ш}}}{K_{\text{діл}} \cdot K_{\text{тг}}} = \frac{819}{10 \cdot 0,3673} = 222,99 \frac{\text{од}}{\frac{\text{рад}}{\text{сек}}} \quad (2.40)$$

Масштаб АЦП датчика струму збудження, установлений виготовлювачем для приводу

$$\begin{aligned} M_{\text{стрз}} &= 819 \frac{\text{Од}}{\text{В}} & I_{\text{шз}} &= 5\text{А} \\ K_{\text{пдсз}} &= \frac{10}{I_{\text{шз}}} = \frac{10}{5} = 2 \frac{\text{Од}}{\text{А}} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Коефіцієнт передачі пристрою виміру струму збудження

$$K_{\text{дсз}} = K_{\text{пдсз}} \cdot M_{\text{стрз}} = 2 \cdot 819 = 1638 \frac{\text{Од}}{\text{А}} \quad (2.42)$$

Коефіцієнт передачі датчика ЕРС

$$K_{\text{де}} = \frac{50}{U_{\text{н}}} = \frac{50}{220} = 0,2273 \frac{\text{Од}}{\text{В}} \quad (2.43)$$

Масштаб АЦП датчика ЕРС (установлений виготовлювачем)

$$M_{\text{е}} = 4,09 \frac{\text{Од}}{\text{В}}$$

Коефіцієнт передачі пристрою виміру ЕРС

$$K_{\text{де}} = 40 \frac{\text{Од}}{\text{В}}$$

2.4.1 Розрахунок регулятора струму

Структурна схема регулювання струму якоря наведена на рис. 2.5.

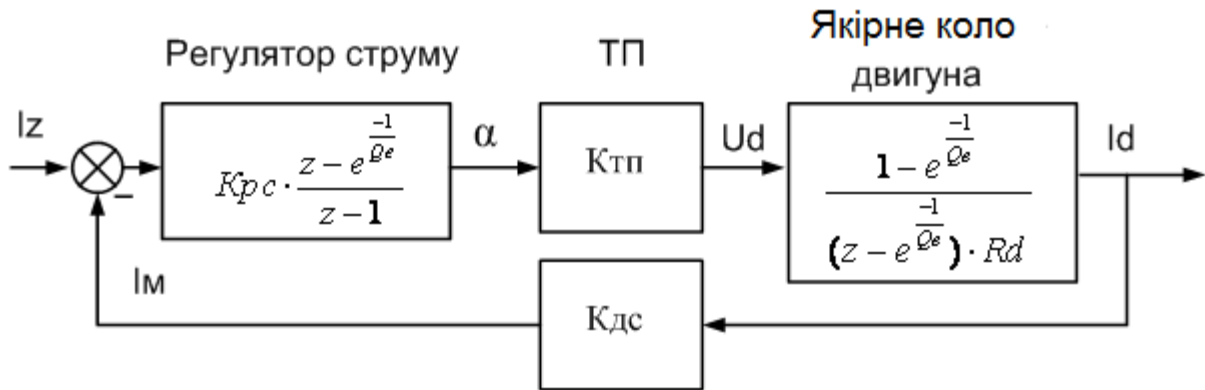


Рис. 2.5. Структурна схема регулювання струму якоря

$K_{ТП}$ – коефіцієнт ТП;

$K_{ДС}$ – коефіцієнт по виміру струму;

Q_E – постійна часу якірного кола у в.о.;

R_E – опір якірного кола.

(розроблено автором з використанням [13; 14])

Зі структурної схеми можна одержати

$$K_{psc} = \frac{R_d \cdot (1 - e^{-\gamma})}{1 - e^{\frac{-1}{Q_E}}} \cdot \frac{M_\alpha}{K_{dc} \cdot K_{mn}} \quad (2.44)$$

Робота регулятора струму оптимальна, коли перехідний процес $I_d[n]$ виглядає як експонента з показником γ . Значення постійної оптимізованого контуру струму γ обирається рівним -1. Це гарантує, що зміна середнього значення струму якоря при стрибку завдання струму на ΔI_Z відбувається згідно з законом $I[n] = \Delta I_Z \cdot (1 - e^{-(n-1)})$, де n - номер інтервалу повторення обчислень.

Струм на виході перетворювача стабілізується протягом 10-13 мс, забезпечуючи високу швидкість та відмінну стійкість до завад. Таким чином, передатна функція оптимізованого контуру струму має вигляд:

$$(2.45)$$

$$W_{pc(z)} = \frac{\frac{1}{K_{dc}} \cdot (1 - e^{-y})}{z - e^{-y}}$$

Звідси коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора струму

$$K_{прся} = \frac{M_a \cdot R_e \cdot \frac{1 - e^{-1}}{-1}}{K_{дся} \cdot K_{тля}} = \frac{119,3918 \cdot 3,2676}{2,6667 \cdot 157,9072} = 0,92646 \quad (2.46)$$

Коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора струму

$$Q_e = \frac{T_e}{3,333 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,0155}{0,0003333} = 4,6513 \quad (2.47)$$

$$K_{ірся} = K_{прся} \cdot \left(1 - e^{\frac{-1}{Q_e}}\right) = 0,92646 \cdot \left(1 - e^{\frac{-1}{4,6513}}\right) = 0,17923 \quad (2.48)$$

Максимальне значення кута β приймаємо рівним 70 ел. град., тобто 1,222 рад, звідки максимальне значення інтегральної суми:

$$S_{імакс} = \frac{M_a \cdot \beta_{макс}}{K_{ірся}} = \frac{488,924 \cdot 1,222}{0,17923} = 3333,7 \quad (2.49)$$

Коефіцієнт виправлення на запізнювання в контурі струму якоря

$$K_{зап} = e^{-1} = 0,3679 \quad (2.50)$$

2.4.2 Розрахунок регулятора швидкості

Для досягнення вищої точності роботи системи використовується пропорційно-інтегральний регулятор швидкості. Параметри регулятора обираються так, щоб при стрибку завдання перерегулювання по швидкості не перевищувало 10%. У такому випадку передатна функція регулятора швидкості має вигляд, зображений на рис. 2.6.

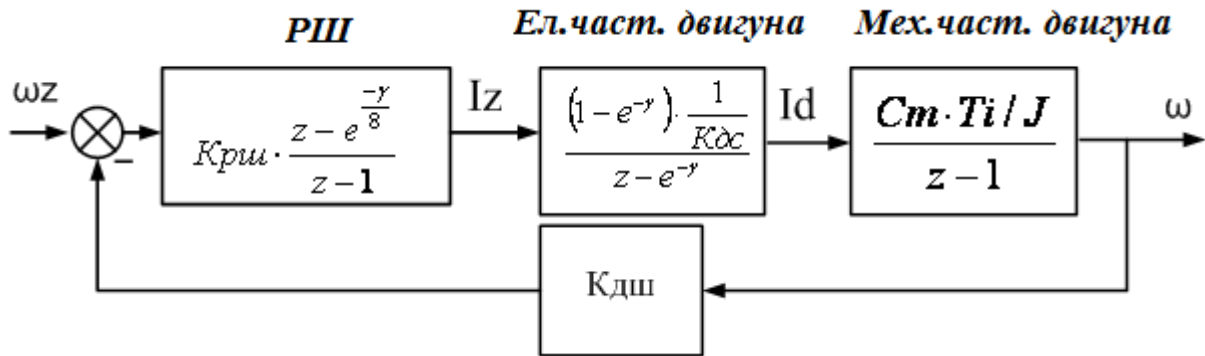


Рис. 2.6. Структурна схема регулювання швидкості
(розроблено автором з використанням [13; 14])

На рис. 2.6 $K_{рш}$ – коефіцієнт пропорційної частини регулятора швидкості.

$$\gamma = 1$$

$$K_{рш} = \frac{J_{\Sigma}}{C_m \Phi_n \cdot T_{іно} \cdot K_{дш}} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{\gamma}{2}}}{1 - e^{-\gamma}} = \quad (2.51)$$

$$= \frac{14,764}{2,6936 \cdot 0,0033 \cdot 222,9} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{1}{2}}}{1 - e^{-1}} = 4,59$$

де γ - коефіцієнт швидкодії контуру струму;

J_{Σ} - сумарний момент інерції;

C_m – коефіцієнт, що зв'язує момент і струм двигуна;

T_i – час інтервалу повторення обчислень рівний $T_i = 0,00333$ с.

З огляду на те що $\gamma = 1$, коефіцієнт інтегральної частини

$$(2.52)$$

$$K_{ipш} = K_{рш} \cdot \left(1 - e^{\frac{-T}{8}}\right) = 4,5901 \cdot \left(1 - e^{\frac{-1}{8}}\right) = 0.5393$$

Обмеження інтегральної суми регулятора швидкості визначається по вираженню

$$S_{\max} = \frac{I_{\max}}{K_{дся} \cdot K_{ipш}} = \frac{300}{2,667 \cdot 0,5393} = 208,5849 \quad (2.53)$$

де I_{\max} – гранично-припустимий струм якоря двигуна;

$K_{дся}$ - коефіцієнт передачі вузла виміру струму;

$K_{ipш}$ - коефіцієнт передачі інтегральної частини регулятора швидкості.

2.4.3 Розрахунок коефіцієнтів настроювання регулятора струму збудження

Структурна схема регулювання струму збудження наведена на рис. 2.7.

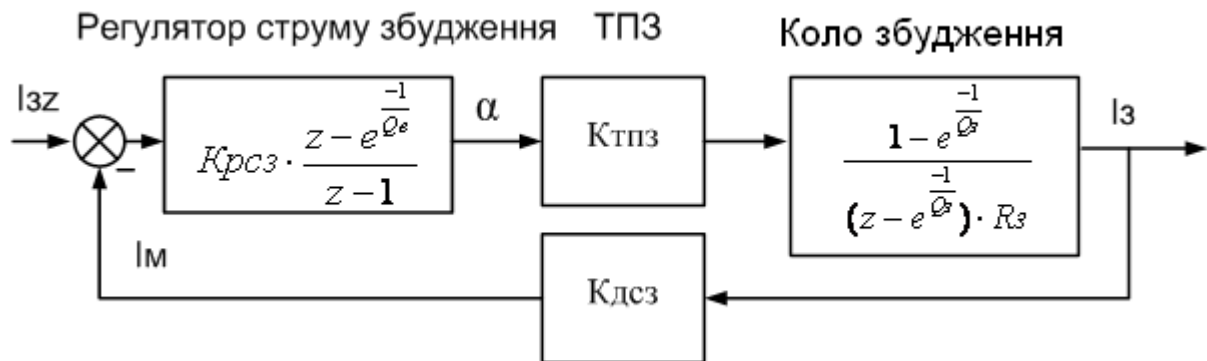


Рис. 2.7. Структурна схема регулювання струму збудження

(розроблено автором з використанням [13; 14])

$K_{рсз}$ – коефіцієнт пропорційної частини регулятора струму збудження;

$K_{тпз}$ - коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача, що живить обмотку збудження;

Q_z – постійна часу обмотки збудження у відносних одиницях;

T_z - постійна часу обмотки збудження, с;

$T_{іпо}$ - час інтервалу повторення обчислень;

$K_{дсз}$ - коефіцієнт передачі вузла виміру й перетворення в цифрову форму струму збудження;

R_3 - опір обмотки збудження.

Величина коефіцієнта передачі пропорційної частини регулятора струму збудження

$$Q_3 = \frac{L_3}{R_3} = \frac{84}{91,9} = 273,95 \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} K_{прсз} &= \frac{R_e \cdot (1 - e^{-\gamma})}{1 - e^{-\frac{1}{Q_3}}} \cdot \frac{M_a}{K_{дсз} \cdot K_{тпз}} = \\ &= \frac{91,989 \cdot 0,007194}{0,00364} \cdot \frac{488,924}{1638 \cdot 148,9111} = 0,36406 \end{aligned} \quad (2.55)$$

Коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора струму збудження

$$K_{ірсз} = K_{прсз} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{Q_3}}\right) = 0,36406 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{273,95}}\right) = 0,01326 \quad (2.56)$$

Максимальне значення кута β_{\max} для тиристорного збудника приймаємо рівним 85 ел. град. або 1,483 рад. Тоді обмеження інтегральної суми дорівнює

$$S_{i\beta_{\max}} = \frac{M_a \cdot \beta_{\max}}{K_{ірсз}} = \frac{488,924 \cdot 1,483}{0,01326} = 546600 \quad (2.57)$$

2.4.4 Розрахунок коефіцієнтів настроювання регулятора ЕРС

Структурна схема регулювання ЕРС наведена на рис. 2.8.

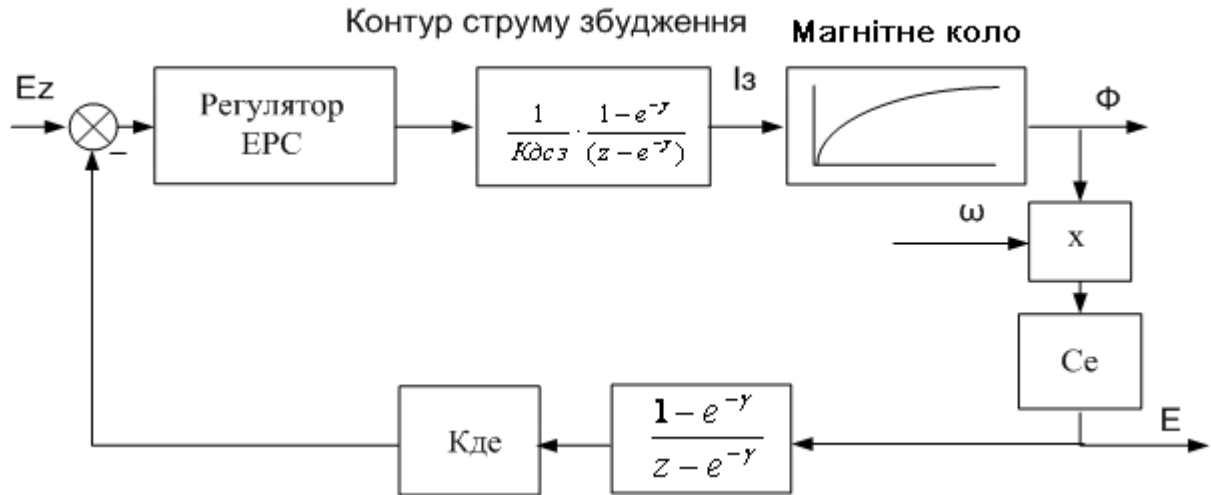


Рис. 2.8. Структурна схема регулювання ЕРС
(розроблено автором з використанням [13; 14])

Так як швидкість стабілізується регулятором швидкості, причому регулювання проводиться шляхом зміни напруги на двигуні, то з достатньою для практики точністю можна вважати, що в процесі регулювання ЕРС швидкість двигуна постійна. Регулятор ЕРС прийнятий пропорційно-інтегральним, його розрахунок виконаний для зони роботи з максимальними швидкостями привода. Для зазначених спрощень передатна функція регулятора ЕРС має вигляд:

$$W_{pe}(z) = K_{pe} \cdot \frac{z - e^{-\gamma}}{z - 1} \quad (2.58)$$

де K_{pe} - коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора ЕРС;

γ - параметр настроювання швидкодії контуру регулювання ЕРС.

Величина коефіцієнта пропорційної частини визначена зі співвідношення

По типовій кривій намагнічування двигунів $S_M \Phi_{\omega}$ визначаємо, що при $I_3 = I_{3 \text{ мін}} K_{\Phi} = 0,482$ при якому забезпечується перехідний процес із перерегулюванням не більше 5%.

Звідки

$$\omega_0 = n_{\text{макс}} \cdot \frac{\pi}{30} = 2600 \cdot \frac{3,14}{30} = 272,27 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \quad (2.59)$$

$$\gamma_1 = \frac{Edoz}{L_3 \cdot i_{\text{змакс}}} = \frac{233,9}{84 \cdot 1,9} = 1,4656$$

$$T_\phi = 0,02\text{с}$$

$$x = \frac{T_{\text{іпо}}}{T_\phi} = \frac{0,00333}{0,02} = 0,1667 \quad (2.60)$$

$$K_{\text{ре}} = \frac{K_{\text{дсз}} \cdot (1 - e^{-\gamma_1})}{4 \cdot (1 - e^{-x}) \cdot 0,482 \cdot K_{\text{де}} \cdot \omega_0} =$$

$$= \frac{1638 \cdot (1 - e^{-1,4656})}{4 \cdot (1 - 0,1535) \cdot 0,482 \cdot 40 \cdot 272,2714} = 0,39079 \quad (2.61)$$

Коефіцієнт підсилення інтегральної частини

$$K_{\text{іре}} = K_{\text{ре}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{x}}\right) = 0,3908 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{0,1667}}\right) = 0,38982 \quad (2.62)$$

Обмеження інтегральної суми регулятора ЕРС при $I_{\text{змакс}} = I_{\text{зном}} = 1,9\text{А}$

$$S_{\text{емах}} = \frac{i_{\text{змакс}} \cdot K_{\text{дсз}}}{K_{\text{іре}}} = 7983,7 \quad (2.63)$$

2.4.5 Розрахунок параметрів регулятора положення

Мікропроцесорне регулювання, засноване на викладених вище принципах, може бути використане для керування установкою робочого органа механізму, що приводиться, у задане кінцеве положення (позиціонування). Керуюча мікро-еом, на яку покладені функції регуляторів струму й швидкості, описаних вище, може одночасно виконувати й функції регулятора положення, якщо має резерв обчислювальної потужності. Оскільки в той же час зберігаються без зміни алгоритми регуляторів струму й швидкості, досягається значна економія обчислювальної потужності.

Розглянемо систему, що реалізує принцип систем з підлеглим регулюванням змінних стану, коли до згаданих контурів струму й швидкості при позиціюванні додається зовнішній контур регулювання положення.

Звичайно в ТЕП широкого призначення здійснюється оптимальний по швидкодії процес позиціювання з обмеженням другої похідної регульованої величини, тобто при розгоні й гальмуванні рух електропривода відбувається з постійним прискоренням.

Структурна схема позиційної системи, у якій збережені алгоритми регуляторів струму й швидкості, містить датчик шляху з передатним відношенням k_n і регулятор положення з передатною функцією:

$$K_{рп} = \frac{K_{дш} \cdot 0,0033^2}{4 \cdot T_e \cdot K_{дп}} = \frac{222,9902 \cdot 0,0033^2}{4 \cdot 0,0155 \cdot 95,54} = 0,0004 \quad (2.64)$$

2.6 Моделювання системи керування електроприводом

Як основний метод дослідження обрано імітаційне моделювання на персональному комп'ютері. Для побудови моделі використано програмний пакет Simulink, що забезпечує високу точність та наочність при аналізі динамічних процесів.

Мета моделювання – підтвердити ефективність прийнятих технічних рішень щодо функціональної структури автоматизованої системи керування (АСК), перевірити працездатність розроблених алгоритмів позиціонування та регулювання, а також оцінити загальну ефективність системи в реальних умовах експлуатації.

Модель електропривода переміщення кисневої фурми розроблено на основі структурної схеми АСК із двохзонним регулюванням швидкості. Усі параметри моделі – включаючи коефіцієнти передачі, постійні часу, обмеження струму та швидкості – отримано в результаті попередніх розрахунків при синтезі регуляторів струму, швидкості, ЕРС та положення.

У ході моделювання досліджено наступні режим роботи системи:

- пуск електропривода без навантаження;
- накид навантаження (імітація зміни механічного моменту при взаємодії фурми з розплавом).

Під час симуляції контролювалися ключові параметри приводу:

- кутова швидкість обертання двигуна;
- струм якоря;
- електромагнітний момент двигуна.

На основі розрахунків системи керування побудовано її структурну схему, наведену на рис. 2.9.

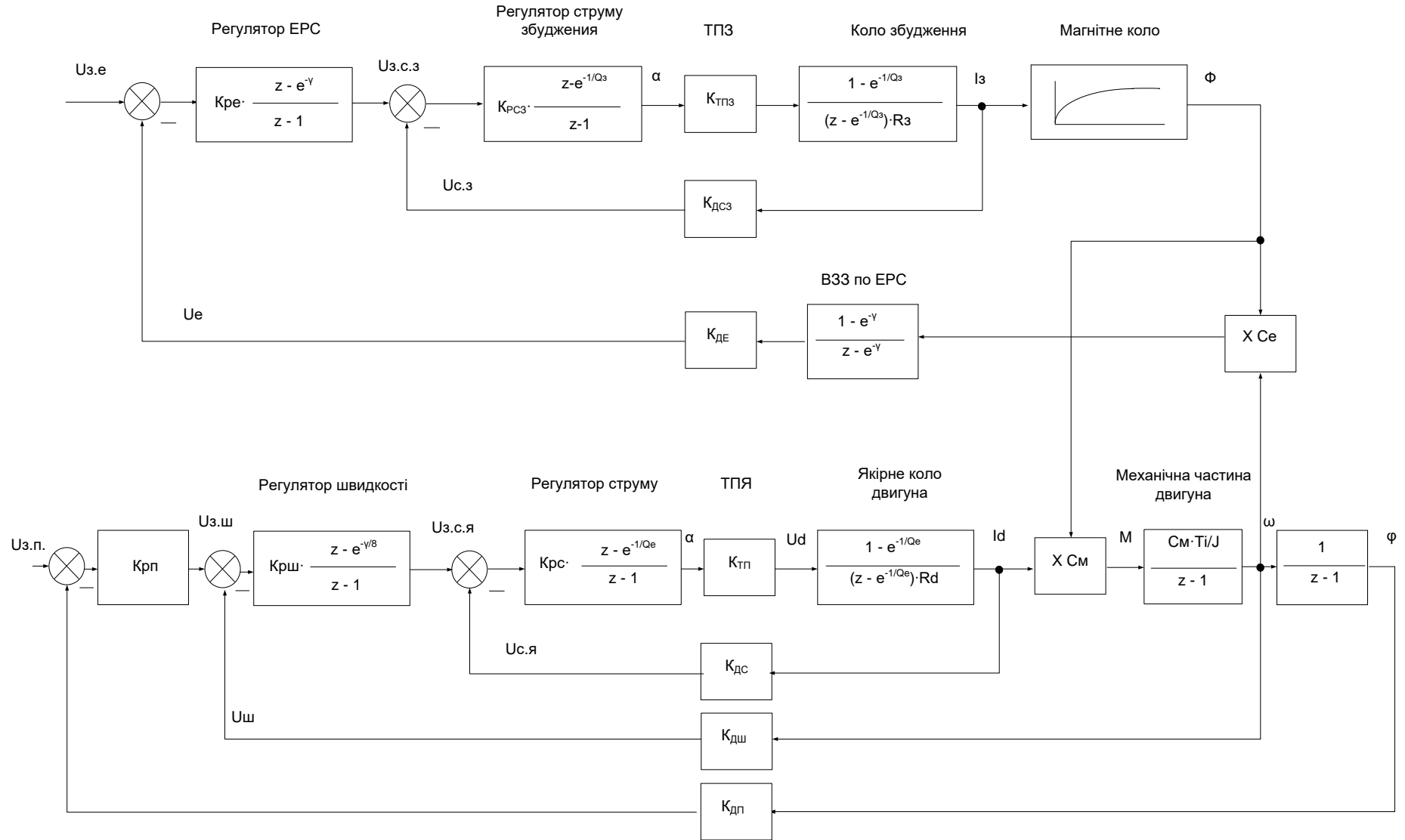


Рис. 2.9. Структурна схема системи керування приводом постійного струму
(розроблено автором)

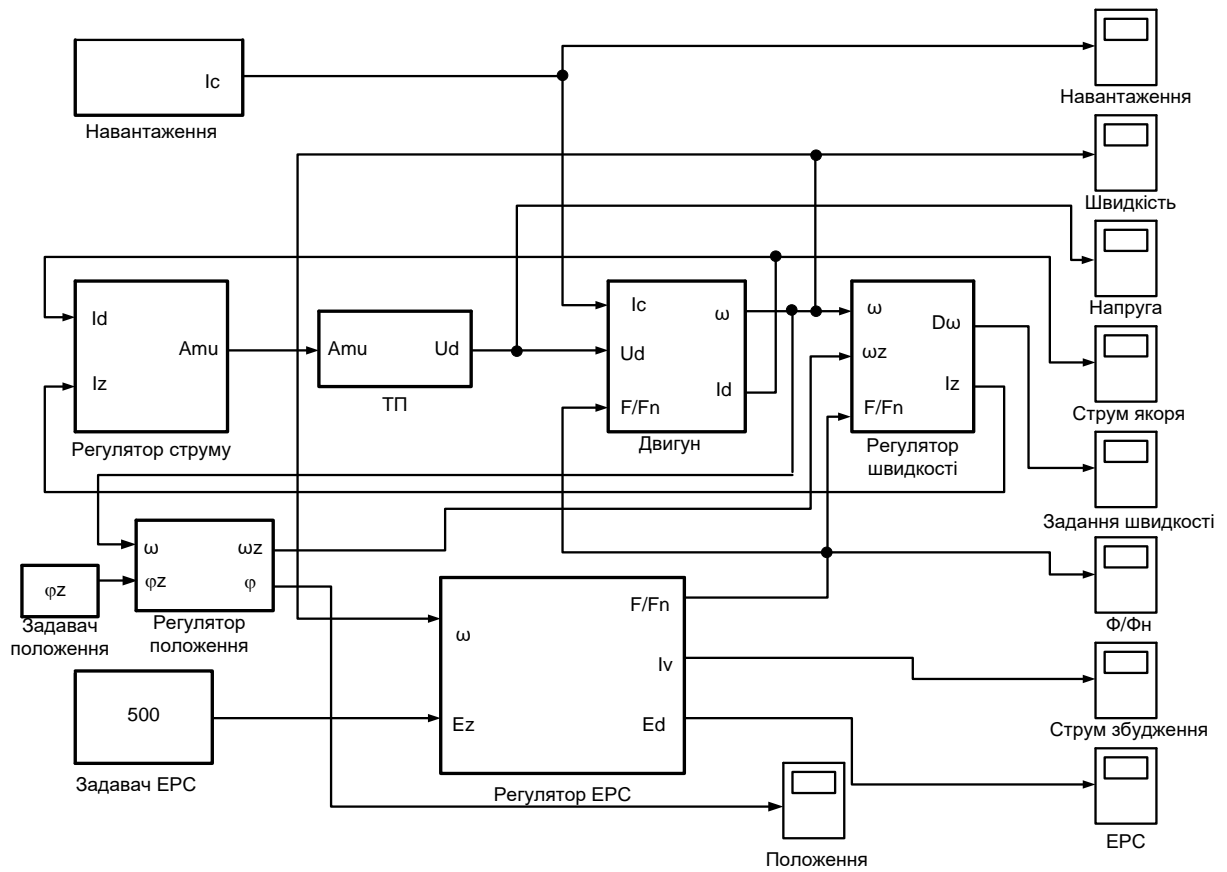


Рис. 2.10. Структурна схема математичної моделі
(розроблено автором)

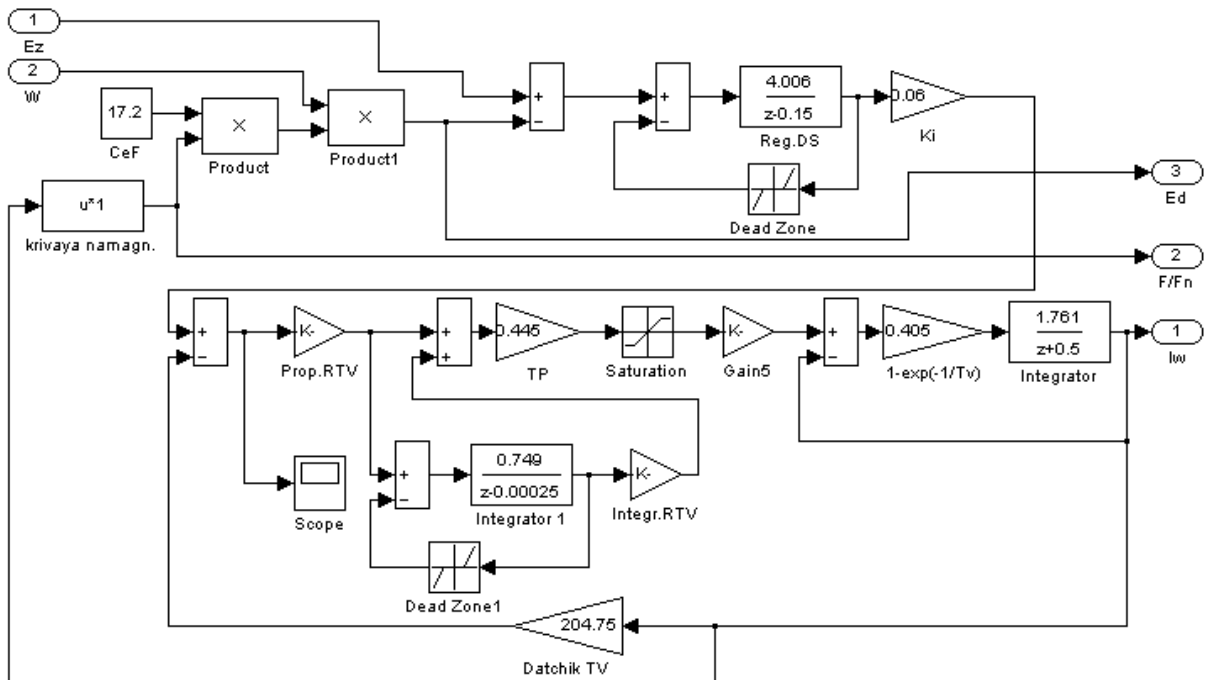


Рис. 2.11. Субблок регулятора ЕРС
(розроблено автором)

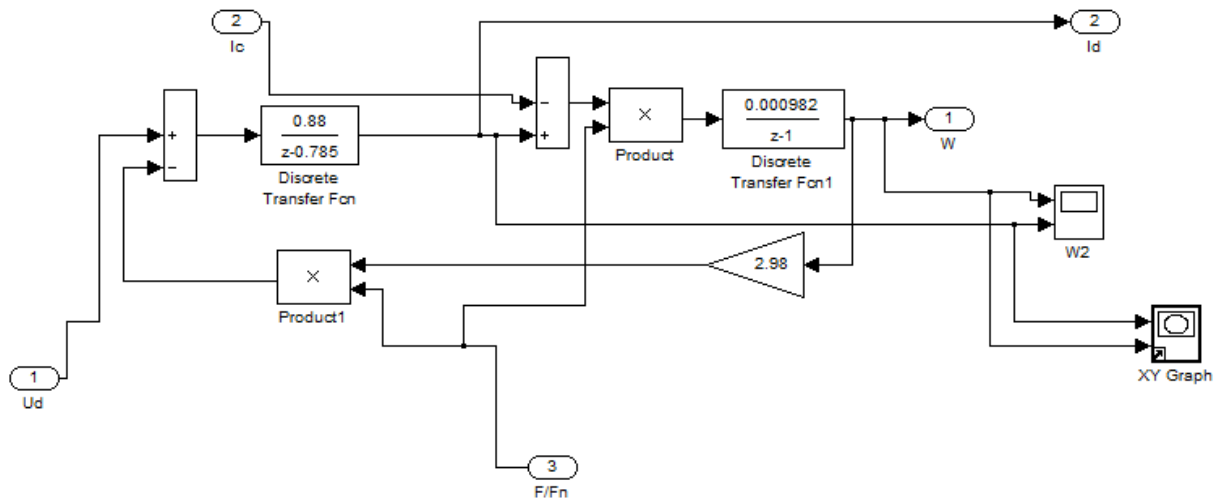


Рис. 2.12. Субблок двигуна
(розроблено автором)

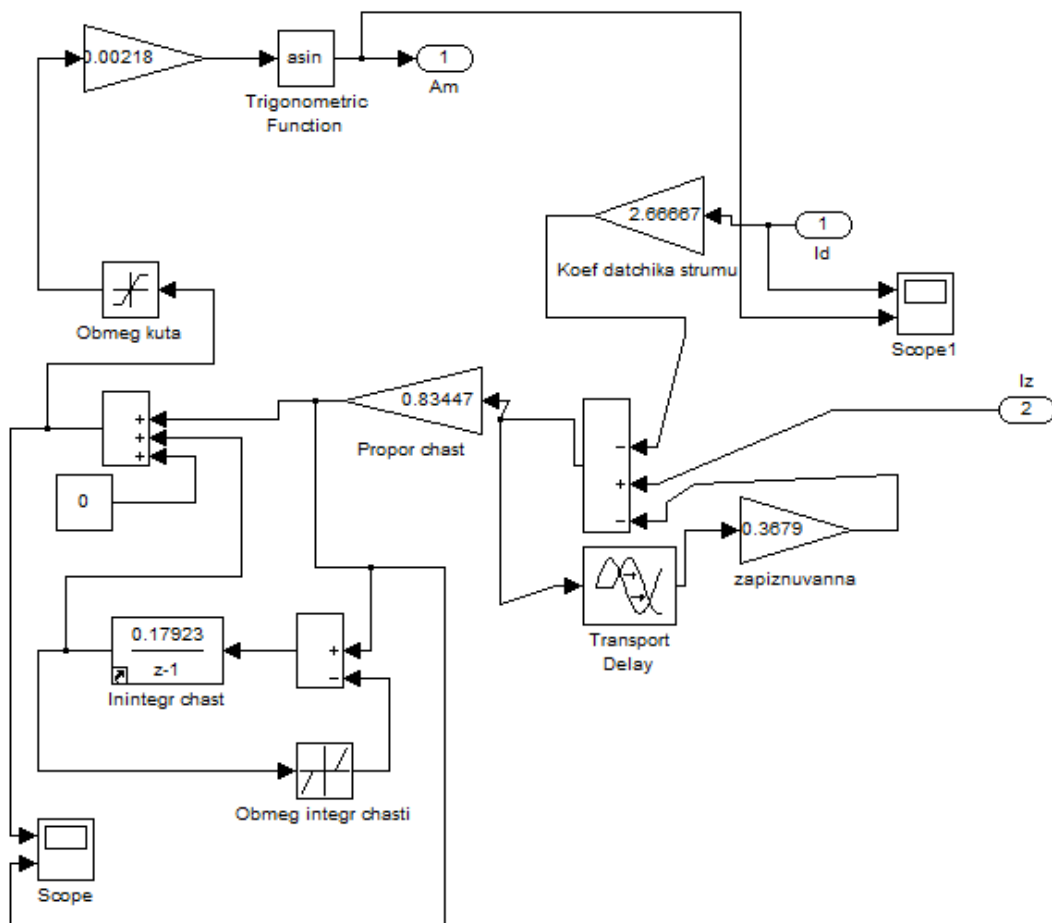


Рис. 2.13. Субблок регулятора струму
(розроблено автором)

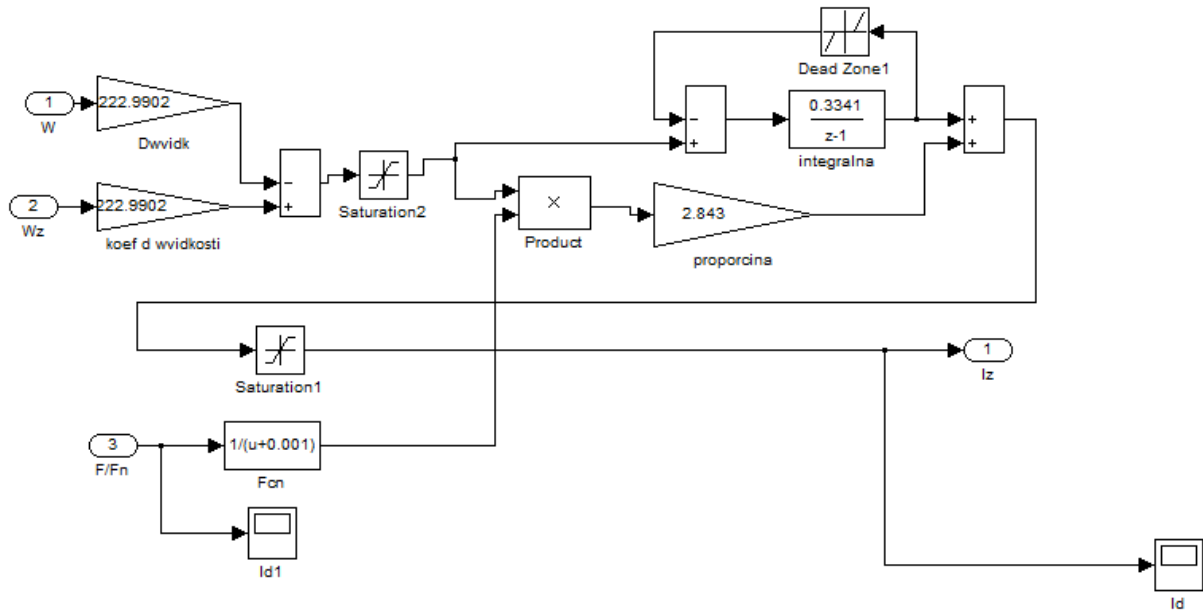


Рис. 2.14. Субблок регулятора швидкості
(розроблено автором)

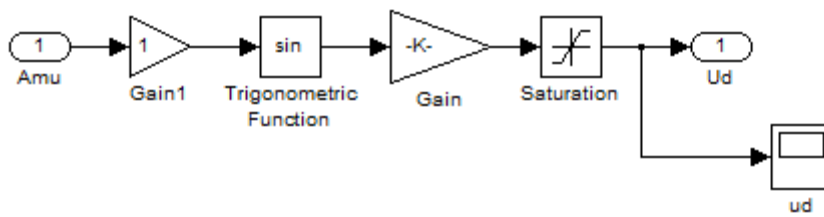


Рис. 2.15. Субблок тиристорного перетворювача
(розроблено автором)

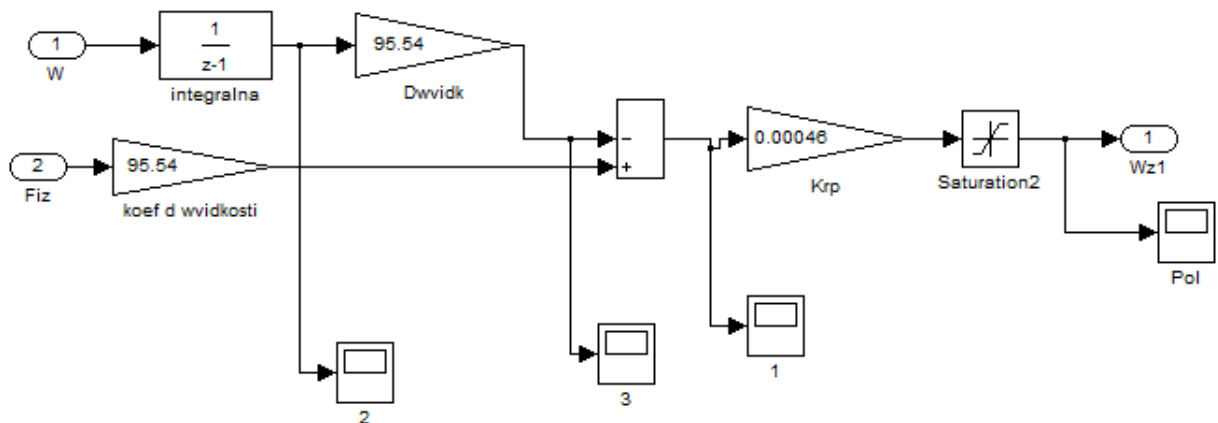


Рис. 2.16. Субблок регулятора положення
(розроблено автором)

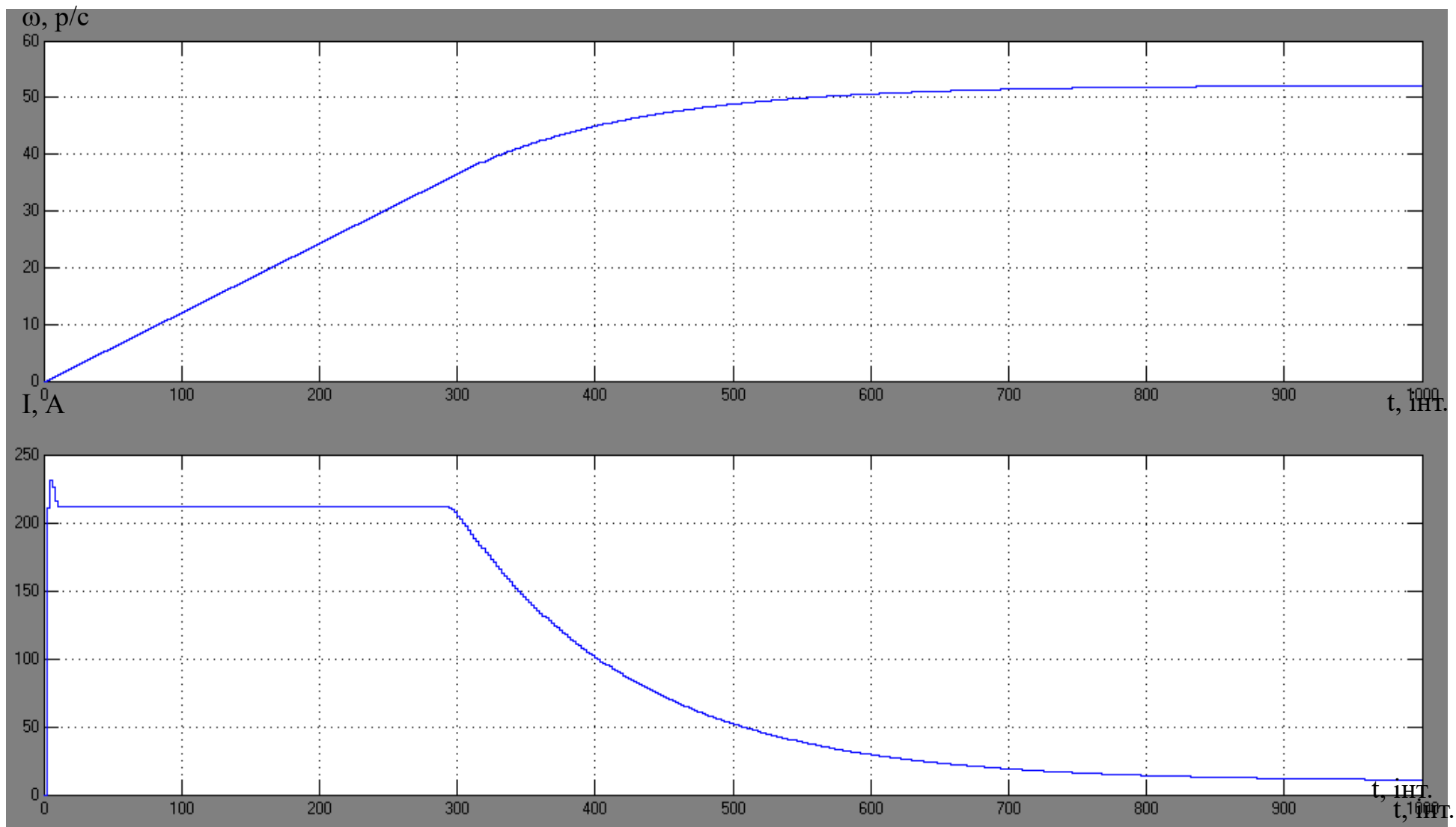


Рис. 2.17. Перехідні процеси при роботі привода фурми
(розроблено автором)

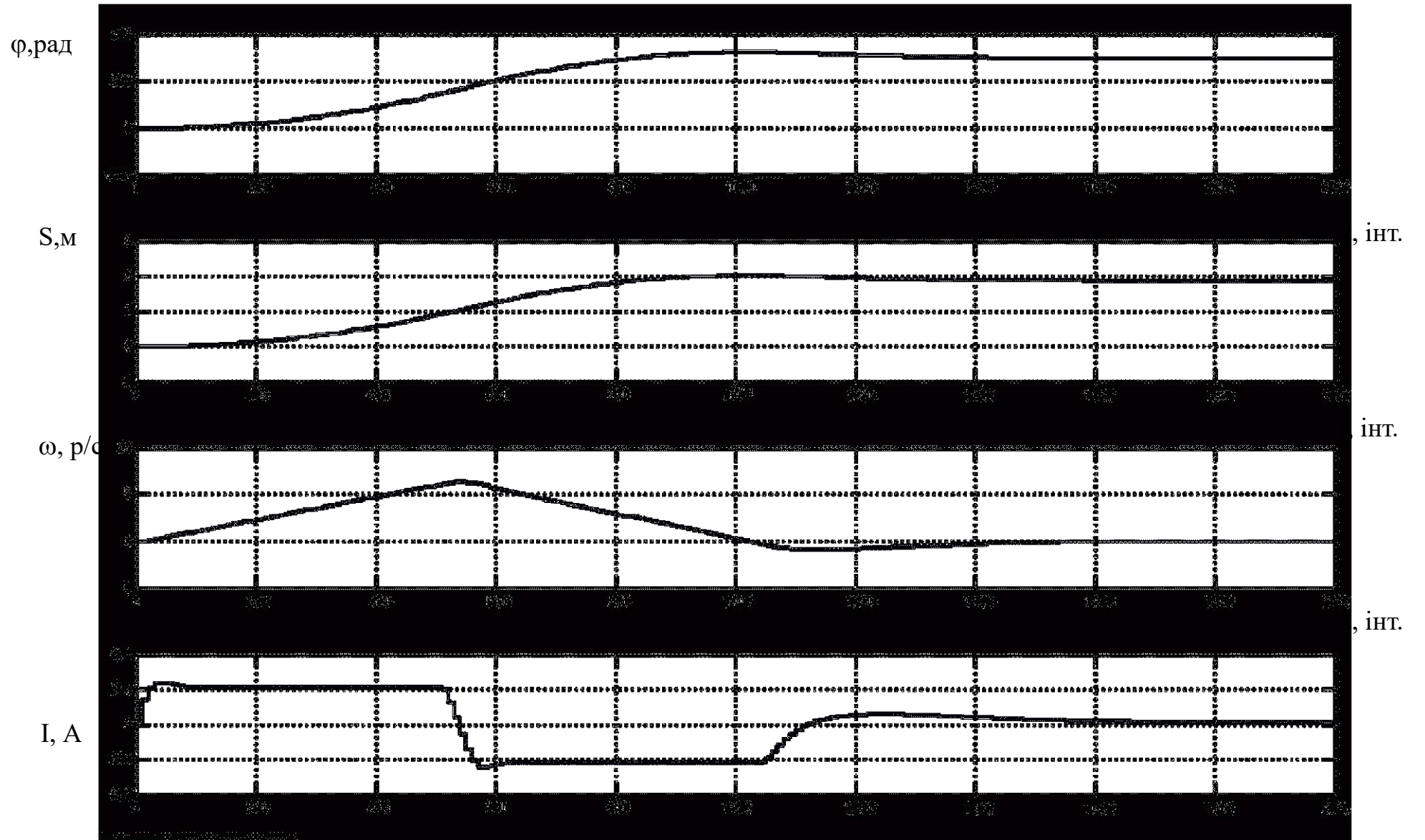


Рис. 2.18. Перехідні процеси при роботі привода фурми з регулятором положення
(розроблено автором)

t , інт.

Аналіз результатів імітаційного моделювання підтвердив працездатність розробленої системи автоматичного керування електроприводом переміщення кисневої фурми. У процесі пуску перерегулювання за струмом склало 4,3 %, а струм обмеження був зафіксований на рівні $2I_n$, що відповідає прийнятним технічним обмеженням.

Регулятор положення успішно відпрацював завдання, що відповідає куту 300 радіан, що еквівалентне переміщенню фурми на 4 м. У процесі руху привод розганявся до максимальної кутової швидкості 6,35 рад/с, після чого швидкість плавно знижувалася до нуля при наближенні до цільового положення.

Максимальне значення струму якоря двигуна під час переходового процесу не перевищило 221 А, що є прийнятним для обраного типу електропривода.

Таким чином, розроблена система автоматичного керування повністю задовольняє встановленим вимогам щодо динамічних характеристик, точності позиціонування та енергетичної ефективності, і може бути рекомендована до практичної реалізації.

2.6 Розробка алгоритмів роботи мікро-ЕОМ

Послідовність виконання операцій у мікро-еом визначається програмою її роботи, у свою чергу програма розробляється проектувальником системи регулювання на базі алгоритмів роботи мікро-еом. Алгоритм – це графічне зображення послідовності виконання операцій мікро-еом, звичайно в укрупненому виді. У ході виконання програми можливі ситуації, коли необхідно перервати виконання основної програми й перейти до виконання іншої послідовності команд, наприклад, при аварійних ситуаціях, обробки подій, пов'язаних із синхронізацією процесу керування зі зміною живлячої перетворювач напруги, обробки сигналів зовнішніх пристроїв і т.п. Після виконання необхідних команд обслуговування зазначеної події, мікро-еом повертається до виконання основної програми. Відповідно ідеології побудови

дискретної моделі тиристорного електропривода основна програма повинна виконуватися в плинні ППР і циклічно повторяться на наступних ППР, тобто сумарний час виконання програми не повинен перевищувати часу інтервалу перетворення, рівного $\frac{T_o}{m_6}$.

2.6.1 Розробка алгоритму системи цифрового керування

Типовий алгоритм в укрупненому виді наведений на рис. 2.19. Програма, що відповідає наведеному алгоритму, починає виконуватися безпосередньо після включення живлення на блок, де конструктивно реалізована зазначена система. Блоки 1...4 алгоритму виконуються завжди при відсутності силової напруги на тиристорних мостах, так при перевірці сигналів виходу подаються пробні сигнали в тому числі й на виходи, пов'язані з керуючими входами тиристорів. Блок 1 алгоритму реалізується в повному обсязі при наявності в мікро-еом убудованих засобів діагностики. Якщо в результаті виконання алгоритмів блок 1...4 виявлено не відповідність, то видається сигнал про несправності цифрової системи й виконання програми припиняється. Якщо результат перевірок позитивний, то в схему керування апаратами, що включають силову напругу на тиристорні мости подається сигнал дозволяючий їхнє включення. Після подачі силової напруги, як правило, перевіряється сигнал « чи дозволена робота привода». Наявність такого сигналу визначається звичайно вимогами техніки безпеки при обслуговуванні складних електромеханічних систем, дуже часто на час ремонтів механізму, розривають ланцюг якоря двигуна, наприклад, відключають автоматичний вимикач, у цьому випадку сигналом дозволу до роботи є замикання контакту-блока-контакту вимикача.

Для синхронізації процесу керування із силовою напругою встановлений блок 7. Зазначений блок очікує появи сигналу в момент, що відповідає природному включенню тиристорів. Блоки алгоритмів роботи мікро-еом при виконанні програм регуляторів розглянемо більш докладно.

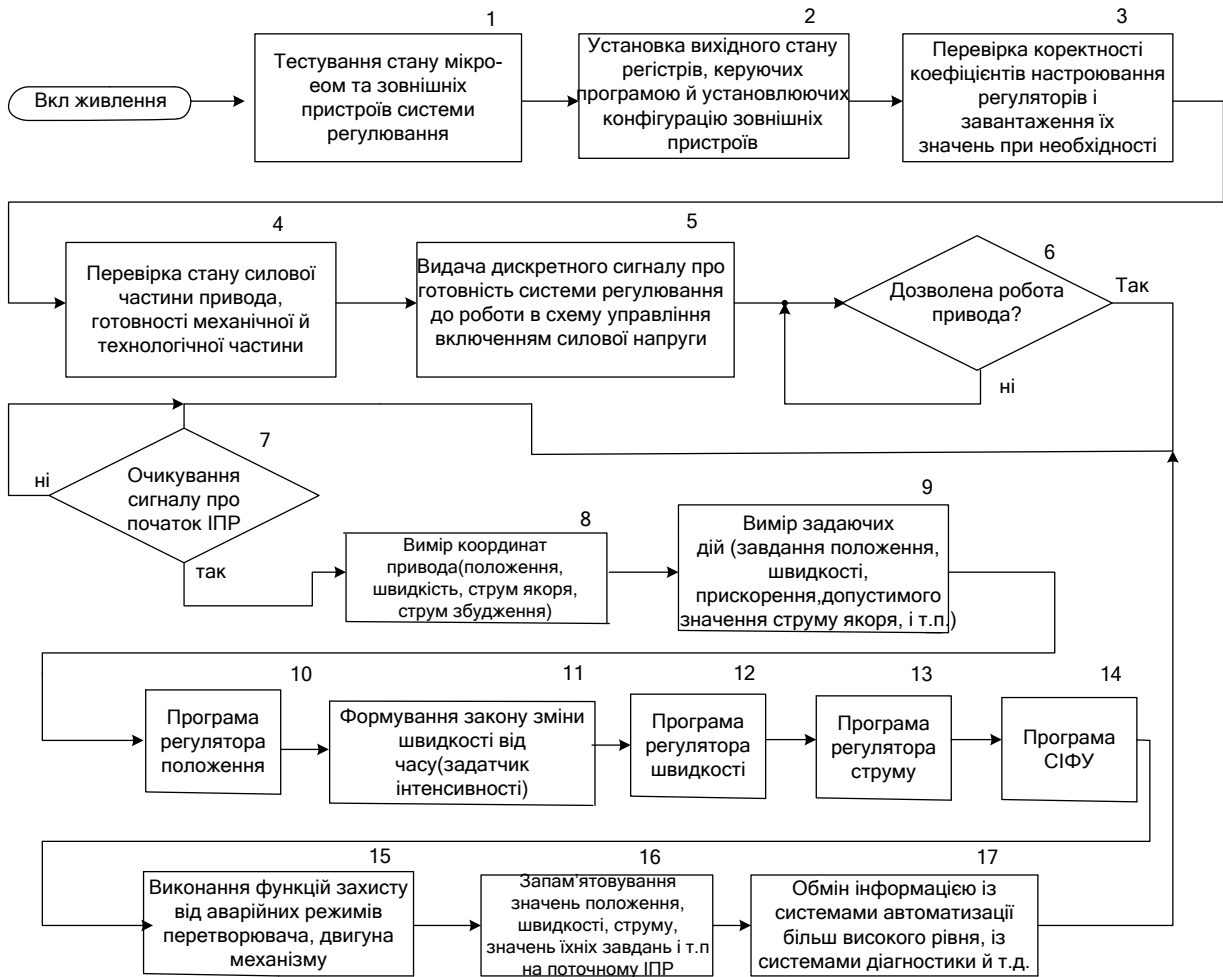


Рис. 2.19. Укрупнений алгоритм роботи мікро-ЕОМ у складі системи регулювання приводом фурми

(розроблено автором з використанням [13; 14])

2.6.2 Алгоритм лінійного задатчика інтенсивності

Визначимо гратчасту функцію, що зв'язує вихід задатчика інтенсивності $\omega_z[n]$ із входами $\omega_r[n]$ й $E_r[n]$ ($\omega_z[n]$ - завдання швидкості у функції номера ІПР, $\omega_r[n]$ бажане стале значення швидкості двигуна, $E_r[n]$ темп прискорення (з) розгону (гальмування) двигуна. При досить рідкій зміні сталого заданого значення швидкості, на етапі розгону (гальмування) величини ω_r й E_r можна вважати постійними.

При цих обмеження гратчасті функції, мають вигляд

$$\omega_z[n] = \left\{ \begin{array}{l} \omega_z[n-1] + Er, \text{ якщо } \dots \omega_r[n] \geq \omega_z[n-1] + Er \\ \omega_z[n-1], \text{ якщо } \dots \omega_z[n-1] - Er \leq \omega_r[n] \leq \omega_z[n-1] + Er \\ \omega_z[n-1] - Er, \text{ якщо } \dots \omega_r[n] \geq \omega_z[n-1] + Er \end{array} \right\} \quad (2.65)$$

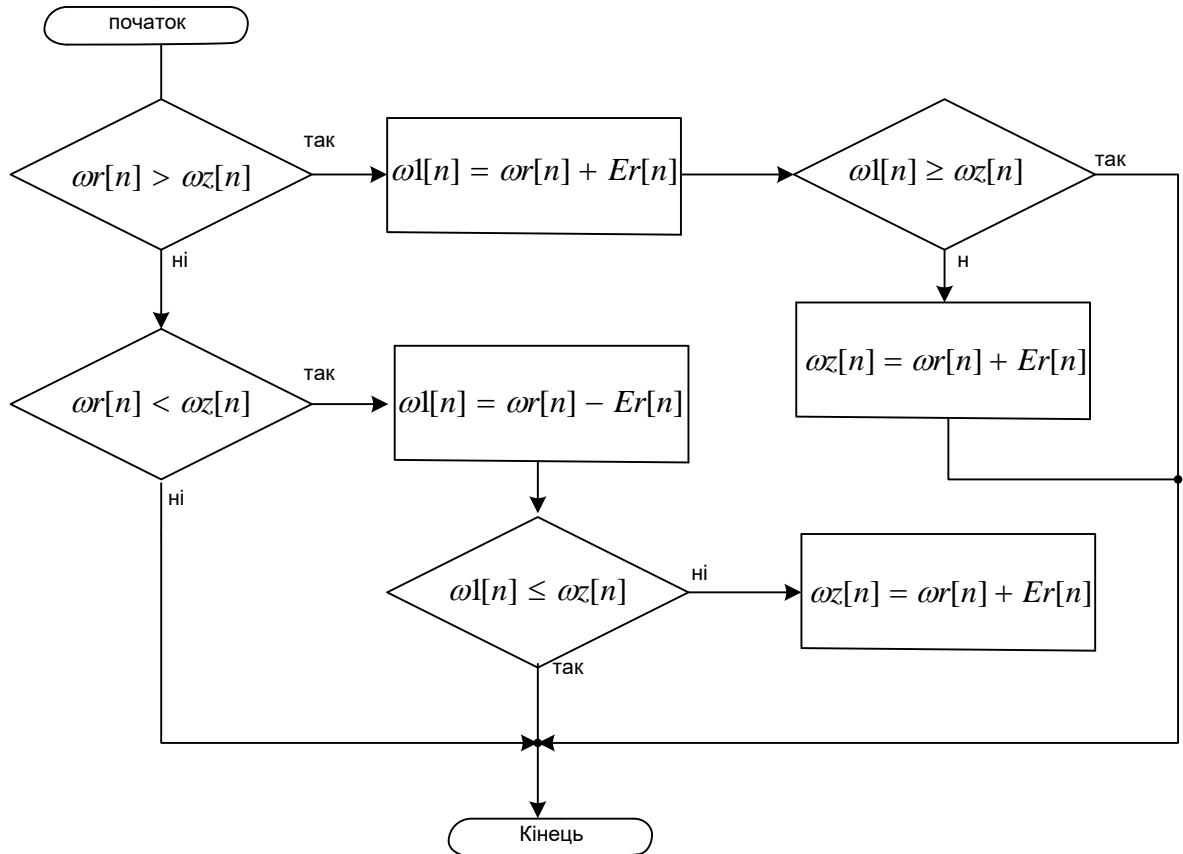


Рис. 2.20. Алгоритм задатчика інтенсивності
(розроблено автором)

Алгоритм, що реалізує умови (2.57) показаний на рис.2.19. Це один з найпростіших задатчиків інтенсивності. У ряді випадків необхідні більше складні алгоритми, наприклад, величина ER повинна змінюватися у функції швидкості обертання, якщо необхідно параболічний закон зміни швидкості у функції часу й т.п.

2.6.3 Алгоритм регулятора швидкості

Розглянемо алгоритм Пі-регулятора швидкості. Для роботи з П-регулятором швидкості досить установити коефіцієнт передачі інтегральної частини рівним нулю.

На підставі передатної функції регулятора можна скласти різницеve рівняння. Описуюче роботу регулятора, з огляду на, що множення на z в області зображень відповідає збільшенню аргументу оригіналу на 1, розподіл на z - відповідно зменшенню аргументу оригіналу на 1. Операції виконуються над різницею між заданим і фактичним значеннями швидкості обертання двигуна, обчисленої в блоці 1 алгоритму. У блоці 2 обчислюється задане значення струму якоря двигуна. У формулі $S\omega$ інтегральна сума регулятора

$$S\omega[n] = \sum_{j=0}^{n-1} \Delta\omega[j] = S\omega[n-2] + \Delta\omega[n-1] \quad (2.66)$$

У вираженні для визначення $I_z[n]$ входить інтегральна сума $S\omega[n-1]$, тому інтегральна сума обчислюється в блоці 7 після обчислення заданого значення струму, для використання на наступному ППР.

Задане значення струму якоря може приймати значення, що лежать тільки в інтервалі $I_{\min} \leq I_z \leq I_{\max}$, границі якого I_{\max} й I_{\min} , визначаються конструкцією двигуна й технологічних вимог до механізму. Звідси інтегральна сума також може приймати значення, що лежать в інтервалі

$$\frac{I_{\min}}{K_{\omega i_M}} \leq S\omega \leq \frac{I_{\max}}{K_{\omega i_M}} \quad (2.67)$$

Ці умови в алгоритмі по рис. 2.21 реалізуються блоками 3, 4, 5, 6 й 8, 9, 10, 11.

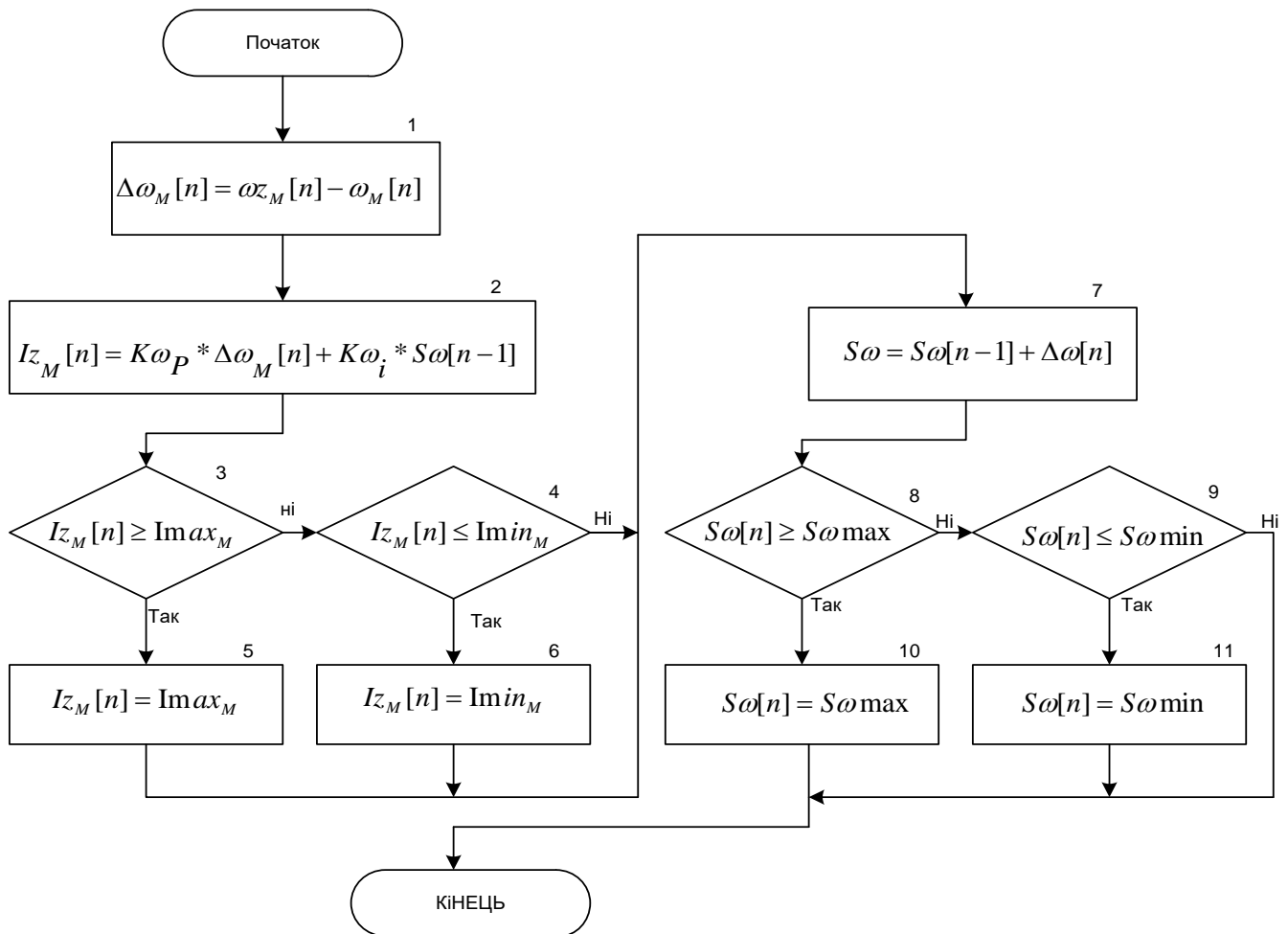


Рис. 2.21. Алгоритм регулятора швидкості
(розроблено автором)

2.6.4 Алгоритм регулятора струму

Різницеві рівняння, що описують роботу регулятора токи ідентичні рівнянням регулятора швидкості, однак, є деякі розходження, які в основному стосуються рівняння для обчислення неузгодженості по струму, оскільки необхідно ввести виправлення для компенсації шкідливої дії запізнювання. Блок №1 алгоритму на рис. 2.22 реалізує обчислення неузгодженості з виправленням на запізнювання. У блоці №2 виконується визначення кута керування тиристорами α_0 – початковий зсув кута керування, що звичайно встановлюється в межах 95-105 ел. градусів, S_i – інтегральна сума регулятора струму

$S_i[n] = \sum_{j=0}^{n-1} \Delta I_M[j] = S_i[n-2] + \Delta I_M[n-1]$. Обчислення інтегральної суми

виконується в блоці 7 алгоритму.

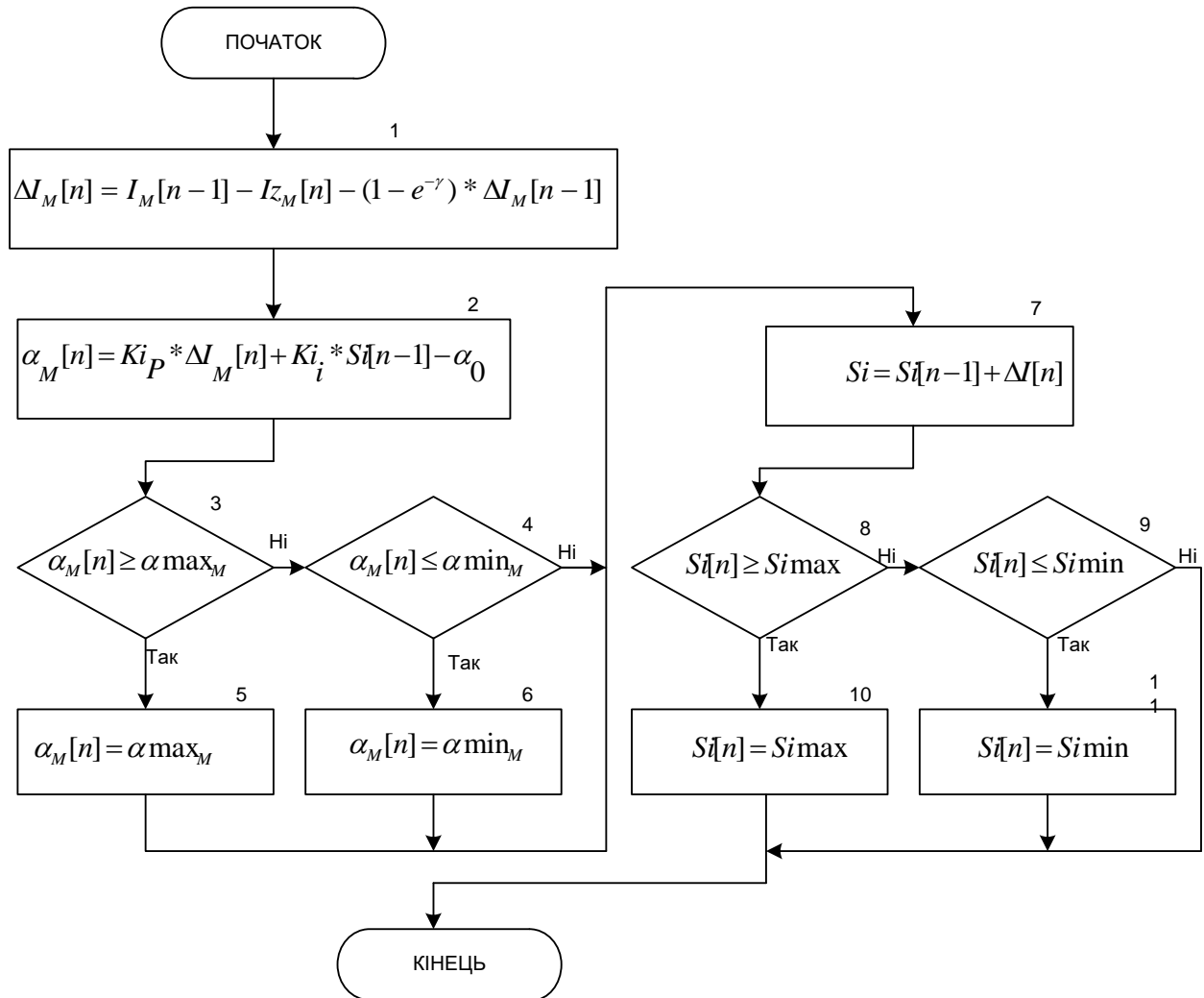


Рис. 2.22. Алгоритм регулятора струму

(розроблено автором)

Обчислене значення кута керування обмежується припустимими межами в блоці 3, 4, 5, 6 алгоритми. Як й у регуляторі швидкості в цьому випадку обчислення інтегральної суми виконується із запізнюванням на один ППР. Інтервал зміни інтегральної суми регулятора струму також обмежений

$$\frac{\alpha_{\min}}{K_{i_i}} \leq S_i \leq \frac{\alpha_{\max}}{K_{i_i}} \quad (2.68)$$

Обмеження S_i виконується в блоках 8, 9, 10, 11.

2.7 Розробка АСУ конвертера №2

2.7.1 Мета й призначення системи

Розроблювана система належить до класу автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП). До об'єктів автоматизації віднесено:

- привод конвертера №2;
- тракт подачі сипучих матеріалів у конвертер;
- систему дозування та подачі феросплавів у ковш;
- кисневу та торкрет-фурми;
- тракт охолодження конвертерних газів (ОКГ) та систему газоочищення (ГО).

Основне призначення системи – забезпечити:

- підвищену надійність керування механізмами конвертера, фурм, систем подачі сипучих і феросплавів;
- автоматичний контроль, сигналізацію, блокування та захист за всіма ключовими параметрами сталеплавильної плавки;
- автоматичне регулювання технологічних режимів (температура, тиск, витрата кисню, склад шихти тощо);
- точне дозування, облік і подачу сипучих матеріалів та феросплавів;
- архівування історичних даних про кожну плавку;
- автоматичне формування звітів (паспорти плавки, зведена звітність за зміну, тиждень тощо);
- інтеграцію з суміжними інформаційними системами (експрес-лабораторія, центральна автоматизована система планування – ЦАСП, ERP-система тощо).

Автоматизації підлягають робочі місця:

- машиніста дистрибутора;
- майстра основного виробництва (на майданчику конвертера);
- чергового електрика.

Мета створення системи – поліпшення техніко-економічних показників роботи конвертера №2 за рахунок оптимізації технологічного процесу плавки та скорочення непродуктивних простоїв.

Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання:

- підвищення надійності та стійкості керування механізмами;
- покращення наочності процесу через сучасні інтерфейси оператора;
- прискорення отримання актуальної інформації про склад і температуру чавуну та сталі;
- забезпечення високої точності підтримки заданих технологічних параметрів;
- підвищення технологічної дисципліни на всіх етапах плавки;
- поліпшення умов праці оперативного персоналу.

Ці завдання реалізуються шляхом заміни застарілих релейно-контакторних схем на сучасну мікропроцесорну АСУ ТП, побудовану на базі:

- сучасних засобів вимірювання (інтелектуальні датчики з цифровими інтерфейсами);
- програмованих логічних контролерів (ПЛК);
- промислових комп'ютерів (ПЕОМ);
- сучасного програмного забезпечення для візуалізації та управління.

Застосування таких засобів дозволяє розширити функціональні можливості системи, а саме:

- відображати технологічний процес у вигляді динамічних мнемосхем, графіків (трендів) та таблиць;
- забезпечити гнучке, інтуїтивне керування процесом;
- формувати та зберігати архів плавок (у тому числі для подальшого аналізу якості);
- надавати рольовий доступ до інформації для різних категорій персоналу: майстра, контролера ОТК, начальника зміни, начальника цеху тощо.

Критерії ефективності системи:

- скорочення непродуктивних простоїв конвертера;

- зменшення кількості плавок, що не відповідають замовленому складу;
- збільшення міжремонтних інтервалів обладнання;
- поліпшення ергономіки та безпеки праці операторського персоналу.

Система реалізується на базі мікропроцесорного контролера, встановленого в шафі керування ШУ-3, і повинна відповідати таким вимогам:

- дискретність розрахунку тривалості етапів плавки – 1 с;
- точність регулювання витрати кисню – $\pm 5\%$;
- періодичність опитування датчиків – не більше 500 мс.

Для інтеграції з верхнім рівнем керування передбачено двосторонній обмін даними між:

- базою даних системи візуалізації;
- завданням опитування інтелектуальних приладів.

Уточнення щодо протоколів та інструментів (актуалізація):

У оригінальному тексті згадувалися застарілі технології: RsView32, DDE, TCPVIP. На сьогодні RsView32 є морально застарілою SCADA-системою, а DDE — небезпечним і нестабільним механізмом обміну даними, який не рекомендується використовувати у промислових системах.

Тому в сучасному проекті доцільно застосовувати:

- SCADA-систему сучасної версії (наприклад, Ignition, WinCC OA, AVEVA System Platform або, якщо залишатися в екосистемі Rockwell – FactoryTalk View SE/ME);

- стандарт OPC UA (Unified Architecture) як основний протокол обміну даними — він забезпечує безпеку, надійність, кросплатформеність і підтримку об'єктно-орієнтованої моделі даних;

- комунікацію з інтелектуальними приладами через Ethernet/IP, Modbus TCP або PROFINET – в залежності від типу обладнання;

- мережевий обмін – через стандартний TCP/IP (а не «TCPVIP», що є помилкою).

Таким чином, функції, що реалізуються програмним забезпеченням:

- підтримка OPC UA (як клієнта, так і сервера);

- двосторонній обмін даними з SCADA-системою через OPC UA;
- обмін з комунікаційним контролером (наприклад, шлюзом або ПЛК) через Ethernet/IP або Modbus TCP по промисловій мережі Ethernet.

Програмна частина розміщується на ПЕОМ робочого місця машиніста дистрибутора, яке обладнується відповідним дисплеєм, резервним живленням та захистом від промислових перешкод.

2.7.2 Аналіз існуючих засобів автоматизації

У сучасному стані конвертерний цех експлуатує змішану інфраструктуру автоматизації, що включає як застарілі аналогові засоби, так і окремі мікропроцесорні системи. До аналогових технічних засобів належать:

- датчики з диференційно-трансформаторною системою вимірювання переміщення;
- контрольно-вимірювальні прилади серій КСД-3, ДИСК-250;
- кабельні та імпульсні лінії зв'язку;
- електромеханічні виконавчі механізми.

Ці засоби характеризуються низькою точністю, відсутністю цифрових інтерфейсів, складністю діагностики та відсутністю підтримки з боку виробників. Більшість з них випущено ще в радянський період, а запасні частини – або відсутні, або виготовляються кустарно.

Окрім того, на першому блоці конвертерів функціонує АСУ ТП «Плавка» на базі мікропроцесорного контролера «Уніконт», а також мікропроцесорні дозатори «Тензод-200». Хоча ці системи формально є «цифровими», вони:

- використовують пропрієтарні протоколи;
- мають ограничені можливості інтеграції;
- не підтримують сучасні стандарти кібербезпеки;
- не мають відкритих API для обміну даними з ERP/MES-системами.

Крім технологічного обладнання, автоматизовані системи є й на об'єктах інфраструктури: циркуляційні насосні станції №1, №2, насосні чистого та

брудного циклів, хімоводоочистка. Однак кожна з цих систем має власну архітектуру, різні платформи керування та незалежні канали зв'язку.

Така фрагментація призводить до серйозних експлуатаційних проблем:

- відсутність єдиного інформаційного простору – оператор не може одночасно бачити стан фурми, тиск у газотракті, температуру чавуну та рівень води в тракті охолодження конвертерних газів;

- повільна діагностика несправностей – через несумісність систем час на виявлення причини простою зростає у 2–3 рази;

- збільшені витрати на обслуговування – підтримка різноманітного устаткування вимагає двох спеціалізованих груп: ділянки КВП і А та ділянки автоматики АСУ. Це дублює функції, ускладнює взаємодію та знижує загальну ефективність;

- неможливість аналізу даних у реальному часі – відсутність архівування за стандартами ISA-95 або ISO 22400 робить неможливим впровадження систем передбачувального технічного обслуговування (Predictive Maintenance) або цифрових двійників.

Крім того, відсутність резервування каналів зв'язку і аналоговий характер більшості сигналів роблять систему вразливою до промислових перешкод, що може призводити до хибних спрацьовувань захистів або, навпаки, пропуску аварійних ситуацій.

Таким чином, сучасний стан засобів автоматизації не відповідає сучасним вимогам до надійності, інтегрованості, діагностичності та гнучкості. Це створює об'єктивну необхідність у створенні уніфікованої, відкритої, модульної АСУ ТП на основі сучасних промислових стандартів (IEC 61131-3, OPC UA, ISA-95), що й становить основу даної роботи.

2.8 Розробка функціональної схеми автоматизації

У роботі розроблено функціональну структуру автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) виплавки сталі в кисневому конвертері. Узагальнена схема наведена на рис. 2.22.

Основне призначення системи – забезпечити комплексну автоматизацію ключових етапів плавки, а саме:

- автоматизоване вимірювання температури розплаву та вмісту вуглецю за допомогою інтелектуального зонда;
- безперервний моніторинг температури металу в ванні конвертера протягом продувки;
- контроль положення конвертера (кут нахилу);
- автоматичне регулювання положення кисневої фурми з урахуванням рівня розплаву;
- точну подачу кисню за заданим технологічним режимом;
- контроль параметрів кисню (тиск, витрата, чистота) та води (температура, швидкість, тиск) для охолодження фурми;
- автоматичну зупинку продувки за досягненням заданих умов (час, витрата кисню, температура);
- аварійну сигналізацію та блокування обладнання при відхиленні критичних параметрів;
- відлік і фіксацію тривалості продувки.

Система інтегрує дані з усіх підсистем конвертерного агрегату, забезпечуючи єдиний інформаційний простір для оператора та автоматичне виконання технологічного регламенту.

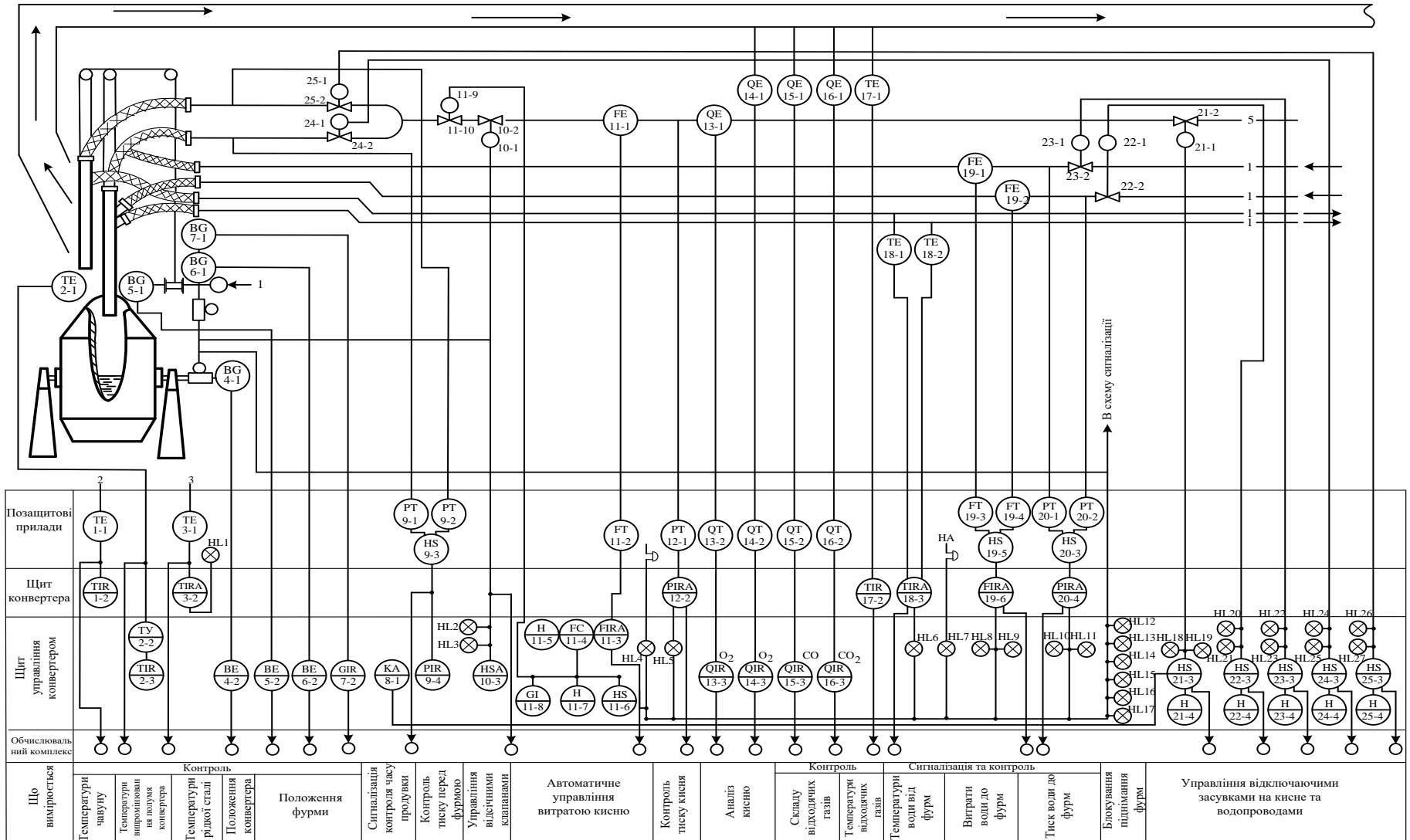


Рис. 2.23. Функціональна система АСУ ТП виплавки сталі в кисневому конвертері (розроблено автором)

2.9 Принцип роботи системи управління положенням фурми під час продувки розплаву

У сучасній практиці при обробці сталі поза піччю (в ковші) застосовують методику багаторівневої продувки інертним газом: фурму послідовно встановлюють на різних глибинах занурення ($0,05-0,1$ Н, $0,2-0,3$ Н та ін.), де Н – висота рівня розплаву в ковші. Проте такий підхід має суттєві недоліки.

По-перше, точна глибина занурення залежить не лише від положення каретки, але й від довжини фурми (яка змінюється через ерозію), рівня розплаву (що варіюється від плавки до плавки) та ступеня заметалювання сопла. Це робить фактичне положення сопла в розплаві непередбачуваним, що знижує ефективність продувки.

По-друге, візуальний контроль кінця фурми під час занурення неможливий, а прямі виміри глибини – технічно складні та ненадійні.

Існують спроби визначати глибину занурення за тиском інертного газу перед фурмою: при зануренні в розплав тиск зростає через металостатичний опір. Однак цей метод також має недоліки. Найбільший – вплив заметалювання: при утворенні металевої «діафрагми» на кінці сопла тиск різко зростає навіть без зміни глибини, що призводить до хибної інтерпретації положення фурми. Крім того, низька витрата газу під час визначення положення сприяє прискореному заметалюванню, оскільки струмінь не здатен ефективно руйнувати утворені наростання.

Мета даної роботи – підвищити точність установки фурми в робоче положення незалежно від довжини фурми, рівня розплаву та стану сопла.

Запропонований алгоритм базується на аналізі динаміки зміни тиску інертного газу за умов номінальної витрати, тобто тієї, що використовується під час реальної продувки. Це дозволяє одночасно знизити заметалювання (через інтенсивний газовий струмінь) і точно визначити момент торкання соплом поверхні розплаву.

Алгоритм роботи:

1. Перед зануренням у фурму подають інертний газ з номінальною витратою (як під час продувки).
2. Фурму опускають з постійною швидкістю V_0 .
3. У реальному часі фіксується тиск газу $P(t)$ перед соплом.
4. На основі отриманих даних будується згладжена крива $P_{згл}(t)$, яка фільтрує випадкові завади.
5. У момент, коли сопло торкається поверхні розплаву, металостатичний опір призводить до точки перегину на кривій $P_{згл}(t)$. Ця точка $A(t_p, P_p)$ визначається ретроспективно за характером відхилення від базового рівня тиску.
6. Знаючи задану глибину занурення H_m та швидкість опускання V_0 , обчислюється інтервал часу:

$$\Delta t = \frac{H_m}{V} \quad (2.69)$$

7. Момент зупинки фурми:

$$t_k = t_p + t \quad (2.70)$$

8. У цей момент фурма автоматично зупиняється у точно визначеному положенні продувки.

Переваги запропонованого методу:

- точність установки не залежить від довжини фурми, рівня розплаву чи ступеня її зношення;
- застосування номінальної витрати газу під час визначення положення зменшує заметалювання і запобігає забиванню сопла шлаком;
- метод автоматичний, не потребує втручання оператора;
- точка перегину на згладженій кривій є надійним індикатором моменту торкання, навіть у присутності шумів.

На рис. 2.24 показана часова залежність тиску на вході фурми під час виконання алгоритму.

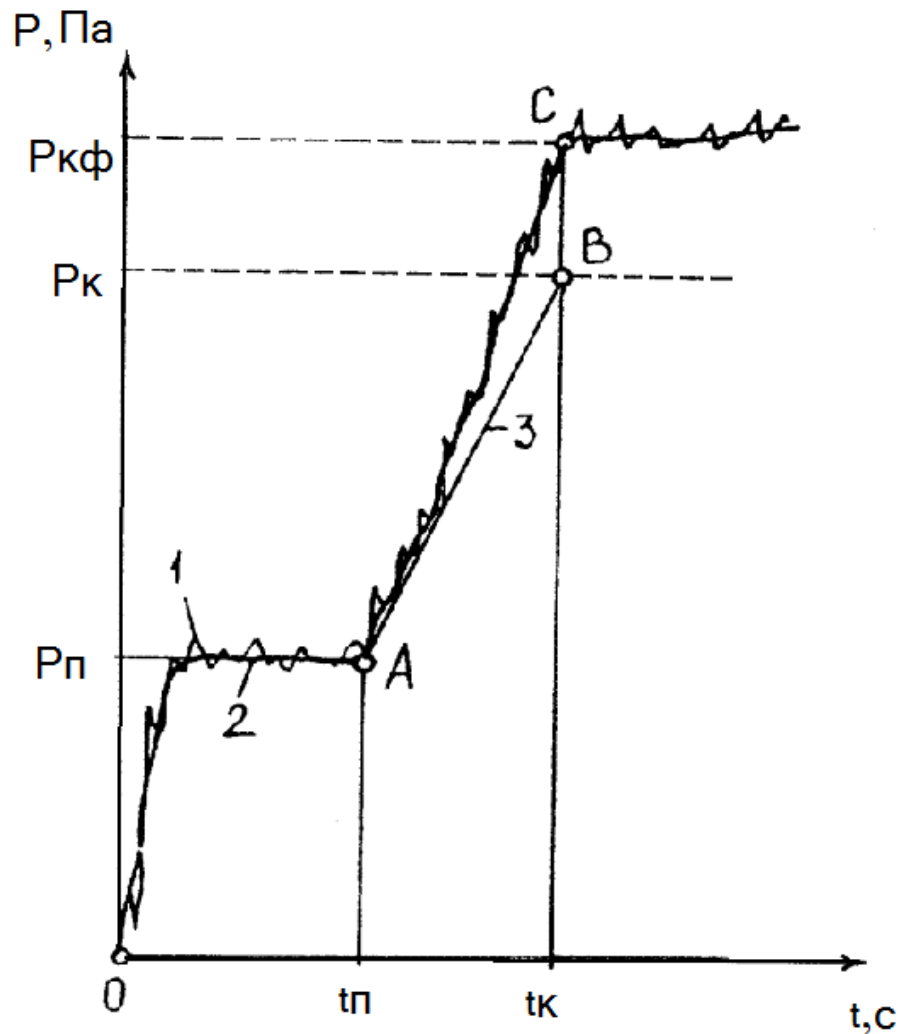


Рис. 2.24. Часова залежність тиску на вході фурми при установці її в положення продувки
(розроблено автором)

Позначення на рис. 2.24:

1 – реальний (контрольований) сигнал тиску; 2 – згладжена залежність $P_{згл}(t)$; 3 – теоретична крива зміни тиску за ідеальними умовами; A($t_{п}; P_{п}$) – точка перегину (момент торкання соплом поверхні розплаву); B($t_{к}; P_{к}$) – теоретична точка, що відповідає досягненню робочого положення; C($t_{к}; P_{кф}$) – фактична точка на згладженій кривій у момент зупинки фурми.

Таким чином, запропонований підхід забезпечує високоточне, адаптивне позиціонування фурми, що підвищує стабільність технологічного процесу, зменшує брак і сприяє ефективному використанню ресурсів.

2.10 Алгоритм розпізнавання свищів продувної фурми

Під час продувки розплаву в ковші на кінці сопла фурми виникає заметалювання – утворення металевої діафрагми, яка поступово звужує вихідний отвір. Цей процес є динамічним: заметалювання постійно утворюється й руйнується під дією струменя газу та потоку розплаву. У міру зростання заметалювання гідравлічний опір сопла збільшується, що призводить до підвищення тиску перед фурмою. Навпаки, при частковому руйнуванні заметалювання тиск знижується.

Особливо критичним є момент вкорочення фурми – коли кінцева частина зі свищами або заметалюванням відламується. У цьому випадку тиск різко падає не лише через зменшення гідравлічного опору, а й через зниження металостатичного напору (оскільки глибина занурення сопла фактично зменшується).

Перед таким руйнуванням, як правило, у стінках газового тракту утворюються свищі – мікротріщини або отвори, через які газ починає витікати в розплав. Проте раннє виявлення свищів ускладнене, оскільки їх початкове зародження викликає такий самий ефект на кривій тиску, як і часткове руйнування заметалювання: локальне зниження тиску, яке не опускається нижче глобального мінімуму P_{min} .

Для розрізнення цих двох явищ запропоновано метод активного експерименту, заснований на пробному підйомі фурми.

Суть методу

При реєстрації неочікуваного зниження тиску система ініціює короткочасний пробний вплив: фурму піднімають на задану відстань ΔH_m з постійною швидкістю V_n протягом часу Δt :

$$\Delta H_m = V_n \cdot \Delta t \quad (2.71)$$

де V_n – швидкість підведення фурми; $V_n \approx \text{const}$;

Δt - час підведення фурми;

Оскільки свищі завжди розташовані вище сопла, металостатичний напір, що діє на них (H_{mc}), менший, ніж на сопло (H_{mf}). Тому при підйомі фурми:

- якщо свищі відсутні, зміна тиску визначається лише зміною напору над соплом;
- якщо свищі наявні, зміна тиску буде меншою, оскільки частина газу витікає вище, де напір слабший.

$$R_{\Sigma z} = R_1 + R_c + R_{mc}, \quad (2.72)$$

де R_1 – середній гідравлічний опір на ділянці газового тракту від місця реєстрації тиску до свищів;

R_c – гідравлічний опір свищів;

R_{mc} – середній гідравлічний опір стовпа розплаву над свищами.

Для справної фурми (без свищів):

$$R_{\Sigma z} = R_1 + R_2 + R_f + R_{mf}, \quad (2.73)$$

де R_2 – середній гідравлічний опір на ділянці газового тракту від свищів до сопла;

R_f – гідравлічний опір сопла фурми;

R_{mf} – гідравлічний опір стовпа розплаву над соплом.

За короткий час пробного впливу всі опори, крім металостатичних, можна вважати сталими:

$$\left. \begin{aligned} R_{\Sigma z} &= K_c + R_{mc}; \\ R_{\Sigma f} &= K_f + R_{mf}; \end{aligned} \right\} \quad (2.74)$$

де $K_c = R_1 + R_c = \text{const}$;

$K_f = R_1 + R_2 + R_f = \text{const}$.

Таким чином, зміна опору при підйомі фурми обумовлена лише зміною R_{mf} або R_{mc} . Оскільки $R_{mc} < R_{mf}$, зміна тиску ΔP при наявності свищів буде меншою.

На основі вираження зміна $R_{\Sigma f}$ при пробному впливі складе:

$$\Delta R_{\Sigma\phi} = \Delta R_{M\phi}. \quad (2.75)$$

Алгоритм розпізнавання

1. При реєстрації аномального зниження тиску $P(t)$ ініціюється пробний підйом фурми на ΔH_m .

2. Вимірюється фактична зміна тиску:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (2.76)$$

де P_1 – тиск до підйому, P_2 – тиск після.

3. Обчислюється теоретична зміна тиску за відсутності свищів:

$$\Delta P_{\text{розн}} = \rho_{\text{мс}} \cdot g \cdot \Delta H_m, \quad (2.77)$$

де $\rho_{\text{мс}}$ — густина рідкого металу, g – прискорення вільного падіння.

4. Вводиться порогове значення $\Delta P_{\text{пор}}$, що враховує похибки вимірювання, коливання заметалювання, шуми тощо.

5. Якщо:

$|\Delta P - \Delta P_{\text{розн}}| > \Delta P_{\text{пор}}$ – свищі ймовірно наявні;

$|\Delta P - \Delta P_{\text{розн}}| \leq \Delta P_{\text{пор}}$ – зниження тиску спричинене зміною заметалювання, свищів немає. (2.78)

Переваги методу:

- не потребує додаткових датчиків – використовує лише існуючий сигнал тиску;
- може бути інтегрований у автоматичний режим «хитання» фурми, що вже використовується для перемішування розплаву;
- ефективний навіть при малих свищах, що ще не вийшли над рівень розплаву;
- не чутливий до змін довжини фурми або рівня металу;
- короткочасний (кілька секунд), тому не впливає на технологічний цикл.

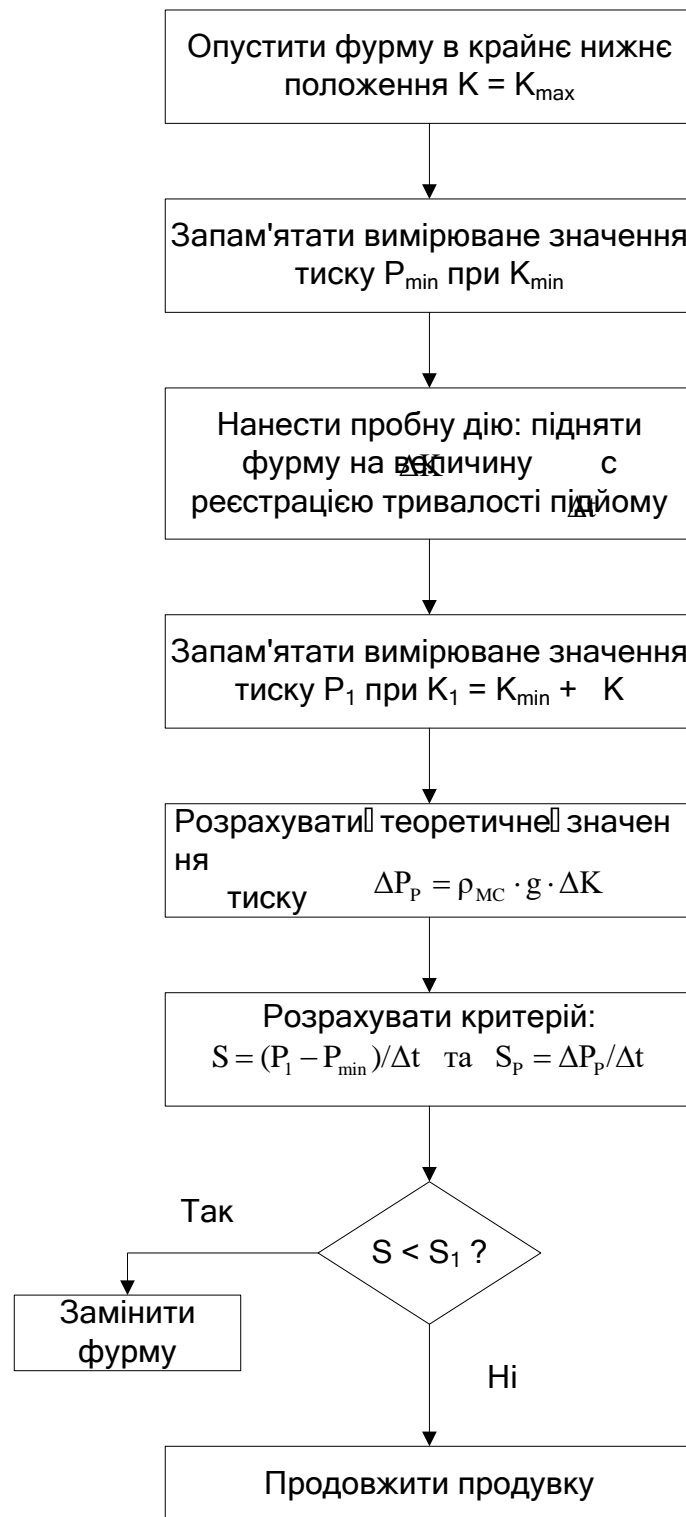


Рис. 2.25. Алгоритм розпізнавання свищів продувної фурми
(розроблено автором)

Через динамічну природу заметалювання існує незначний ризик, що його зміна під час пробного впливу маскуватиме ефект від свищів. Однак, через

коротку тривалість експерименту та фіксацію нахилу кривої тиску (а не абсолютного значення), така помилка малоїмовірна. Крім того, після вкорочення фурми ймовірність швидкого утворення нових свищів низька, оскільки тиск у системі знижується, а отже, й механічні навантаження на стінки тракту.

Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє своєчасно виявляти зароджуючі свищі, що запобігає аварійному руйнуванню фурми та попаданню води в розплав.

2.11 Вибір технічних засобів автоматизації

Технічні засоби системи повинні вибиратися виходячи із критеріїв повноти виконання функцій АСУ ТП, надійності, метрологічній атестації, ремонтпридатності й ін.

У системі використовуємо технічні засоби з терміном служби не менш 10 років.

Комплекс технічних засобів розробляємо виходячи з умов можливого розширення функцій АСУ ТП.

До складу комплексу технічних засобів включаємо наступні основні технічні засоби:

- первинні перетворювачі - датчики тиску, датчики витрати, термомпари, термоопори, датчики положення й ін.;
- інтелектуальні прилади з послідовними інтерфейсами;
- органи керування - кнопки, ключі, командоконтролери;
- виконавчі механізми - регулювальні клапани й пристрої керування ними (безконтактні пускачі, блоки ручного керування, ключі керування і т.д.);
- прилади збору й обробки сигналів з датчиків - мікропроцесорні контролери;
- робочі станції персональні ЕОМ;

- пристрої зв'язку - прилади, що забезпечують стикування й обмін даними між усіма компонентами системи.

Для вибору перелічених технічних засобів складемо таблицю основних вимірювальних сигналів.

Таблиця 2.2

Перелік основних вимірювальних сигналів

Найменування	Діапазон виміру	Од. вим.	Тип сигналу	Необхідна точність, %
1	2	3	4	5
Киснева фурма				
Температура O ₂ на кисневу фурму	- 50 ÷ 50	°C	TCM50M	1,0
Температура води із кисневої фурми	0 ÷ 100	°C	TCM50M	1,0
Температура металу в конвертері Digitemp-E	800 ÷ 1800	°C	RS-485	0,1
Температура сталі в розливочному ковші	800 ÷ 1800	°C	RS-485	0,1
Температура чавуну в конвертерному ковші (міксерне відділення 1)	800 ÷ 1800	°C	RS-485	0,1
Температура навколишнього повітря в приміщенні АСУТП конвертора №2	- 50 ÷ 50	°C	TCM50M	1,0
Тиск O ₂ на кисневу фурму	0-16	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск води на охолодження кисневої фурми	0-16	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск O ₂ у мережі	0-25	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск O ₂ з високої сторони	0-40	кгс/см ²	4-20мА	1,0
ΔР / витрата O ₂ на кисневу фурму	0-40 (0-630)	кПа (нм ³ /хв)	4-20мА	1,0
ΔР / витрата води на охолодження кисневої фурми	0-0,4 (0-160)	кгс/см ² (м ³ /ГОДИНУ)	4-20мА	1,0
ΔР / витрата кисню на торкрет-фурму конвертера №3	0-1,6 (0-320)	кгс/см ² (нм ³ /хв)	4-20мА	1,0

Продовження табл. 2.2

1	2	3	4	5
Положення регулювального клапана витрати O ₂ на кисневу фурму	0-100	%	4-20мА	Індикатор
Чистота O ₂ подаваного на кисневу фурму	95-100	%	4-20мА	1,0
Положення кисневої фурми	1000-0	см	4-20мА	0,2
Кут нахилу конвертера	0-360	град	4-20мА	0,5
Азотування				
Температура азоту	- 50 ÷ 50	°С	ТСМ50М	1,0
Тиск азоту на кисневу фурму	0-25	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск азоту на вході	0-25	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск азоту в мережі	0-25	кгс/см ²	4-20мА	1,0
ΔР / витрата азоту на фурму	0-0,4 (0-630)	кгс/см ² (нм ³ /хв)	4-20мА	1,0
Торкретування				
Температура води з торкрет-фурми	0-100	°С	ТСМ50М	1,0
Тиск кисню на торкрет-фурму	0-16	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск води на охолодження торкрет-фурми	0-16	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск повітря на РКП	0-10	кгс/см ²	4-20мА	1,0
ΔР / витрата кисню на торкрет-фурму	0-1,6 (0-320)	кгс/см ² (нм ³ /хв)	4-20мА	1,0
ΔР / витрата води на торкрет-фурму	0-0,4 (0-100)	кгс/см ² (м ³ /година)	4-20мА	1,0
ΔР / витрата повітря на РКП	0-1600 (0-2000)	кгс/см ² (нм ³ /годин)	4-20мА	1,0
Вага торкретмаси в бункері	0-6	тонн	RS-485	1,0
Продукта сталі аргонном у ковші				
Температура аргону	- 50 ÷ 50	°С	ТСМ50М	1,0
Тиск аргону на ківш	0-16	кгс/см ²	4-20мА	1,0

1	2	3	4	5
ΔP / витрата аргону на ківш	0-0,4 (0-10)	кгс/см ² (нм ³ /хв)	4-20мА	1,0
Охолоджувач конвертерних газів (ОКГ)				
Температура води на виході з кесона	0-100	°С	ТСМ50М	1,0
Температура води по контурах 1	0-180	°С	ТСМ50М	1,0
Температура води по контурах 2	0-180	°С	ТСМ50М	1,0
Температура води по контурах 3	0-180	°С	ТСМ50М	1,0
Температура води по контурах 4	0-180	°С	ТСМ50М	1,0
Температура циркуляційної води на вході нитки 1	0-150	°С	ТСМ50М	1,0
Температура циркуляційної води на вході нитки 2	0-150	°С	ТСМ50М	1,0
Тиск води на кесон	0-2,5	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск циркуляційної води на вході нитки 1	0-40	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск циркуляційної води на вході нитки 2	0-40	кгс/см ²	4-20мА	1,0
ΔP / витрата води на кесон	0-0,4 (0-2500)	кгс/см ² (м ³ /година)	4-20мА	1,0
ΔP / витрата циркуляційної води на вході (1нитка)	0-2500 (0-1250)	кгс/см ² (т/година)	4-20мА	1,0
ΔP / витрата циркуляційної води на вході (2нитка)	0-2500 (0-1250)	кгс/см ² (т/година)	4-20мА	1,0
ΔP / витрата циркуляційної води на опускний ОКГ (1нитка)	0-63 (0-500)	кПа (т/година)	4-20мА	1,0
ΔP / витрата циркуляційної води на опускний ОКГ (2нитка)	0-63 (0-500)	кПа (т/година)	4-20мА	1,0

Газоочищення				
Температура газу перед трубою Вентурі	0-150	°С	ТСМ50М	1,0
Температура газу після труби Вентурі	0-150	°С	ТСМ50М	1,0
Температура газів перед газоочищенням	0-900	°С	4-20мА (ХА(К))	1,0
Тиск-розрядження газу перед газоочищенням	31,5 ÷ - 31,5	кгс/м ²	4-20мА	1,0
Розрядження перед трубою Вентурі	0 ÷ - 250	кгс/м ²	4-20мА	1,0
Розрядження після труби Вентурі	0 ÷ - 2500	кгс/м ²	4-20мА	1,0
Розрядження газу після каплеуловлювачів	0 ÷ - 2500	кгс/м ²	4-20мА	1,0
Тиск оборотної води на скрубєр (верхній ярус)	0-6	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск оборотної води на скрубєр (нижній ярус)	0-6	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск оборотної води на трубу Вентурі №1	0-6	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Тиск оборотної води на трубу Вентурі №2	0-6	кгс/см ²	4-20мА	1,0
Витрата води на скрубєр (верхній ярус)	0-40 (0-160)	кПа (м ³ /годину)	4-20мА	1,0
Витрата води на скрубєр (нижній ярус)	0-40 (0-160)	кПа (м ³ /годину)	4-20мА	1,0
Витрата води на труби Вентурі №1	0-40 (0-200)	кПа (м ³ /година)	4-20мА	1,0
Витрата води на труби Вентурі №2	0-40 (0-200)	кПа (м ³ /годину)	4-20мА	1,0

Вибір технічних засобів для проектованої системи автоматичного керування (АСК) положенням кисневої фурми конвертера №2 ґрунтується на комплексі вимог: висока надійність у складних умовах металургійного виробництва, точність вимірювання, швидкодія, підтримка сучасних

промислових протоколів, можливість інтеграції та тривалий термін служби не менше 10–15 років.

Нижче наведено вибір ключових компонентів системи, кожен із яких відіграє критичну роль у реалізації алгоритмів точного позиціонування фурми та передбачувальної діагностики свищів [15-30].

2.11.1 Програмований логічний контролер та модулі розширення

Центральним обчислювальним вузлом є ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500 (CPU 1516-3 PN/DP). Цей вибір обумовлений необхідністю виконання складних математичних операцій (аналіз точок перегину на кривій тиску, згладжування сигналів, розрахунок інтервалів часу), а також високою швидкістю при обробці сигналів від датчиків та керуванні силовим перетворювачем КТЕ.

Таблиця 2.3

Характеристики центрального процесора ПЛК

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	2	3	4
1	Модель центрального процесора	–	SIMATIC S7-1500 CPU 1516-3 PN/DP
2	Час виконання бітових операцій	нс	10
3	Час виконання операцій з цілими числами	нс	30
4	Час виконання операцій з плаваючою комою	нс	48
5	Обсяг робочої пам'яті	МБ	1,5
6	Обсяг пам'яті для коду програми	МБ	5
7	Обсяг пам'яті для зберігання даних	МБ	8
8	Кількість інтерфейсів PROFINET	шт	2
9	Кількість інтерфейсів PROFIBUS DP	шт	1

Продовження табл. 2.3

1	2	3	4
10	Швидкість обміну PROFINET	Мбіт/с	100/1000
11	Швидкість обміну PROFIBUS DP	Мбіт/с	12
12	Максимальна кількість модулів розширення	шт	32
13	Підтримка технологічних функцій	–	Motion Control, PID, HSC
14	Час циклу програми (типовий)	мс	1–10 (налаштовується)
15	Діагностична буферна пам'ять	записів	500
16	Температурний діапазон роботи	°C	0...+60
17	Ступінь захисту	–	IP20
18	Напруга живлення	В DC	24 (±20%)
19	Споживаний струм (типовий)	мА	1600
20	Потужність споживання	Вт	~38
21	Час збереження даних при відключенні	років	>10 (при +40°C)
22	Підтримка веб-сервера	–	Так (HTTP/HTTPS)
23	Гарантія виробника	років	3

Для введення аналогових сигналів (наприклад, від датчика тиску) обрано модуль AI 8xU/I HF (6ES7531-7NF00-0AB0). Його ключові переваги — висока частота дискретизації (до 8 кГц) та вбудовані цифрові фільтри (Low/High Pass, Notch), що дозволяють ефективно придушувати електромагнітні завади від тиристорного перетворювача КТЕ.

Характеристики модуля аналогового вводу AI 8xU/I HF

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	Артикул	–	6ES7531-7NF00-0AB0
2	Кількість аналогових входів	каналів	8
3	Роздільна здатність АЦП	біт	16
4	Типи вимірюваних сигналів	–	±10 В, 0–10 В, 4–20 мА
5	Вхідний опір (напруга)	кОм	>100
6	Вхідний опір (струм)	Ом	50
7	Час перетворення на канал	мс	0,125 / 0,25 / ... / 10
8	Частота дискретизації (макс.)	кГц	8
9	Основна похибка вимірювання	%	±0,1
10	Температурний дрейф	%/10К	±0,05
11	Вбудовані цифрові фільтри	–	Low Pass, High Pass, Notch
12	Гальванічна ізоляція	–	Так
13	Діагностика обриву/КЗ	–	Так
14	Температурний діапазон	°С	0...+60
15	Споживана потужність	Вт	~1,5

Модулі дискретного вводу (DI 16x24VDC HF) та виводу (DQ 16x24VDC/0.5A HF) забезпечують надійний інтерфейс з кінцевими вимикачами безпеки, приводами клапанів та іншими виконавчими механізмами.

Таблиця 2.5

Характеристики модуля дискретного вводу DI 16x24VDC HF

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	Артикул	–	6ES7521-1BH00-0AB0
2	Кількість входів	каналів	16
3	Час затримки (налаштовується)	мкс	50...3000
4	Частота лічби	кГц	100

Таблиця 2.6

Характеристики модуля дискретного виводу DQ 16x24VDC/0.5A HF

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	Артикул	–	6ES7522-1BH01-0AB0
2	Кількість виходів	каналів	16
3	Тип виходу	–	Транзисторний (MOSFET)
4	Номінальний струм на канал	А	0,5
5	Захист від КЗ	–	Так (електронний)

2.11.2 Датчики технологічних параметрів (газовий тракт)

Датчик тиску кисню (Rosemount 3051S1TG) — ключовий елемент системи діагностики свищів. Його висока точність ($\pm 0,025\%$), швидкість відгуку (< 100 мс) та спеціальне «кисневе» виконання (знежирення, PTFE-ущільнення, антиіскрові з'єднання) забезпечують безпечну та надійну роботу.

Таблиця 2.7

Розширені характеристики інтелектуального датчика тиску кисню

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	Модель	–	Rosemount 3051S1TG
2	Верхня межа вимірювання	МПа	2,5
3	Основна зведена похибка	%	±0,025
4	Протокол передачі даних	–	4–20 мА + HART
5	Час відгуку (T90)	мс	<100
6	Матеріал ущільнень	–	PTFE (без мастила)
7	Ступінь захисту	–	IP66/IP67
8	Сертифікація для роботи з киснем	–	Так

Витратомір кисню (Rosemount 8800DF) — вихрового типу, без рухомих частин, що забезпечує високу надійність і мінімальне обслуговування.

Таблиця 2.8

Розширені характеристики витратоміра кисню

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	Модель	–	Rosemount 8800DF
2	Похибка вимірювання витрати	%	±1,0 (для газів)
3	Матеріал корпусу	–	Нержавіюча сталь 316L
4	Сертифікація для кисню	–	Так (CGA G-4.1)

2.11.3 Засоби контролю положення та швидкості

Абсолютний енкодер SICK AFM60A забезпечує точне позиціонування фурми навіть після відключення живлення (без батареї, завдяки Wiegand-сенсору).

Таблиця 2.9

Розширені характеристики абсолютного енкодера (позиціонування)

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	Модель	–	SICK AFM60A-S4NB018x12
2	Кількість позицій на оберт	–	262 144 (2 ¹⁸)
3	Загальна роздільна здатність	біт	30
4	Інтерфейс передачі даних	–	PROFINET RT/IRT
5	Час збереження позиції	–	Необмежено (батарея не потрібна)

Інкrementальний енкодер SICK DFS60B з HTL-виходом забезпечує високу завадостійкість у промисловому середовищі.

Таблиця 2.10

Розширені характеристики інкрементального енкодера (швидкість)

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	Модель	–	SICK DFS60B-S4PA10000
2	Кількість імпульсів на оберт	імп/об	1024
3	Тип виходу	–	HTL / Push-Pull
4	Максимальна частота сигналу	кГц	600

2.11.4 Панель оператора та блок живлення

Панель HMI Simatic KTP700 дозволяє оператору відстежувати криву тиску в реальному часі, налаштовувати параметри позиціонування та архівувати дані останніх 500 плавок.

Таблиця 2.11

Характеристики панелі оператора HMI

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	Модель	–	Simatic HMI Comfort Panel TP700
2	Діагональ дисплея	дюйм	7
3	Обсяг пам'яті для архівів	МБ	2048 (SD-карта)
4	Інтерфейси зв'язку	–	PROFINET, USB

Блок живлення SITOP PSU8200 забезпечує стабільне живлення ПЛК з ККД >92% і часом утримання напруги >20 мс при зникненні мережі.

Таблиця 2.12

Характеристики блоку живлення ПЛК

№	Найменування параметру	Одиниці	Значення
1	Модель	–	SITOP PSU8200
2	Вихідна напруга	В DC	24
3	Номінальний вихідний струм	А	10
4	ККД	%	>92
5	Час утримання напруги	мс	>20

2.11.4 Зведена специфікація обладнання

Розташуємо обране обладнання в таблиці 2.13.

Зведена специфікація технічних засобів

№	Позн.	Найменування та технічна характеристика	Тип / Модель	Кількість
1	CPU	Центральний процесор ПЛК, S7-1500	6ES7516-3AN02-0AB0	1
2	AI	Модуль аналогового вводу (8 AI, High Feature)	6ES7531-7NF00-0AB0	1
3	DI	Модуль дискретного вводу (16 DI, High Feature)	6ES7521-1BH00-0AB0	1
4	DQ	Модуль дискретного виводу (16 DQ, High Feature)	6ES7522-1BH01-0AB0	1
5	PT	Інтелектуальний датчик тиску кисню (кисневе виконання)	Rosemount 3051S1TG	1
6	FT	Вихровий витратомір кисню	Rosemount 8800DF	1
7	BE	Абсолютний багатооборотний енкодер (позиціонування фурми)	SICK AFM60A-S4NB018x12	1
8	BR	Інкrementальний енкодер (швидкість двигуна)	SICK DFS60B-S4PA10000	1
9	LS	Кінцевий вимикач безпеки (IP67)	Schmersal ZS 335-11Z	4
10	HMI	Панель оператора Simatic Comfort 7"	6AV2124-0GC01-0AX0	1
11	PS	Блок живлення ПЛК (24 В, 10 А)	SITOP PSU8200	1

Примітка: Усі зазначені засоби сумісні з PROFINET, що забезпечує єдину мережеву архітектуру.

2.12 Економічне обґрунтування проекту

2.12.1 Вихідні дані

Метою роботи є модернізація системи керування електроприводом переміщення кисневої фурми конвертера №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» шляхом заміни застарілої аналогової системи на сучасну мікропроцесорну автоматизовану систему керування (АСК) із функціями точного позиціонування та діагностики свищів.

Основний економічний ефект досягається за рахунок:

- економії технічного кисню (0,15% від базової витрати) за рахунок оптимального алгоритму позиціонування фурми та раннього виявлення свищів;
- підвищення надійності та безпеки (запобігання аваріям, пов'язаним із потраплянням води в розплав).

Таблиця 2.14

Вихідні техніко-економічні показники

№	Найменування показника	Позначення	Одиниця виміру	Значення
1	Річний обсяг виробництва сталі	V_1	т	6 237 591
2	Ціна технічного кисню	Цк	грн/1000 м ³	6 000
3	Питома витрата кисню (базова)	qк	м ³ /т	55
4	Очікуване зниження витрати кисню	ΔQ	%	0,15

2.12.2 Розрахунок капітальних вкладень

Капітальні витрати включають:

- придбання основного обладнання;
- транспортування (4%);
- монтаж та пусконаладжувальні роботи (12%);
- програмне забезпечення, навчання, технічний супровід;

- резервні компоненти;
- непередбачувані витрати (7%).

Таблиця 2.15

Кошторис капітальних витрат

№	Найменування	Тип / Модель	К- ть, од.	Ціна за од., грн	Трансп орт, грн	Монт аж та ПНР, грн	Вартість, грн
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Двигун постійного струму	Д806 (22 кВт)	1	215 000	8 600	25 800	249 400
2	Комплектний тиристорний електропривод	КТЕ-200/220-УХЛ4	1	185 000	7 400	22 200	214 600
3	Центральний процесор ПЛК	6ES7516-3AN02-0AB0	1	145 000	5 800	17 400	168 200
4	Модуль аналогового вводу	6ES7531-7NF00-0AB0	1	42 000	1 680	5 040	48 720
5	Модуль дискретного вводу	6ES7521-1BH00-0AB0	1	35 000	1 400	4 200	40 600
6	Модуль дискретного виводу	6ES7522-1BH01-0AB0	1	35 000	1 400	4 200	40 600
7	Датчик тиску кисню (кисневе виконання)	Rosemount 3051S1TG	1	95 000	3 800	11 400	110 200
8	Вихровий витратомір кисню	Rosemount 8800DF	1	105 000	4 200	12 600	121 800
9	Абсолютний багатооборотний енкадер	SICK AFM60A-S4NB018x12	1	45 000	1 800	5 400	52 200
10	Інкrementальний енкадер	SICK DFS60B-S4PA10000	1	30 000	1 200	3 600	34 800
11	Кінцевий вимикач безпеки	Schmersal ZS 335-11Z	4	6 000	240	720	27 840

Продовження табл. 2.15

1	2	3	4	5	6	7	8
12	Панель оператора Simatic Comfort 7"	6AV2124-0GC01-0AX0	1	45 000	1 800	5 400	52 200
13	Блок живлення ПЛК (24 В, 10 А)	SITOP PSU8200	1	18 000	720	2 160	20 880
14	Програмне забезпечення	TIA Portal (ліцензія)	1	85 000	–	–	85 000
15	Проектні та пусконаладжувальні роботи	–	–	–	–	–	328 000
16	Навчання персоналу	–	–	–	–	–	85 000
17	Технічний супровід (6 міс.)	–	–	–	–	–	120 000
18	Резервні компоненти	–	–	–	–	–	95 000
19	Разом (основні витрати)	–	–	–	–	–	1 739 040
20	Непередбачувані витрати (7%)	–	–	–	–	–	121 733
21	Загальна сума капітальних вкладень	–	–	–	–	–	1 860 773

Розрахунок непередбачуваних витрат:

$$1\,739\,048 \cdot 0,07 = 121\,734 \text{ грн} \quad (2.79)$$

Загальна сума:

$$K = 1\,739\,048 + 121\,734 = 1\,860\,782 \text{ грн} \quad (2.80)$$

2.12.3 Розрахунок експлуатаційних витрат

Амортизаційні відрахування

Амортизація розраховується прямолінійним методом:

$$A_p = K_{\text{пер}} \cdot N_a / 100 \quad (2.81)$$

де:

$K_{\text{пер}}$ – первинна вартість групи обладнання, грн;

N_a – норма амортизації, %.

Розрахунки за групами:

1. Силова частина (двигун Д806 + КТЕ):

$$K_{\text{пер}1} = 249\,400 + 214\,600 = 464\,000 \text{ грн} \quad (2.82)$$

$$T_{\text{сл}1} = 10 \rightarrow N_{a1} = 10\%$$

$$A_{p1} = 464\,000 \cdot 0,10 = 46\,400 \text{ грн/рік} \quad (2.83)$$

2. Електронне обладнання та ПЗ (ПЛК, датчики, ПЗ):

$$\begin{aligned} K_{\text{пер}2} = & 168\,200 + 48\,720 + 40\,600 + 40\,600 + 110\,200 + \\ & + 121\,800 + 52\,200 + 34\,800 + 52\,200 + 20\,880 + 85\,000 = 775\,200 \text{ грн} \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$T_{\text{сл}2} = 8 \text{ років} \rightarrow N_{a2} = 12,5\%$$

$$A_{p2} = 775\,200 \cdot 0,125 = 96\,900 \text{ грн/рік} \quad (2.85)$$

Примітка: Проектні роботи, навчання, супровід не амортизуються, оскільки не є об'єктами основних засобів.

Таблиця 2.16

Структура основних фондів впроваджуваного рішення

Група основних фондів	Первісна вартість, грн	Термін служби, років	Норма амортизації, %	Річна амортизація, грн
-----------------------	------------------------	----------------------	----------------------	------------------------

Силова частина (Д806, КТЕ)	464 000	10	10,0	46 400
Електронне обладнання та ПЗ	775 200	8	12,5	96 900
Разом	1 239 200	–	–	143 300

Витрати на обслуговування

Приймаємо 7% від вартості електронного обладнання:

$$T_{\text{обсл}} = 775\,200 \cdot 0,07 = 54\,264 \text{ грн/рік} \quad (2.86)$$

2.12.4 Розрахунок економічного ефекту

Економія кисню

1. Базова витрата кисню:

$$V_{\text{кбаз}} = V_1 \cdot q_k = 6\,237\,591 \cdot 55 = 343\,067\,505 \text{ м}^3/\text{рік} \quad (2.87)$$

2. Економія кисню (0,15%):

$$\Delta V_k = 343\,067\,505 \cdot 0,15100 = 343\,067\,505 \cdot 0,0015 = 514\,601 \text{ м}^3/\text{рік} \quad (2.88)$$

3. Грошова економія:

$$E_k = 514\,601/1000 \cdot 6\,000 = 514,601 \cdot 6\,000 = 3\,087\,606 \text{ грн/рік} \quad (2.89)$$

Загальні зміни статей витрат

Таблиця 2.17

Загальні зміни статей витрат

№	Стаття витрат	Зміна витрат, грн/рік	На 1 т, грн/т
1	Амортизація	+143 300	+0,0229
2	Обслуговування	+54 264	+0,0087
3	Економія кисню	-3 087 606	-0,4950

Разом	ΔB	-2 889 042	-0,4634
-------	------------	------------	---------

Собівартість 1 т сталі після впровадження

Базова собівартість 1 т сталі (до впровадження): $S_{\text{баз}} = 16\,800,00 \text{ грн/т}$

Зміна собівартості на 1 т: $\Delta C = -0,4634 \text{ грн/т}$

Собівартість після впровадження:

$$S_{\text{після}} = S_{\text{баз}} + \Delta C = 16\,800,00 - 0,4634 = 16\,799,54 \text{ грн/т} \quad (2.90)$$

Чистий річний економічний ефект

$$E_{\text{річ}} = |\Delta B| = 2\,889\,042 \text{ грн/рік} \quad (2.91)$$

Термін окупності

$$T_{\text{ок}} = K / E_{\text{річ}} = 1\,860\,782 / 2\,889\,042 = 0,644 \text{ року} = 7,7 \text{ місяців} \quad (2.92)$$

Ефект з урахуванням нормативного коефіцієнта

Приймаємо нормативний коефіцієнт $E_n = 0,15$:

$$\begin{aligned} E_{\text{чист}} &= E_{\text{річ}} - E_n \cdot K = 2\,889\,042 - 0,15 \cdot 1\,860\,782 = \\ &= 2\,889\,042 - 279\,117 = 2\,609\,925 \text{ грн/рік} \end{aligned} \quad (2.93)$$

2.12.5 Підсумкові техніко-економічні показники

Таблиця 2.18

Техніко-економічні показники впроваджуваної системи

№	Найменування показника	Одиниця виміру	До впровадження	Після впровадження	Абсолютна зміна (\pm)
1	2	3	4	5	6
1	Річний обсяг виробництва сталі	тис. т	6 237,591	6 237,591	0,000
2	Питома витрата кисню	м ³ /т	55,000	54,918	- 0,082

3	Річна витрата кисню	тис. м ³	343 068	342 542	- 526
4	Витрати на кисень (річні)	тис. грн	2 058 408	2 055 252	- 3 156
5	Собівартість 1 т сталі	грн/т	16 800,00	16 799,54	- 0,46
6	Собівартість річного обсягу	млн грн	104 791,53	104 788,64	- 2,89

Продовження табл. 2.18

1	2	3	4	5	6
7	Додаткові капітальні вкладення	тис. грн	–	1 860,77	+ 1 860,77
8	Амортизаційні відрахування	тис. грн/рік	–	143,30	+ 143,30
9	Витрати на обслуговування	тис. грн/рік	–	54,26	+ 54,26
10	Чистий річний економічний ефект	тис. грн/рік	–	2 889,04	+ 2 889,04
11	Термін окупності	місяців	–	7,7	–
12	Ефект з урахуванням $E_n = 0,15$	тис. грн/рік	–	2 609,93	+ 2 609,93

Як бачимо модернізація системи керування кисневою фурмою є економічно доцільною:

- термін окупності – 7,7 місяців;
- річний ефект – майже 2,6 млн грн (з урахуванням E_n);

– пропозиція забезпечує підвищення безпеки (запобігання аваріям із потрапляння води в розплав).

2.13 Охорона праці при експлуатації модернізованої системи керування кисневою фурмою

Модернізація системи керування положенням кисневої фурми конвертера №2 із застосуванням автоматизованої мікропроцесорної системи (АСК) вносить зміни в умови праці обслуговуючого персоналу (електромонтерів, операторів, майстрів). Незважаючи на підвищення рівня автоматизації, залишаються актуальними питання забезпечення безпеки праці, що вимагають аналізу нових та існуючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ) та розробки комплексу організаційно-технічних заходів щодо їх усунення або мінімізації впливу.

2.13.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Об'єкт модернізації – система керування електроприводом переміщення кисневої фурми – розташована в конвертерному цеху, який за характером середовища відноситься до виробництв з підвищеною безпекою [38]. Впровадження нової АСК не змінює класу шкідливості цеху, але вносить специфічні ризики, пов'язані з експлуатацією електроустаткування та програмно-апаратних комплексів у агресивному середовищі.

Основні НШВФ, що діють на працівників, пов'язаних з обслуговуванням та експлуатацією модернізованої системи:

1. Фізичні небезпечні фактори:

– електричний струм: Роботи з підключенням, налагодженням та ремонтом шафи керування ПЛК, модулів вводу-виводу, панелі оператора, датчиків та силової частини (КТЕ-200/220-УХЛ4, двигун Д806). Ризик ураження

електричним струмом виникає при порушенні правил експлуатації, відсутності захисного заземлення або пошкодженні ізоляції;

- рухомі частини механізмів: Потенційна небезпека від рухомих частин механізму переміщення фурми (редуктор, канати, каретка), особливо під час налагоджувальних та ремонтних робіт при недостатніх блокуваннях;

- підвищена температура поверхонь: Нагрівання корпусів силового обладнання (тиристорний перетворювач, двигун), а також загальний високий температурний фон цеху;

- підвищений рівень шуму: Робота двигуна, редукторів, систем вентиляції шаф керування, загальний цеховий шум;

- висока питома питомість теплового потоку (інфрачервоне випромінювання): Випромінювання від розплаву в конвертері під час роботи оператора біля пульта керування.

2. Фізичні шкідливі фактори:

- підвищена температура повітря робочої зони: Обумовлена технологічним процесом виплавки сталі [39];

- промислові пил і аерозолі: Металургійний пил, що містить оксиди заліза, може осідати на електронних компонентах АСК, викликаючи перегрів та короткі замикання, а також діяти на органи дихання персоналу;

- підвищена напруженість електромагнітного поля: Генерується силовими електричними установками та компонентами АСК;

- фактори трудового процесу;

- нервово-психічні навантаження: Робота оператора з новим програмним інтерфейсом SCADA/ HMI у відповідальному режимі контролю критичного процесу позиціонування фурми.

- напруга зорових аналізаторів: Тривала робота з дисплеєм панелі оператора для моніторингу графіків тиску та положення.

3. Пожежонебезпечні фактори:

- наявність горючих матеріалів: Електрична ізоляція, пил на обладнанні, господарські матеріали в службових приміщеннях;

– джерела запалення: Іскріння в електроапаратурі, перегрів обладнання через несправності, статична електрика.

2.13.2 Заходи щодо усунення або зменшення впливу НШВФ

Для забезпечення безпечної експлуатації модернізованої системи заплановано комплекс заходів:

Електробезпека: усі корпуси електрообладнання (ПЛК, шафи, двигун) підлягають обов'язковому захисному заземленню відповідно до вимог [40]. Електрообладнання вибрано з відповідним ступенем захисту (IP54 для модулів у шафі, IP65 для датчиків у цеху). У схемі керування передбачені аварійні стоп-кнопки та програмні блокування. Для робіт під напругою обов'язкове застосування діелектричних засобів захисту [41].

Захист від рухомих частин: механізм переміщення фурми обладнання кінцевими вимикачами та програмованими блокуваннями в ПЛК. Зони можливого небезпечного руху позначені на підлозі. Під час ремонтних робіт обов'язкове повне зняття напруги з приводів та вивішування плакатів «Не вмикати! Працюють люди».

Мікроклімат та пил: шафа керування з ПЛК оснащується кондиціонером або системою обдуву з пилоутримуючими фільтрами для підтримки допустимої температури та чистоти повітря всередині. Для персоналу передбачені кондиційовані кабіни операторів.

Захист від шуму: Силове обладнання встановлюється на віброізолювальних опорах. Для персоналу, що працює в цеховій зоні, передбачена видача індивідуальних засобів захисту органів слуху (вушні затички, навушники) відповідно до [42].

Ергономіка та психофізіологічне навантаження: інтерфейс панелі оператора (НМІ) розробляється з дотриманням принципів когнітивної ергономіки: чітка мнемосхема, логічна структура меню, налаштування тривог за пріоритетами.

Передбачено чергування операторів. Проводиться навчання персоналу роботі з новою системою.

Пожежна безпека: приміщення шаф керування обладнується автономними датчиками диму та системою автоматичного порошкового гасіння. Електропроводка виконується кабелями з оболонкою, що не поширює горіння. Навколо шаф забезпечується вільний доступ та відсутність горючих матеріалів.

2.13.3 Організація засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) та медичні огляди

Персонал, зайнятий обслуговуванням системи, забезпечується ЗІЗ відповідно до Типових галузевих норм [43]. Норми видачі наведено в табл.2.19.

Таблиця 2.19

Норми видачі засобів індивідуального захисту персоналу, що обслуговує АСК

№ з/п	Посада / Вид робіт	Найменування засобу захисту	Термін носіння
1	Електромонтер з ремонту та обслуговування	Костюм для захисту від загальних виробничих забруднень	12 місяців
		Чоботи діелектричні	24 місяці
		Рукавички діелектричні	до зносу
		Окуляри захисні	до зносу
		Каска захисна	24 місяці
2	Оператор дистрибутора (у цеховій зоні)	Костюм із вогнезахисної тканини	12 місяців
		Чоботи шкіряні з металевим підноском	12 місяців
		Рукавички брезентові	3 місяці
		Каска захисна з підшоломником	24 місяці

		Окуляри захисні з затемненим склом	до зносу
--	--	------------------------------------	----------

Усі працівники, допущені до експлуатації електроустановок, проходять попередні та періодичні медичні огляди згідно з наказом [44]. Періодичність оглядів для електромонтерів – 1 раз на 12 місяців, для операторів у цехах з шкідливими умовами – 1 раз на 24 місяці.

2.13.4 Пожежна безпека модернізованої електроустановки

Впровадження АСК підвищує пожежну безпеку за рахунок точного контролю параметрів та усунення «людського фактору», однак нова електронна апаратура сама є об'єктом пожежної небезпеки категорії В (за горючими властивостями електричної ізоляції) [45]. Заходи з пожежної безпеки:

1. Профілактичні: система теплового контролю за температурою критичних компонентів у ПЛК та перетворювачі; регулярне очищення від пилу; заборона зберігання сторонніх предметів у шафах.

2. Запобіжні: електромонтаж виконаний кабелями з пожежостійкою ізоляцією. Встановлення автоматичних вимикачів з правильним вибором уставок за струмом.

3. Гасіння: обладнання приміщення шафи керування автономним модулем порошкового гасіння. Наявність поблизу вогнегасників типу ВП (пінних) для гасіння електроустаткування після зняття напруги та ВВ (вуглекислотних) – до 1000 В [46].

Таким чином, впровадження мікропроцесорної АСК керування кисневою фурмою не лише підвищує технологічну безпеку процесу, але й вимагає ретельного підходу до охорони праці персоналу, що з нею працює. Розроблений комплекс організаційно-технічних заходів, що включає забезпечення електробезпеки, запобігання механічному травматизму, створення безпечного мікроклімату для електронного обладнання, постачання персоналу сучасними ЗІЗ та заходи пожежної безпеки, дозволить мінімізувати ризики виробничого

травматизму та професійних захворювань. Для ефективної реалізації цих заходів є обов'язковим попереднє навчання та інструктаж всього залученого персоналу.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження та розроблено автоматизовану систему керування (АСК) положенням кисневої фурми конвертера №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Метою роботи було наукове обґрунтування та інженерна розробка мікропроцесорної системи для підвищення точності, надійності та безпеки процесу продувки.

В ході роботи було виконано наступне:

- проведено аналіз технологічного процесу та існуючого обладнання, що виявило застарілість релейно-контакторних систем керування та обґрунтувало актуальність модернізації;

- на основі технологічних вимог обґрунтовано вибір електропривода постійного струму на базі двигуна Д806 (22 кВт) та комплектного тиристорного електропривода КТЕ-200/220-УХЛ4, що забезпечує необхідну точність позиціонування та динаміку;

- розроблено структуру двоконтурної системи підлеглого регулювання з цифровою реалізацією. Виконано повний інженерний розрахунок параметрів усіх контурів системи: струму якоря, швидкості, ЕРС та положення;

- наукова новизна роботи полягає у розробці алгоритму автоматичного визначення моменту торкання сопла фурми розплаву на основі аналізу точки перегину на згладженій кривій тиску кисню. Це дозволяє забезпечити точну установку фурми в положенні продувки незалежно від її довжини, рівня металу та ступеня заметалювання. Також розроблено метод активного експерименту (пробного підйому фурми) для ранньої діагностики свищів у газовому тракті, що запобігає аварійному руйнуванню;

- працездатність та динамічні характеристики запропонованої системи підтверджені результатами імітаційного моделювання в середовищі Simulink. Моделювання показало задовільну швидкодію, обмеження струму на рівні $2I_n$ та точне відпрацювання заданого положення;

– розроблено алгоритми роботи мікропроцесорної системи керування, функціональну схему автоматизації АСУ ТП конвертера та здійснено вибір сучасних технічних засобів (ПЛК Siemens S7-1500, інтелектуальні датчики, НМІ-панель), що відповідають вимогам надійності та інтегрованості;

– проведене техніко-економічне обґрунтування підтверджує високу ефективність проекту. Основний економічний ефект досягається за рахунок економії технічного кисню (0,15%) та скорочення браку. Розрахунки показали чистий річний економічний ефект у розмірі 2,61 млн грн при терміні окупності капітальних вкладень (1,86 млн грн) менше 8 місяців;

– у розділі охорони праці проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, пов'язані з експлуатацією нової системи, та запропоновано комплекс заходів щодо електробезпеки, захисту від рухомих частин, пожежної безпеки та забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту, що забезпечить безпечні умови праці.

Отже, розроблена в роботі автоматизована мікропроцесорна система керування положенням кисневої фурми є технічно обґрунтованою, економічно ефективною та готовою до впровадження на діючому виробництві. Її реалізація дозволить забезпечити стабільне ведення технологічного процесу, підвищити якість сталі, знизити витрати матеріальних ресурсів та підвищити рівень промислової безпеки на конвертерному виробництві.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ArcelorMittal Kryvyi Rih. (б.д.). Головна. <https://ukraine.arcelormittal.com/>
2. Баптизманський, В. І., Охотський, В. Б., & Коновалов, В. С. (1984). *Металургія сталі. Вища школа.*
3. Глінков Г.М., Маковський В.А., Лотман С.Л. *Проектування систем контролю та автоматичного регулювання металургійних процесів.* – М.: *Металургія*, 1986. – 352 с. *(фундаментальна праця)*
4. Євдокимов О.Ю., Кондратюк С.В. *Сучасні системи автоматизації та керування в металургії.* – К.: НТУУ «КПІ», 2018. – 288 с.
5. Мельник В.І., Литвиненко О.М. *Технологія виробництва сталі в кисневих конвертерах.* – Дніпро: НМетАУ, 2020. – 320 с.
6. Кудрін В.А. *Металургія сталі.* – М.: *Металургія*, 1981. – 485 с. *(фундаментальна праця)*
7. Іванов Є.В., Петров А.С. *Енергоефективні електроприводи промислових механізмів.* – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 210 с.
8. Колосов В.О., Сидоренко Р.М. *Мікропроцесорні системи керування електроприводами: навч. посібник.* – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 176 с.
9. Семенов А.С. (ред.) *Розвиток конвертерного виробництва: збірник наукових праць.* – Запоріжжя: ЗДІА, 2022.
10. Ткаченко В.О., Шевченко О.М. *Електропривод та автоматизація промислових механізмів.* – К.: Вища школа, 1990. – 343 с. *(класичний підручник)*
11. Москаленко В.В. *Автоматизований електропривод: Підручник.* – 5-те вид. – М.: Академія, 2007. – 368 с.
12. Каталог та технічна документація на комплектні тиристорні електроприводи серії «КТЕ» виробництва ВАТ «Український електропривод» (офіційний сайт, 2022-2023 рр.).
13. Файнштейн В.Г., Файнштейн Е.Г. *Мікропроцесорні системи управління тиристорними електроприводами.* – М.: В-во Енергоатом, 1986. – 240 с.

14. Файнштейн В.Г., Воробейчик О.С. Цифрові системи управління електроприводів: монографія / Під редакцією Учителя О.Д. – Кривий Ріг: Видавництво ДВНЗ «КНУ», 2014. –159 с.

15. Siemens Industry Online Support [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://support.industry.siemens.com>

16. SIMATIC S7-1500 Automation System. Manual. – Siemens AG, 2023. – 1124 p. – Order number: A5E09250804-002.

17. Rosemount 3051S Pressure Transmitter. Reference Manual. – Emerson Automation Solutions, 2022. – Режим доступу: <https://www.emerson.com/en-us/automation/pressure-measurement>

18. Rosemount 8800D Vortex Flowmeter. Technical Documentation. – Emerson, 2021. – Документ № 00809-0100-4801.

19. SICK AFM60 Absolute Multiturn Encoder. Product Information. – SICK AG, Germany, 2022. – Доступно: <https://www.sick.com>

20. SICK DFS60 Incremental Encoder. Datasheet. – SICK AG, 2021. – Версія 2.1.

21. SIMATIC HMI Comfort Panels. Operating Instructions. – Siemens, 2022. – Документ ID: 037381875.

22. SITOP PSU8200 24 V/10 A Power Supply. Technical Manual. – Siemens AG, 2020. – Номер замовлення: 6EP1333-3BA00.

23. PROFINET IO System – System Description. – PROFIBUS & PROFINET International (PI), 2021. – Версія 2.4.

24. OPC UA Specification. Part 1–14. – OPC Foundation, 2020. – URL: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications/>

25. IEC 61131-3:2013 Programmable controllers – Part 3: Programming languages. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013. – 482 p.

26. Schmersal ZS 335-11Z Safety Limit Switch. Catalogue Data. – Schmersal Group, 2022. – Доступно: <https://www.schmersal.com>

27. ATEX Directive 2014/34/EU – Equipment for use in potentially explosive atmospheres. – Official Journal of the European Union, L 96, 29.03.2014.
28. CGA G-4.1: Cleaning Equipment for Oxygen Service. – Compressed Gas Association, 8th ed., 2018. – Arlington, VA.
29. ASTM G93 – Standard Practice for Cleaning Methods and Cleanliness Assessment of Oxygen System Components. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
30. Каталог технічних засобів автоматизації компанії «Ріттал» (Rittal) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rittal.com/ua/uk>
31. Економічна інформація від фінансового відділу ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». – Кривий Ріг, груд. 2025.
32. Прайс-лист ТОВ «Електропривод-Сервіс» (двигуни Д806, КТЕ). – Запоріжжя, 2025.
33. Siemens Industry Automation Price List. – 2025.
34. Emerson Automation Solutions – Rosemount 3051S Catalog. – 2022.
35. SICK AG – Encoder Product Guide. – Germany, 2022.
36. ДСТУ 8302:2015 «Система стандартів науково-технічної інформації».
37. Статистичні дані по аварійності та простоям обладнання конвертерного цеху №2 / ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». – 2024.
38. ДСТУ ІЕС 61131-2:2016 Автоматизовані системи керування. Частина 2: Вимоги до обладнання та випробувань (ІЕС 61131-2:2007, ІДТ).
39. ДСТУ-Н Б EN 15251:2012 Вхідні параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергоефективності будівель щодо якості повітря всередині приміщень, теплового комфорту, освітлення та акустики (EN 15251:2007, ІДТ).
40. ДСТУ-Н Б В.2.5-38:2018 Інструкція з улаштування електроустановок. Електрозахисні заходи. Захисне заземлення та потенціалозрівнювання.
41. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 28.01.2020 № 246 «Про затвердження Державних санітарних норм та правил при роботі з джерелами електромагнітних полів».

42. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 08.10.2021 № 2114 «Про затвердження Державних санітарних норм виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку».

43. Наказ Міністерства соціальної політики України від 25.11.2020 № 1435 «Про затвердження Типових галузевих норм безоплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту працівникам металургійних, трубних та коксохімічних підприємств, виробництв і об'єктів».

44. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 21.05.2007 № 246 «Про проведення обов'язкових медичних оглядів працівників окремих категорій».

45. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги.

46. ДСТУ 3967-2000 Вогнегасники. Загальні технічні вимоги. Методи випробовувань.

47. 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.



Звіт подібності

Метадані

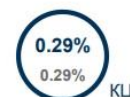
Назва організації		підрозділ		
STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY		STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY		
Заголовок				
141-1д-2026врм				
Автор		Науковий керівник / Експерт		
141-1д-2026врм		Молдло Є.О.		
Кількість слів	Кількість символів	Дата звіту	Дата редагування	ІД документу
15924	114266	1/13/2026	1/13/2026	333099384

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.



15924
Кількість слів



114266
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		288
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		63

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір 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

Колір тексту

порядковий НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	141-6д-д 1/8/2025 STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)	65 0.41 %
2	Розробка електропривода видаючих роликів агрегату поперечного різання тонколистового стану 6/18/2025 National University "Zaporizhzhia Polytechnic" (Кафедра "Електропривод та автоматизація промислових установок")	45 0.28 %

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, *Бабич Микола Володимирович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна магістерська (бакалаврська) робота (назва роботи повністю) виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

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

Також я поінформований(на), що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений(на) з умовами такого розміщення.

01.06. 2025