

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

Кривий Ріг – 2026

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

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«____» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТКИ

Гречки Андрія Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема випускної кваліфікаційної роботи

Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод конвеєру чавунно-розливної машини

керівник випускної роботи Пироженко Андрій Володимирович, доцент, к.т.н.

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

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

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 02.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

Об'єкт - конвеєр чавунно-розливної машини розливного відділення доменного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; асинхронний двигун з короткозамкненим ротором - потужність 30 кВт, номінальна частота обертання 985 об/хв; тип системи керування - ПЧ-АД (перетворювач частоти - асинхронний двигун); чотириступінчастий редуктор із загальним передаточним числом $i = 650$ (ступені 3,8; 4,2; 5,857; 6,952); приводна зірочка - кількість зубів $z = 10$; вимоги до системи - плавне регулювання швидкості конвеєра відповідно до температури злитків, аперіодичний перехідний процес, перерегулювання не більше 0,5 %, пусковий струм не більше $3 \cdot I_n$; контроль параметрів - температура злитків, швидкість конвеєра; наявність електричного гальмування.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити. 4.1 Аналітична частина: Опис технологічного процесу розливання чавуну та призначення конвеєра розливної машини. Аналіз існуючої системи

керування електроприводом конвеєра та її недоліків. Вимоги до модернізованої системи керування. Огляд та обґрунтування вибору системи ПЧ-АД з векторним керуванням. 4.2 Основна частина: Кінематичний розрахунок приводу конвеєра. Розрахунок та вибір асинхронного електродвигуна. Обґрунтування вибору перетворювача частоти. Розробка функціональної схеми системи керування. Синтез структурної схеми з передатними функціями регуляторів струму, потоку та швидкості. Розрахунок параметрів системи підлеглого регулювання координат методом налаштування на модульний оптимум. Моделювання системи векторного керування в MATLAB/Simulink. Розробка алгоритму управління швидкістю транспортування злитків. Заходи з охорони праці: аналіз шкідливих факторів, розрахунок захисного заземлення, блискавкозахист.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 ВРБ.141.237-ст.02.К7 - Схема розташування технологічного обладнання;
 ВРБ.141.237-ст.02.К1 - Кінематична схема електропривода; ВРБ.141.237-ст.02.Е2 - Схема електрична функціональна; ВРБ.141.237-ст.02.Е1- Схема електрична структурна; ВРБ.141.237-ст.02.Е0.1- Графіки перехідних процесів; ВРБ.141.237-ст.02.Е3 - Схема електрична принципова; ВРБ.141.237-ст.02.Е0.2 - Алгоритм управління швидкістю транспортування злитків

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Пироженко А.В.	10.04.2026	10.04.2026
Основна частина	Пироженко А.В.	10.04.2026	10.04.2026

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	01.05.2026	
2.	Основна частина	22.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	28.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	29.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	02.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	18.06.2026	

Студент

Гречка А.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

Пироженко А.В.
(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення	Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.
1	A3	<i>ВРБ.141.237-см.02.К7</i>	Схема розташування	1		
2			технологічного			
3			обладнання			
4	A3	<i>ВРБ.141.237-см.02.К1</i>	Кінематична схема	1		
5			електропривода			
6	A3	<i>ВРБ.141.237-см.02.Е2</i>	Схема електрична	1		
7			функціональна			
8	A3	<i>ВРБ.141.237-см.02.Е1</i>	Схема електрична	1		
9			структурна			
10	A3	<i>ВРБ.141.237-см.02.Е0.1</i>	Графіки перехідних	1		
11			процесів			
12	A3	<i>ВРБ.141.237-см.02.Е3</i>	Схема електрична	1		
13			принципова			
14	A3	<i>ВРБ.141.237-см.02.Е0.2</i>	Алгоритм управління	1		
15			швидкістю			
16			транспортування злитків			
17	A4	<i>ВРБ.141.237-см.02.ПЗ</i>	Пояснювальна записка	69		
18						
19						
20						
					<i>ВРБ.141.237-см.02.ВР</i>	
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		
Розроб.		<i>Гречка А.А.</i>			<i>Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.</i>	
Пров.		<i>Пироженко А.В.</i>				
					<i>Електропривод конвеєру чавунно-розливної машини</i> <i>Відомість роботи</i>	
Н.контр.		<i>Пироженко А.В.</i>				
Затв.		<i>Модло Є.О.</i>				
					Літера	
					Аркуш	
					Аркушів	
					4	
					1	
					<i>ННТІ ДУЕТ</i>	
					<i>Каф.ЕІА</i>	
					<i>гр. ЗЕПА-23ск</i>	

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної роботи: 69 сторінок, 20 рисунків, 20 таблиць, 21 джерело, 3 додатки.

Об'єкт дослідження - технологічний процес розливання чавуну на конвеєрній машині та його електропривод.

Предмет дослідження - автоматизована система керування швидкістю стрічок конвеєра чавунно-розливної машини за схемою «перетворювач частоти - асинхронний двигун» (ПЧ-АД).

Метою роботи є розроблення та обґрунтування автоматизованої системи керування конвеєром чавунно-розливної машини, що забезпечує безпережимне розливання, регулювання швидкості та оптимальний температурний режим злитків.

Методи дослідження: методи теорії автоматичного керування, математичне моделювання динамічних систем у середовищі MATLAB/Simulink, методи розрахунку електроприводів змінного струму.

Результати: розроблено функціональну та структурну схеми системи автоматичного керування (САК) конвеєром, виконано вибір електродвигуна, перетворювача частоти й засобів автоматизації; розраховано регулятори системи векторного керування; підтверджено моделюванням динамічні показники.

Запропонована система забезпечує підвищення якості чушкового чавуну, зниження частки бою при транспортуванні та економію електроенергії.

Ключові слова: асинхронний двигун, векторне керування, електропривод, конвеєр, математичне моделювання, перетворювач частоти, регулятор, розливна машина.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Загальні відомості про технологічний механізм, конструкція та кінематика	11
1.1.1 Характеристика технологічного процесу	11
1.1.2 Конструктивні особливості та режими роботи розливних машин	12
1.1.3 Технічна характеристика двохстрічкової розливної машини	15
1.1.4 Кінематика розливної машини.....	16
1.2 Обґрунтування та вибір системи електроживлення приводу	17
1.3 Технічні вимоги до електропривода та постановка завдання	18
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	19
2.1 Визначення потужності та вибір електродвигуна	19
2.1.1 Розрахунок продуктивності конвеєра	19
2.1.2 Розрахунок натягів ланцюгів та потужності приводу	20
2.1.3 Вибір електродвигуна	22
2.2 Розрахунок перетворювача частоти, вибір компонентів силового кола ...	24
2.2.1 Вибір перетворювача частоти	24
2.2.2 Вибір допоміжних компонентів силового кола	26
2.2.3 Розрахунок і вибір комутаційної апаратури	28
2.2.4 Розрахунок і вибір силового кабелю	29
2.3 Побудова схеми заміщення, математичний опис та механічні характеристики	30
2.4 Вибір структури системи автоматичного регулювання електропривода .	30
2.5 Розрахунок регуляторів аналогової системи керування	33

2.6	Моделювання динаміки замкнутої системи в перехідних режимах.....	33
2.7	Аналіз якісних показників системи керування	34
2.8	Принципова схема системи керування	38
2.9	Функції та призначення системи регулювання швидкості конвеєра.....	39
2.9.1	Постановка задачі.....	39
2.9.2	Керуючі, збурювальні та регульовані параметри	39
2.9.3	Основні функції системи	40
2.10	Схема автоматизації та опис принципу дії.....	41
2.11	Інформаційне забезпечення автоматичної системи управління	42
2.12	Алгоритми роботи системи управління розливною машиною	44
2.12.1	Алгоритм управління охолодженням злитків	44
2.12.2	Алгоритм управління швидкістю транспортування злитків	44
2.13	Вибір засобів автоматизації	48
2.13.1	Вибір контролера.....	48
2.13.2	Вибір датчика температури.....	56
2.13.3	Вибір фотодатчика	57
2.13.4	Датчики тиску.....	59
2.14	Охорона праці	59
2.14.1	Аналіз умов праці.....	59
2.14.1.1	Організація робочого місця.....	59
2.14.1.2	Мікроклімат виробничих приміщень.....	59
2.14.1.3	Шкідливі речовини.....	60
2.14.1.4	Освітлення.....	61
2.14.1.5	Шум та вібрація.....	62
2.14.1.6	Виробничі випромінювання та електробезпека	62

2.14.2 Заходи з охорони праці	63
2.14.2.1 Вимоги до персоналу та порядок допуску до роботи	63
2.14.2.2 Нормалізація повітря робочої зони, освітлення, захист від шуму ..	63
2.14.2.3 Електробезпека та розрахунок захисного заземлення	64
2.14.2.4 Захист від ударів блискавки	64
2.14.3 Пожежна безпека	64
2.14.4 Засоби індивідуального захисту	65
2.14.5 Санітарно-гігієнічні та ергономічні вимоги	66
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68
Додаток А	70
Додаток Б	75
Додаток В	78

ВСТУП

Керування технологічним процесом розливання чавуну на конвеєрній машині охоплює виконання ряду взаємопов'язаних завдань: збір первинної технологічної інформації про стан об'єкта (фіксацію присутності рідкого металу в жолобі та рівень його наповнення, виміряне значення температури чавуну, поточну швидкість стрічок конвеєра, контроль наявності охолодної води та тиску в системі охолодження, температурний стан злитків у мультях після охолодження, наявність чушок після вибивки, наявність вапняного розчину і температуру мульт перед обприскуванням); опрацювання зібраних даних за наперед визначеними алгоритмами; формування керуючих сигналів; реалізацію виробленого керуючого впливу на виконавчі механізми.

Серед головних завдань системи автоматичного управління (САУ) електроприводами конвеєрних стрічок розливної машини виділяються: індивідуальна зміна швидкості обертання кожного привода стрічки та синхронізація руху обох стрічок із мультями.

Регулювання швидкості конвеєрних стрічок на розливних машинах з метою стабілізації технологічного режиму виливання здійснюється локальними підсистемами автоматичного регулювання. Системи регулювання побудовано за принципом зворотного зв'язку за відхиленням: будь-яке відхилення фактичної швидкості від заданого значення усувається шляхом коригування частоти обертання приводних роликів.

З метою підвищення якості чушкового чавуну необхідно цілеспрямовано впливати на характеристики злитка - зокрема, покращувати його ударну в'язкість і структуру поверхні. Для зниження частки бою при транспортуванні та перевантаженнях необхідно здійснювати розливання без пережиму мультди. У процесі транспортування гарячий метал у мультях поступово охолоджується, тому для забезпечення оптимальної температури злитків на момент розвантаження необхідно регулювати швидкість конвеєра відповідно до поточної температури металу.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю модернізації застарілих систем керування конвеєрами розливних машин на металургійних підприємствах України з метою підвищення якості продукції, енергоефективності та надійності виробництва. Метою дипломного проекту є розроблення автоматизованої системи керування конвеєром чавунно-розливної машини за схемою ПЧ-АД, що забезпечує задані технологічні параметри.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальні відомості про технологічний механізм, конструкція та кінематика

1.1.1 Характеристика технологічного процесу

Виробництво чавуну здійснюється у потужних доменних печах із вогнетривкою цегляною кладкою, що досягають заввишки 30 м при внутрішньому діаметрі близько 12 м. Схематичний розріз доменної печі наведено на рис. 1.1.

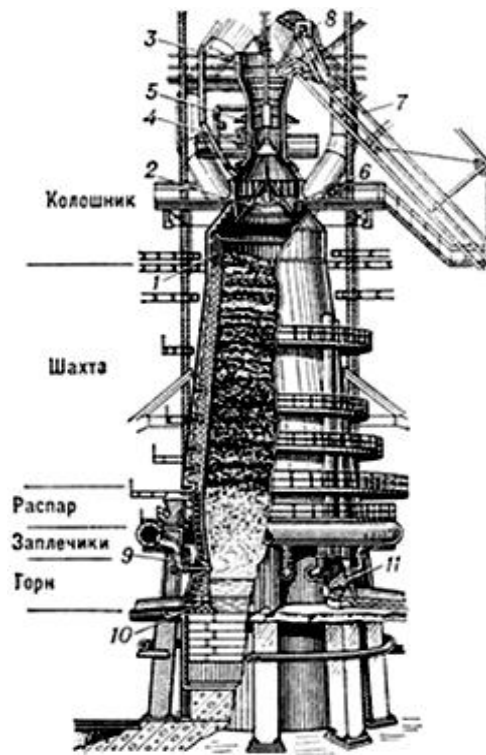


Рис. 1.1. Схематичний розріз доменної печі [1]

Складові елементи: 1 - захисні сегменти колошника; 2 - великий конус; 3 - прийомна вирва; 4 - малий конус; 5 - розподільник шихти; 6 - вирва великого конуса; 7 - похилий міст; 8 - скіп; 9 - повітряна фурма; 10 - чавунна лютка; 11 - шлакова лютка.

Верхня частина печі іменується шахтою та завершується отвором - колошником, що перекривається рухомою конструкцією - колошниковим затвором. Найширша ділянка перерізу печі - розпар, а нижня конічна частина - горн. Через спеціальні отвори (фурми) у горн нагнітається підігріте повітря або кисень.

Завантаження печі відбувається послідовними шарами: спочатку кокс, потім - агломерат і кокс. Агломерат - це підготовлена залізна руда, спечена разом із флюсом. Горіння підтримується безперервним вдуванням у горн підігрітого дуття або збагаченого кисню. Дуття надходить у кільцевий колектор навколо горна і через вигнуті патрубки вводиться через фурми. У горні кокс окиснюється до CO_2 ; вуглекислий газ, піднімаючись крізь шари розпеченого коксу, відновлюється до CO , який потім відновлює залізну руду, перетворюючись на CO_2 .

Відновлення оксидів заліза протікає переважно в середній частині шахти. Порожню породу формує переважно SiO_2 - тугоплавка речовина. Для переведення тугоплавких домішок у легкоплавкі сполуки застосовують вапняковий флюс (CaCO_3), який взаємодіє з SiO_2 з утворенням силікату кальцію (CaSiO_3), що легко відокремлюється у вигляді шлаку.

Відновлене залізо у твердому стані поступово опускається до більш розігрітого розпару, насичується вуглецем і перетворюється на чавун. Рідкий чавун накопичується у горні під шаром шлаку, який захищає метал від повторного окиснення. Чавун і шлак випускають через спеціальні отвори в міру накопичення. Колошниковий газ із вмістом до 25 % CO спалюється в повітронагрівачах-кауперах для підігріву дуття. Піч працює безперервно до капітального ремонту [1].

1.1.2 Конструктивні особливості та режими роботи розливних машин

Впровадження механізованого розливання рідкого чавуну в чушки за допомогою конвеєрних машин докорінно змінило умови праці в цій ділянці

виробництва: було усунуто важку фізичну роботу і різко скоротилися трудові витрати [2].

До розливних машин ставляться такі основні вимоги: мінімальні втрати чавуну у вигляді скрапу; мінімальна вартість технологічного переділу. Задоволення цих умов можливе лише за умови раціональної конструкції машини, що забезпечує мінімальне розбризкування металу, унеможливорює перелив форм, зменшує чисельність обслуговуючого персоналу та витрати на технічне обслуговування.

Нині застосовуються два основних типи розливних машин, що розрізняються конструкцією конвеєра. На рис. 1.2 показано конвеєрну розливну машину продуктивністю до 108 т чавуну на годину. На конвеєрних стрічках закріплено металеві ізложниці (мульди), розраховані на отримання чушок масою 18 кг.

Кожна стрічка приводиться від окремого електромеханічного привода, що складається з електродвигуна, редуктора і двох провідних зірочок. Ведені зірочки розміщено під площадкою ливарної сторони; там само передбачені натяжні пристрої. Номінальна продуктивність досягається при швидкості руху стрічок 8-9 м/хв.

Чавуновіз із рідким металом підводиться до ливарної сторони машини і встановлюється по осі так, щоб центр ковша збігався з віссю машини. Ківш обладнано спеціальними цапфами, що спираються на стенди під час кантування. Перекидання ковша здійснюється кантовальною лебідкою або мостовим краном. Рідкий чавун через вогнетривкий жолоб, що роздвоюється, рівномірно розподіляється між двома стрічками, заповнюючи ізложниці. Конструкція мульд і нахил рейок розраховані так, що при переповненні мульди надлишок металу перетікає в наступну порожню, не проливаючись на підлогу.

Мульди з залитим чавуном рухаються похилою галереєю до розвантажувальної сторони. Починаючи з другої третини шляху, над стрічкою розміщено водяні бризкалки, що забезпечують інтенсивне охолодження та тверднення металу.

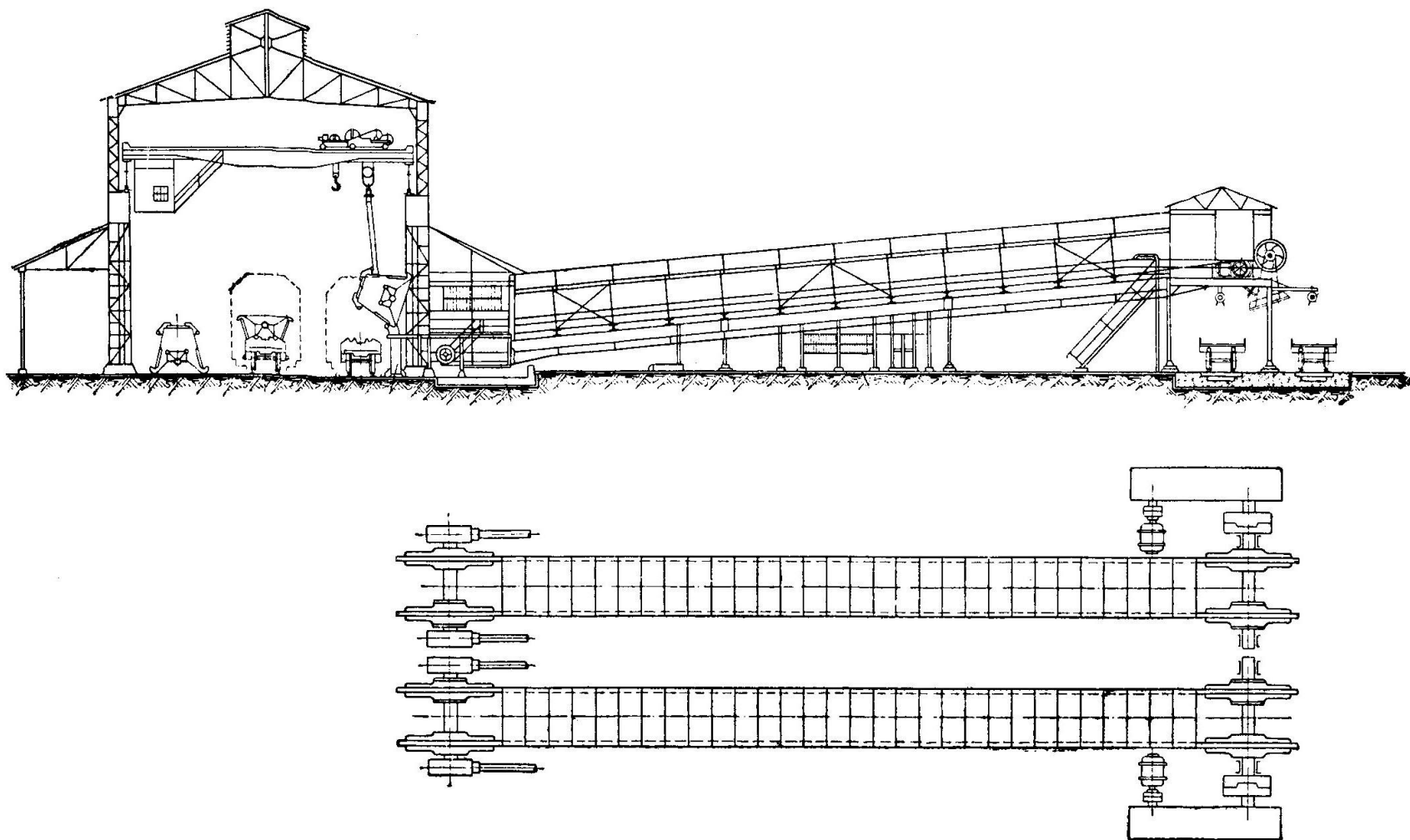


Рис. 1.2. Конвеєрна розливна машина [2]

На розвантажувальному кінці застигли чушки скидаються у напрямний жолоб і потрапляють на залізничні платформи, де зрошуються додатковими душами. Порожні мульди повертаються у перекинутому положенні нижньою гілкою конвеєра. Приблизно посередині зворотного шляху вони проходять через пристрій обприскування вапняним молоком, що запобігає приварюванню чавуну при наступному заливанні.

1.1.3 Технічна характеристика двохстрічкової розливної машини

Технічні параметри двохстрічкової розливної машини наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Технічна характеристика двохстрічкової розливної машини [2]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Кількість мульд на стрічці	шт.	308
2	Кількість стрічок	шт.	2
3	Міжцентрова відстань мульд	м	0,15
4	Маса чушки	кг	18
5	Швидкість руху конвеєра	м/хв	9,1
6	Кут нахилу конвеєра	град	9
7	Відстань між зірочками	мм	43 000
8	Тип редуктора привода	-	2Ц2-400
9	Максимальна швидкість крюка	м/с	0,847
10	Мінімальна швидкість крюка	м/с	0,095
11	Діаметр барабана	м	0,93
12	Діаметр каната	м	0,031
13	Кут нахилу стрічки	градус	9°20'
14	Кількість зубів зірочки	шт.	10
15	Продуктивність при безперервному розливанні	т/год	108
16	Маса машини	т	225

1.1.4 Кінематика розливної машини

Ланцюги з мульдами приводяться у рух провідними зірочками (зубчастими блоками), що розташовані на розвантажувальному кінці машини. Зірочка складається з чавунного диска та знімного зубчастого вінця, набраного з окремих сегментів. Провідні зірочки з'єднані з електродвигуном через редуктор (рис. 1.3). Кожна стрічка має автономний привод. Між редуктором і двигуном встановлено запобіжні зрізні шпильки для захисту від надмірного крутного моменту.

На завантажувальному кінці розташовано натяжні зірочки, що переміщаються гвинтовим пристроєм (хід 600 мм). Зірочки виготовляють зварними.

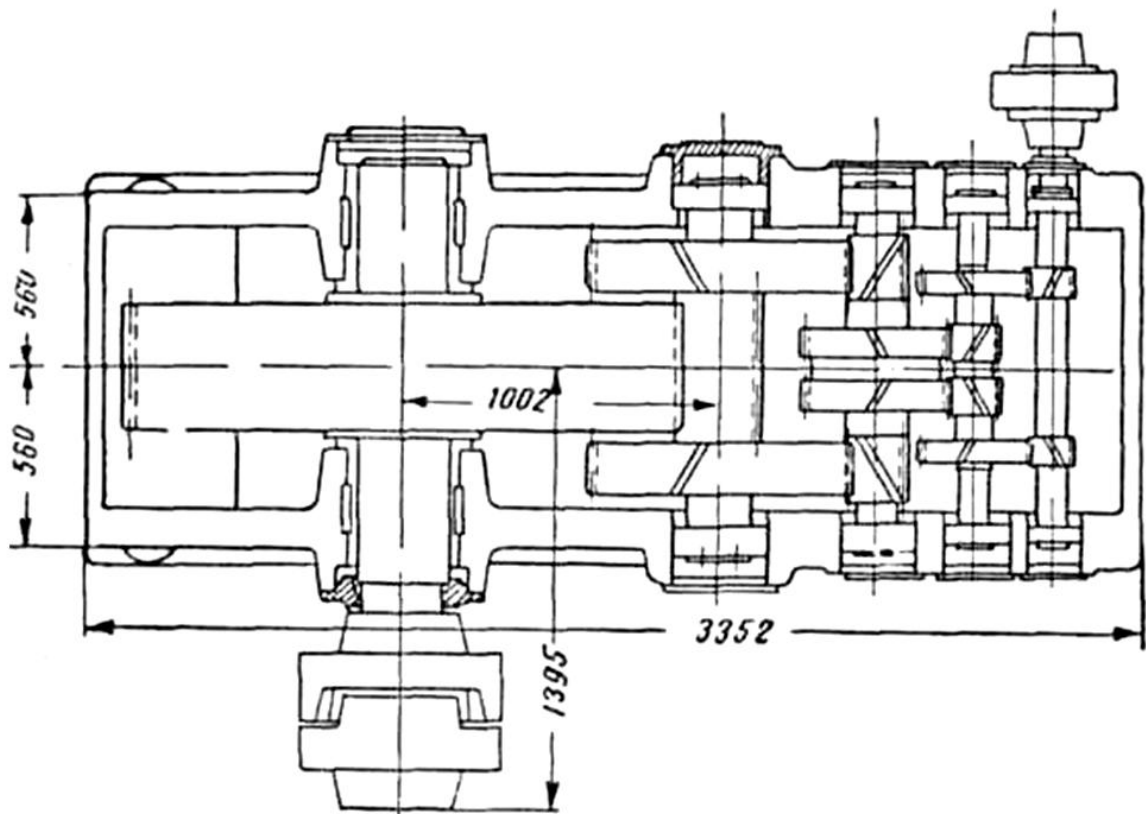


Рис. 1.3. Редуктор електропривода розливної машини [2]

Редуктор чотирьохступінчастий; загальне передаточне число

$$i = 3,8 \cdot 4,2 \cdot 5,857 \cdot 6,952 = 650.$$

На даний момент в якості приводного двигуна експлуатується машина змінного струму серії 4А, з потужністю $P_n = 30$ кВт, та номінальними обертами $n_n = 970$ об/хв.

Керування розливною машиною здійснюється з центрального пульта машиніста, з дублюванням з місцевих пультів.

1.2 Обґрунтування та вибір системи електроживлення приводу

Обґрунтуємо вибір системи електропривода виходячи з технологічних вимог. Як приводний двигун використовується асинхронна машина з короткозамкненим ротором (АД КЗР) - найбільш надійний і дешевий тип у порівнянні з машиною постійного струму та синхронною машиною [3].

Відомі такі основні способи регулювання швидкості АД: параметричне (у тому числі фазове), каскадне та частотне. Параметричне регулювання передбачає зміну опорів, реакторів чи конденсаторів, увімкнених у фази статора або ротора. Цей метод нераціональний і не придатний для тривалого та глибокого регулювання.

Каскадне регулювання полягає в підключенні до мережі кола статора і введенні в коло ротора додаткової ЕРС. Реалізується через машинні агрегати або керовані випрямлячі з інверторами (асинхронно-вентильний каскад). Такі схеми рекуперують потужність ковзання і є економічними у вузькому діапазоні (2:1-3:1), однак мають порівняно низький коефіцієнт потужності (0,7 і нижче).

Частотне регулювання передбачає узгоджену зміну частоти та амплітуди напруги статора АД КЗР. Цей спосіб є найбільш раціональним: він економічний, охоплює широкий діапазон регулювання і забезпечує регулювання від наддуже малих до надвисоких частот обертання. АД КЗР не має ковзних контактів, що гарантує тривалу безаварійну роботу.

За технологічними вимогами необхідно підтримувати оптимальну температуру злитків до моменту їх розвантаження через регулювання швидкості конвеєра. Система електропривода конвеєра має відповідати таким

вимогам: діапазон регулювання швидкості 5:1; точність підтримання швидкості в усьому діапазоні - не гірше 5 %; забезпечення автоматичного обмеження гальмівного моменту.

На підставі викладеного зупинимо вибір на системі «перетворювач частоти - асинхронний двигун» (ПЧ-АД).

1.3 Технічні вимоги до електропривода та постановка завдання

При проектуванні системи автоматичного управління електроприводом необхідно врахувати вимоги технологічного механізму. Критерії оцінювання системи: ККД, $\cos\phi$, надійність, вартість, витрати на експлуатацію, діапазон регулювання, швидкодія, статична й динамічна похибки, перерегулювання, плавність пуску та гальмування, обмеження прискорення й ривка, динамічні навантаження, точність позиціонування.

Виходячи з обраного варіанта електропривода, визначаємо основні елементи системи: електродвигун, перетворювач частоти, блоки керування і захисту.

Загальні вимоги до приводів конвеєрних механізмів: мінімальна тривалість перехідних процесів; плавне регулювання швидкості; можливість реверсування робочих органів. Специфічні вимоги технологічного процесу транспортування: мінімальний час перехідного процесу при обмеженні максимального динамічного струму; регулювання швидкості залежно від фактичної продуктивності; висока перевантажувальна здатність двигуна; обмеження динамічних зусиль на стрічку та несучі конструкції; висока надійність системи в цілому.

Завданням випускної роботи є розробка системи автоматичного регулювання швидкості конвеєра розливної машини, яка забезпечує оптимальний технологічний режим розливання чавуну.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Визначення потужності та вибір електродвигуна

2.1.1 Розрахунок продуктивності конвеєра

Вихідні дані для розрахунку: маса чушки $p_1 = 18$ кг; відстань між мульдами $a = 0,15$ м; швидкість руху конвеєра $v = 9,1$ м/хв; кількість стрічок 2; маса ковша $G = 120$ т; коефіцієнт використання $\kappa = 0,97$.

Теоретична продуктивність однієї стрічки визначається за формулою (2.1):

$$Q_1 = \frac{2 \cdot 60 \cdot 1000 \cdot p_1 \cdot v}{a} = \frac{2 \cdot 60 \cdot 1000 \cdot 18 \cdot 9,1}{0,15} = 131,04 \text{ т/год} \quad (2.1)$$

де Q_1 - теоретична продуктивність однієї стрічки, т/год;

p_1 - маса чушки, кг;

v - швидкість руху конвеєра, м/хв;

a - міжцентрова відстань мульд, м.

Тривалість завантаження ковша визначається за формулою (2.2):

$$t_1 = \frac{1000 \cdot G \cdot a \cdot \kappa}{2 \cdot p_1 \cdot v} = \frac{1000 \cdot 120 \cdot 0,15 \cdot 0,97}{2 \cdot 18 \cdot 9,1} = 53,297 \text{ хв} \quad (2.2)$$

Тривалість технологічного циклу (де $t_2 = 2,5$ хв - час налаштування, $t_3 = 9$ хв - час закінчення):

$$t_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 = 53,297 + 2,5 + 9 = 64,797 \text{ хв} \quad (2.3)$$

Фактична продуктивність:

$$Q = \frac{60 \cdot G \cdot \kappa}{t_{\text{ц}}} = \frac{60 \cdot 120 \cdot 0,97}{64,797} = 107,78 \text{ т/год} \quad (2.4)$$

Добова продуктивність ($T_r = 20$ год/добу):

$$Q_{\text{ц}} = \frac{G \cdot T_r \cdot \kappa \cdot 60}{t_{\text{ц}}} = \frac{120 \cdot 20 \cdot 0,97 \cdot 60}{64,797} \approx 2156 \text{ т/добу} \quad (2.5)$$

2.1.2 Розрахунок натягів ланцюгів та потужності привода

Вихідні дані: довжина конвеєра $L_k = 43$ м; кут нахилу $\alpha = 9^\circ 20'$ ($\sin \alpha = 0,162$; $\cos \alpha = 0,987$); кількість зубів зірочки $z = 10$; крок ланцюга $t_l = 0,6$ м.

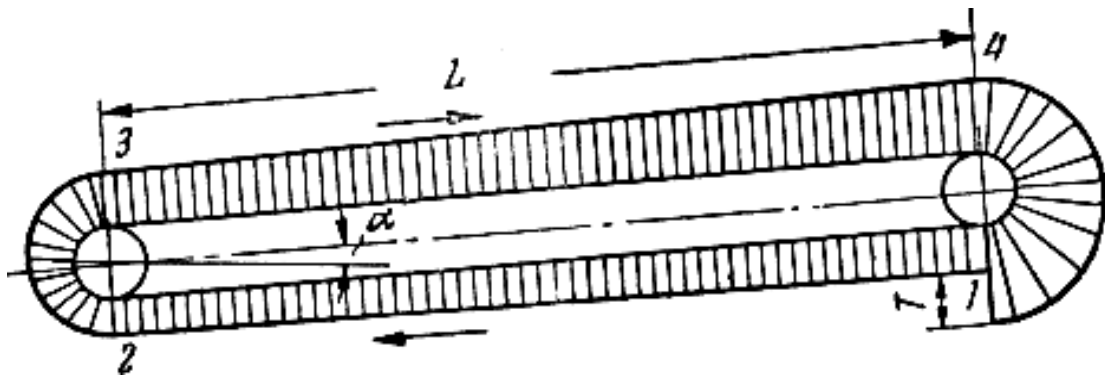


Рис. 2.1. Розрахункова схема розливної машини [2]

Зведений коефіцієнт опору:

$$k = \frac{c \cdot \mu \cdot d}{2} + f \cdot D = \frac{4 \cdot 0,04 \cdot 6,5}{2} + 0,08 \cdot 25 = 0,067 \quad (2.6)$$

Кількість ланок на 1 м: $n = 1 / t_l = 1 / 0,6 = 1,667$ ланок/м.

Лінійна маса холостої гілки:

$$q_0 = m_{\text{стр}} \cdot n = 280 \cdot 1,667 = 466,667 \text{ кг/м} \quad (2.7)$$

Натяг у нижній (ненавантажений) гілці обирається $S_2 = 500$ кг. Опір руху холостої гілки:

$$W_{21} = q_0 \cdot L_k \cdot (\sin\alpha + k \cdot \cos\alpha) = 466,667 \cdot 43 \cdot (0,162 + 0,067 \cdot 0,987) = 1919,85 \text{ кг} \quad (2.8)$$

Натяг у верхній точці холостої гілки: $S_1 = S_2 + W_{21} = 500 + 1919,85 = 2419,85 \text{ кг}$.

Натяг у точці посадки на зірочку: $S_3 = 1,1 \cdot S_2 = 550 \text{ кг}$.

Лінійна маса навантаженої гілки $q = mч / (2 \cdot n) = 18 / (2 \cdot 0,6) = 60 \text{ кг/м}$.

Опір руху навантаженої гілки:

$$W_{34} = (q_0 + q) \cdot L_k \cdot (\sin\alpha + k \cdot \cos\alpha) = (466,667 + 60) \cdot 43 \cdot (0,162 + 0,067 \cdot 0,987) = 5170,83 \text{ кг} \quad (2.9)$$

Максимальний натяг $S_4 = S_3 + W_{34} = 5720,83 \text{ кг}$; з урахуванням запасу 1,15:

$$S_4' = 6578,96 \text{ кг}.$$

Тягова сила на ободі зірочки:

$$T_z = S_4' - S_1 = 6578,96 - 2419,85 = 4159,11 \text{ кг} \quad (2.10)$$

Кутове прискорення при пуску

$$a_1 = 2\pi \cdot v / (60 \cdot z \cdot tл) = 7,568 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2.$$

Додаткове динамічне зусилля:

$$S_d = \frac{(q + 2 \cdot q_0) \cdot L_k \cdot g}{3 \cdot a_1} = 98,85 \text{ кг} \quad (2.11)$$

Сумарне тягове зусилля: $S_{sum} = S_4' + S_d = 6677,81 \text{ кг}$.

Потужність на привідному валу однієї стрічки:

$$N_1 = \frac{(S_d + T_z) \cdot v}{60 \cdot 102} = \frac{(98,85 + 4159,11) \cdot 9,1}{60 \cdot 102} = 6,331 \text{ кВт} \quad (2.12)$$

Потужність двигуна ($\eta_{\text{ред}} = 0,848$ - ККД редуктора):

$$N_d' = \frac{N_1}{\eta_{\text{ред}}} = \frac{6,331}{0,848} = 7,466 \text{ кВт} \quad (2.13)$$

З урахуванням пускового коефіцієнта 1,5: $N_{d2} = 1,5 \cdot 7,466 = 11,199 \text{ кВт}$.
Сумарна потужність для двох стрічок:

$$P_d = 2 \cdot N_d' = 2 \cdot 11,199 = 22,398 \text{ кВт} \quad (2.14)$$

2.1.3 Вибір електродвигуна

На підставі виконаних розрахунків для приводу конвеєрних стрічок розливної машини обрано асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором WEG W22 IE3 225M/6 виробництва WEG (Бразилія), з номінальною потужністю $P_n = 30 \text{ кВт}$ та частотою обертання $n_n = 985 \text{ об/хв}$. Двигуни серії W22 належать до енергоефективного класу IE3 (Premium Efficiency), сертифіковані за стандартом ДСТУ ІЕС 60034-30-1, мають ступінь захисту IP55, ізоляцію класу F, придатні до роботи з перетворювачами частоти у складі системи ПЧ-АД [3].

Паспортні параметри двигуна WEG W22 IE3 225M/6 наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Паспортні параметри двигуна WEG W22 IE3 225M/6 [3]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	WEG (Бразилія)
2	Тип	-	W22 IE3 225M/6
3	Номінальна потужність P_n	кВт	30
4	Лінійна напруга статора U_n	В	380
5	ККД η_n (100 % / 75 % навант.)	%	93,0 / 93,2
6	Номінальна частота обертання n_n	об/хв	985
7	Швидкість холостого ходу ω_0	рад/с	104,72
8	Число пар полюсів p_n	од.	3
9	Номінальне ковзання s_n	в.о.	0,025
10	Номінальний струм статора	А	58
11	Момент інерції ротора	кг·м ²	0,35
12	$\cos \varphi$ (100 % / 75 % навант.)	в.о.	0,84 / 0,79
13	Кратність пускового моменту K_p	в.о.	2,1
14	Кратність максимального моменту K_m	в.о.	3,0
15	Кратність пускового струму K_i	в.о.	6,5

Двигуни серії W22 застосовуються в усіх галузях промисловості. Їх ключові переваги: знижена питома витрата електроенергії; уніфіковане виконання зі ступенем захисту IP55; ізоляція класу F (допустимий перегрів +80 °С); знижені акустичні показники; відповідність національним та міжнародним стандартам. Допустиме відхилення напруги мережі ± 5 % від номіналу. Номінальний режим гарантовано при температурі +40 °С і висоті не більше 1000 м над рівнем моря.

2.2 Розрахунок перетворювача частоти, вибір компонентів силового кола

2.2.1 Вибір перетворювача частоти

Статичні перетворювачі частоти поділяються на два основних класи: з безпосереднім зв'язком (БПЧ) та з проміжною ланкою постійного струму (ПЧ з ЛПС). БПЧ відрізняється простою силовою схемою, однак максимальна регульована вихідна частота не перевищує 40 % від частоти живильної мережі; крім того, низький $\cos\phi$ при регулюванні та несинусоїдальна форма вихідної напруги ускладнюють застосування. ПЧ з ланкою постійного струму є більш технологічно досконалим [4].

Вибір зупиняємо на системі «ПЧ з ЛПС - АД КЗР», що надає такі переваги: регулювання швидкості АД без значних втрат ковзання; синусоїдальна форма вхідного і вихідного струму; плавне регулювання у широкому діапазоні; жорсткі регульовальні характеристики та висока перевантажувальна здатність; коефіцієнт потужності, близький до одиниці; висока швидкодія та алгоритми енергозбереження; система самодіагностики; інтеграція в системи автоматизації вищого рівня.

Для частотного перетворення обрано перетворювач Altivar Process ATV930D30N4 виробництва Schneider Electric (Франція). Технічні параметри наведено в табл. 2.2.

Технічні параметри перетворювача частоти ATV930D30N4 [4]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	Schneider Electric (Франція)
2	Лінійний струм при 400 В	А	65
3	Струм короткого замикання	кА	22
4	Потужність двигуна	кВт	30
5	Номінальний лінійний струм	А	66
6	Максимальний перехідний струм	А	109
7	Маса	кг	37
8	Діапазон вихідних частот	Гц	0-1600
9	Напруга живлення	В	380-480
10	Частота живлячої мережі	Гц	50/60
11	Частота комутації	кГц	4
12	Діапазон регулювання швидкості	-	1:100
13	Аналогові входи	шт.	2 канали ± 10 В, $R_{vx} > 6$ кОм
14	Аналогові виходи	шт.	1 канал ± 10 В / 10 мА
15	Дискретні входи	шт.	6 каналів, 30 В
16	Цифрові інтерфейси	-	Modbus TCP, EtherNet/IP, CANopen



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд перетворювача Altivar Process ATV930 [4]

Системи керування та захисту перетворювача забезпечують захист від перевантажень, КЗ, перенапруг, зникнення живлення, пошкодження системи охолодження та витоку на землю. Вбудовані засоби діагностики контролюють підсистеми введення/виведення, джерело живлення та пам'ять мікроконтролера.

2.2.2 Вибір допоміжних компонентів силового кола

Для придушення електромагнітних завад обрано дросель постійного струму VW3 A4 510 з індуктивністю 0,52 мГн і номінальним струмом 84,5 А, а також мережевий дросель VW3 A4 556 (0,3 мГн, 100 А). Мережевий дросель пом'якшує стрибки напруги при комутаціях великих споживачів та наближає форму споживаного струму до синусоїдальної; THD без дроселя становить 66 %, із дроселем - 89 %; надійність перетворювача зростає в 5-7 разів.



Рис. 2.3. Зовнішній вигляд мережевого дроселя [4]

Вхідний фільтр VW3 A4 407 (номінальний струм 92 А) встановлюється для пригнічення стрибків живлячої напруги та зниження амплітуди пульсацій струму. Синусний фільтр VW3 A5 204 (3×66 А) застосовується для усунення акустичного шуму, при рекуперативному гальмуванні та при підключенні кабелями 150-300 м.

Гальмівний резистор VW3 A7 804 ($R = 14$ Ом, $P = 22,4$ кВт) підключається до шини постійного струму всередині ПЧ та поглинає кінетичну енергію при інтенсивному гальмуванні великих інерційних мас.

Трифазний лінійний дросель двигуна VW3 A5 103 (3×90 А) пригнічує вищі гармоніки напруги та знижує токи, обумовлені комутацією, що захищає конденсатори ланки постійного струму.

2.2.3 Розрахунок і вибір комутаційної апаратури

Автоматичний вимикач обирається за умовами: $U_n \geq 380 \text{ В}$, $I_n \geq I_{stt}$, $I_{ks} \geq I_{K3max}$. Розрахунковий струм для вибору вхідного автомата:

$$I_H = \frac{1,8 \cdot P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{1,8 \cdot 30}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9 \cdot 0,84} = 108,52 \text{ А} \quad (2.15)$$

Обрано автоматичний вимикач Schneider Electric Compact NSX160F TM160D (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Технічні характеристики вхідного автоматичного вимикача [4]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	Schneider Electric (Франція)
2	Тип	-	Compact NSX160F TM160D
3	Номінальний струм автомата	А	125
4	Кількість полюсів	од.	3Р
5	Призначення	-	Захист електричного кола

Струм уставки електромагнітного розчеплювача $I_{устем.} = 3 \cdot I_{нПЧ} = 3 \cdot 66 = 198 \text{ А}$. Для лінійного контактора (магнітного пускача) розрахунковий струм:

$$I_H = \frac{1,8 \cdot P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\varphi} = \frac{1,8 \cdot 30}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,84} = 97,67 \text{ А} \quad (2.16)$$

Обрано магнітний пускач LS Electric MC-100a (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

Технічні характеристики магнітного пускача MC-100a [4]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	LS Electric (Південна Корея)
2	Тип	-	MC-100a
3	Номінальний струм	А	100
4	Номінальна напруга	В	380
5	Кількість силових полюсів	од.	3Р
6	Рід струму	-	Змінний/постійний

2.2.4 Розрахунок і вибір силового кабелю

Економічно доцільний переріз провідника:

$$S = \frac{I_H}{J_{ек}} = \frac{60,3}{3,1} = 19,45 \text{ мм}^2 \quad (2.17)$$

де $J_{ек} = 3,1 \text{ А/мм}^2$ - економічна щільність струму для мідної жили.

Обрано кабель ВВГнг 4×25 виробництва ПрАТ «Південкабель» (м. Харків, Україна): $I_{доп} = 100 \text{ А}$, $r_0 = 0,716 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,091 \text{ Ом/км}$. Перевірка за допустимим струмом: $100 \text{ А} > 97,67 \text{ А}$ - умова виконана.

2.3 Побудова схеми заміщення, математичний опис та механічні характеристики

У цьому розділі наведено лише ключові результати розрахунку схеми заміщення асинхронного двигуна та побудови його швидкісних і механічних характеристик; повний покроковий розрахунок винесено у Додаток А.

Обрана структура - Т-подібна схема заміщення асинхронної машини у фазних координатах. На підставі каталожних даних [3] та методики [5] обчислено основні параметри схеми заміщення:

- активний опір ротора: $R_r = 0,1 \text{ Ом}$;
- активний опір статора: $R_s = 0,124 \text{ Ом}$;
- індуктивний опір контуру намагнічення: $X_m = 8,555 \text{ Ом}$;
- індуктивності: $L_s = 0,084 \text{ Гн}$, $L_o = 0,085 \text{ Гн}$, $L_m = 0,082 \text{ Гн}$;
- номінальний момент $M_n = 293,82 \text{ Н}\cdot\text{м}$; пусковий момент $M_p = 617,03 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Швидкісні та механічні характеристики двигуна, побудовані для частот живлення $f_1 = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ Гц}$, наведено в Додатку А (рис. А.2-А.4). Характеристики свідчать про прийнятну жорсткість при частотах $f_1 \geq 0,3 f_{nom}$ та необхідність застосування ІR-компенсації при низьких частотах.

2.4 Вибір структури системи автоматичного регулювання електропривода

В основу сучасних законів керування асинхронними двигунами покладено метод результуючого вектора, який має як математичну, так і чітку фізичну інтерпретацію. Загальні рівняння Горєва-Парка для узагальненої електричної машини мають вигляд:

$$U_s = R_s \cdot i_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j \cdot \omega_k \cdot \Psi_s \quad (2.18)$$

$$U_r = R_r \cdot i_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \Psi_r \quad (2.19)$$

Можливі способи керування: зміна модуля вектора; зміна модуля та аргументу вектора; регулювання проекції вектора на вісь. Відповідно виокремлюються варіанти: скалярне, полярне та векторне керування. У проекті прийнято векторну систему керування з орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора [6; 7].

На відміну від скалярного, векторне керування оперує одночасно амплітудою і фазою струму статора. Система орієнтована по потокозчепленню ротора: вісь X системи координат, що обертається з синхронною швидкістю, суміщається з вектором Ψ_r . Проекція I_{1x} визначає магнітний потік (аналог струму збудження ДПС), а I_{1y} - електромагнітний момент (аналог якірного струму). Завдяки цьому забезпечується незалежне керування потоком і моментом.

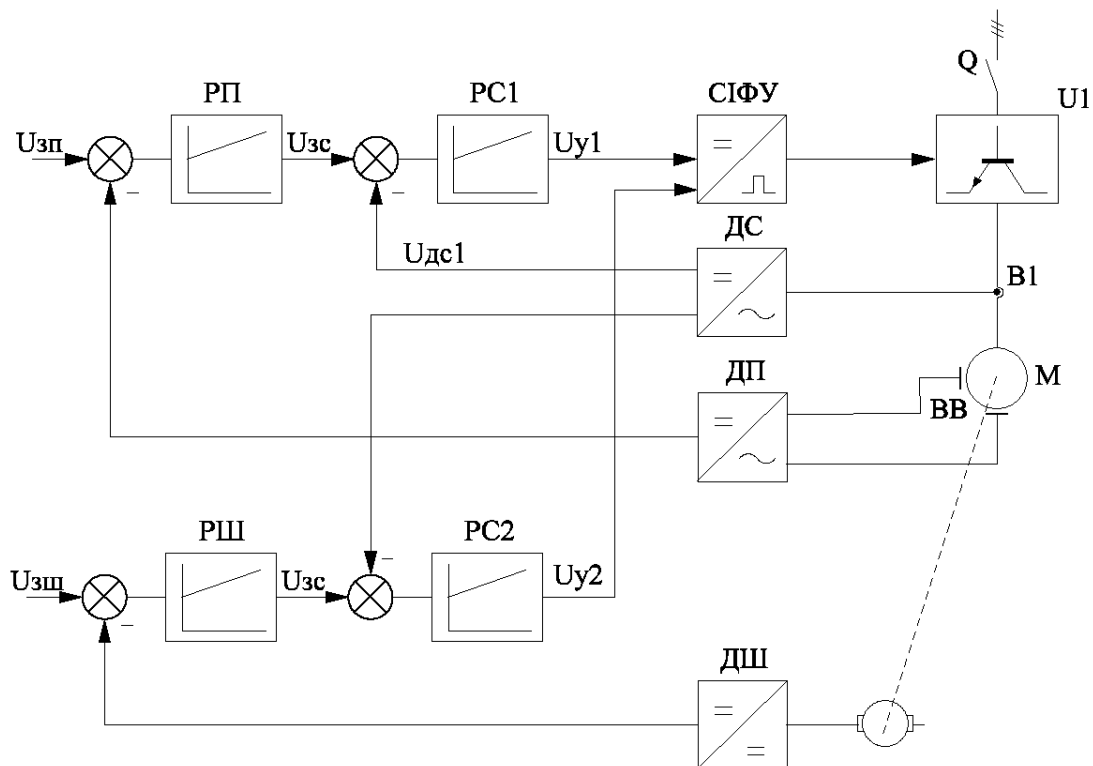


Рис. 2.4. Функціональна схема ПЧ з векторним керуванням [7]

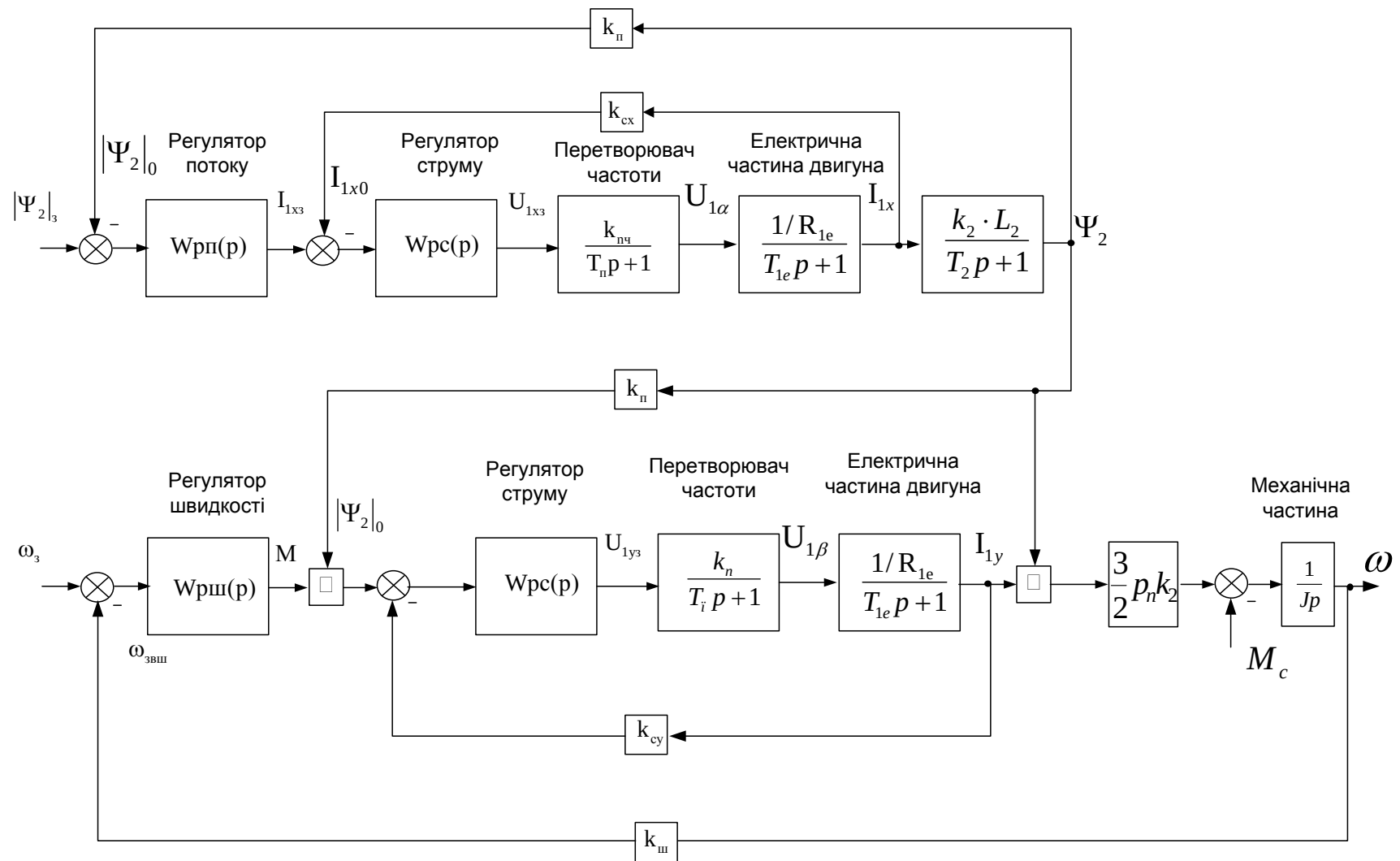


Рис. 2.5. Структурна схема системи ПЧ-АД
(розроблено автором)

2.5 Розрахунок регуляторів аналогової системи керування

У цьому підрозділі наведено лише підсумкові передатні функції регуляторів та основні параметри. Повний розрахунок базових величин, коефіцієнтів зворотних зв'язків, регуляторів струму, потоку й швидкості винесено у Додаток Б.

Прийняте налаштування регуляторів - на модульний оптимум (МО).
Передатні функції розрахованих регуляторів:

- регулятор струму I_{1x} : $W_{pc1}(p) = (0,024 p + 1) / (0,0381 p)$;
- регулятор струму I_{1y} : $W_{pc2}(p) = (0,024 p + 1) / (0,00637 p)$;
- регулятор потоку: $W_{pp}(p) = (0,848 p + 1) / (0,004 p)$;
- регулятор швидкості: $W_{ps}(p) \approx 7,885 / p$.

Базові значення (детальний розрахунок - у Додатку Б): $U_b = 310,27$ В; $I_{1b} = 85,26$ А; $\omega_{rb} = 104,72$ рад/с; $M_b = 859,44$ Н·м; $\Psi = 6,151$ Вб. Коефіцієнти зворотних зв'язків: $K_p = 1,626$; $K_{c1} = 0,133$; $K_{c2} = 0,022$; $K_{sh} = 0,0955$; $K_{пч} = 31,03$.

2.6 Моделювання динаміки замкнутої системи в перехідних режимах

Після визначення всіх параметрів структурної схеми (рис. 2.5) виконано моделювання системи керування в пакеті MATLAB/Simulink. Підсистема Bas1 здійснює масштабування координат у відносних одиницях: масштаб потокозчеплення $\Psi_b = 6,151$ Вб; масштаб швидкості $\omega_{rb} = 104,72$ рад/с; масштаб активної складової струму $I_{1b} = 149,796$ А. Максимальна напруга системи керування $U_{нз} = 10$ В.

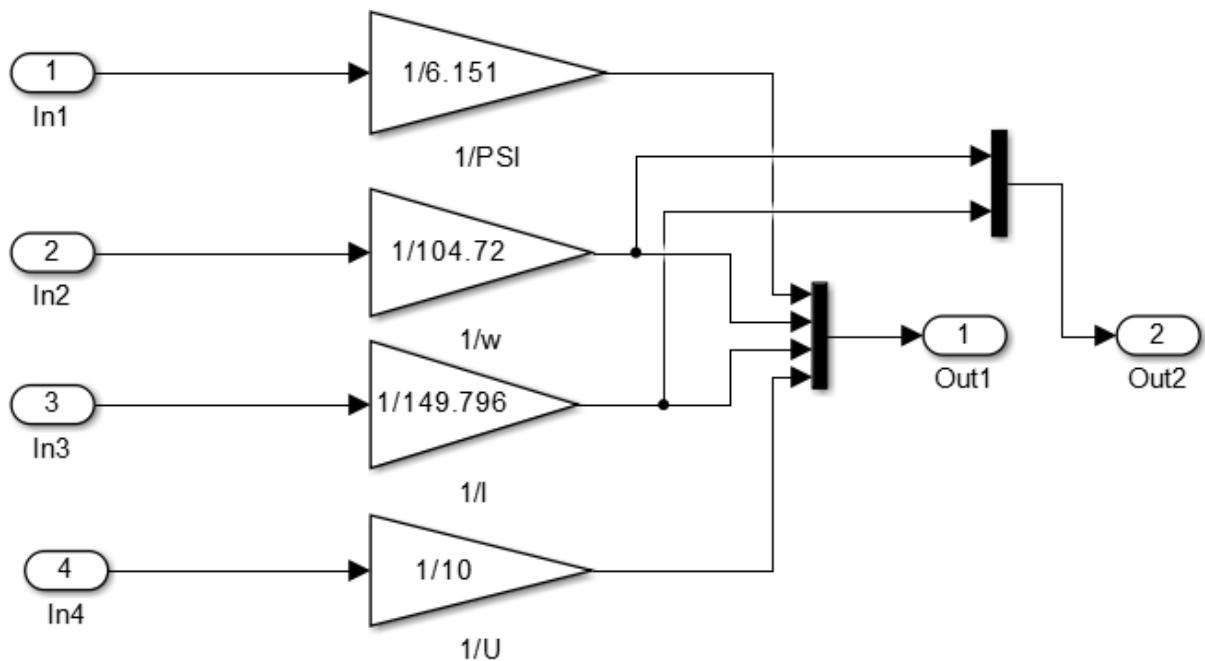


Рис. 2.6. Підсистема Bas1
(розроблено автором)

2.7 Аналіз якісних показників системи керування

За результатами моделювання отримано такі показники:

- пусковий струм не перевищує 3 In, на відміну від прямого пуску (5-7 In);
- перерегулювання за струмом не перевищує 4,3 %, що відповідає налаштуванню на модульний оптимум;
- при прикладенні навантаження ($t = 0,5$ с) статизм за швидкістю становить менше 1 %;
- регулятор швидкості функціонує відповідно до розрахункових параметрів.

Розроблена система керування задовольняє технологічним вимогам до електропривода конвеєра розливної машини.

Рис. 2.7. Модель системи керування електроприводом у MATLAB/Simulink
(розроблено автором)

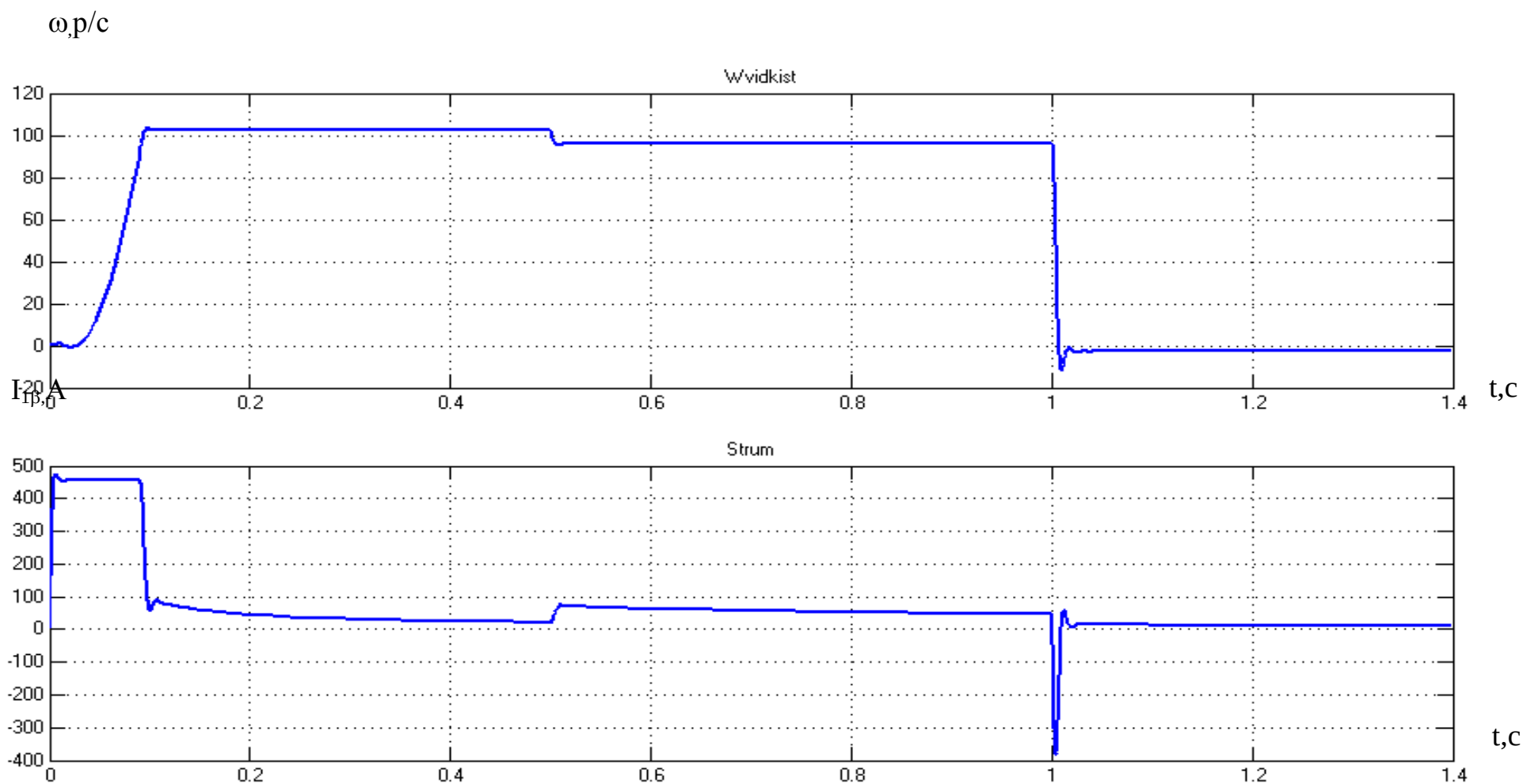


Рис. 2.8. Перехідні процеси при пуску (абсолютні одиниці)
(розроблено автором)

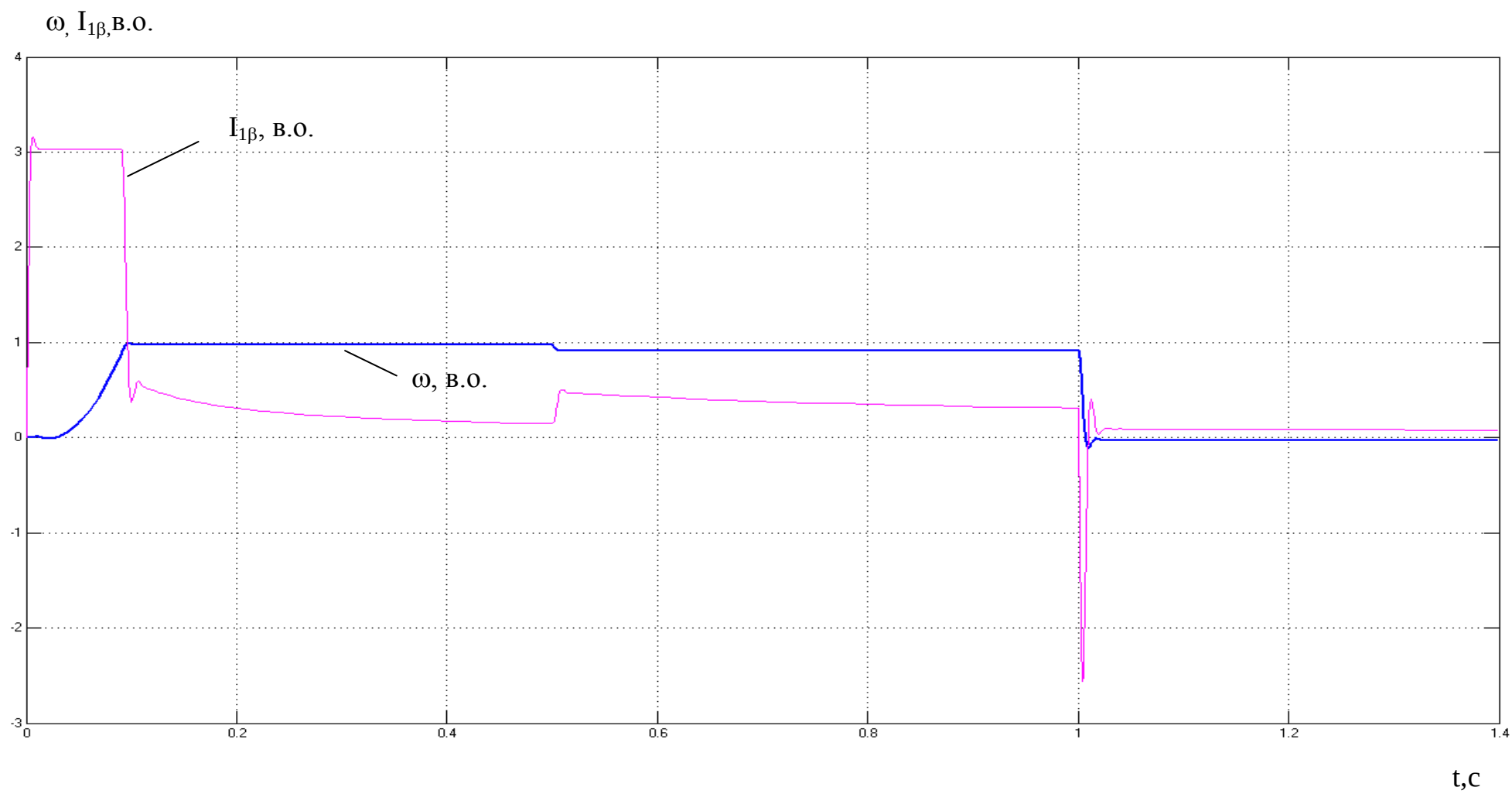


Рис. 2.9. Перехідні процеси при пуску (відносні одиниці)
(розроблено автором)

2.8 Принципова схема системи керування

Принципову схему системи керування наведено на рис. 2.10. Живлення перетворювача здійснюється від трифазної мережі 6 кВ через трансформатор ТМГ 40/6 та автоматичний вимикач QF1. Через вимикач QF2 підключено трансформатор 380/220 В для гальванічної розв'язки.

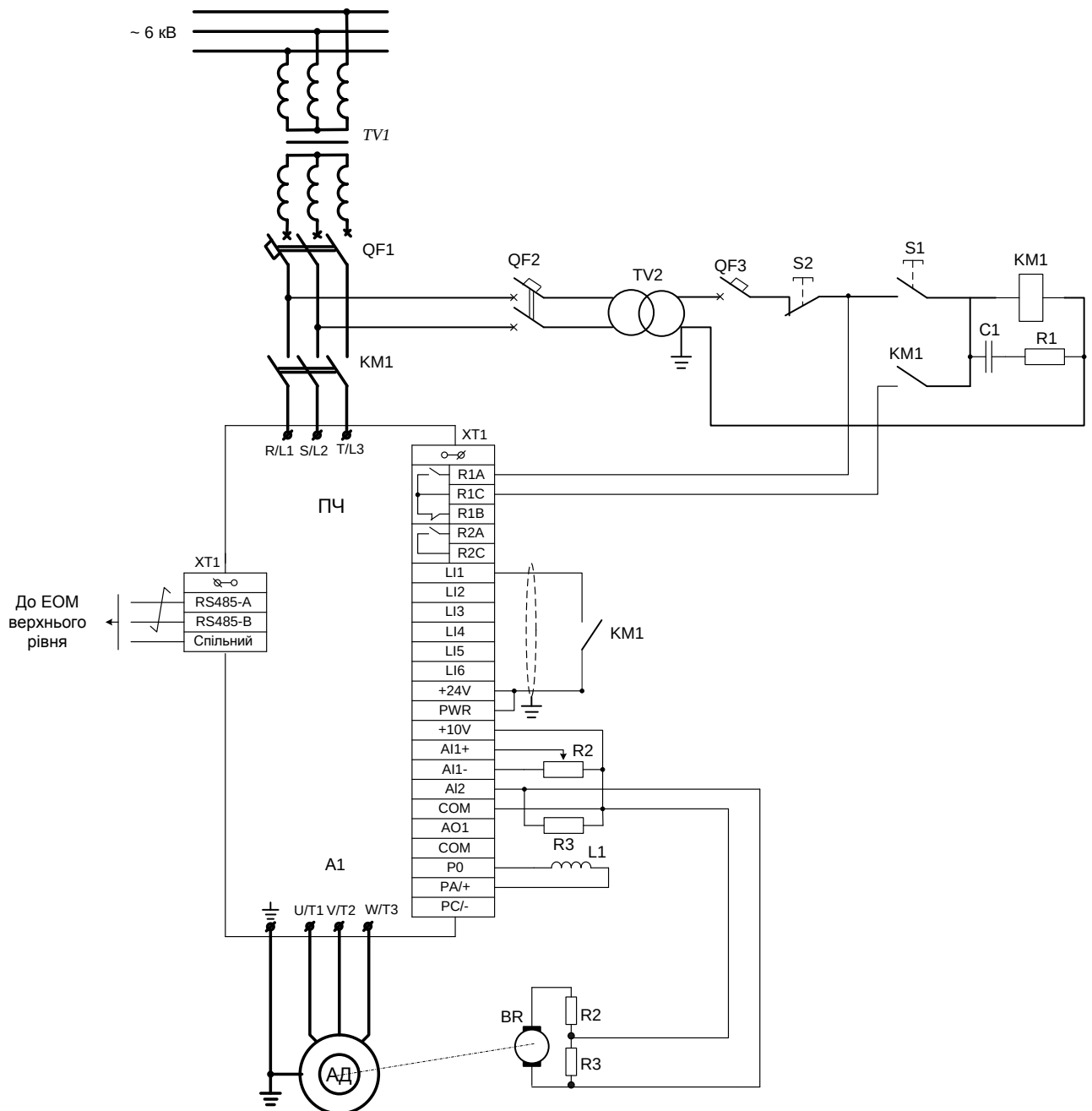


Рис. 2.10. Принципова схема системи керування
(розроблено автором)

Датчик швидкості живиться від вбудованого блока +24 В перетворювача частоти. При натисканні кнопки S1 втягується контактор KM1, що подає напругу на ПЧ та активує вхід LI1. За появи сигналу LI1 перетворювач замикає ключ R1A-R1C, дублюючи ланцюг кнопки S1. З резистора R2 знімається еталонна напруга, пропорційна завданню за швидкістю. Для згладжування гармонік струму встановлено дросель L1. Усі металеві корпуси заземлено. Параметри роботи ПЧ передаються на верхній рівень АСУ за протоколом Modbus TCP.

2.9 Функції та призначення системи регулювання швидкості конвеєра

2.9.1 Постановка задачі

У ході транспортування гарячого металу в мульдах конвеєра чавун поступово охолоджується. Для підтримання оптимальної температури злитків на момент вивантаження необхідно регулювати швидкість руху конвеєра відповідно до поточної температури металу.

2.9.2 Керуючі, збурювальні та регульовані параметри

На підставі аналізу технологічного процесу визначено: регульований параметр - швидкість руху стрічки, що задається залежно від температури металу; регулюючий вплив - зміна амплітуди та частоти живильної напруги двигуна; зовнішні збурення - температура й в'язкість розливного металу, рівень заповнення мульд, температура та тиск охолодної води, зміна опору руху. Контрольовані параметри: швидкість стрічки, температура металу, температура охолодженої води.

2.9.3 Основні функції системи

Система автоматичного управління процесом розливання чавуну виконує такі функції: збір первинної технологічної інформації; обробку даних за заданими алгоритмами; формування керуючих сигналів; реалізацію виробленого керуючого впливу. Ключові функції САУ приводами конвеєра: індивідуальна корекція частоти обертання кожного привода та синхронізація швидкостей стрічок.

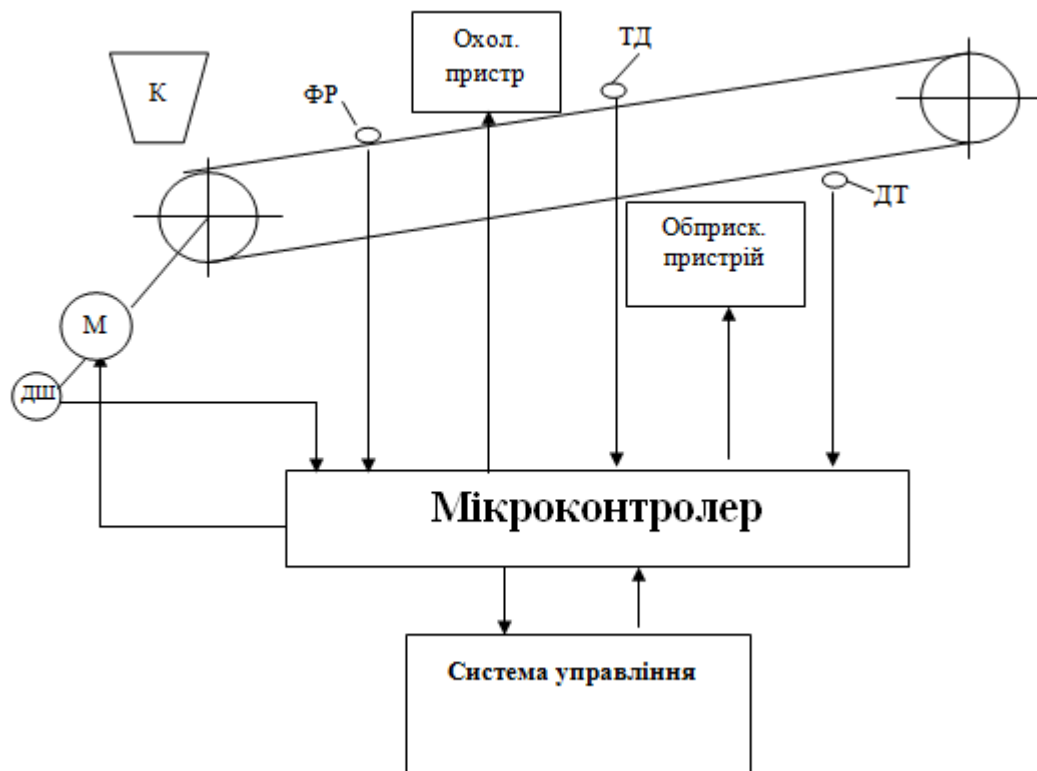


Рис. 2.11. Структурна схема управління розливною машиною
(розроблено автором)

На рис. 2.11 позначено: К - ківш; М - привод конвеєра; ДШ - датчик швидкості; ФР - фотореле; ОхолПр - охолоджувальний пристрій; ТД - датчик тиску; ДТ - датчик температури обприскувача.

2.11 Інформаційне забезпечення автоматичної системи управління

При комплексній автоматизації розливної машини враховуються специфічні вимоги до збору й обробки вихідної інформації. Істотним резервом підвищення продуктивності є оснащення засобами обчислювальної техніки.

До керуючої машини надходить інформація: про розливання (температура чавуну в ковші, рівень заповнення жолоба, швидкість стрічок, положення мульд, температура злитків до охолодження); про охолодження (наявність і тиск охолодної води, витрата); про вибивку (температура злитків, час і кількість мульд); про обприскування (положення мульд, температура, наявність і тиск вапнового розчину).

Схема на рис. 2.13 містить такі елементи та параметри контролю: 1 – розливальний ківш; 2 – напрямний жолоб; 3 – транспортний конвеєр; 4 – вимірювач швидкості руху стрічки; 5 – оптичний датчик позиціонування; 6 – блок охолодження; 7 – термопара (датчик температури); 8 – механізм вибивки; 9 – система зрошення; 10 – сигнал про наявність ковша, заповненого чавуном; 11 – температура металу під час розливки; 12 – контроль заповнення жолоба; 13 – імпульс швидкості транспортування; 14 – сигнал від фотодатчика про проходження заповнених мульд; 15 – параметри охолоджувального контуру (наявність води та робочий тиск); 16 – температура чавуну після етапу охолодження; 17 – контроль системи подачі вапняного розчину (тиск та наявність); 18 – сигнал про розташування вільних мульд; 19 – нагрів порожніх мульд після вибивки чушок; 20 – дані про ступінь очищення мульд від залишків металу; 21 – контрольний фотодатчик.

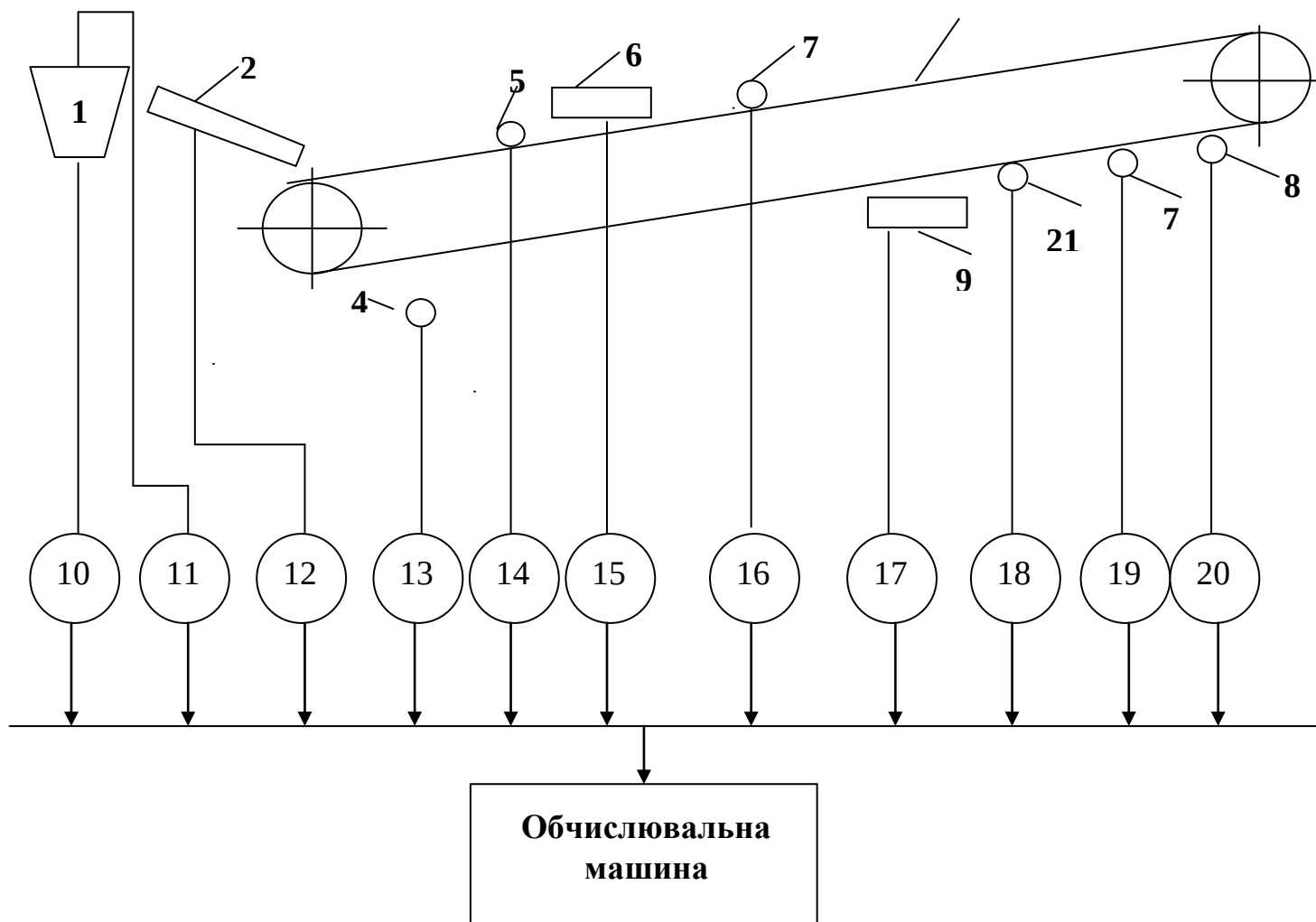


Рис. 2.13. Функціональна схема інформаційно-керуючої системи розливної машини
(розроблено автором)

2.12 Алгоритми роботи системи управління розливною машиною

2.12.1 Алгоритм управління охолодженням злитків

Режим охолодження чушок на стрічці визначається маркою чавуну й температурою металу при розливанні, а регулюється витратою охолодної води, ступенем заповнення мульд та швидкістю стрічок. При максимально допустимій швидкості злитки повинні повністю затвердіти до кінця конвеєра. Надмірне охолодження (чушки розбиваються при падінні) усувається збільшенням швидкості; рідкі чушки при вивантаженні - підвищенням витрати води або зменшенням заповнення мульд.

2.12.2 Алгоритм управління швидкістю транспортування злитків

При невідрегульованій швидкості можливі ситуації, коли злитки не встигають затвердіти й виливаються на розвантажувальному кінці або занадто рано тверднуть і б'ються. Регулювання швидкості виключає ці явища. При ознаках виливання конвеєр тимчасово зупиняють для додаткового охолодження, розраховують нову знижену швидкість і поновлюють розливання.

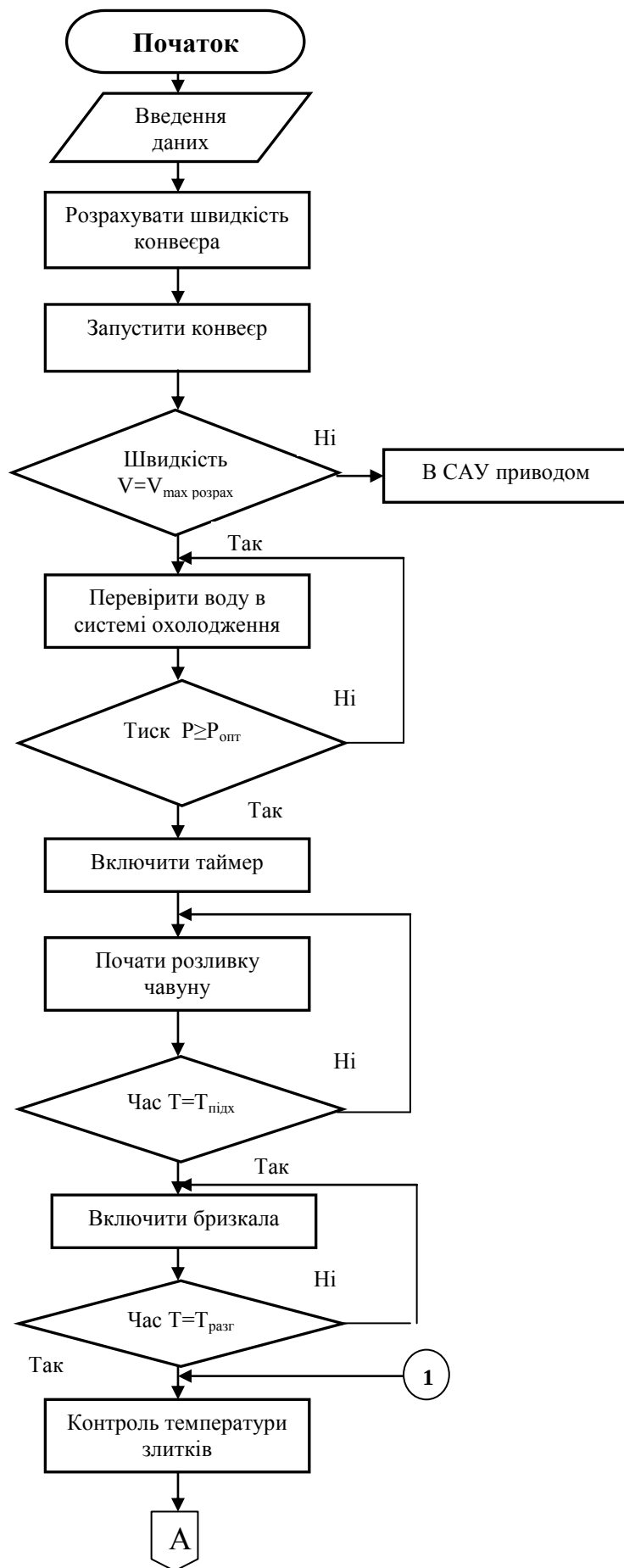


Рис. 2.14. Алгоритм управління охолодженням злитків, аркуш 1
(розроблено автором)

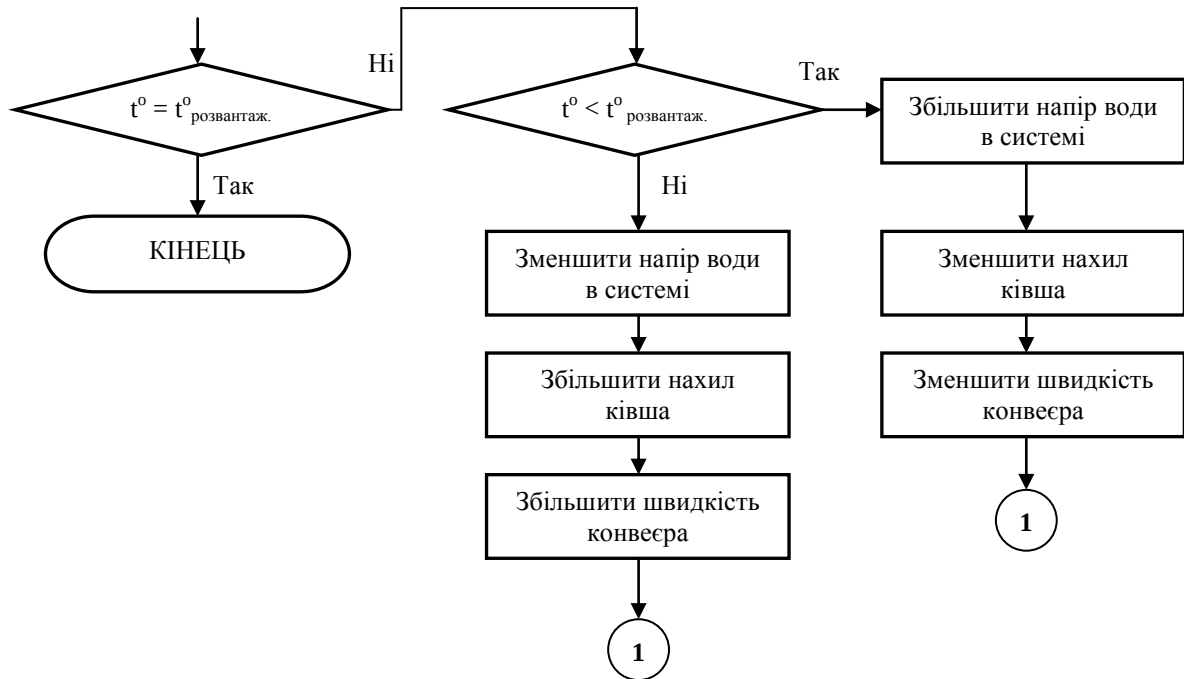


Рис. 2.14., аркуш 2
(розроблено автором)

Оббризування порожніх мульд вапняним розчином автоматизовано за сигналом таймера. Воду для охолодження подають лише під повні мульди, щоб запобігти зволоженню вапнового покриття порожніх.

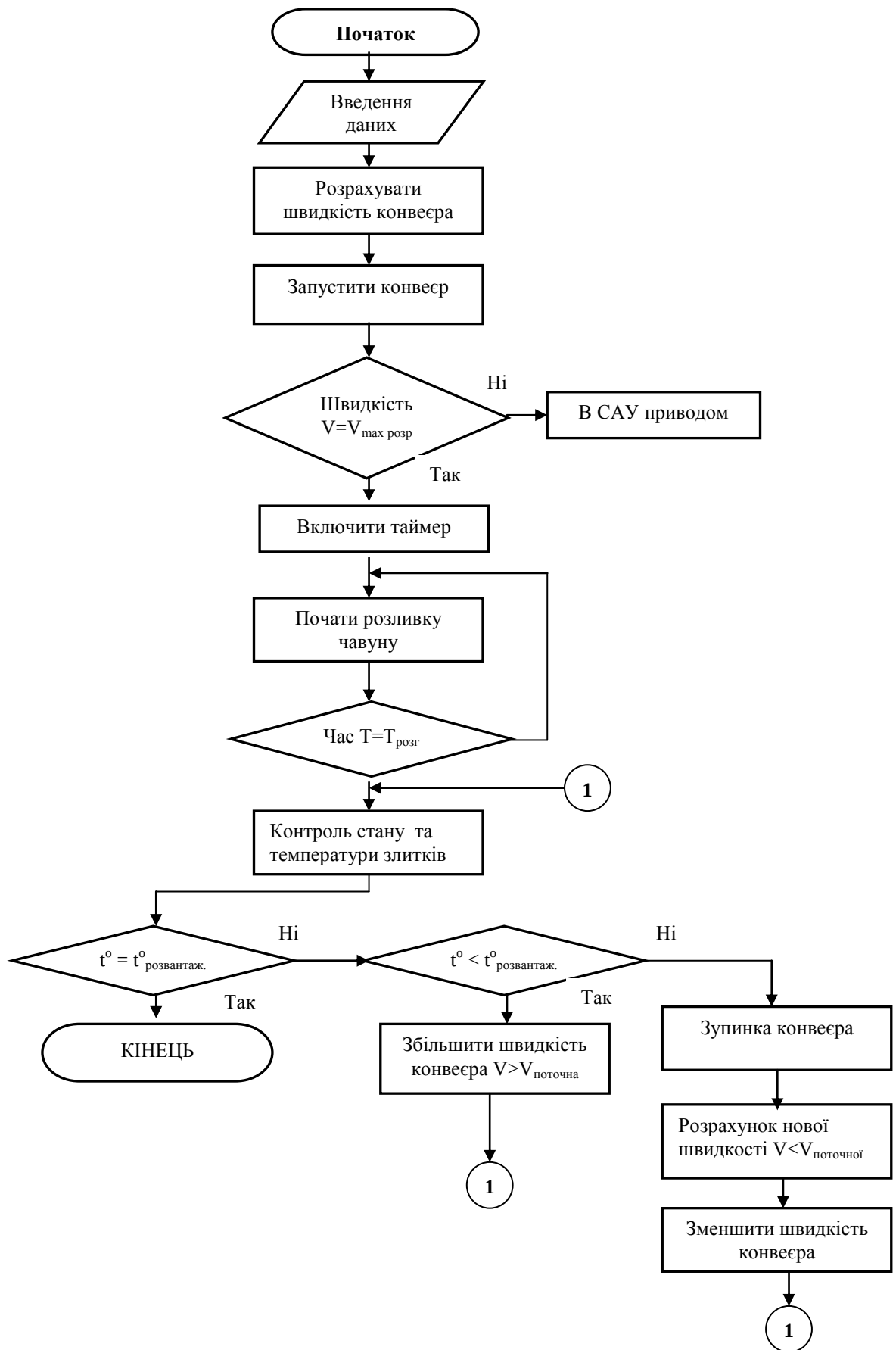


Рис. 2.15. Алгоритм управління швидкістю транспортування злитків
(розроблено автором)

2.13 Вибір засобів автоматизації

2.13.1 Вибір контролера

Систему автоматичного управління побудовано на базі програмованого логічного контролера SIMATIC S7-1500 CPU 1515-2 PN виробництва Siemens AG (Німеччина). Контролери серії SIMATIC S7-1500 орієнтовані на завдання середнього та великого масштабу автоматизації, програмуються мовами стандарту IEC 61131-3 у середовищі TIA Portal V18 (LAD, FBD, STL, SCL, GRAPH).

Основні характеристики контролера: робоча пам'ять для коду програми - 1 Мбайт, для даних - 5 Мбайт; час виконання булевих операцій - 10 нс; вбудовані інтерфейси PROFINET (2 порти) та PROFIBUS DP; підтримка віддалених модулів вводу-виводу ET 200; ступінь захисту IP20; діапазон робочих температур 0-60 °C; вологість 5-95 % без конденсату.

2.13.5 Аналіз вхідних та вихідних сигналів системи

Для коректного вибору модулів розширення контролера SIMATIC S7-1500 необхідно провести аналіз усіх вхідних та вихідних сигналів, що формуються технологічним обладнанням розливної машини або надходять до нього. Перелік сигналів з визначенням їх типів та джерел наведено в табл. 2.5.

**Перелік вхідних та вихідних сигналів системи автоматизації розливної
машини**

№	Найменування сигналу	Тип / рівень сигналу	Пристрій-джерело / виконавець
1	2	3	4
ВХІДНІ СИГНАЛИ			
1	Наявність металу в жолобі	DI / 24 В DC	Фотодатчик SICK WT24-2B410
2	Рівень металу в жолобі (нижня межа)	DI / 24 В DC	Фотодатчик SICK WT24-2B410
3	Рівень металу в жолобі (верхня межа)	DI / 24 В DC	Фотодатчик SICK WT24-2B410
4	Температура злитків у мультях 1	AI / 4-20 мА	Пірометр Optris CTlaser 3М
5	Температура злитків у мультях 2	AI / 4-20 мА	Пірометр Optris CTlaser 3М
6	Поточна швидкість стрічки 1	AI / 4-20 мА	Енкодер SICK DFS60 (з виходом ПЧ)
7	Поточна швидкість стрічки 2	AI / 4-20 мА	Енкодер SICK DFS60 (з виходом ПЧ)
8	Тиск охолодної води (контур 1)	AI / 4-20 мА	Е+Н Cerabar PMC51
9	Тиск охолодної води (контур 2)	AI / 4-20 мА	Е+Н Cerabar PMC51
10	Наявність чушок після вибивки	DI / 24 В DC	Фотодатчик SICK WT24-2B410

Продовження табл. 2.5

1	2	3	4
11	Наявність вапняного розчину (рівень)	DI / 24 В DC	Поплавковий перемикач
12	Температура мульд перед обприскуванням	AI / 4-20 мА	Пірометр Optris CTlaser 3М
13	Готовність перетворювача частоти 1	DI / 24 В DC	Altivar ATV930 (вихід READY)
14	Готовність перетворювача частоти 2	DI / 24 В DC	Altivar ATV930 (вихід READY)
15	Аварія перетворювача частоти 1	DI / 24 В DC	Altivar ATV930 (вихід FAULT)
16	Аварія перетворювача частоти 2	DI / 24 В DC	Altivar ATV930 (вихід FAULT)
ВИХІДНІ СИГНАЛИ			
17	Завдання швидкості стрічки 1	АО / 4-20 мА	Altivar ATV930 (вхід AI1)
18	Завдання швидкості стрічки 2	АО / 4-20 мА	Altivar ATV930 (вхід AI1)
19	Пуск привода конвеєра 1	DO / 24 В DC	Altivar ATV930 (вхід LI1)
20	Пуск привода конвеєра 2	DO / 24 В DC	Altivar ATV930 (вхід LI1)
21	Зупинка привода конвеєра 1	DO / 24 В DC	Altivar ATV930 (вхід LI2)
22	Зупинка привода конвеєра 2	DO / 24 В DC	Altivar ATV930 (вхід LI2)

1	2	3	4
22	Зупинка привода конвеєра 2	DO / 24 В DC	Altivar ATV930 (вхід LI2)
23	Відкриття клапана подачі води (контур 1)	DO / 24 В DC	Bürkert 6281 (соленоїд)
24	Відкриття клапана подачі води (контур 2)	DO / 24 В DC	Bürkert 6281 (соленоїд)
25	Клапан подачі вапняного розчину	DO / 24 В DC	Bürkert 6281 (соленоїд)
26	Сигналізація аварійного стану (сирена)	DO / 24 В DC	Звуковий оповіщувач
27	Сигналізація по шині PROFINET (обмін)	Мережа / PROFINET	HMI Weintek MT8103iE

Підрахунок сигналів за типами: дискретних входів (DI) - 10 шт.; аналогових входів (AI) - 7 шт.; дискретних виходів (DO) - 8 шт.; аналогових виходів (AO) - 2 шт. З урахуванням резерву каналів 20 % визначено потребу в модулях: DI - 12 каналів (1 модуль на 16 DI), AI - 9 каналів (2 модулі на 8 AI кожен або 1 модуль на 16 AI), DO - 10 каналів (1 модуль на 16 DO), AO - 3 канали (1 модуль на 4 AO).

2.13.6 Вибір модулів розширення контролера

На основі виконаного аналізу сигналів обрано такі сигнальні модулі серії S7-1500 виробництва Siemens AG (Німеччина), сумісні з CPU 1515-2 PN за шиною PROFINET та інтерфейсним модулем backplane.

Модуль дискретних входів SM 521 DI16 x 24 VDC HF обрано для прийому сигналів від фотодатчиків, кінцевих вимикачів, вихідних сигналів готовності та аварії перетворювачів частоти. Технічні характеристики модуля наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

**Технічні характеристики модуля дискретних входів Siemens SM 521 DI16
[10]**

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник (країна)	-	Siemens AG (DE)
2	Тип модуля	-	SM 521 DI16 x 24 VDC HF (6ES7521-1BH10-0AA0)
3	Кількість дискретних входів	шт.	16
4	Номінальна напруга вхідного сигналу	V DC	24
5	Рівень "1" (вхідний струм)	мА	$\geq 7,0$
6	Час затримки вхідного сигналу	мс	0,05-20
7	Напруга живлення модуля	V DC	24
8	Споживана потужність	Вт	$\leq 4,5$
9	Ступінь захисту	-	IP20
10	Діагностика	-	Обрив провідника, перенапруга

Модуль аналогових входів SM 531 AI8 x U/I HS обрано для прийому сигналів від пірометрів Optris CTlaser 3M та перетворювачів тиску

Endress+Hauser PMC51 у стандарті 4-20 мА. Обрано два модулі загальним числом 16 аналогових каналів; технічні характеристики наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Технічні характеристики модуля аналогових входів Siemens SM 531 AI8

[10]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник (країна)	-	Siemens AG (DE)
2	Тип модуля	-	SM 531 AI8 x U/I HS (6ES7531-7KF00-0AB0)
3	Кількість аналогових входів	шт.	8
4	Діапазон вхідного струмового сигналу	мА	4-20
5	Роздільна здатність (розрядність АЦП)	біт	16
6	Основна похибка	%	$\pm 0,05$
7	Час перетворення на канал	мкс	62,5
8	Напруга живлення модуля	В DC	24
9	Споживана потужність	Вт	$\leq 5,0$
10	Ступінь захисту	-	IP20
11	Підтримка режиму HART	-	Так

Модуль аналогових виходів SM 532 AO4 x U/I ST обрано для формування аналогових сигналів завдання швидкості (4-20 мА) до перетворювачів частоти Altivar ATV930. Технічні характеристики наведено в табл. 2.8.

Технічні характеристики модуля аналогових виходів Siemens SM 532 AO4**[10]**

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник (країна)	-	Siemens AG (DE)
2	Тип модуля	-	SM 532 AO4 x U/I ST (6ES7532-5HD00-0AB0)
3	Кількість аналогових виходів	шт.	4
4	Діапазон вихідного струмового сигналу	мА	4-20
5	Роздільна здатність (розрядність ЦАП)	біт	16
6	Основна похибка	%	$\pm 0,1$
7	Навантаження при I-виході	Ом	≤ 600
8	Час встановлення виходу	мс	$\leq 0,5$
9	Напруга живлення модуля	В DC	24
10	Споживана потужність	Вт	$\leq 6,0$

Модуль дискретних виходів SM 522 DQ16 x 24 VDC/0.5A HF обрано для формування команд керування перетворювачами частоти (пуск/зупинка), соленоїдними клапанами та сигнальним оповіщувачем. Технічні характеристики наведено в табл. 2.9.

Технічні характеристики модуля дискретних виходів Siemens SM 522 DQ16**[10]**

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник (країна)	-	Siemens AG (DE)
2	Тип модуля	-	SM 522 DQ16 x 24 VDC/0.5A HF (6ES7522-1BH10-0AA0)
3	Кількість дискретних виходів	шт.	16
4	Номінальна напруга виходу	V DC	24
5	Максимальний струм на канал	A	0,5
6	Тип виходу	-	Транзистор (PNP, Source)
7	Час вмикання / вимикання	мкс	≤ 30 / ≤ 100
8	Напруга живлення	V DC	24
9	Споживана потужність	Вт	$\leq 4,5$
10	Ступінь захисту	-	IP20
11	Діагностика	-	Обрив провідника, КЗ

Усі обрані модулі монтуються на профільні рейки шафи керування разом із CPU 1515-2 PN, з'єднуються через U-коннектори та живляться від системного блока живлення Siemens PS 60W 24/48/60V DC (6ES7505-0KA00-0AB0).

Конфігурація апаратних засобів виконується в TIA Portal V18 у вигляді апаратної конфігурації проекту.

2.13.2 Вибір датчика температури

Для безконтактного вимірювання температури мульт із металом застосовано стаціонарний інфрачервоний пірометр Optris CTlaser 3M виробництва Optris GmbH (Німеччина). Прилад призначений для безконтактного вимірювання температури поверхні за тепловим випромінюванням з лазерним прицілюванням, передачі результатів за уніфікованим струмовим сигналом та інтерфейсом RS-485 для архівації в системі АСУ ТП.



Рис. 2.16. Зовнішній вигляд пірометра Optris CTlaser 3M

([8])

Технічні характеристики пірометра Optris CTlaser 3M [8]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	Optris GmbH (Німеччина)
2	Діапазон вимірювання	°C	100-1800
3	Спектральний діапазон	мкм	2,3
4	Показник візування	-	75:1
5	Роздільна здатність	°C	0,1
6	Постійна часу	мс	1
7	Вихідний сигнал	-	4-20 мА / RS-485
8	Напруга живлення	В	8-36
9	Похибка вимірювання	%	±0,5
10	Відстань до об'єкта	м	0,3-30
11	Маса	кг	0,4

2.13.3 Вибір фотодатчика

Для визначення місцезнаходження повних або порожніх мульд застосовано фотодатчик SICK WT24-2B410 (виконання для гарячих об'єктів) виробництва SICK AG (Німеччина). Пристрій виявляє нагріті об'єкти за інфрачервоним випромінюванням, живиться постійним струмом 24 В, не потребує спеціального обслуговування та має ступінь захисту IP67.



Рис. 2.17. Зовнішній вигляд фотодатчика SICK WT24-2B410

([9])

Таблиця 2.11

Технічні характеристики фотодатчика SICK WT24-2B410 [9]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	SICK AG (Німеччина)
2	Напруга живлення	В	24 (10-30)
3	Споживана потужність	Вт	≤1,5
4	Вихідний сигнал	-	PNP, 100 мА
5	Кут зору	°	≤1,5
6	Температура середовища	°C	-30...+70
7	Відносна вологість	%	≤95
8	Час спрацьовування	мс	≤1
9	Відстань до об'єкта	м	1,5-10
10	Маса	кг	≤0,3

2.13.4 Датчики тиску

Для контролю тиску в системі охолодження застосовано перетворювачі тиску Endress+Hauser Cerabar PMC51 виробництва Endress+Hauser (Швейцарія/Німеччина). Прилади серії Cerabar PMC51 призначені для неперервного перетворення вимірюваного тиску в уніфікований струмовий (4-20 мА) та цифровий (HART, PROFIBUS PA, FOUNDATION Fieldbus) сигнал. Серія охоплює перетворювачі надлишкового та абсолютного тиску. Вимірювані середовища: рідини, пара, газ. Діапазон вимірювання від 0-100 мбар до 0-400 бар. Клас точності - 0,075 %. Має сертифікати ATEX, IECEx, метрологічну сертифікацію в Україні.

2.14 Охорона праці

2.14.1 Аналіз умов праці

2.14.1.1 Організація робочого місця

Відповідно до санітарних норм проектування промислових підприємств, доменні цехи розміщують відносно населених пунктів з підвітряного боку. Доменний цех належить до підприємств першого класу з санітарно-захисною зоною 1000 м. Він розташований на відстані 4 км від найближчого населеного пункту в умовах природного провітрювання. Поздовжня вісь ливарного двору орієнтована під кутом 60° до пануючих вітрів для запобігання пилового забруднення адміністративних будівель. Освітленість території - $E_n = 100$ лк; висота виробничих приміщень - не менше 6 м [11; 12].

2.14.1.2 Мікроклімат виробничих приміщень

Для ділянки АСУ ТП встановлено нормативи мікроклімату згідно з [14]. Фактичні та допустимі значення наведено в табл. 2.14.1.

Таблиця 2.12

Параметри мікроклімату ділянки АСУ ТП [14]

Сезон	Темп. норм., °С	Темп. факт., °С	Волог. норм., %	Волог. факт., %	Швидкість, м/с
Холодний	18-20	20-24	75	40-50	≤0,3
Теплий	21-23	35	55	40	≤0,4

Основними джерелами тепла в приміщенні є: мікропроцесори систем автоматичного управління, допоміжне й сервісне обладнання, прилади освітлення.

2.14.1.3 Шкідливі речовини

У доменному процесі утворюються: оксид вуглецю CO, диоксид сірки SO₂, вуглеводні C_nH_m та ціаністі сполуки. Доменний газ (CO, N₂, CO₂, H₂) за різного впливу на організм може викликати отруєння і задуху. Виробничий пил утворюється при завантаженні шихти, випуску чавуну і шлаку. Питоме виділення пилу на рудному дворі досягає 50 г/т чавуну; концентрація коливається від 17 до 1500 мг/м³. Відносний внесок металургійних виробництв у викиди шкідливих речовин наведено в табл. 2.13; концентрації в доменному цеху - в табл. 2.14.

Таблиця 2.13

Відносна кількість викидів шкідливих речовин металургійних виробництв [13]

Виробництво	Пил, %	SO ₂ , %	NO _x , %	CO, %
Агломераційне	40,3	60,76	26,0	77,8
Доменне	18,7	0,30	3,0	3,5
Сталеплавильне	13,0	0,02	6,5	5,4
Прокатне	0,2	0,20	10,5	0,1

Концентрації шкідливих речовин у доменному цеху [14]

Речовина	ГДК, мг/м ³	Фактична концентрація, мг/м ³
Оксиди азоту	5	55
Магнезит	10	9
Сірчистий ангідрид	10	9,3
Кремнійвмісний пил	1	14
Глиноземвмісний пил	2	15
Пил вапна	3	5
Доломіт	6	10
Оксид вуглецю	20	18
Мінеральні масла	5	4,2

Вміст пилу в приміщеннях АСУ ТП не повинен перевищувати: 2 мг/м³ - для обслуговування локальної автоматики; 0,75 мг/м³ - для мікропроцесорної техніки.

2.14.1.4 Освітлення

Зорова робота в приміщенні відноситься до розряду VII (робота з матеріалами, що світяться, в гарячих цехах). Нормована освітленість: у приміщенні контролерів - не менше 500 лк; у приміщеннях датчиків - не менше 200 лк [15]. Рівень освітленості робочих приміщень наведено в табл. 2.15.

Таблиця 2.15

Рівень освітленості робочих приміщень [15]

№	Параметр	Одиниці виміру	Норматив	Факт
1	Освітленість в приміщенні контролерів	лк	500	400
2	Освітленість у приміщеннях датчиків	лк	200	140

2.14.1.5 Шум та вібрація

Персонал АСУ ТП підлягає впливу підвищеного рівня шуму від технологічного обладнання. Граничний рівень шуму для виробничих приміщень за [16] наведено в табл. 2.16. Вібрація в приміщеннях АСУ ТП не повинна перевищувати: за частотою - 25 Гц; за амплітудою - 0,1 мм.

Таблиця 2.16

Граничний рівень шуму для виробничих приміщень [16]

Вид діяльності	63 Гц	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц	дБА
Постійні робочі місця	95	87	82	78	75	73	71	69	80

2.14.1.6 Виробничі випромінювання та електробезпека

Джерелами теплового випромінювання є: розплавлений чавун (1420 °С), шлак (1450 °С), гарячий агломерат (500-700 °С), полум'я (1200 °С), нагріті поверхні та дуга електрозварювання. Інтенсивність інфрачервоного

опромінення на робочих місцях не повинна перевищувати 300 ккал/(м²·год) [13].

Приміщення чергового персоналу АСУ ТП відноситься до категорії без підвищеної небезпеки [17]. Електричні травми (від 25-30 мА) - місцеві опіки та металізація шкіри; електричні удари (більше 50 мА) - ураження внутрішніх органів. Струм 100 мА є смертельно небезпечним.

2.14.2 Заходи з охорони праці

2.14.2.1 Вимоги до персоналу та порядок допуску до роботи

Інструктажі за видом і часом проведення поділяються на: вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий [12]. Вступний інструктаж проводиться в кабінеті охорони праці за затвердженою програмою з використанням технічних засобів навчання; фіксується у відповідному журналі. Первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі проводить безпосередній керівник робіт із записом у журналі реєстрації інструктажів. Роботи підвищеної небезпеки виконуються за нарядом-допуском [13].

2.14.2.2 Нормалізація повітря робочої зони, освітлення, захист від шуму

Для зниження теплового навантаження застосовуються: вентилятори і кондиціонери, дрібнодисперсне розпилення води, холодне екранування. Кімнати відпочинку підтримують температуру 25-27 °С. Передбачається робоче, аварійне (для продовження роботи) та аварійне (для евакуації) освітлення відповідно до [15]. Для зниження шуму застосовується шумоізоляція, акустична обробка приміщень, акустичні екрани; рівень шуму знижується до 80 дБА [16].

2.14.2.3 Електробезпека та розрахунок захисного заземлення

Живлення цеху - 6 кВ трифазними лініями з ізолюованою нейтраллю. Розподіл по цеху - від знижувальних підстанцій (0,4 кВ) чотирипровідними лініями. Заходи безпеки: зняття напруги при ремонтах, захисне заземлення ($R_t \leq 4 \text{ Ом}$) згідно з [17], застосування малої напруги (36 В) у небезпечних зонах.

У цьому підрозділі наведено лише підсумок розрахунку захисного заземлення; повний покроковий розрахунок винесено у Додаток В. За результатами розрахунку: розрахунковий струм замикання на землю $I_t = 225 \text{ А}$; опір одного трубчастого заземлювача $R_{tr} \approx 38,2 \text{ Ом}$; кількість заземлювачів $n = 5$ шт.; опір сполучних смуг $R_p \approx 8,7 \text{ Ом}$; загальний опір групового заземлювача $R_{gr} \approx 3,9 \text{ Ом} \leq 4 \text{ Ом}$ - умова [17] виконана.

2.14.2.4 Захист від ударів блискавки

Застосовано блискавкозахист II категорії, зона захисту Б згідно з [18]. При грозовій активності понад 10 год/рік будівлю цеху захищено одиночним стрижневим блискавковідводом, встановленим на димарі висотою $h = 45 \text{ м}$.

2.14.3 Пожежна безпека

За вибухопожежною небезпекою доменний цех відноситься до категорії «Г» (обробка негорючих матеріалів у розпеченому стані) згідно з [19]. Будівлі - II ступінь вогнестійкості. Основні ризики: спалахування електрообладнання при перевантаженнях або КЗ (клас Е); спалах і вибух горючих газоповітряних сумішей (клас Z). Для запобігання пожежам передбачено: теплові реле і плавкі запобіжники; прокладку кабелів у металевих трубах; відведення статичного заряду; систему автоматичної пожежної сигналізації. Первинні засоби пожежогасіння наведено в табл. 2.17.

Таблиця 2.17

Первинні засоби пожежогасіння для ділянки АСУ ТП [19]

Категорія	Площа, м ²	Кіл. щитів	ВВП-10	Порошкові (10 л)	СО ₂ (5 л)
Г	800	3	4	2	1
Е	1800	2	2	1	2

2.14.4 Засоби індивідуального захисту

ЗІЗ і спецодяг видаються безкоштовно відповідно до [20] і штатного розкладу підприємства. Перелік ЗІЗ для персоналу АСУ ТП наведено в табл. 2.18; захисні засоби з електробезпеки - в табл. 2.19.

Таблиця 2.18

Перелік ЗІЗ для персоналу АСУ ТП [20]

№	Посада	К-сть	ЗІЗ	Строк, міс.
1	Майстер АСУ ТП	1	Костюм х/б; черевики шкіряні; куртка ватяна	12; 12; 36
2	Інженер-програміст	2	Костюм х/б; черевики; куртка ватяна	12; 12; 36
3	Черговий слюсар	5	Костюм х/б; черевики; куртка ватяна	12; 12; 36
4	Слюсар АСУ ТП	5	Костюм х/б; черевики; куртка ватяна	12; 12; 36

Захисні засоби з електробезпеки та строки їх випробувань [17]

№	Найменування	Строки випробувань
1	Ізолювальні штанги	1 раз на 2 роки
2	Вимірювальні кліщі	1 раз на 2 роки
3	Ізолювальні кліщі	1 раз на 2 роки
4	Діелектричні рукавички	2 рази на рік
5	Інструмент з ізольованими ручками до 1000 В	1 раз на рік
6	Показчик напруги вище 1000 В	1 раз на 2 роки
7	Діелектричні боти	1 раз на 3 роки

2.14.5 Санітарно-гігієнічні та ергономічні вимоги

До складу санітарно-побутових приміщень входять: гардеробні, вмивальні, душові, туалети, питні фонтанчики, їдальня, здравпункт. Кількість душових сіток - 1 на 3 особи (40 шт.); кранів у вмивальниках - 1 на 20 осіб (6 шт.). Їдальня розрахована на 30 місць (1 місце на 4 особи). Убиральні розміщені не далі 50 м від робочих місць.

Колірне оформлення виробничих приміщень: теплі тони (червоний, жовтогарячий, жовтий) і холодні (синьо-фіолетовий, синій, синьо-зелений). Холодні тони знижують нервову напругу; насичені теплі - зменшують стомлюваність від монотонної роботи; зелені тони - послаблюють вплив шуму.

У дипломному проекті на підставі чинної законодавчої та нормативно-правової бази України розроблено заходи з охорони праці, що захищають працівників від впливу виявлених шкідливих і небезпечних факторів виробництва.

ВИСНОВКИ

У дипломному проекті розроблено автоматизовану систему регулювання приводу конвеєра чавунно-розливної машини за схемою ПЧ-АД.

Досліджено характеристики технологічного процесу розливання чавуну. Обрано асинхронний електродвигун WEG W22 IE3 225M/6 ($P_n = 30$ кВт) виробництва WEG як найбільш енергоефективний варіант приводу.

Розраховано параметри схеми заміщення асинхронного двигуна (повний розрахунок - у Додатку А) та обґрунтовано систему регулювання технологічних параметрів. Для управління електроприводом прийнято векторну систему на базі перетворювача частоти Schneider Electric Altivar Process ATV930D30N4.

Виконано синтез регуляторів струму, потоку та швидкості з налаштуванням на модульний оптимум (повний розрахунок - у Додатку Б).

Векторне керування дозволяє незалежно та практично безінерційно регулювати швидкість і момент на валу двигуна, що забезпечує: високу точність регулювання швидкості; плавний пуск і рівномірне обертання в усьому діапазоні частот; швидку реакцію на зміну навантаження (мінімальний статизм); розширений діапазон управління та зниження витрат на нагрів.

Моделювання в середовищі MATLAB/Simulink підтвердило розрахункові показники якості: пусковий струм не перевищує $3 I_n$; перерегулювання за струмом - до 4,3 % (модульний оптимум); статизм за швидкістю при навантаженні - менше 1 %.

У підрозділі 2.14 проаналізовано умови праці на ділянці АСУ ТП, обґрунтовано заходи захисту від шкідливих чинників та виконано розрахунок захисного заземлення (повний розрахунок - у Додатку В); умова $R_{гp} \leq 4$ Ом виконується.

Запропонована система регулювання забезпечує безпережимне розливання, стабілізацію температурного режиму та зниження частки бою чушок при транспортуванні, що в комплексі підвищує якість чушкового чавуну та енергоефективність виробництва.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Большаков В.І. Доменне виробництво: підручник. - Дніпро: НМетАУ, 2018. - 412 с.
2. Гасик М.І., Габдулін Т.Г. Машини та агрегати металургійних цехів: навч. посіб. - Дніпро: Видавництво НМетАУ, 2017. - 380 с.
3. WEG W22 IE3 General Purpose Three-Phase Electric Motors. Technical Catalogue. - WEG Equipamentos Elétricos S.A., 2023. - 96 p. URL: <https://www.weg.net>
4. Altivar Process ATV930/950 Variable Speed Drives. Catalogue. - Schneider Electric, 2024. - 224 p. URL: <https://www.se.com>
5. Попович М.Г., Лозинський О.Ю. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: підручник. - К.: Либідь, 2005. - 680 с.
6. Толочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану. - Донецьк: Норд-Прес, 2019. - 296 с.
7. Krishnan R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control. - Pearson, 2015. - 626 p.
8. Optris CTlaser 3M / 1M / 05M / 2M Operators Manual. - Optris GmbH, 2023. - 78 p. URL: <https://www.optris.com>
9. SICK WT24-2 Photoelectric Sensors. Operating Instructions. - SICK AG, 2023. - 32 p. URL: <https://www.sick.com>
10. Siemens SIMATIC S7-1500 Signal Modules SM 521/522/531/532. Hardware and Product Description. - Siemens AG, 2024. - 412 p. URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата звернення: 10.05.2026)
11. Endress+Hauser Cerabar PMC51 Technical Information TI00436P. - Endress+Hauser AG, 2024. - 84 p. URL: <https://www.endress.com>
12. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII (із змінами).

13. НПАОП 27.0-1.01-08. Правила охорони праці в металургійній промисловості.
14. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
15. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.
16. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
17. ПУЕ:2017. Правила улаштування електроустановок.
18. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд.
19. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
20. НПАОП 0.00-7.17-19. Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці.
21. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання.
21. Гушко С.В. Вимоги з оформлення письмових робіт у Державному університеті економіки і технологій. - Кривий Ріг: ДУЕТ, 2023. - 48 с.

А.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна та побудова швидкісних і механічних характеристик

А.1.1 Параметри двигуна та розрахункові співвідношення

У Додатку А наведено повний покроковий розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна WEG W22 IE3 225M/6 та побудову його швидкісних і механічних характеристик за методикою [5].

Спрощена схема заміщення асинхронного електродвигуна, прийнята для розрахунку, наведена на рис. А.1.

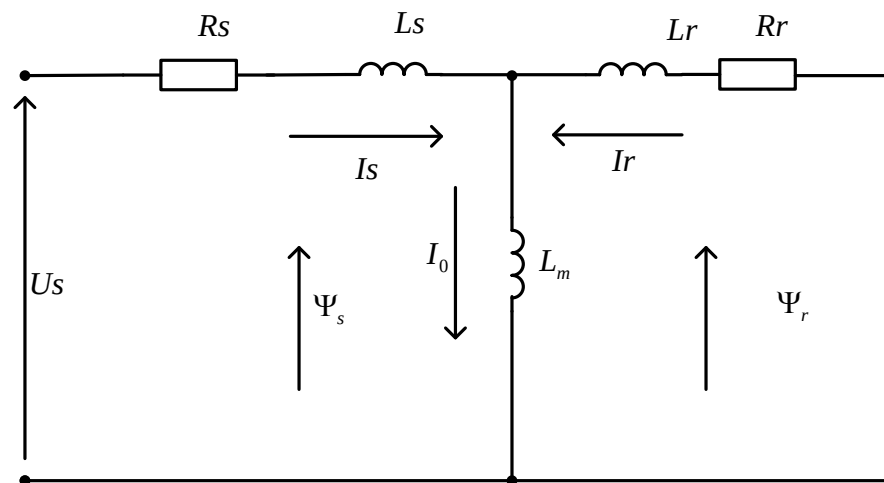


Рис. А.1. Схема заміщення асинхронного двигуна [5]

Вихідні паспортні дані двигуна (для зручності розрахунку): $P_n = 30$ кВт; $U_n = 380$ В (лінійна); $\cos \varphi = 0,84$; $\eta = 0,93$; $n_n = 985$ об/хв; $p_n = 3$; $s_n = 0,025$; $K_i = 6,5$; $K_r = 2,1$; $K_m = 3,0$; $J_{дв} = 0,35$ кг·м².

Швидкість холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p_n} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{3} = 104,72 \text{ рад/с} \quad (\text{A.1})$$

Номінальна швидкість:

$$\omega_{\text{ном}} = (1 - s_n) \cdot \omega_0 = (1 - 0,025) \cdot 104,72 = 102,10 \text{ рад/с} \quad (\text{A.2})$$

Номінальний момент:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{30\,000}{102,10} = 293,82 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (\text{A.3})$$

Пусковий момент:

$$M_p = K_p \cdot M_H = 2,1 \cdot 293,82 = 617,03 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (\text{A.4})$$

Номінальний струм статора:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{30\,000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9 \cdot 0,84} = 60,29 \text{ А} \quad (\text{A.5})$$

Струм намагнічування $I_0 \approx 24,02 \text{ А}$ (за каталожною характеристикою).

Активний опір ротора:

$$R_r = \frac{M_H \cdot \omega_0 \cdot s_H}{3 \cdot I'^2} = \frac{293,82 \cdot 104,72 \cdot 0,025}{3 \cdot 50,64^2} = 0,1 \text{ Ом} \quad (\text{A.6})$$

Активний опір статора ($\beta = 1,2$ - коефіцієнт твердості; $C_1 = 1,031$ - конструктивний коефіцієнт):

$$R_s = R_r \cdot \beta \cdot C_1 = 0,1 \cdot 1,2 \cdot 1,031 = 0,124 \text{ Ом} \quad (\text{A.7})$$

ЕРС ланки намагнічення $E \approx 205,53 \text{ В}$. Індуктивний опір контуру намагнічення:

$$X_m = \frac{E}{I_0} = \frac{205,53}{24,024} = 8,555 \text{ Ом} \quad (\text{A.8})$$

Розраховані індуктивності: $L_s = 0,084 \text{ Гн}$; $L_r = 0,085 \text{ Гн}$; $L_m = 0,082 \text{ Гн}$.
Коефіцієнт розсіювання $\sigma = 0,062$.

А.1.2 Швидкісні та механічні характеристики

Швидкісні характеристики двигуна, побудовані за частотами живлення $f_1 = 10, 20, 30, 40, 50$ Гц, наведено на рис. А.2; механічні характеристики - на рис. А.3; механічні характеристики з ІR-компенсацією - на рис. А.4.

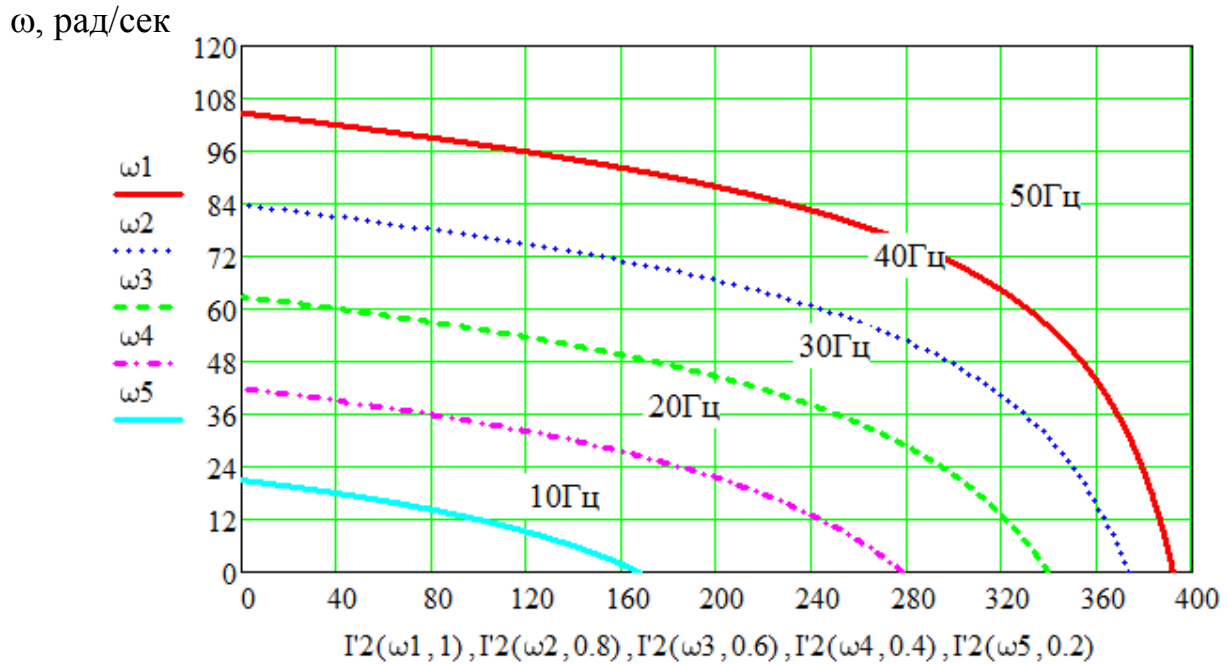


Рис. А.2. Графік швидкісних характеристик АД при різних частотах живлення I_r', A
(розроблено автором)

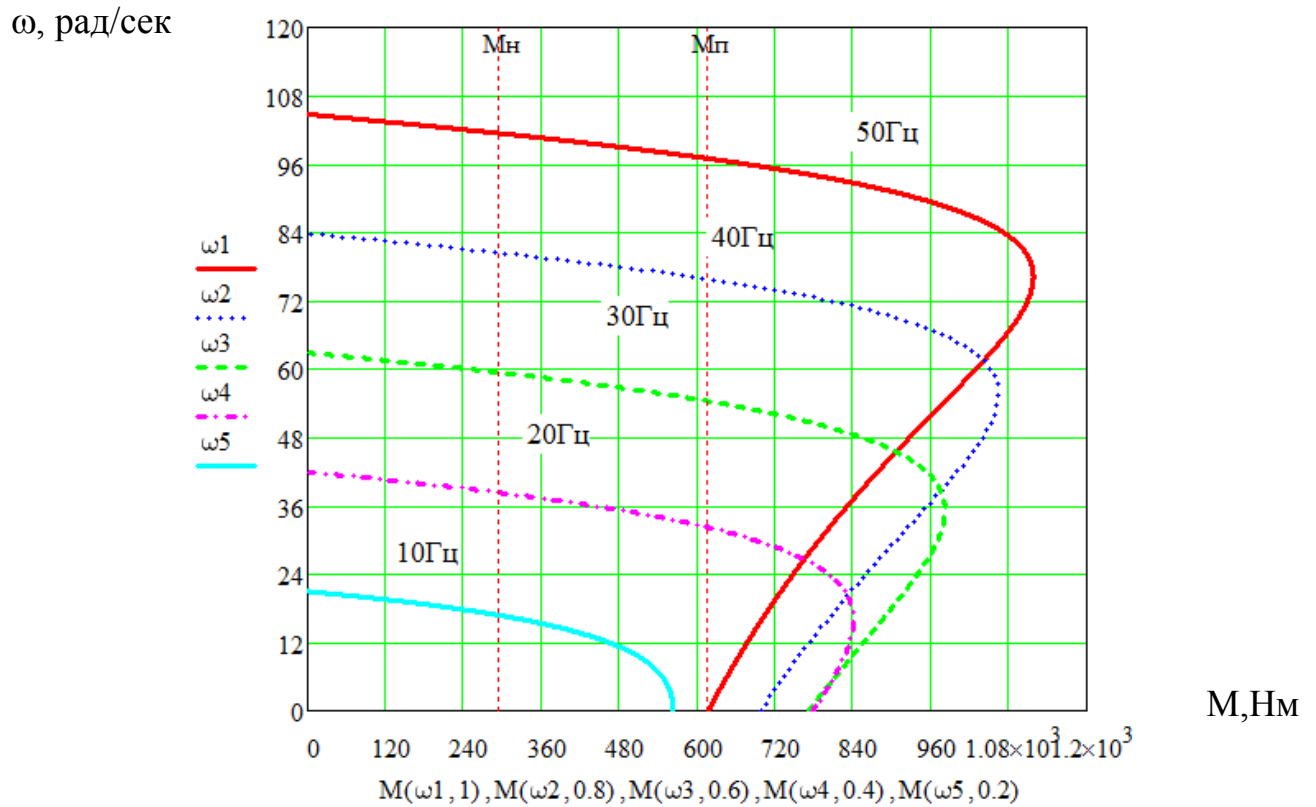


Рис. А.3. Графік механічних характеристик АД

(розроблено автором)

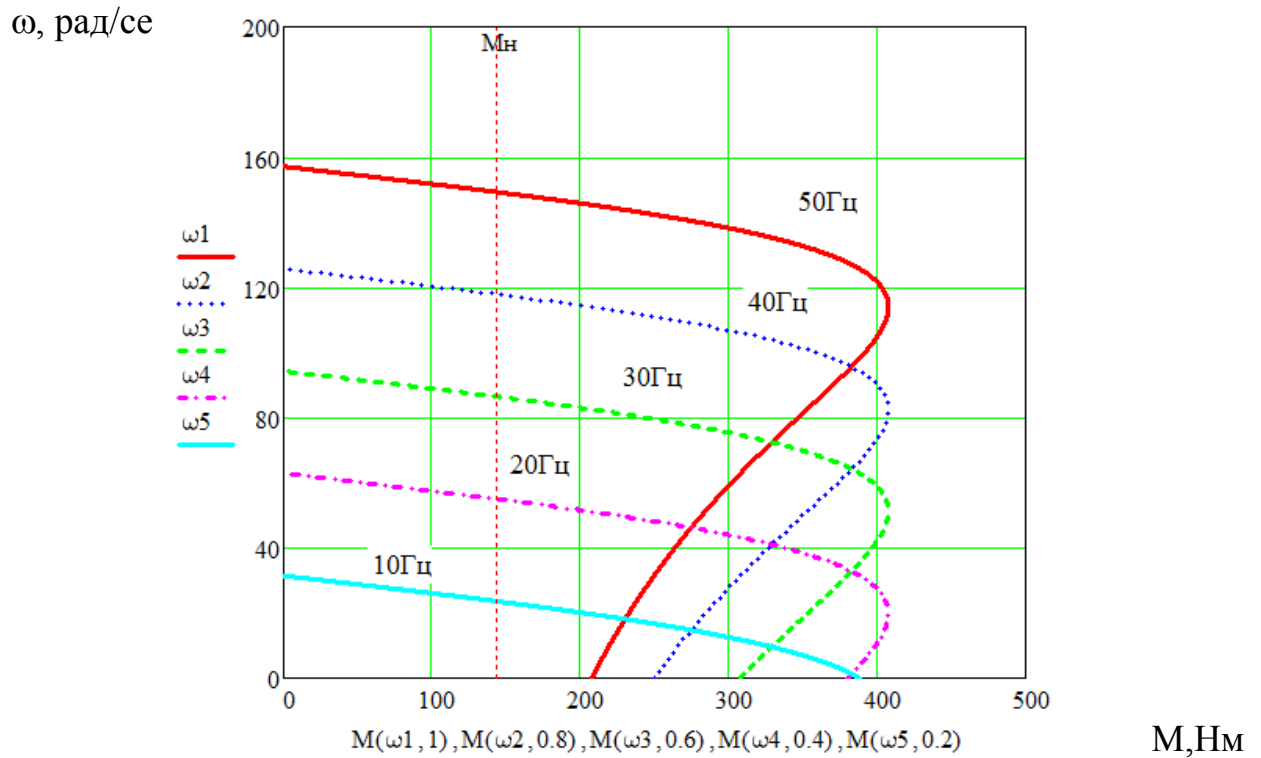


Рис. А.4. Графік механічних характеристик АД з урахуванням ІР-компенсації

(розроблено автором)

Зменшення критичного моменту при зниженні частоти пояснюється тим, що при низьких значеннях частоти втрата напруги на R_s значно знижує напругу, що подається на контур намагнічування. На практиці, коли $f_1 \leq 0,3-0,4$, втрата напруги на R_s суттєво зменшує величину напруги, прикладеної до контура намагнічування. Для усунення цього впливу застосовано ІR-компенсацію (рис. А.4) [7].

Б.1 Розрахунок передатних функцій регуляторів векторної системи керування

Б.1.1 Базові значення та коефіцієнти зворотних зв'язків

Базова напруга:

$$U_6 = \frac{\sqrt{2} \cdot U_H}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{\sqrt{3}} = 310,27 \text{ В} \quad (\text{Б.1})$$

Базовий струм:

$$I_6 = \sqrt{2} \cdot I_H = \sqrt{2} \cdot 60,29 = 85,26 \text{ А} \quad (\text{Б.2})$$

Базова кутова швидкість:

$$\omega_6^r = \frac{\omega_6}{p_n} = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 104,72 \text{ рад/с} \quad (\text{Б.3})$$

Базовий момент:

$$M_6 = \frac{M_{кр} \cdot P_H}{M_H \cdot \omega_6^r} = \frac{881,47 \cdot 30\,000}{293,82 \cdot 104,72} = 859,44 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (\text{Б.4})$$

Потокозчеплення ротора:

$$\Psi = L_m \cdot I_{1x}' = 0,082 \cdot 75,29 = 6,151 \text{ Вб} \quad (\text{Б.5})$$

Коефіцієнти зворотних зв'язків ($U_{нз} = 10 \text{ В}$ - максимальна напруга системи керування):

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\text{нз}}}{\Psi} = \frac{10}{6,151} = 1,626 \quad (\text{Б.6})$$

$$K_{c1} = \frac{U_{\text{нз}}}{I_{1x}} = \frac{10}{75,29} = 0,133 \quad (\text{Б.7})$$

$$K_{c2} = \frac{U_{\text{нз}}}{I_{1y}} = \frac{10}{449,39} = 0,022 \quad (\text{Б.8})$$

$$K_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{нз}}}{\omega_6^r} = \frac{10}{104,72} = 0,0955 \quad (\text{Б.9})$$

$$K_{\text{пч}} = \frac{U_6}{U_{\text{нз}}} = \frac{310,27}{10} = 31,03 \quad (\text{Б.10})$$

Б.1.2 Розрахунок регулятора струму

Сумарний активний опір фази двигуна (коефіцієнт $K_r = L_m / L_r = 0,964$):

$$R_{1e} = R_s + K_r^2 \cdot R_r = 0,124 + 0,964^2 \cdot 0,1 = 0,217 \text{ Ом} \quad (\text{Б.11})$$

Постійна часу:

$$T_{1e} = \frac{\sigma \cdot L_s}{R_{e1}} = \frac{0,062 \cdot 0,084}{0,217} = 0,024 \text{ с} \quad (\text{Б.12})$$

Постійна часу ротора:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{0,085}{0,1} = 0,848 \text{ с} \quad (\text{Б.13})$$

Постійна інтегрування регулятора (при налаштуванні на модульний оптимум, $T = 0,001 \text{ с}$):

$$T_{i1} = \frac{K_{c1} \cdot 2 \cdot T \cdot K_{пч}}{R_{1e}} = \frac{0,133 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 31,03}{0,217} = 0,0381 \text{ с} \quad (\text{Б.14})$$

Передатна функція регулятора струму I_{1x} :

$$W_{pc1}(p) = \frac{T_{1e} \cdot p + 1}{T_{i1} \cdot p} = \frac{0,024p + 1}{0,0381p} \quad (\text{Б.15})$$

Аналогічно отримано передатну функцію регулятора струму I_{1y} :

$$W_{pc2}(p) = \frac{T_{1e} \cdot p + 1}{T_{i2} \cdot p} = \frac{0,024p + 1}{0,00637p} \quad (\text{Б.16})$$

Б.1.3 Розрахунок регулятора потоку

$$T_{iп} = \frac{K_{п} \cdot 4 \cdot T \cdot L_m}{K_{c1}} = \frac{1,626 \cdot 4 \cdot 0,001 \cdot 0,082}{0,133} = 0,004 \text{ с} \quad (\text{Б.17})$$

$$W_{pп}(p) = \frac{T_r \cdot p + 1}{T_{iп} \cdot p} = \frac{0,848p + 1}{0,004p} \quad (\text{Б.18})$$

Б.1.4 Розрахунок регулятора швидкості

Коефіцієнт регулятора швидкості при налаштуванні на модульний оптимум:

$$K_{pш} = \frac{K_{пч} \cdot K_{c2} \cdot J}{3 \cdot p_n \cdot K_r \cdot 2 \cdot T \cdot K_{ш}} = \frac{1,626 \cdot 0,022 \cdot 0,361}{3 \cdot 3 \cdot 0,964 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 0,095} = 7,885 \quad (\text{Б.19})$$

В.1 Розрахунок захисного заземлення

В.1.1 Вихідні дані та розрахунковий струм замикання

Розрахунок виконано для мережі з ізолюованою нейтраллю напругою 10 кВ за методикою [17]. Вихідні дані: довжина кабельних ліній $l_{\text{каб}} = 6,8$ км; довжина повітряних ліній $l_{\text{пв}} = 3,6$ км; питомий опір ґрунту $\rho = 40$ Ом·м; діаметр трубчастого заземлювача $d = 0,03$ м; довжина заземлювача $l = 2$ м; глибина закладання $h = 0,8$ м.

Розрахунковий струм замикання на землю:

$$I_t = U_l \cdot \left(\frac{l_{\text{каб}}}{350} + \frac{l_{\text{пв}}}{1150} \right) = 10\,000 \cdot \left(\frac{6,8}{350} + \frac{3,6}{1150} \right) = 225 \text{ А} \quad (\text{В.1})$$

В.1.2 Опір одиночного заземлювача

Опір одного трубчастого заземлювача:

$$R_t^r = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{2l}{d}\right) = \frac{40}{2\pi \cdot 2} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 2}{0,03}\right) \approx 38,2 \text{ Ом} \quad (\text{В.2})$$

В.1.3 Кількість заземлювачів та опір сполучних смуг

Орієнтовна кількість заземлювачів $n \approx 5$ шт. (відстань між ними $a = 12$ м). При $a/l = 1$ і $n = 5$ коефіцієнти використання: $\eta_z = 0,69$; $\eta_{\Pi} = 0,75$.

Опір сполучних смуг ($l_{\Pi} = 8$ м, $B = 0,04$ м):

$$R_{\Pi} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l_{\Pi}} \cdot \ln\left(\frac{2l_{\Pi}^2}{B \cdot h}\right) \approx 8,7 \text{ Ом} \quad (\text{В.3})$$

В.1.4 Загальний опір групового заземлювача

$$R_{\text{гр}} = \frac{R_t^r \cdot R_{\Pi}}{R_t^r \cdot \eta_{\Pi} + n \cdot \eta_3 \cdot R_{\Pi}} \approx 3,9 \text{ Ом} \quad (\text{В.4})$$

Умова $R_{\text{гр}} \leq 4 \text{ Ом}$, встановлена [17] для електроустановок з ізольованою нейтраллю напругою 10 кВ, виконана.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-53-2026врб

Автор

141-53-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ІД документу

334133558

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/2/2026

Дата редагування

—

Обсяг знайдених подібностей

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



КП 1

8173

Кількість слів



КЦ

56875

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		24
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		15

Джерела

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

10 найдовших фраз

Копію тексту

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

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

Я, *Гречка Андрій Анатолійович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод конвеєру чавунно-розливної машини виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

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

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

01.06.2026