

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

ННІ/факультет	<i>Навчально-науковий технологічний інститут</i>
Кафедра	<i>Електричної інженерії та автоматизації</i>
Спеціальність	<i>141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка</i>
Форма навчання	<i>денна</i>

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Якімов Павло Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему *«Електропривод механізму пересування сталевозу вантажо-
під'ємністю 215 т конверторного цеху»*

(повна назва теми)

за матеріалами

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

Доцент, к.т.н.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Рожненко Ж.Г.

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 2026__р. №

Завідувач кафедри

(підпис)

Є.О. Модло

Наук. ступень, вчене звання

Ініціали, прізвище

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ**

Кафедра Електричної інженерії і автоматизації

Рівень вищої освіти бакалавр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Електричної інженерії і автоматизації

В.о. зав каф.

Модло Є.О.

(підпис)

(посада, вчене звання,
прізвище ініціали)

«___» _____

2026__ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ(КИ)

Якімова Павла Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Електропривод механізму
пересування сталевозу вантажопід'йомністю 215 т конверторного цеху

керівник кваліфікаційної роботи Рожненко Жанна Георгіївна, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06»04.2026 р. № 238-ст

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2026

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи бакалавра: статті,
патенти, промислові дослідження

Об'єкт розробки і дослідження – електропривод механізму пересування сталевозу.

Характер навантаження – робота в режимі S3, електропривод працює в еквівалентному повторно-короткочасному режимі з високою частотою вмикань та значними пусковими навантаженнями.

Тип системи електроприводу: режим роботи електропривода - рід струму - постійний, тиристорний перетворювач - реверсивний (за схемою зустрічно-паралельного з'єднання), напруга змінного струму 10 кВ (лінія живлення цеху) та 380 В (вхід перетворювача), відхилення напруги мережі +10 %, -15 %, частоти мережі 50 Гц ± 2 %. Статичне зусилля опору пересуванню 10840 Н (порожній), 39900 Н (завантажений), передатна кількість редуктора 52,32.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1 Аналітична частина;

4.2 Основна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 Загальний вигляд сталевоза. Кінематична схема механізму

2 Функціональна схема

3 Структурна схема

4 Принципова електрична схема

5 Схема моделювання

6 Результати моделювання

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	Рожненко Ж.Г., доцент		
2 Основна частина	Рожненко Ж.Г., доцент		

7. Дата видачі завдання «06» ____ 04 ____ 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	30.04.2026	
2.	Основна частина	05.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	11.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	26.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	19.06.2026	

Студент

(підпис)*Якімов П.С.*
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)*Рожненко Ж.Г.*
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Якімов П.С. «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод механізму пересування сталевозу вантажопідйомністю 215 т.» – Бакалаврська робота. – Кривий Ріг, 2026. 70 с., 25 рис., 11 табл., 15 джерел.

Об'єкт досліджень – механізм пересування сталевозу.

Метою роботи є розробка системи електроприводу механізму пересування сталевоза.

Предмет дослідження: електричні та механічні характеристики двигунів, а також поведінка системи при можливих режимах роботи.

Методи дослідження. В роботі застосовувалися: методи теорії електроприводу для розрахунку навантажувальних діаграм і вибору потужності двигунів в режимі S3 (повторно-короткостроковий). Математичне моделювання в середовищі MATLAB / Simulink для аналізу пуско-гальмівних режимів.

У роботі розроблено та досліджено двоконтурну систему підпорядкованого регулювання електропривода сталевозу вантажопідйомністю 215 тонн, що базується на реверсивному тиристорному перетворювачі та системі обмеження прискорення. Автором впроваджено задатчик інтенсивності, який забезпечує плавний пуск механізму з прискоренням до $0,2 \text{ м/с}^2$, що гарантує відсутність коливань та розпліскування рідкого металу під час транспортування. Результати комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB підтвердили високу динамічну точність системи, скорочення пускових струмів та оптимізацію роботи тягових двигунів. Практичне впровадження запропонованої схеми дозволяє знизити енергоспоживання на 25–30% та значно подовжити термін експлуатації механічного обладнання сталевозу в умовах конвертерного цеху.

Ключові слова: сталевоз, електропривод постійного струму, тиристорний перетворювач, система автоматичного керування, імітаційне моделювання, показники якості регулювання.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Технологічний процес виплавки сталі в конвертерному цеху	10
1.2 Аналіз сталевозу як об'єкта автоматизованого електроприводу	14
1.3 Режим роботи та навантажень	17
1.4 Конструкція механізму, кінематична схема	18
1.5 Технічні дані механізму	21
1.6 Вимоги до електроприводу механізму	21
1.7 Обґрунтування вибору роду струму, типу електроприводу та способу регулювання координат	23
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	27
2.1 Розрахунок потужності і вибір двигуна	27
2.2 Вибір елементів електроустаткування	31
2.2.1 Вибір струмообмежувального реактора	31
2.2.2 Вибір тиристорного перетворювача	32
2.2.3 Вибір реактора, що згладжує	33
2.2.4 Визначення розрахункових характеристик статичного перетворювача	35
2.2.5 Визначення параметрів силового ланцюга	36
2.2.6 Розрахунок параметрів механічної системи	37
2.3 Перевірка забезпечення заданої сфери існування електромеханічних характеристик електроприводу	38
2.4 Розрахунок електромеханічних характеристик розімкнутої системи перетворювач-двигун	40
2.5 Структурна схема силового каналу електроприводу	44
2.6 Структурна схема системи автоматичного регулювання електроприводу	45
2.7 Оптимізація контуру струму	47
2.8 Оптимізація контуру ЕРС	49

2.9 Аналіз нелінійних структур САУ РЕП. Моделювання нелінійних структур САУ РЕП	52
2.9.1 Розрахунок перехідних процесів та визначення динамічних показників якості нелінійної САУ РЕП перетворювач безперервний	54
2.10 Розрахунок статичних робочих характеристик	57
2.11 Заходи із охорони праці та безпеки	61
2.11.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників	61
2.11.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників	62
2.11.3 Пожежна безпека	66
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69

ВСТУП

Ефективність роботи сучасного сталеплавильного цеху безпосередньо залежить від надійності міжпрогонового транспорту. Сталевоз вантажопідйомністю 215 тонн є ключовою ланкою в технологічному ланцюжку «піч-агрегат позапічної обробки-МНЛЗ». У період 2022-2025 років експлуатація таких агрегатів на підприємствах України (зокрема, на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та ПАТ «Запоріжсталь») відбувається в екстремальних умовах. Головним викликом стали аварійні відключення електроенергії та нестабільність параметрів мережі живлення. Для електроприводу сталевоза це критично: раптова зупинка платформи з 215 тоннами розплаву може призвести до застигання металу в ковші та виходу з ладу дорогого футерування. Тому розробка електроприводу, здатного безпечно завершити цикл руху або забезпечити евакуацію ковша при перебоях у мережі, є актуальним інженерним завданням.

Незважаючи на тимчасове скорочення виробництва сталі в Україні, вимоги до точності позиціонування сталевозів та плавності їхнього ходу лише зросли. Використання застарілих релейно-контакторних систем управління при відновленні активної роботи заводів у 2024-2025 роках веде до високих динамічних ударів у трансмісії та перевитрати електроенергії. Модернізація електроприводу дозволяє знизити експлуатаційні витрати і забезпечити збереження механічного обладнання при роботі з величезними інерційними масами.

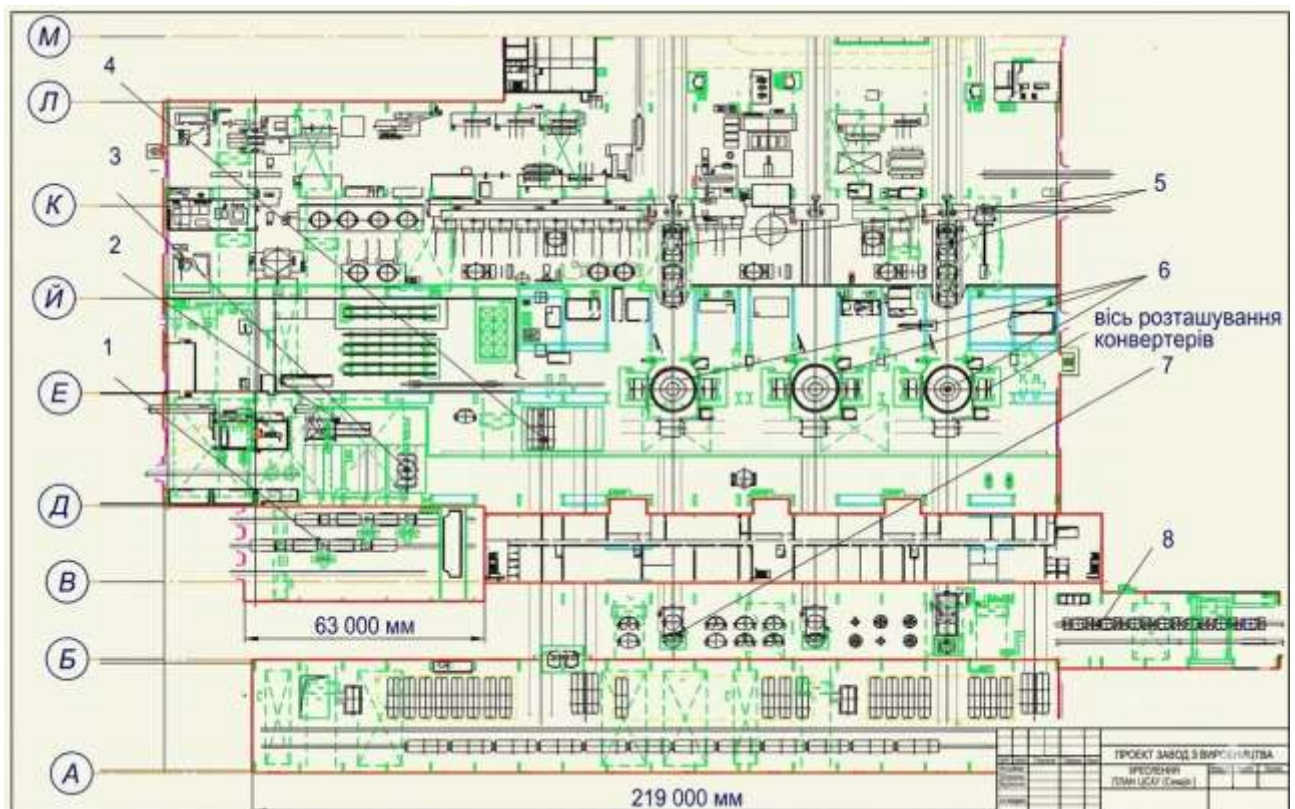
Таким чином, проектування сучасного електроприводу сталевозу є комплексним завданням, що поєднує вимоги високої надійності, енергоефективності та живучості системи в умовах нестабільного енергопостачання. Враховуючи специфіку роботи на таких гігантах, як ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" та ПАТ "Запоріжсталь", стає очевидним, що параметри електромеханічної системи не можуть розглядатися у відриві від реальних умов експлуатації.

Для обґрунтованого вибору потужності двигунів, розрахунку статичних навантажень та синтезу системи керування необхідно детально проаналізувати умови роботи агрегату. У зв'язку з цим першим етапом роботи є вивчення технологічного циклу конвертерного цеху та визначення ролі сталевоза в загальному процесі виробництва сталі, що дозволить сформулювати чіткі технічні вимоги до його електроприводу.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічний процес виплавки сталі в конвертерному цеху

Сучасний конвертерний цех - це високоавтоматизований комплекс, основним завданням якого є переробка рідкого чавуну та сталевих брухту на сталь заданого хімічного складу (рис.1.1-1.2). Процес у конвертері протікає з величезною швидкістю (окислення домішок киснем), що накладає жорсткі часові рамки на всі допоміжні операції, включаючи транспортування.



1 – відділення переливу чавуну (ОПЧ); 2 – встановлення глибокої десульфурації; 3 - чавуновози; 4 – скраповози; 5 – сталевози; 6 – конвертери; 7 – самохідні шлаковози; 8 – несамохідні шлаковози

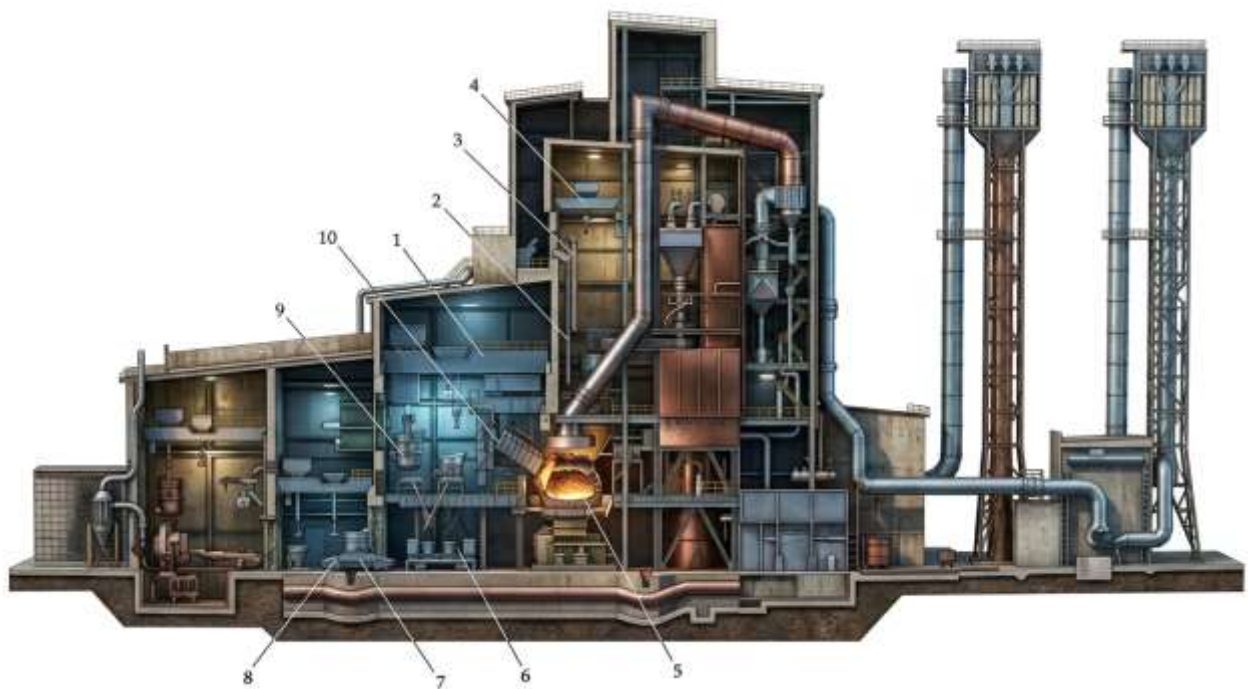
Рис.1.1.Компонування конвертерного відділення киснево-конвертерного цеху

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]



Рис.1.2.Вигляд конвертерного відділення киснево-конвертерного цеху

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]



1 - кран для заливання чавуну; 2 - фурма киснева; 3 - машина для переміщення кисневої фурми; 4 - кран бруківки для обслуговування конвертерів; 5 - кисневий конвертер; 6-чавуновоз; 7 - сталевоз; 8-сталерозливний ківш; 9 - ківш для чавуну; 10 - завалочна напівпортальна машина

Рис.1.3.Поперечний розріз киснево-конвертерного цеху

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

На рис. 1.1 представлено компонування конвертерного відділення киснево-конвертерного цеху, де технологічні потоки організовані для мінімізації простоїв. Основні вузли включають:

1. Відділення переливу чавуну (ОПЧ): початкова точка, де рідкий чавун готується до заливки конвертер.
2. Установка глибокої десульфурзації: устаткування для очищення чавуну від сірки перед початком плавки, що є важливим для якості сталі.
3. Чавуновози: транспортні засоби, що доставляють рідкий чавун до конвертерів.
4. Скраповози: машини для подачі сталевих брухту (скрапу) до зони завантаження.
5. Сталевози (вантажопідйомністю 215 т): на схемі вони розташовані на рейкових коліях у підконвертерному прольоті, забезпечуючи транспортування наповненого ковша від осі конвертера до установок позапічної обробки.
6. Конвертери: основні сталеплавильні агрегати розташовані в центральній частині відділення.
7. Самохідні шлаковози: призначені для оперативного видалення шлаку, що утворюється у процесі плавки.
8. Несамохідні шлаковози: використовуються для накопичення та подальшого транспортування шлаку до шлакового відділення.

Технічний аналіз розміщення сталевозів

Згідно зі схемою 1.1 сталевози (позиція 5) працюють в умовах жорсткої прив'язки до осей розташування конвертерів (позиція 6). Це накладає спеціальні вимоги на електромеханічну частину. Точність позиціонування: Привід повинен забезпечувати зупинку ковша точно по осі випуску сталі, щоб уникнути пошкодження обладнання та потоки металу. Траєкторія руху: переміщення здійснюється по поперечних коліях, що зв'язують головний проліт з розливним, що вимагає від системи керування приводом плавної роботи на малих швидкостях. Захист приводу: враховуючи близькість до шлаковозів (позиції 7, 8)

та зон випуску, електрообладнання сталевоза піддається не тільки тепловому впливу, але й ризику забруднення агресивним середовищем.

Це компонування підтверджує актуальність вибору надійної системи електроприводу, здатної працювати в умовах високої щільності технологічного обладнання та інтенсивних вантажопотоків, характерних для ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та «Запоріжсталь».

Розглянемо основні етапи технологічного циклу.

1. Завалка брухту та заливка чавуну: за допомогою кранів завалки в конвертер завантажуються металобрухт і заливається рідкий чавун з міксера.

2. Продування киснем: через фурму в агрегат подається кисень під високим тиском. У цей період відбувається інтенсивне вигорання вуглецю, кремнію та марганцю. Температура всередині конвертера досягає 1600-1700 ° С.

3. Випуск сталі (ключовий етап для сталевозу): після досягнення потрібного складу конвертер нахиляється. Сталевоз із підготовленим ковшем повинен завчасно зайняти позицію під випускним отвором. Помилка у позиціонуванні або відмова електроприводу в цей момент призведе до проток металу, що кваліфікується як важка аварія. Після наповнення ковша сталевоз транспортує його на установку «піч-ківш» (КПК). Тут проводиться остаточне коригування складу та температури сталі. Електромеханічна система сталевоза повинна забезпечити плавне переміщення, щоб унеможливити динамічні удари, які можуть пошкодити футерування ковша.

4. Розливка: Ківш подається до машини безперервного лиття заготовок (МНЛЗ).

Під конвертерами укладено шляхи широкої колії, що з'єднують конвертерний цех з відділенням безперервного розливання сталі, пересікають всі прольоти (крім скрапного). Цими шляхами ковші зі сталлю передають на сталевозах в ОНРС, а ковші зі шлаком - у проліт перестановки шлакових ковшів. Цими ж шляхами порожні ковші після розливки повертають у ковшовий проліт для підготовки до прийому чергової плавки.

1.2 Аналіз сталевозу як об'єкта автоматизованого електроприводу

Сталевоз, 215 т., є самохідною рейковою платформою. З погляду електромеханіки - це інерційний об'єкт із змінною масою (порожній ківш важить близько 90-100 тонн, повний - понад 300 тонн).

Технічні особливості агрегату.

Механічна частина: рама сталевоза спирається на два або чотири ходові візки. Через величезні навантаження на осі (до 50-60 тонн на колесо) використовується ширококоліїний рейковий шлях (рис.1.4-1.5).



Рис.1.4. Загальний вигляд сталевоза

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

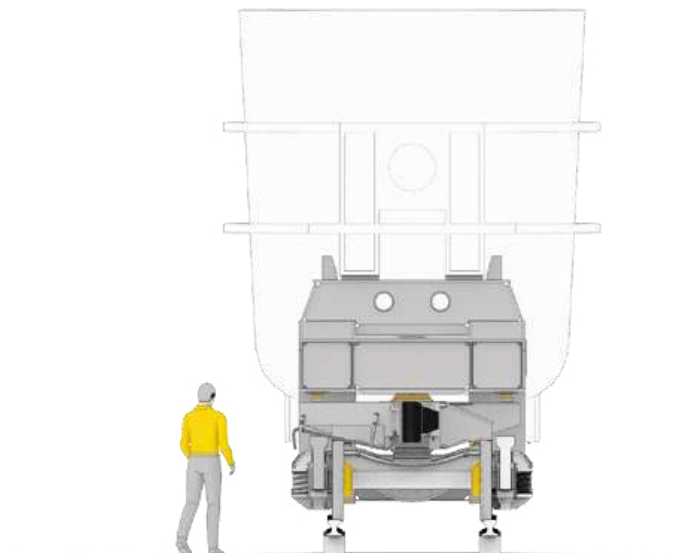
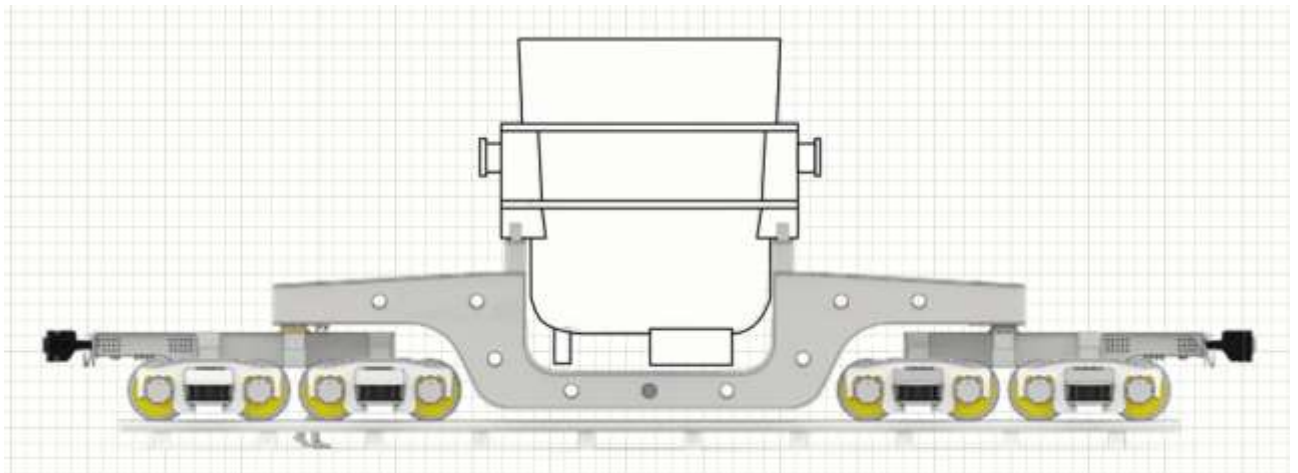
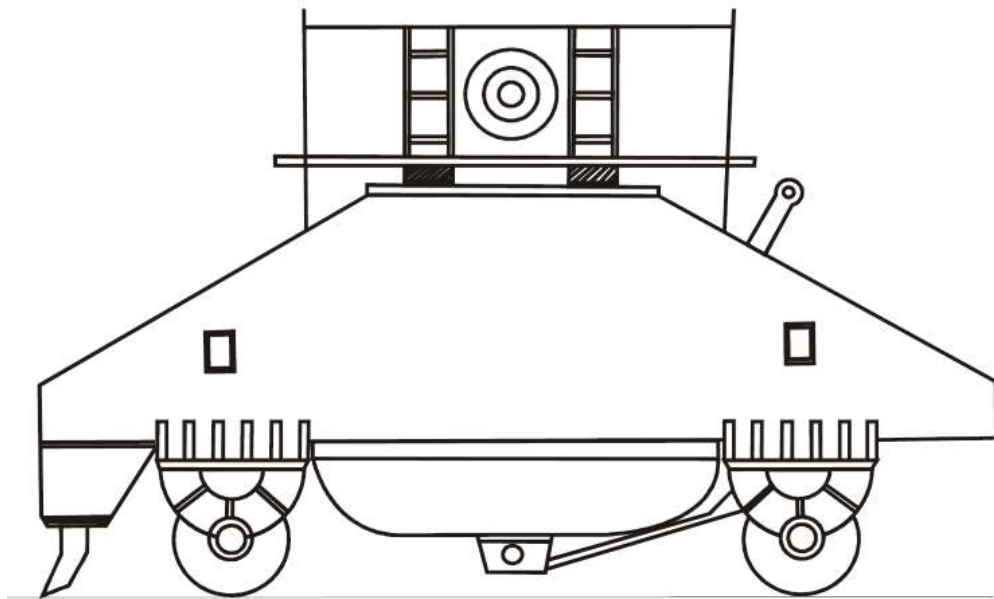


Рис.1.5. Загальний вигляд сталевоза

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Система живлення: енергія до двигунів передається через гнучкий кабель, що намотується на кабельний барабан або через тролєї. В умовах 2022-2025 років кабель більш надійний, оскільки менше схильний до зледеніння або забруднення при нестабільній роботі цеху.

Двигун: зазвичай застосовується багаторуховий привід (2 або 4 двигуни), з'єднаних механічно через загальні вали або редуктори. Це забезпечує резервування: при виході з ладу одного двигуна сталевоз на 215 тонн повинен мати можливість рухатись з небезпечної зони на потужності, що залишилася.

У цей період 2022-2025 років на українських комбінатах (ПАТ «АМКР», ПАТ «Запоріжсталь») відбулося зрушення у бік «виживання» обладнання. Проблема «холодних» простоїв: через часті повітряні тривоги та відключення електрики виробничий цикл став уривчастим. Сталевоз може годинами стояти на коліях. Електромеханіку важливо враховувати, що після тривалого простою мастило в редукторах остигає, в'язкість зростає, і пусковий момент двигуна при першому старті збільшується в 1.5-2 рази порівняно з номіналом.

Ризики раптових відключень (Blackouts): на реальному виробництві (досвід ПАТ «АМКР») критичним питанням стала евакуація сталевоза при втраті напруги. Якщо машина зупиняється під конвертером або на шляху проходження під час відключення мережі, метал може застигнути. Це змушує інженерів проектувати електроприводи з можливістю роботи від резервних джерел живлення (ДБЖ чи дизель-генератори) на малих швидкостях.

Ерозія мережі: постійні перемикання в енергосистемі України у 2024–2025 роках призводять до виникнення вищих гармонік та стрибків напруги. Для старих релейних систем це не так критично, але сучасні частотні перетворювачі (ЧРП) вимагають установки вхідних мережевих дроселів і фільтрів, щоб електропривод сталевоза не спрацював в найвідповідальніший момент випуску сталі.

Скорочення ремонтних циклів: через мобілізацію персоналу та дефіцит запчастин обслуговування техніки стало рідше. Тому актуальність теми диплома зміщується у бік діагностики: сучасний електропривод повинен сам повідомляти

систему управління про перегрівання підшипників або перекося фаз, запобігаючи поломці до її наступу.

З погляду електромеханіки, сталевоз - це складна динамічна система, що працює в циклічному режимі. Технологічний цикл включає наступні основні операції:

1. Подача під конвертер: рух порожнього сталевозу до сталеплавильного агрегату. Потрібна висока точність зупинки для поєднання осі ковша з випускним отвором конвертера.

2. Прийом плавки: статичне становище під струменем металу. У цей момент електропривод знаходиться в режимі «утримання», а електрообладнання піддається потужному тепловому випромінюванню.

3. Транспортування до установки «під-ківш» (КПК): переміщення повністю навантаженого агрегату. Маса системи (сталевоз + ківш + футерування + метал) досягає 350-380 тонн. Тут електропривод повинен долати значні моменти опору, пов'язані з тертям кочення та можливими перекосами рами.

4. Подача на поворотний стенд МНЛЗ: фінальний етап, що вимагає гранично плавного уповільнення, щоб унеможливити розплескування металу та динамічні навантаження в механічних передачах.

1.3 Режим роботи та навантажень

Сталевоз 215 тонн - це об'єкт з величезною інерційністю. Аналіз технологічного процесу дозволяє виділити ключові характеристики навантаження.

1. Режим роботи: за класифікацією ДСТУ (ГОСТ) агрегат працює у режимі S3 (повторно-короткочасний). Однак фактична тривалість включення (ПВ) в умовах 2025 часто перевищує розрахункові 40%, оскільки технологічні затримки змушують привод працювати довше на низьких швидкостях. Статичні та динамічні моменти: при рушанні з місця сталевоз повинен подолати момент

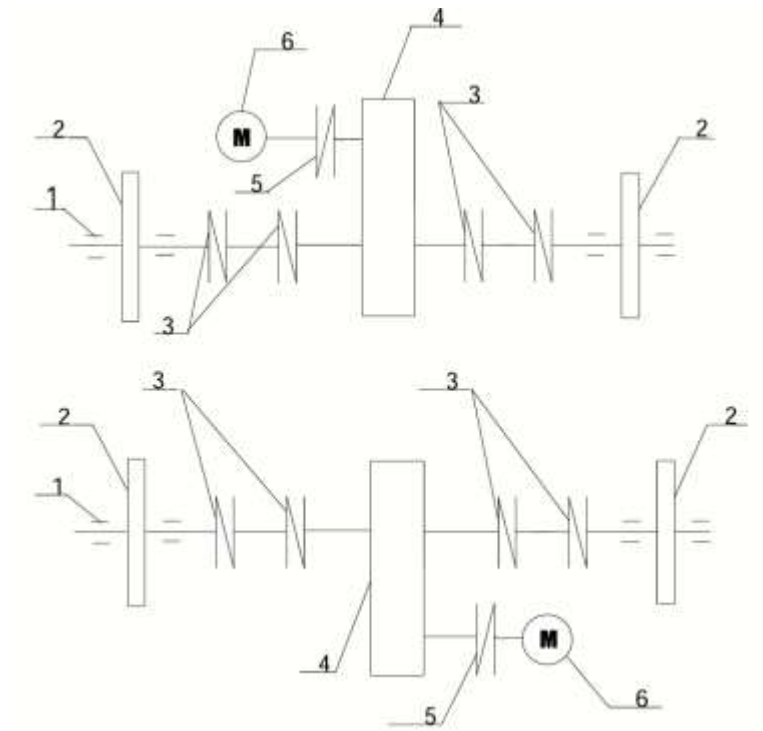
тертя спокою, який може бути значно збільшений через забруднення рейок металевим пилом або окалиною.

Температурний фактор: устаткування працює у зоні температур навколишнього повітря до $+60^{\circ}\text{C}$... $+80^{\circ}\text{C}$. Теплове випромінювання від ковша (температура сталі близько 1600°C) створює градієнт температур, який може призвести до несиметричного розширення конструкцій та заклинювання підшипників, що у свою чергу збільшує навантаження на двигун.

Технологічний процес експлуатації сучасного сталевозу (215т.) характеризується екстремальними умовами, які посилилися у 2022–2025 роках через енергетичну нестабільність в Україні. Електромеханічна система повинна забезпечувати як переміщення вантажу, а й виживання агрегату в аварійних ситуаціях. Це диктує необхідність використання сучасних асинхронних двигунів із частотним керуванням та посиленням захистом.

1.4 Конструкція механізму, кінематична схема

Конструктивно транспортний механізм виконаний у вигляді неповоротної платформи має чотири приводні колеса. Привод коліс здійснюється від двох механізмів пересування, кожен з яких складається з електродвигуна постійного струму, триступінчастого циліндричного редуктора, а також муфт МЗ та МЗП. При виході з ладу одного механізму пересування, другий повинен забезпечити нормальну роботу всього механізму протягом повного технологічного циклу до зупинки конвертора на перефутерування. Крім механізмів пересування, сталевоз обладнаний скребком приводом підйому, що включає електродвигун типу АР-43-6, редуктор Ц2УН-125, два спеціальні конічні гвинтові редуктори та муфти. Струмopрoвід до сталевоза приєднується гнучким кабелем. Кінематична схема механізму представлена на рисунку 1.6.



1 - підшипники кочення; 2 - ходові колеса діаметром 1000 мм; 3-муфта типу МЗП-8; 4 - редуктор триступінчастий; 5-муфта типу М 3-4; 6 - електродвигун постійного струму

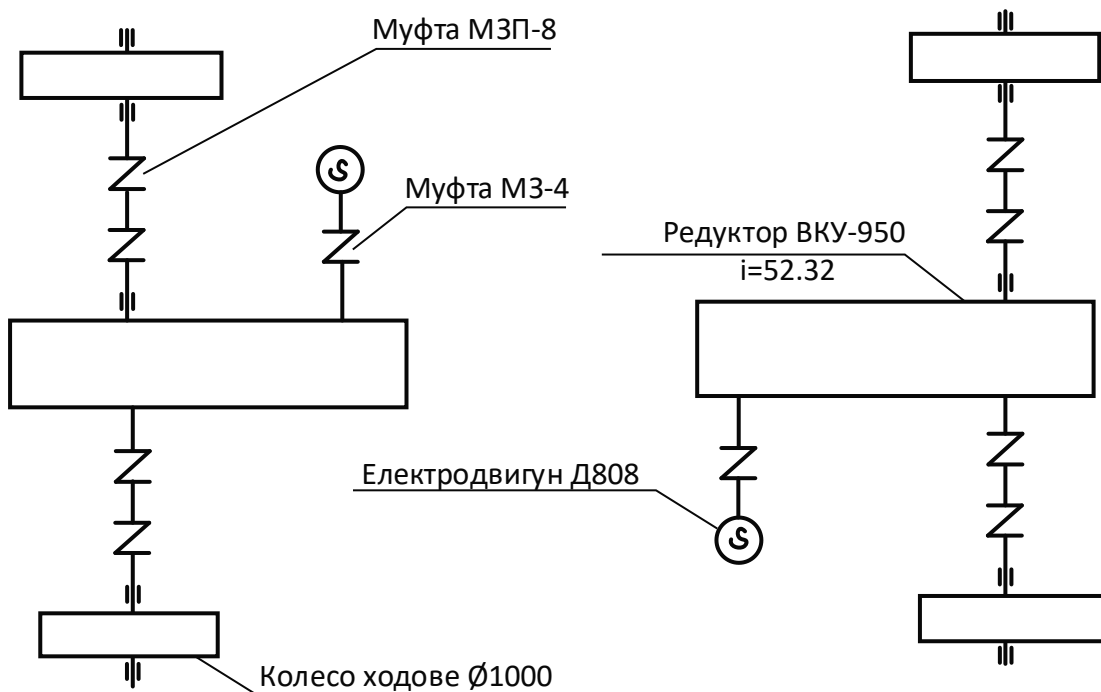


Рис.1.6. Кінематична схема механізму

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Опис елементів кінематичної схеми

Підшипники кочення (1): служать опорами для валів ходових коліс та внутрішніх валів редуктора. Вони забезпечують обертання з мінімальними втратами на тертя та сприймають радіальні навантаження від ваги конструкції.

Ходові колеса (2): виконавчі органи механізму діаметром 1000 мм. Великий діаметр коліс дозволяє знизити опір коченню та тиск на рейки, що необхідно для обладнання великої вантажопідйомності.

Муфта типу МЗП-8 (3): муфта зубчаста з проміжним валом (подовжувачем). Вона передає момент, що крутить, від редуктора до колеса, компенсуючи можливі перекоси і неспіввісність валів, які неминучі при деформації металоконструкції під навантаженням.

Редуктор триступінчастий (4): основний агрегат для зниження частоти обертання та відповідного збільшення крутного моменту. Три ступені передачі дозволяють досягти високого передавального числа, необхідного для плавного переміщення важкого крана.

Муфта типу МЗ-4 (5): зубчаста муфта, що з'єднує вал електродвигуна із входним валом редуктора. Як правило, одна з половин такої муфти використовується як гальмівний шків для установки колодкового гальма.

Електродвигун постійного струму (6): приводний агрегат. Двигуни постійного струму вибираються для таких механізмів завдяки їх відмінним пусковим характеристикам та можливості плавно регулювати швидкість, що мінімізує розгойдування вантажу.

Принцип роботи механізму

Пуск: При подачі напруги на електродвигун (6) крутний момент через муфту (5) передається на входний вал редуктора (4).

Трансформація: усередині редуктора за рахунок трьох пар зубчастих зачеплень швидкість обертання знижується до робочої швидкості руху крана, а момент, що крутить, багаторазово зростає.

Передача на колеса: з вихідного валу редуктора через зубчасту муфту (3) передається момент на ходові колеса (2).

Рух: Колеса, встановлені в підшипникових вузлах (1), починають обертатися та переміщують кран по підкранових коліях.

Технічні особливості. Використання зубчастих муфт (МЗ та МЗП) гарантує високу надійність та довговічність при роботі зі змінними навантаженнями та частими реверсами. Триступінчасте компонування редуктора дозволяє використовувати компактний високообертовий двигун для отримання повільного та потужного руху ходових коліс.

1.5 Технічні дані механізму

Технічні дані механізму представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні дані механізму

Вантажопідйомність	$Q = 215\text{т};$
Маса порожнього механізму	$m = 80\text{т};$
Маса механізму з нормально наповненим ковшем	$m = 295\text{т};$
Швидкість пересування	$v = 0,83 \text{ м/с};$
Внутрішній діаметр підшипників буксових коліс	$D_{\text{п}} = 18\text{см};$
Діаметр ходових коліс	$D_{\text{к}} = 1000\text{мм};$
Радіус шийки осі ходового колеса	$R_{\text{ш}} = 0,15 \text{ м};$
Передатна кількість редуктора	$i = 52,32;$
Коефіцієнт тертя у підшипниках ходових коліс	$p = 0,015;$
Коефіцієнт, що враховує тертя реборд ходових коліс об рейки	$k=0.015;$
Коефіцієнт зчеплення ходових коліс об рейки	$K_{\text{сч.}} = 0,25;$
Коефіцієнт тертя кочення ходових коліс	$f = 0,0012;$
Максимально допустиме прискорення при транспортування металу, м/с^2	$a=0,2;$
Коефіцієнт корисної дії механізму	$\eta = 0,85\%$

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

1.6 Вимоги до електроприводу механізму

У ККЦ-1 використовуються сталевози, виконані у вигляді платформи з чотирма приводними колесами. Колеса наводяться двома механізмами

пересування, кожен із яких має електропривод. Сталевоз працює при двох основних швидкостях пересування: основний 1м/с та зниженою 0,2 м/с. Гальмування електроприводу при нормальній роботі рекуперативне електричне. У нашому механізмі як аварійне використовується динамічний гальмування та після зниження швидкості до 0,1м/с накладаються гальма. При зникненні напруги гальма накладаються миттєво. Електропривод пересування сталевозом повинен мати такі властивості:

- мати високу плавність пуску та гальмування, що виключає виплеск металу;
- регулювання швидкості повинно бути в межах 5:1;
- має бути передбачене зниження швидкості при маневрах під час зливу сталі, підвищення точності зупинки сталевоза наприкінці шляху;
- висока надійність. Зволікання, а тим більше відмови у роботі електроприводи сталевоза неприпустимі, тому що злив стали в конвертер має бути здійснений у заданий час. Крім того, при затримці подачі ковша на розлив знижується температура рідкої сталі, та безперервне розливання на МНЛЗ стає неможливим.

Розглядаючи властивості приводу, визначимо пропоновані до нього вимоги:

- сталевоз повинен мати циклічність у технологічному процесі, так як найменші відхилення від заданого режиму роботи можуть призвести до збоїв у роботі електрообладнання, що бере участь у технологічному процесі;
- необхідність ведення процесу при відхиленнях у роботі електроприводу;
- обмеження прискорення при маневрах з метою безпечного протікання технологічний процес.

Визначивши вимоги до електроприводу механізму, розглянемо завдання автоматизації конверторного цеху

Передбачаються три рівні автоматичного керування:

- система управління окремими механізмами (конверторами, фурмами, міксерами, МНЛЗ та ін.) з перенесення ковшів, зливу металу, подачі кисню зважуванню та подачі в конвертор заданої порції сипких матеріалів і т.д.

- система управління технологічним процесом окремо в конверторі та на МНЛЗ. На цьому рівні за допомогою ЕОМ вирішуються задачі автоматизації управління процесом виробництва сталі та литих заготівель;
- система управління конверторним цехом у зв'язку з іншими цехами.

На цьому рівні вирішується завдання з оперативного планування та управління відділеннями конверторного цеху, забезпеченню його вихідними матеріалами оперативного обліку та аналізу цеху з звітної документації та і т.д.

1.7 Обґрунтування вибору роду струму, типу електроприводу та способу регулювання координат

Вибір роду струму при проектуванні механізму має дуже важливе значення, так як рід струму визначатиме який двигун буде встановлений на механізмі, змінного струму чи двигун постійного струму. При цьому потрібно врахувати всі техніко-економічні показники, експлуатаційні витрати та зручність обслуговування та ремонту електроустаткування. У цехах металургійних підприємств знаходять застосування кранові електродвигуни трифазного змінного струму (асинхронні) та постійного струму (послідовного чи паралельного збудження). Вони працюють як правило, у повторно короткочасному режимі при широкому регулюванні частоти обертання, причому їхня робота супроводжується значними перевантаженнями, частими пусками. У ряді металургійних цехів вони, крім цього піддаються впливу високої температури (до 60-70 °C), парів та газів.

У зв'язку з цим за своїми техніко-економічними показниками та характеристикам кранові електродвигуни значно відрізняються від електродвигунів загальнопромислового виконання. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором застосовуються рідше через зниженого пускового моменту та значних пускових струмів хоча їх маса приблизно на 8% менше, ніж у двигунів з фазним ротором, а вартість у 1,3 рази менша, ніж у двигунів при однаковій потужності. Асинхронні електродвигуни із короткозамкненим

ротором іноді застосовують при легких та середніх режимах роботи. Перевагою асинхронних електродвигунів перед двигунами постійного струму є їх відносно менша вартість, простота обслуговування та ремонту.

Привод сталевоза вимагає широке та плавне регулювання швидкості, його робота супроводжується великою кількістю включень за годину, іноді потрібно регулювання швидкості вище номінальної, тому доцільно буде використовувати двигун постійного струму. На сталевозах встановлюються кранові електродвигуни постійного струму типу Д. Для вибору керування механізмом розглянемо дві системи керування електроприводом: систему Г – Д та систему ТП – Д і потім виберемо саму економічну та надійну, яка задовольнятиме всім регулювання; - Досить великий діапазон регулювання швидкості; Незважаючи на всі переваги розглянутої системи, вона має серйозні недоліки:

- наявність у перетворювальному агрегаті частин, що обертаються;
- необхідність у догляді;
- потреба у спеціальному приміщенні, у фундаменті;
- Велика встановлена потужність електричних машин;
- Суттєва інерційність системи управління.

Тому досконалішим є тиристорний електропривод постійного струму системою ТП – Д.

Управління двигуном постійного струму здійснюється через тиристори, шляхом зміни кута управління тиристора, а завдяки негативним зворотним зв'язкам, які використовуються в електроприводі, можна отримати практично будь-яку жорсткість механічних характеристик, що є одним з переваг системи ТП – Д. Зазначимо також, що діапазон регулювання швидкості також високий, як і в системі Г – Д 50:1 та більше;

- значний термін служби - 15,20 років;
- значне напруження на відмову протягом дворічної гарантійної роботи 4000 – 6500 год;
- Використання комплектних тиристорних електроприводів дозволяє знизити трудомісткість розробок та виготовлення електроприводів, знизити

витрати на електромонтажні роботи, підвищити їхню заводську готовність, скоротити час та налагодження приводів.

Тому використовуємо систему ТП - Д, так як вона має великі перевагами, ніж система Г - Д. Намі використаний тиристорний електропривод серії КТЕ. У системі передбачено регулювання швидкості, зміною напруги на якорі двигуна, а також передбачена стабілізація струму збудження електродвигуна за рахунок регулятора струму збудження.

Для регулювання швидкості в механізмі використано систему підлеглого регулювання з однозонним регулюванням швидкості. Спрощена електрична схема електроприводу сталевоза наведена на рис. 1.7.

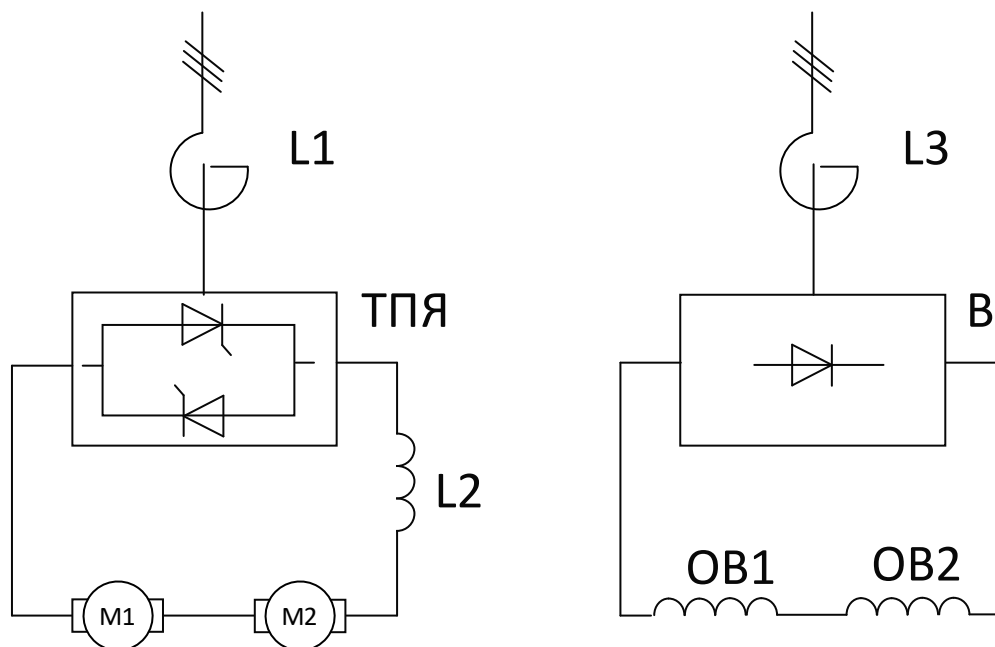


Рис.1.7. Спрощена електрична схема електроприводу сталевоза

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Механічна система електроприводу

Особливістю схеми електроприводу є два приводні двигуни, які послідовно включені в електричний ланцюг, живляться від одного перетворювача та працюють на одне навантаження. Спрощено механічну систему можна подати розрахунковою схемою (рис. 1.8, а) та структурної (рис. 1.8, б)

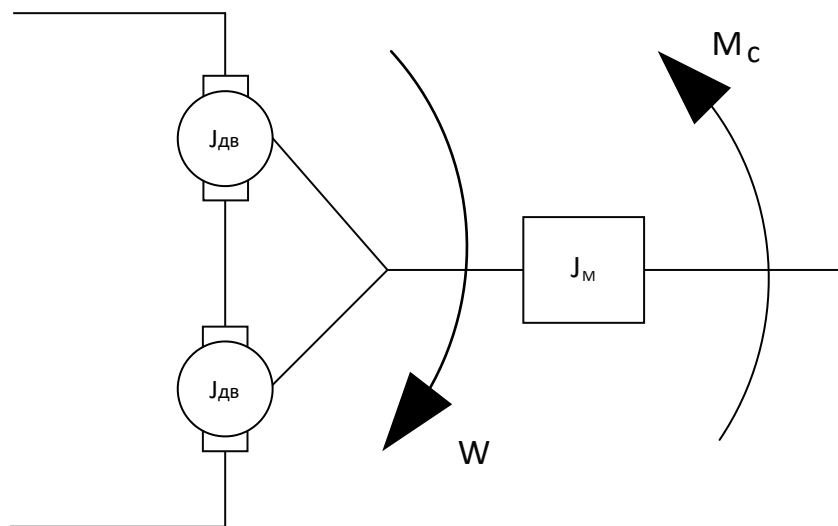
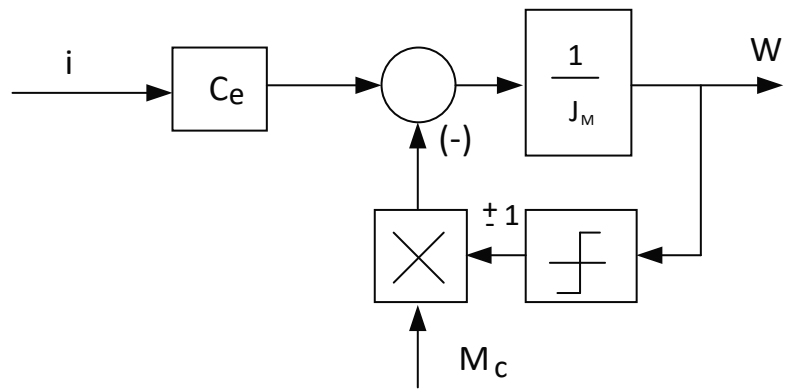


Рис.1.8. Спрощена механічна схема електроприводу сталевоза

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [4]

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок потужності і вибір двигуна

Робота сталевозу вантажопідйомністю 215 тонн пов'язана з ризиками, що диктують особливі вимоги до розрахункової частини.

Техніко-економічне обґрунтування

1. Умови екстремальних навантажень та температур

Сталевоз працює в зоні інтенсивного теплового випромінювання від ковша. Це зумовлює вибір двигунів із класом нагрівальності ізоляції Н (до 180°C). Обґрунтування потужності має враховувати неминуче зниження ККД електрообладнання при перегріві.

2. Плавність пуску та гальмування

При масі системи понад 215 тонн виникають колосальні сили інерції. Обґрунтування вибору потужності будується як на подоланні сил тертя, а й у забезпеченні нормованого прискорення ($\alpha \leq 0,2 \text{ м/с}^2$). Це критично важливо для: запобігання розбризкуванню рідкого металу, виключення пробуксовування коліс на рейках, зниження динамічних ударів на зубчасті передачі редуктора.

Режим роботи та надійність (ПВ)

Для металургійних цехів характерний повторно-короткочасний режим роботи. У розрахунках приймається тривалість включення (ПВ) 40% чи 60%. Вибір двигуна за середньоквадратичною потужністю (методом еквівалентних моментів) гарантує, що обмотки не згорять при частому чергуванні пусків та зупинок. Дублювання та коефіцієнт запасу. Враховуючи тяжкість наслідків зупинки сталевоза з повним ковшем, у розрахунок закладається підвищений коефіцієнт запасу ($k_z 1.3 \dots 1.5$). Це необхідно для компенсації можливого забруднення рейкових шляхів (протоки шлаку, металевий пил), що різко збільшує опір пересування.

Рационально обраний електродвигун за даного режиму роботи повинен задовольняти трьом вимогам:

- температура нагрівання має перевищувати значень температури, встановлених гостом для електричних машин;
- двигун повинен мати достатній приводний момент для виробничого механізму: пусковий та максимальний момент;
- механізм повинен забезпечити запас зі зчеплення при пуску та гальмуванні.

Визначимо статичні сили та наведені до валу двигуна моменти опору руху:

-при порожньому ковші:

$$F_{\text{мін.}} = \frac{k \cdot (m_o) \cdot g \cdot (m \cdot R_{\text{ц}} + f)}{R_k} = \frac{2 \cdot 80000 \cdot 9,81 \cdot (0,015 \cdot 0,15 \cdot 0,0012)}{0,5} = 10830,24 \text{ Н} \quad (2.1)$$

де $k = 2$ - коефіцієнт, що враховує тертя реборд ходових коліс об рейки (див. технічні дані на механізм);

$m = 0,015$ - коефіцієнт тертя ходових колес;

$m = 80 \text{ т}$ - маса порожнього механізму;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння;

$R = 0,5 \text{ м}$ - радіус ходового колеса;

$f = 0,0012$ - коефіцієнт тертя кочення

Розрахуємо наведений момент опору:

$$M_{\text{с мін}} = \frac{F_{\text{с мін}} \cdot R_k}{i_{\text{ред}} \cdot \eta_m} = \frac{10830,24 \cdot 0,5}{52,32 \cdot 0,85} = 121,76 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.2)$$

Розрахуємо при повному завантаженні ковша:

$$F_{\text{мін.}} = \frac{k \cdot (m_o) \cdot g \cdot (m \cdot R_{\text{ц}} + f)}{R_k} = \frac{2 \cdot 295000 \cdot 9,81 \cdot (0,015 \cdot 0,15 \cdot 0,0012)}{0,5} = 39895,8 \text{ Н} \quad (2.3)$$

де $m_n = 215 \text{ т}$ - маса вантажу

$$M_{c \text{ макс}} = \frac{F_{c \text{ макс}} \cdot R_k}{i_{\text{ред}} \cdot \eta_m} = \frac{39895,8 \cdot 0,5}{52,32 \cdot 0,85} = 448,55 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.4)$$

Розрахуємо при повному завантаженні ковша статичну потужність при рівномірному русі:

$$P_c = \frac{F_{c \text{ макс}} \cdot V_m}{\eta_m} \cdot 10^{-3} = \frac{39895,8 \cdot 0,83}{0,85} \cdot 10^{-3} = 38,96 \text{ кВт} \quad (2.5)$$

де $m = 0,83 \text{ м / с}$ - лінійна швидкість механізму;

$\eta_m = 0,85$ - коефіцієнт корисного дій механізму.

Для забезпечення роботи сталевоза з одним двигуном обираємо кожен двигун на повну потужність. З урахуванням стандартного значення ПВ = 40% □ для двигуна, розрахуємо його повну потужність:

$$P_{\text{дв.розр.}} = P_c \sqrt{\frac{\text{ПВ \%}}{100}} = 38,96 \sqrt{\frac{40}{100}} = 24,6 \text{ кВт}. \quad (2.6)$$

Розрахуємо значення максимальної швидкості руху під час робочої швидкості $V_m = 0,83 \text{ м/с}$:

$$W_{\text{дв.розр.}} = \frac{V_m}{R_k} \cdot i_{\text{ред}} = \frac{0,83}{0,5} \cdot 52,32 = 86,85 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.7)$$

Момент інерції навантаженого механізму, приведений до валу двигуна розрахуємо за виразом:

$$\begin{aligned} J_{\text{межруж}} &= 2 \cdot J_{\text{дв}} \cdot 1,25 + m \left(\frac{V_m}{w_{\text{дв}}} \right)^2 = \\ &= 1,25 \cdot 2 \cdot 2 + 295 \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{0,83}{86,85} \right)^2 = 31,94 \text{ кгм}^2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Момент інерції порожнього механізму, приведений до валу двигуна, розрахуємо за виразом:

$$\begin{aligned} J_{\text{межруж}} &= 2 \cdot J_{\text{дв}} \cdot 1,25 + m_o \left(\frac{V_m}{w_{\text{дв}}} \right)^2 = \\ &= 1,25 \cdot 2 \cdot 2 + 80 \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{0,83}{86,85} \right)^2 = 12,3 \text{ кгм}^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Обираємо електродвигун типу Д-808, довідкові дані наведено у таблиці 2.1.

Перевіримо двигун на перевантажувальну здатність під час роботи з повною навантаженням у режимі заданого максимального прискорення:

Динамічний момент, необхідний для забезпечення прискорення $\alpha = 0,2 \text{ м/с}^2$:

$$M_{\text{дин макс}} = a \cdot \frac{i_{\text{ред}}}{R_{\text{к}}} \cdot j_e = 0,2 \cdot \frac{52,32}{0,5} \cdot 31,94 = 668,44 \text{ Нм} \quad (2.10)$$

Таблиця 2.1

Характеристика електродвигуна типу Д-808

Тип електродвигуна	$P_{\text{н}}$ кВт	$U_{\text{н}}$ В	$I_{\text{н}}$ А	$n_{\text{н}}$ Об/хв	$R_{\text{оя}}$ Ом	$R_{\text{дп}}$ Ом
Д-808	26	220	134	825	0,034	0,02
$n_{\text{н}}$	$M_{\text{макс}}$	$\Phi_{\text{ном}}$	Число полюсів 2р	GD^2	$R_{\text{в}}$	$I_{\text{в}}$
Об/хв	Н·м	Вб	-	кг·м ²	Ом	А
1650	1175	0,0358	4	6	44,4	3,4

Повний момент двигуна в режимі запуску

$$M_{\text{пуск макс}} = M_{\text{с розр}} + M_{\text{дин.макс}} = 448,5 + 668,44 = 1116,94 \text{ Нм} \quad (2.11)$$

За умови: $M_{\text{пускмакс}} < \lambda_{\text{дв}} \cdot M_{\text{дв}}$

впливає, що двигун по перевантажувальній здатності проходить і забезпечує необхідне максимальне значення прискорення.

Розрахункові параметри електродвигуна

За паспортними даними обраного електродвигуна визначимо його основні параметри:

- Розрахуємо номінальну кутову швидкість

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = 3,14 \cdot \frac{825}{30} = 86,35 \text{ рад/с} \quad (2.12)$$

де $n_{\text{ном}} = 825 \text{ об/хв}$. номінальна частота обертання обраного електродвигуна; -

Опір двигуна в гарячому стані при перегріві $+95 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$R_{\text{двгор}} = 1,38 \cdot (R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}}) = 1,38 \cdot (0,034 + 0,02) = 0,074552 \text{ Ом} \quad (2.13)$$

- розрахуємо коефіцієнт ЕРС (В с/рад) та електромагнітного моменту (Н м/) двигуна:

$$c = \frac{U_n - I_{\text{двн}} \cdot R_{\text{двгор}}}{W_{\text{двн}}} = \frac{220 - 134 \cdot 0,07452}{86,35} = 2,43. \quad (2.14)$$

- розрахуємо максимальний допустимий струм двигуна:

$$I_{\text{двмакс}} = 3 \cdot I_{\text{ном}} = 3 \cdot 134 = 402 \text{ А} \quad (2.15)$$

- розрахуємо індуктивність електродвигуна

L

$$L_{\text{дв}} = \gamma \cdot \frac{U_{\text{дв.ном}}}{p \cdot w_{\text{дв.ном}} \cdot I_{\text{дв.ном}}} = 0,4 \cdot \frac{220}{2 \cdot 86,35 \cdot 134} = 0,0038 \text{ Гн}, \quad (2.16)$$

де $p = 2$ - число пар полюсів електродвигуна $\gamma = 0,4$

2.2 Вибір елементів електроустаткування

2.2.1 Вибір струмообмежувального реактора

Струмообмежувальні реактори включають у ланцюг змінного струму при підключенні тиристорного перетворювача до промислової мережі або загальної мережі живлення кількох тиристорних перетворювачів

Визначимо необхідне значення повного опору обмотки фази реактора:

$$Z_{\text{ф.расч}} = \frac{U_{\text{кз}} \% \cdot U_{\text{фн}}}{100 \cdot I_{\text{ф.расч}}} = \frac{5,5 \cdot 220}{100 \cdot 114,67} = 0,1055 \text{ Ом}, \quad (2.17)$$

$$U_{2\text{фн}} = \frac{U_{2\text{м}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} \quad (2.18)$$

відносна напруга короткого замикання реактора:

$$U_{\text{кз}} \% = 5,5\%$$

Розрахуємо фазне значення струму:

$$I_{\text{ф.расч}} = k_i \cdot k_{i2} \cdot I_{\text{дв.н}} = 1,05 \cdot 0,815 \cdot 134 = 114,67 \text{ А} \quad (2.19)$$

де $k_i = 1,05$ - коефіцієнт враховує відхилення форми струму від синусоїдальної;
 $k_{i2} = 0,815$ - коефіцієнт, що характеризує відношення $\frac{I_{2\Phi}}{I_{\text{дв}}}$ для трифазної мостової схеми випрямляча

$$X_{\text{ф.расч}} = Z_{\text{ф.расч}},$$

$$L_{\text{ф.расч}} = \frac{X_{\text{ф.расч}}}{\omega_c} = \frac{0,1055}{314} = 0,336 \text{ мГн.} \quad (2.20)$$

За розрахунковими даними вибираємо струмообмежуючий реактор типу РТСТ-165-0,2543 з технічними даними, наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

$U_{\text{ли}}$	$I_{\text{ф.н}}$	$L_{\text{р.ф}}$	$R_{\text{р.ф}}$	$X_{\text{рф}}$
В	А	Гн	Ом	Ом
410	165	$0,25 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,0785

2.2.2 Вибір тиристорного перетворювача

Відповідно до вимог, що пред'являються до електроприводу сталевоза, та

спираючись на обраний тип електроприводу серії КТЕ, вибираємо перетворювач виходячи з наступних умов:

$$U_{d,ном} \geq 2U_{об,ном} = 440 \text{ В};$$

$$I_{дн} \geq I_{об,ном} = 134 \text{ А};$$

$$I_{дмакс} \geq I_{об,макс} = 402 \text{ А},$$

де $I_{дн}$ -номінально випрямлений струм перетворювача, А;

$U_{дн}$ -номінальна випрямлена напруга тиристорної перетворювача, В.

Вибираємо тиристорний перетворювач КТЕ-200/460 з технічними параметрами, наведеними у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Технічні параметри тиристорного перетворювача КТЕ-200/460

Технічна характеристика	Одиниця вимірювання	Значення
Номінальний випрямлений струм	А	200
Кратність перевантаження струмом при 10 мс		2,25
Номінальна випрямлена напруга	В	460
Номінальна напруга мережі	В	380
Частота мережі живлення	Гц	50
Коливання живильної мережі, не більше	%	+10 -15
Номінальна напруга тиристорного збудника	В	220

2.2.3 Обґрунтування та розрахунок параметрів згладжувального реактора

Використання тиристорного випрямляча у системі живлення електродвигуна супроводжується виникненням пульсацій струму. Інтенсивність цих змінних гармонік визначається налаштуваннями кута регулювання та характеристиками ланцюга. Подібний режим роботи провокує надмірне перегрів машини, ускладнює процес комутації і, через формування області переривчастих струмів, знижує стабільність механічних показників.

Для мінімізації амплітуди пульсацій в ланцюг якоря встановлюють реактор. Це рішення оптимізує експлуатаційні параметри двигуна, проте негативно позначається на масогабаритних показниках установки, збільшує капітальні витрати та знижує швидкодію системи. Розрахунок необхідної індуктивності дроселя для стабілізації режиму безперервних струмів здійснюється згідно з методикою [5].

$$L_{\text{кн1}} = \frac{1}{\omega_c} \cdot \kappa_{\text{грmax}} \cdot \frac{U_{2\phi\phi}}{\kappa_{u2} \cdot I_{\text{д гр}}} =$$

$$= \frac{1}{314} \cdot 0.09356 \cdot \frac{220}{0.428 \cdot 16.08} = 0.0095 \text{ Гн.} \quad (2.21)$$

Розрахуємо значення початково безперервного струму:

$$\kappa_{\text{грmax}} = 1 - \frac{\pi}{6} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{6} = 1 - \frac{3.14}{6} \cdot \text{ctg} \frac{3.14}{6} = 0.093$$

$$I_{\text{д гр}} = (0.1 - 0.15) \cdot I_{\text{н}} = 0.12 \cdot 134 = 16.08 \text{ А.} \quad (2.22)$$

Розрахункове значення індуктивності коригуючого дроселя буде дорівнювати:

$$L_{\text{др1}} = L_{\text{кн1}} - 2L_{\text{р.ф}} - 2L_{\text{дв}} =$$

$$= 0.0095 - 2 \cdot 0.00025 - 2 \cdot 0.0038 = 0.00137 \text{ Гн.} \quad (2.23)$$

$$E_{\text{д(1)max}} = \frac{U_{2\phi\phi} \cdot \sqrt{2} \cdot m_{\text{в}}}{\kappa_{u2} \cdot (m_{\text{в}}^2 - 1)} =$$

$$= \frac{220 \cdot \sqrt{2} \cdot 6}{0.428 \cdot (6^2 - 1)} = 124.6 \text{ В,} \quad (2.24)$$

$E_{\text{д(1)max}}$ - для визначення ефективного значення основної гармоніки пульсацій випрямленої напруги за умови, що кут регулювання дорівнює 90° розрахуємо:

$$P_{(1)\%} = 15 \% \quad (2.25)$$

Розрахуємо індуктивність дроселя, що згладжує:

$$\begin{aligned} L_{др2} &= L_{кн2} - 2L_{р.ф} - L_{дв} = \\ &= 0,0033 - 2 \cdot 0,00025 - 0,0076 = 0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

Для силового ланцюга встановлюється дросель з параметрами наведеними у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Параметри реактора, що згладжує ФРОС-65/0,5 УЗ

Тип	Індуктивність в Гн, L _{др}	Опір, Ом, R _{др}	Струм, А
ФРОС-65/0,5 УЗ	$1 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	320

2.2.4 Визначення розрахункових характеристик статичного перетворювача

Середня величина випрямленої напруги при заданому куті регулювання $\alpha=0^\circ$:

$$E_{d0} = \frac{U_{2\phi}}{k_{u2}} = \frac{220}{0,428} = 514 \text{ В.} \quad (2.27)$$

Розрахуємо коефіцієнт (максимальне значення) посилення перетворювача:

$$K_{тп} = \frac{\pi \cdot k_{yo} \cdot E_{d0}}{2 \cdot U_{оп макс}} = \frac{3,14 \cdot 0,475 \cdot 514}{10} = 76,66, \quad (2.28)$$

де $k_{y0} = 0,475$ -коефіцієнт передачі керуючого органу на вході СІФУ;
амплітуда опорної напруги СІФУ:

$$2 \cdot U_{оп макс} = 10 \text{ В}$$

Розрахуємо постійну часу тиристорного перетворювача:

$$T_{\text{тп}} = \frac{0,5}{m_{\text{в}} \cdot f_c} = \frac{0,5}{6 \cdot 50} = 0,00167 \text{ с} \quad (2.29)$$

Розрахуємо коефіцієнт передачі пристрою узгодження на вході СІФУ перетворювача:

$$K_{\text{yo}} = \frac{\alpha_{\text{нач}} - \alpha_{\text{мин}}}{\alpha_0} = \frac{110 - 10}{180} = 0,555 \quad (2.30)$$

Розрахуємо опір силового ланцюга перетворювача:

$$R_{\text{тп}} = 2R_{\text{р.ф}} + R_{\text{к}} + R_{\text{др}} = 2 \cdot 0,013 + 0,075 + 0,0045 = 0,1055 \text{ Ом},$$

Розрахуємо опір, що вноситься за рахунок комутації анодних струмів, Ом: (2.31)

$$R_{\text{к}} = \frac{m_{\text{в}} \cdot X_{\text{трф}}}{2\pi} = \frac{6 \cdot 0,0785}{2 \cdot 3,14} = 0,075 \text{ Ом}$$

Розрахуємо індуктивність силового ланцюга перетворювача:

$$L_{\text{тп}} = 2L_{\text{р.ф}} + L_{\text{др}} = 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} + 0,001 = 0,0015 \text{ мГн}. \quad (2.32)$$

Розрахуємо максимальний допустимий струм перетворювача:

$$I_{\text{дмак}} = 2,25 \cdot I_{\text{дн}} = 2,25 \cdot 200 = 450 \text{ А}. \quad (2.33)$$

Вибираємо максимальний допустимий струм електроприводу:

$$I_{\text{сп.макс.}} = I_{\text{дв.макс.}} = 402 \text{ А}.$$

2.2.5 Визначення параметрів силового ланцюга

До складу електроприводу, що розглядається, входять тиристорне джерело живлення, електродвигун постійного струму і додаткові реактори. У ході проектування були встановлені параметри індуктивності згладжувального та обмежувального дроселів. Для напівпровідникового перетворювача $L_{\text{тп}} = 0,5$

мГн визначено основні показники ланцюга випрямлення $R_{ТП} = 0,1$ Ом. Також наведено характеристики двигуна, включаючи опір обмоток у нагрітому стані $R_{ДВ.гор.} = 0,07452$ Ом конструктивну постійну моменту $c = 2,43$ та номінальний крутний момент $M_{ном} = 301$ Н·м. Розрахункові значення для якірного ланцюга включають індуктивність додаткового реактора, активний опір двигуна та параметри перетворювача: сумарний активний опір ланцюга; індуктивний опір фази.

Розрахуємо індуктивність якірного ланцюга:

$$L_{яц} = 2 \cdot L_{ДВ} + L_{ТП} = 2 \cdot 0,0038 + 0,0015 = 0,0091 \text{ Гн.} \quad (2.34)$$

Розрахуємо опір ланцюга двигуна:

$$R_{цдв} = 2 \cdot R_{ДВ.гор} + 0,1 \cdot 2R_{ДВ.гор} = 2 \cdot 0,07452 + 0,1 \cdot 2 \cdot 0,07452 = 0,164 \text{ Ом} \quad (2.35)$$

Розрахуємо опір якірного ланцюга:

$$R_{яц} = R_{цдв} + R_{ТП} = 0,164 + 0,1055 = 0,27 \text{ Ом} \quad (2.36)$$

Розрахуємо електромагнітну постійну якірного ланцюга:

$$T_{яц} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}} = \frac{0,0091}{0,27} = 0,034 \text{ с.} \quad (2.37)$$

Коефіцієнт ЕРС еквівалентного двигуна дорівнює $C = 2 \cdot C_{ДВ.} = 4,86$ В с/рад.

2.2.6 Розрахунок параметрів механічної системи

$$J_{Е\text{ мін}} = 12,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{Е\text{ макс}} = 31,94 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$M_{с\text{ мін}} = 121,76 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{с\text{ макс}} = 448,55 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad 2$$

Проведемо розрахунок електромеханічної постійної часу:

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{яц}}{c^2} = \frac{(12,3 \div 31,94) \cdot 0,27}{4,86^2} = 0,14 \div 0,365 \quad (2.38)$$

2.3 Перевірка забезпечення заданої сфери існування електромеханічних характеристик електроприводу

У цьому розділі виконується аналіз відповідності робочих параметрів електроприводу встановленим межам. Область функціонування замкнутої системи, лімітована граничною швидкістю $\omega = \omega_{\max}$ та допустимими значеннями струму $\pm I_{\text{доп}}(\omega)$, повинна знаходитися в межах технічних можливостей комплексу "перетворювач - двигун". Кордони останнього визначаються режимами мінімального кута регулювання (випрямлення) та максимально можливого інвертування. Дотримання даних пропорцій зазвичай передбачає наявність надмірної потужності трансформатора та перетворювального блоку. Однак оскільки максимізація динамічних показників не є пріоритетним завданням поточного проекту, такі вимоги до запасу напруги можуть бути пом'якшені.

Необхідно забезпечити дотримання ключового критерію: електромеханічна характеристика системи без зворотного зв'язку повинна проходити вище за розрахункову точку $\omega = \omega_{\max}$, $I = I_H$. Ця умова перевіряється для режиму роботи випрямляча при мінімально можливому куті відкриття вентилів $\alpha_{\min}$ у поєднанні з падінням напруги в мережі живлення.

Розрахуємо мінімальний кут управління перетворювачем:

$$\alpha_{\min} = \arccos \frac{C_{\Sigma} \cdot \omega_{\max} + I_{\text{двн}} \cdot R_{яц}}{E_{d0}} = \arccos \frac{2 \cdot 2,43 \cdot 86,35 + 134 \cdot 0,27}{514} = \arccos 0,887 = 27,52 \text{ град.} \quad (2.39)$$

Приймаємо $\alpha_{\min} = 10$ градусів, з урахуванням можливого зниження напруги мережі. Розраховуємо електромеханічні характеристики розімкнутої системи при $\alpha_{\min} = 10$ градусів за виразом у випрямлячому режимі:

$$\omega_{\max}(I_{\text{я}}) = \frac{1}{c} (k_c \cdot E_{d0} \cdot \cos \alpha_{\min} - R_{\text{яц}} \cdot I_{\text{я}}) = \frac{1}{4,86} (514 \cdot \cos 10^\circ - 0,27 I_{\text{я}}) \quad (2.39)$$

Результати розрахунку електромеханічної характеристики, при $\alpha_{\min}$, зведені у таблиці 2.5, а самі показники представлені рисунку 2.1.

Таблиця 2.5

Розрахункові параметри електромеханічної характеристики при $k_c = 1$

$\omega, \text{с}^{-1}$	102	96,37	80,79
$I_{\text{дв}}$	0	134	402

Визначимо електромеханічну характеристику безпечного інвертування при роботі перетворювача в інверторному режимі:

$$\omega_{\max}(I_{\text{я}}) = \frac{1}{c} \left[K_c \cdot E_{d0} \cdot \cos \delta - (R_{mn} - R_{\text{цдв}}) \cdot I_{\text{я}} \right] = \frac{1}{4,86} \left[514 \cdot \cos 6^\circ - (0,1055 - 0,164) I_{\text{я}} \right], \quad (2.40)$$

де δ - кут, запасу при інвертуванні приймаємо $\delta = 6$ град.;

Таблиця 2.6

Розрахункові параметри електромеханічної характеристики, при $k_c = 0,9$.

$\omega, \text{с}^{-1}$	105,2	106,8	110
$I_{\text{дв}}$	0	-134	-402

Визначимо максимальний кут управління:

$$\alpha_{\max} = \arccos \left[\frac{2 \cdot R_{mn} \cdot I_{\text{епмакс}}}{E_{d0}} - \cos \delta \right] = 146^\circ \quad (2.41)$$

Для знайденого $\alpha_{\max}$, розраховуємо та побудуємо електромеханічну характеристику розімкнутої системи електроприводу при роботі в інверторному режимі:

$$\omega_{\max}(I_{\text{я}}) = \frac{1}{c} (-k_c \cdot E_{\text{d0}} \cdot \cos \alpha_{\text{пхак}} - R_{\text{яц}} \cdot I_{\text{я}}) = \frac{1}{4,86} (-514 \cdot \cos 146^\circ - 0,27 \cdot I_{\text{я}}) \quad (2.42)$$

У таблицю 2.7 зведено результати розрахунку електромеханічних показників.

Таблиця 2.7

Розрахунок електромеханічних показників

$\omega, \text{с}^{-1}$	87,7	95,12	110
$I_{\text{дв}}$	0	-134	-402

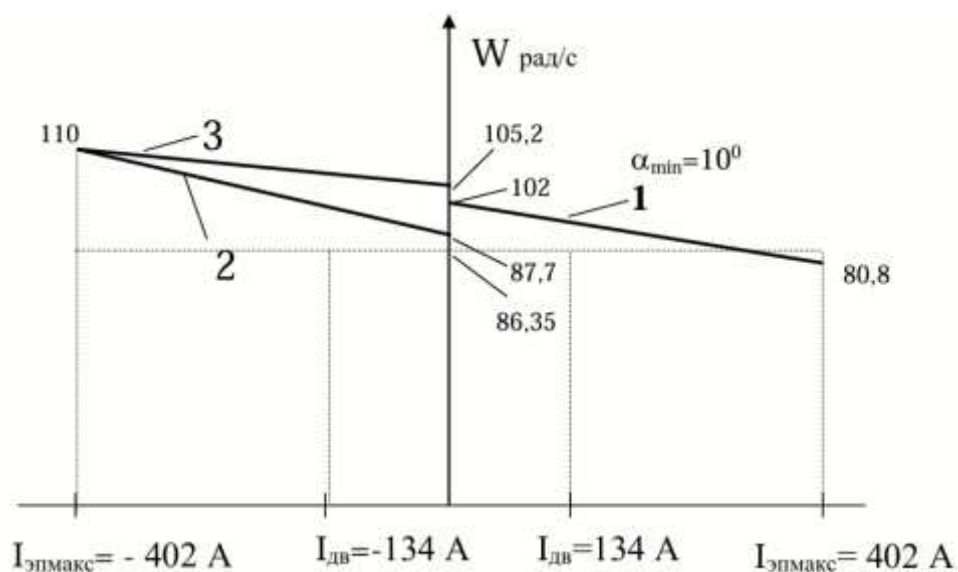


Рис. 2.1. Область існування електромеханічних характеристик

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

2.4 Розрахунок електромеханічних характеристик розімкнутої системи перетворювач-двигун

Розрахуємо швидкість обертання валу електродвигуна:

$$\omega = \frac{E_d - I_d \cdot R_{яц} - \Delta U_a}{c}, \quad (2.43)$$

Середнє значення випрямленої ЕРС у режимі безперервного струму:

$$E_d = E_{d0} \cdot \cos(\alpha)$$

α – кут включення тиристора, що відраховується від точки природної комутації;
 ΔU_a - пряме падіння напруга на тиристорі.

Шляхом перетворення вихідних рівнянь виведемо залежність кута управління швидкості обертання. Цей вираз необхідний забезпечення заданого швидкісного режиму роботи двигуна.

$$\alpha(\omega) = \arccos\left(\frac{\omega \cdot c + I_d \cdot R_{яц} + \Delta U_a}{E_{d0}}\right). \quad (2.44)$$

$$\omega(I) = \frac{E_{d0} \cdot \cos(\alpha(\omega)) - I \cdot R_{яц} - \Delta U_a}{c}. \quad (2.45)$$

Незважаючи на теоретичну лінійність характеристик, на практиці при невеликих навантаженнях виникає режим переривчастих струмів (РПТ), масштаб якого збільшується пропорційно до зростання кута α . Фізика процесу полягає в тому, що миттєва величина випрямленої напруги в певні моменти виявляється нижчою за проти-ЕРС мотора. Відповідно до рівняння рівноваги, ЕРС ланцюга набуває негативного значення, що диктує необхідність зміни напрямку струму. Однак одностороння провідність силових вентилів перешкоджає цьому, внаслідок чого струм обнуляється. При значних навантаженнях струм залишається безперервним навіть при короточасному перевищенні ЕРС двигуна над напругою перетворювача, оскільки система має суттєвий запас електромагнітної енергії. Кордоном між цими станами служить режим початкового безперервного струму. Рівень граничного струму визначається параметрами силової схеми та кутом регулювання. Для аналізу

зони переривчастих струмів визначимо кут відкриття щодо початку позитивної напівхвилі фазної ЕРС:

$$\theta_0(\alpha) = \frac{180}{\pi} \cdot \left(\alpha(\omega) + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m_s} \right) \right). \quad (2.46)$$

Значення ЕРС у відносних одиницях залежно від кута управління α у зоні переривчастих струмів:

$$e(\alpha) = \cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \frac{\sin\left(\left(\theta_0(\alpha) - \theta\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \sin\left(\left(\theta_0(\alpha) + \lambda - \theta\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot e^{\frac{\lambda \cdot \pi}{180} \cot\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right)}}{1 - e^{\frac{\lambda \cdot \pi}{180} \cot\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right)}} \quad (2.47)$$

Кут провідності тиристорів:

$$\lambda = \frac{2 \cdot 180}{m_s} = 60 \text{ град}$$

кут θ – кут відставання струму в якорі від напруги. Він обумовлений присутністю в ланцюзі якоря індуктивності $L_{яц}$. Кут θ знайдемо за виразом:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\omega_0 \cdot L_{яц}}{R_{яц}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (2.48)$$

Значення струму у відносних одиницях у зоні уривчастих струмів:

$$i(\alpha) = \frac{m_s}{2 \cdot \pi} \left(\cos\left(\theta_0(\alpha) \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \cos\left((\lambda + \theta_0(\alpha)) \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \lambda \cdot \frac{\pi}{180} \cdot e_{sp}(\alpha) \right), \quad (2.49)$$

Характеристики режиму переривчастого струму можна побудувати в абсолютних одиницях (ω)= f(I) за такими виразами:

$$\omega(\alpha) = e(\alpha) \frac{\sqrt{2} \cdot U_n \cdot \cos\left(\theta_0(\alpha) \cdot \frac{\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right) - \Delta U_n}{c},$$

$$I(\alpha) = i(\alpha) \frac{\sqrt{2} \cdot U_n \cdot \cos\left(\theta_0(\alpha) \cdot \frac{\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right)}{R_{нп}}. \quad (2.50)$$

Графічна інтерпретація електромеханічних властивостей системи в зоні уривчастих струмів отримана при зміні параметрів α (0-180) і λ (0-60) в заданих діапазонах. Відповідні розрахункові криві, збудовані за допомогою інструментарію MathCad, представлені на рис. 2.2.

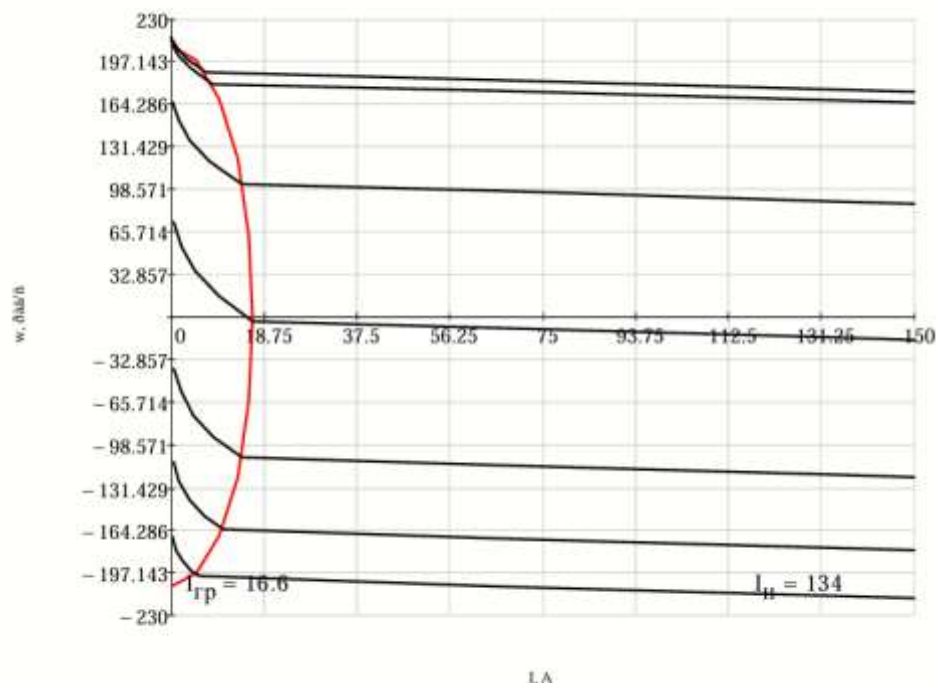


Рис. 2.2. Електромеханічні характеристики системи ТП-Д із роздільним управлінням

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Визначення параметрів граничної характеристики здійснюється на основі рівнянь для струму та швидкості, що описують роботу системи у режимі переривчастої провідності. Для цього фіксується значення кута провідності $\lambda = 60$ град, в той час як кут регулювання α виступає в ролі параметра, що варіюється.

$$\frac{I_{дп\max}}{I_{дн}} = \frac{16,6}{134} = 0,124$$

2.5 Структурна схема силового каналу електроприводу

Структурна схема силового каналу електроприводу наведено рис.2.3.

Параметри елементів структурної схеми наведено у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8

Параметри елементів силового каналу

$K_{тп}$	$T_{тп},$ с	$R_{яц},$ Ом	$L_{яц},$ Гн	$C_{э}$	$J_{э}$
76,66	0,00167	0,27	0,0091	4,86	12,3÷31,94
$T_{яц},$ с	$K_{дт},$ В/А	$K_{дн}$	$M_{с},$ Н·м	$R_{дв},$ Ом	$T_{дв},$ с
0,034	0,02	0,02	121,76÷448,55	0,07452	0,051

Коефіцієнт передачі датчика струму з урахуванням коефіцієнта передачі шунта ($\Delta U_{шн} = 0,075$ В, $I_{шн} = 500$ А) та коефіцієнта посилення типового осередку датчику струму:

$$K_{дт} = \frac{U_{дт\max}}{I_{шн\max}} = \frac{10}{500} = 0,02 \text{ В/А.} \quad (2.51)$$

Датчик напруги розраховано з використанням типового осередку датчика напруги із вхідним дільником.

Розрахуємо Коефіцієнт передачі датчика напруги:

$$K_{дн} = \frac{U_{дн\max}}{U_{вх.\max}} = \frac{10}{500} = 0,02. \quad (2.52)$$

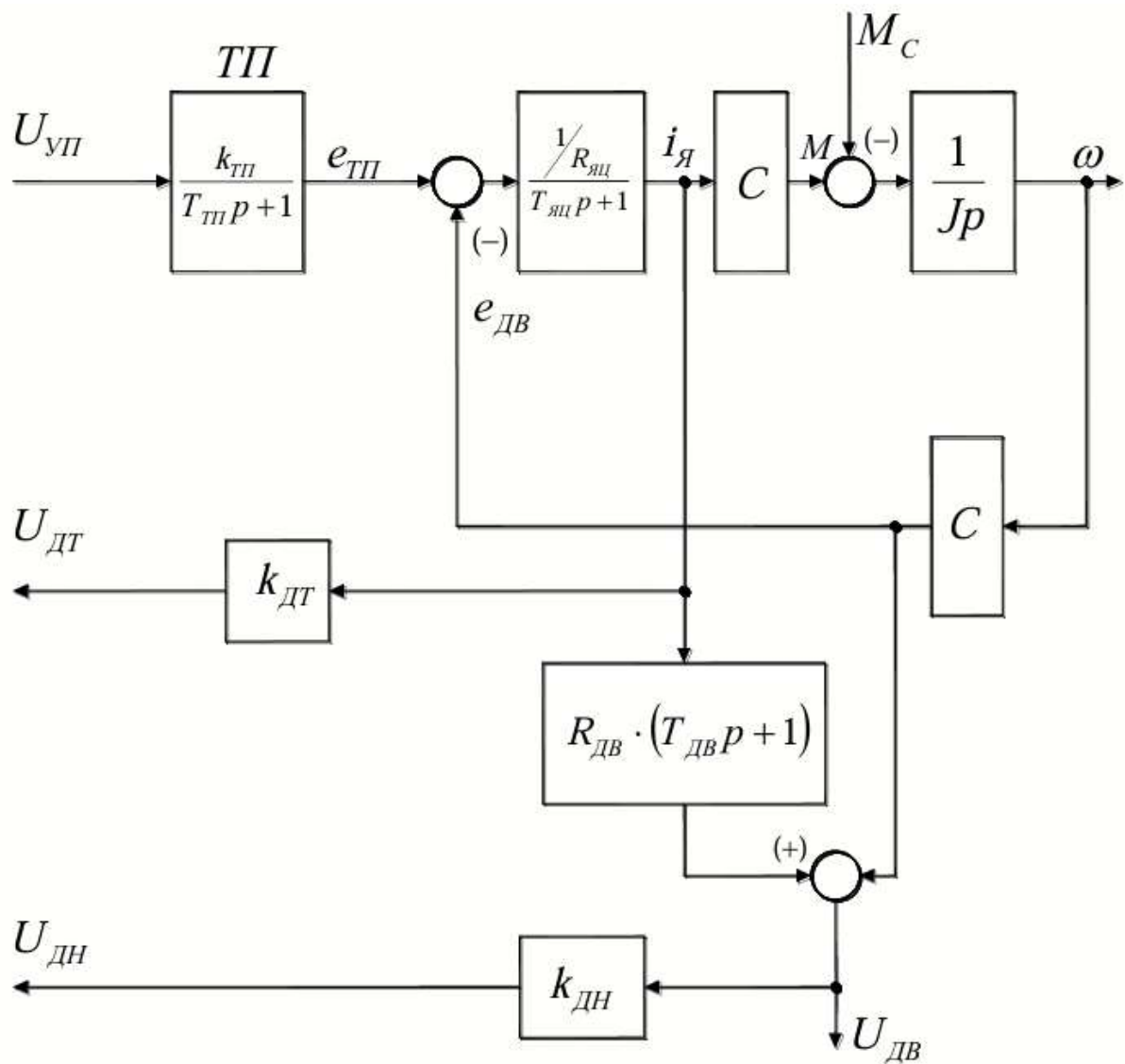


Рис. 2.3. Структурна схема силового каналу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

2.6 Структурна схема системи автоматичного регулювання електроприводу

У системі управління даного електроприводу задіяно зворотний зв'язок по ЕРС, що обґрунтовано помірними вимогами до його точнісних характеристик. Це рішення дозволяє уникнути технічних складнощів, що виникають при використанні тахометричних датчиків. Привод із зв'язком по ЕРС характеризується стабільною роботою та жорсткістю механічних параметрів. До

переваг конфігурації також відносяться простота обслуговування, надійність і можливість струмообмеження.

На рис.2.4 продемонстровано відповідну структурну схему САР. На схемі прийнято такі позначення:

$V_{x.f}$ -фільтр на входе РЭП;

РЕ- регулятор ЕРС;

РТ- регулятор тока;

передатна функція тиристорного перетворювача:

$$W_{TP}(p) = \frac{K_{TP}}{T_{TP}p + 1}.$$

Організація регульованого електроприводу (РЕП) виконана за класичною двоконтурною схемою. Внутрішня петля регулювання струму оснащена ПІ-регулятором, тоді як зовнішній контур управління ЕРС базується на ПІ-регуляторі. Визначення поточного значення ЕРС мотора здійснюється непрямым методом: на вхід спеціалізованого датчика подаються сигнали, еквівалентні напрузі якоря і падіння напруги на його активному опорі, що відповідає методиці [4]. Враховуючи, що введення негативного зворотного зв'язку ЕРС здатне трансформувати динамічні властивості струмового контуру, необхідно провести аналіз її впливу на перехідні процеси.

$$T_M/T_{яц}=(0,14\div 0,365)/0,034=4,12\div 10,74 \quad (2.53)$$

Таким чином, при оптимізації контурів не будемо враховувати ЕРС двигуна.

Методика налаштування даного контуру базується на принципі поділу: спочатку розрахунок ведеться без урахування впливу ЕРС двигуна. Оптимальний тип регулятора визначається за результатами зіставлення електромагнітної постійної часу якорної ланцюга з малою постійною часу системи. Класифікацію методів налаштування залежно від цього коефіцієнта систематизовано в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9

Тип регулятора та метод оптимізації контуру

$T_{яц}/4 \cdot T_{\mu}$	Тип регулятора	Метод оптимізації
≤ 1	П	МО[СО]
≥ 1	П	СО[МО]
$\gg 1$	П[П]	МО[СО]

Налаштування струмового контуру виконується згідно з критеріями модульного (технічного) оптимуму з використанням П-регулятора при значенні коефіцієнта оптимізації $a_T = 2$ [4]. Важливо відзначити, що інтеграція додаткових фільтрів, що згладжують, в дану ланцюг негативно впливає на динамічні властивості системи, провокуючи падіння швидкодії як самого контуру, так і всього приводу. У зв'язку з цим застосування подібних фільтрів виправдане виключно для придушення критичних перешкод і має розглядатися безпосередньо в процесі пусконаладжувальних робіт.

Передатна функція П-регулятора струму може бути розрахована за формулою:

$$W(p)_{PT} = K_{PT} \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p}, \quad (2.54)$$

Постійна часу регулятора струму:

$$T_{PT} = T_{яц} = 0,034 \text{ с};$$

Коефіцієнт посилення регулятора струму може бути розрахован за формулою:

$$K_{\text{рт}} = \frac{T_{\text{яц}} \cdot R_{\text{яц}}}{K_{\text{ТП}} \cdot K_{\text{T}} \cdot 2 \cdot T_{\mu}} = \frac{0,034 \cdot 0,27}{76,66 \cdot 0,0249 \cdot 2 \cdot 0,00167} = 1,44 \quad (2.55)$$

де коефіцієнт зворотного зв'язку струму якоря;

$$K_m = \frac{U_{\text{рс доп}}}{I_{\text{доп max}}} = \frac{10}{402} = 0,0249 \text{ В/А}; \quad (2.56)$$

Коефіцієнт передачі датчика струму $K_{\text{дт}} = 0,02$.

Розрахуємо коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку струму регулятора:

$$K_{\text{от}} = K_{\text{T}}/K_{\text{дт}} = 0,0249/0,02 = 1,245. \quad (2.57)$$

Розрахуємо передатну функцію замкнутого контуру управління:

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{т.зам}} &= \frac{1/K_m}{2T_{\mu m} \cdot p(T_{\mu m} \cdot p + 1) + 1} = \frac{1/K_m}{2T_{\mu m}^2 p^2 + 2T_{\mu m} \cdot p + 1} \approx \\ &\approx \frac{1/K_m}{2T_{\mu} \cdot p + 1} \approx \frac{1/K_m}{2T_m \cdot p + 1} \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$T_m = 2 \cdot T_{\mu m} = 0,0034 \text{ с.}$$

Похибка відпрацювання заданого значення струму складе

$$\Delta I_{\text{уст}} = 0$$

2.8 Оптимізація контуру ЕРС

Структурна схема контуру ЕРС двигуна може бути спрощена представлена у вигляді, наведеному на рисунку 2.6.

$$K_{\text{от2}} \cdot K_{\text{дт}} = R_{\text{дв}} \cdot K_{\text{дн}},$$

Постійну часу фільтра в ланцюгу зворотного зв'язку вибираємо рівною

$$T_{\text{фн}} = T_{\text{дв}} = 0,051 \text{ с.}$$

Для запобігання небажаним викидам (перерегулювання) струму в режимах відпрацювання сигналу, що задає, потрібно симетрування структури управління. З цією метою на вході системи інтегрується інерційна ланка першого порядку, параметри якої відповідають характеристикам ланки у ланцюзі зворотного зв'язку ($T_2 = T_{ДВ} = 0,051\text{с}$). Таке рішення дозволяє компенсувати динамічні спотворення, що вносяться датчиком струму або ЕРС.

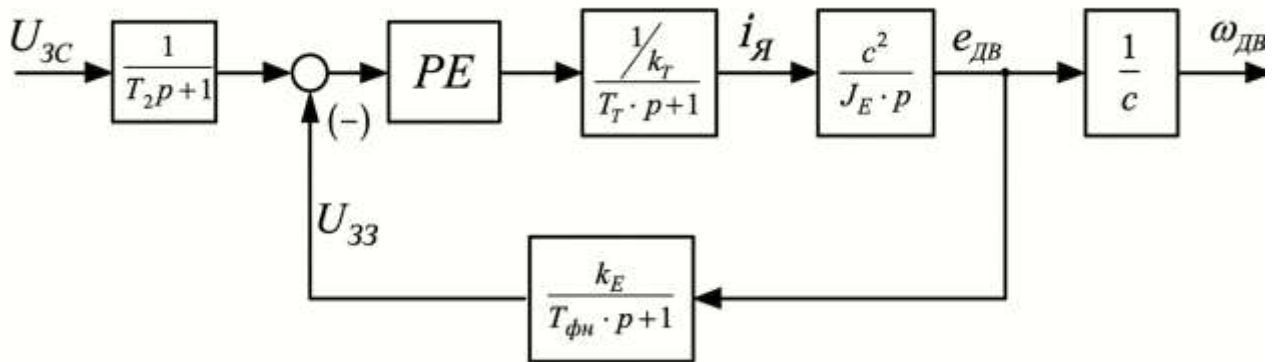


**Рис. 2.6. Структурна схема лінеаризованої САУ РЕП
зі зворотним зв'язком по ЕРС**

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Як методику синтезу контуру управління ЕРС прийнято технічний оптимум. Вибір користь регулятора пропорційного типу зумовлений астатизмом об'єкта (наявністю інтегратора в контурі). Виходячи зі стандартного коефіцієнта оптимізації $a_e = 2$, визначимо характеристики регулятора, використовуючи наведені нижче залежності:

$$K_{\text{рег эдс}} = \frac{J_{\text{э}} \cdot K_T}{K_{\text{э}} \cdot C^2 \cdot a_{\text{э}} \cdot (T_T + T_{\text{ДВ}})} =$$

$$= \frac{(12,3 \div 31,94) \cdot 0,0249}{0,0238 \cdot 4,86^2 \cdot 2 \cdot 0,5434} = 5,013 \div 13,02 \quad (2.58)$$

де $T_{\mu e} = (T_T + T_{\text{ФН}}) = (20,00167 + 0,051) = 0,05434$ - мала постійна часу ЕРС;

$K_e = K_{\text{ос}} \cdot K_{\text{де}} \cdot K_{\text{дн}} = U_{\text{з макс}} / E_{\text{дв макс}} = 10 / 419,66 = 0,0238 \text{ В} \cdot \text{с}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку з ЕРС.

$E_{\text{дв.макс}} = C_e \cdot \omega_{\text{еп.макс}} = 4,86 \cdot 86,35 = 419,66 \text{ В}$ – максимальна ЕРС двигуна при $\omega_{\text{еп.макс}}$.

$K_{\text{ое}} = K_e / K_{\text{де}} \cdot K_{\text{дн}} = 0,0245 / 1 \cdot 0,02 = 1,225$ – коефіцієнт передачі цепі зворотного зв'язку за ЕРС регулятора. $K_{\text{де}} = 1$.

Передаточна функція замкнутого контуру записана відносно швидкості двигуна:

$$W_{\text{зам}} = \frac{1/K_3 \cdot C_3}{a_3(T_m + T_{\text{де}})P[(T_m + T_{\text{де}})P + 1] + 1} = \frac{1/(K_3 \cdot C_3)}{a_3 \cdot T^2 \mu \cdot p + a_3 \cdot T \mu \cdot p + 1} = \frac{8,65}{0,0059P^2 + 0,10868P + 1} \quad (2.59)$$

На основі отриманого виразу передавальної функції було виконано розрахунок логарифмічних частотних характеристик (ЛЧХ) для замкнутого контуру ЕРС. Побудова графіків здійснювалася у обчислювальному середовищі Matlab, результати аналізу представлені рис.2.7.

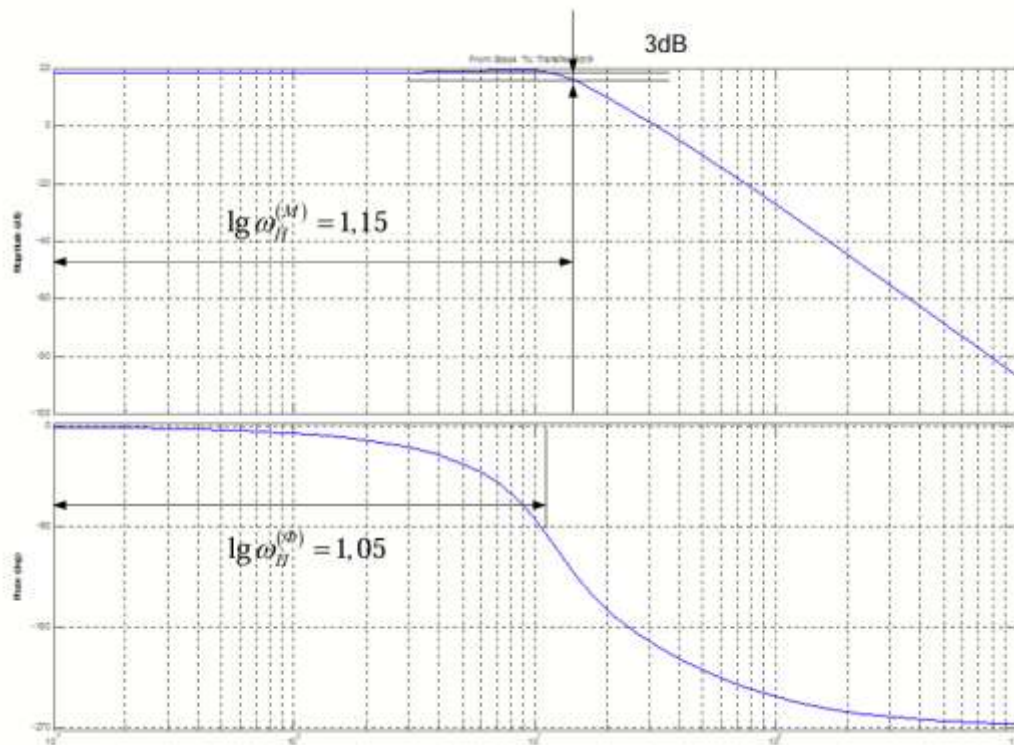


Рис. 2.7. ЛАЧХ замкнутого контуру ЕРС

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

$$\begin{aligned}
 \omega_{\Pi}^{(M)} &= 10^{1,15} = 14,13 \text{ рад/с} \\
 f_{\Pi}^{(M)} &= \frac{\omega_{\Pi}}{2\pi} = \frac{14,13}{6,283} = 2,25 \text{ Гц} \\
 \omega_{\Pi}^{(\Phi)} &= 10^{1,05} = 11,22 \text{ рад/с} \\
 f_{\Pi}^{(\Phi)} &= \frac{\omega_{\Pi}}{2\pi} = \frac{11,22}{6,283} = 1,79 \text{ Гц}
 \end{aligned}
 \tag{2.60}$$

Очікувані орієнтовні показники якості роботи контуру ЕРС (швидкості) з управління:

- статична помилка $\Delta\omega_{y, \text{уст.}} = 0$;
- Смуга пропускання по фазі та модулю

$$\omega_n^{(M)} = \omega^{(\Phi)} = \frac{0,71}{T_{\mu\text{з}}} = \frac{0,71}{0,05434} = 13,06 \text{ рад/с;}
 \tag{2.61}$$

- показники відпрацювання ступінчастого завдання швидкості $\delta = 4,3\%$ -перерегулювання,
- час першого та остаточного входження в 5% зону встановленого значення швидкості

$$t_{py1}^{(5)} = t_{py2}^{(5)} = 4,1 T_{\mu\text{з}} = 4,1 \cdot 0,05434 = 0,22 \text{ с}
 \tag{2.62}$$

2.9 Аналіз нелінійних структур САУ РЕП. Моделювання нелінійних структур САУ РЕП

Достовірність кількісних оцінок поведінки реального РЕП безпосередньо залежить від того, наскільки повно у розрахунках відображено фізичні особливості виконавчих механізмів. Насамперед це стосується тиристорного перетворювача, чия робота характеризується дискретністю та специфічним

законом регулювання груп вентилів. Моделювання має охоплювати нелінійні характеристики СІФУ та зворотних зв'язків, а також враховувати реактивний характер навантажень та складність кінематичних передач. Важливим фактором є варіативність параметрів системи у часі, таких як момент інерції та індуктивність. На рис. 2.8 представлено відповідну нелінійну структурну схему управління.

У структурній схемі прийнято такі позначення:

- передатна функція П-РЕ:

$$W(P)_{PE} = K_{PE}.$$

- передатна функція ПІ-РТ:

$$W(P)_{PT} = K_{PT} \frac{T_{PT} p + 1}{T_{PT} p}.$$

- передатна функція ТП:

$$W(p)_{TP} = \frac{K_{TP}}{T_{mn}p + 1}$$

- передаточна функція передавальна функція електродвигуна:

$$W(p) = \frac{C}{R_{яц} \cdot (T_{яц} p + 1) \cdot Jp}.$$

передатна функція фільтра при $T_{фн} = T_{дв}$.

$$W(P)_{\phi\phi} = \frac{1}{T_{\phi H} P + 1}.$$

K_{oe} - коефіцієнт зворотного зв'язку з ЕРС

$K_{де}$ -коефіцієнт датчика ЕРС

$K_{дт}$ - коефіцієнт датчика струму

$K_{іт}$ -коефіцієнт зворотного зв'язку по струму

$K_{дн}$ -коефіцієнт датчика напруги

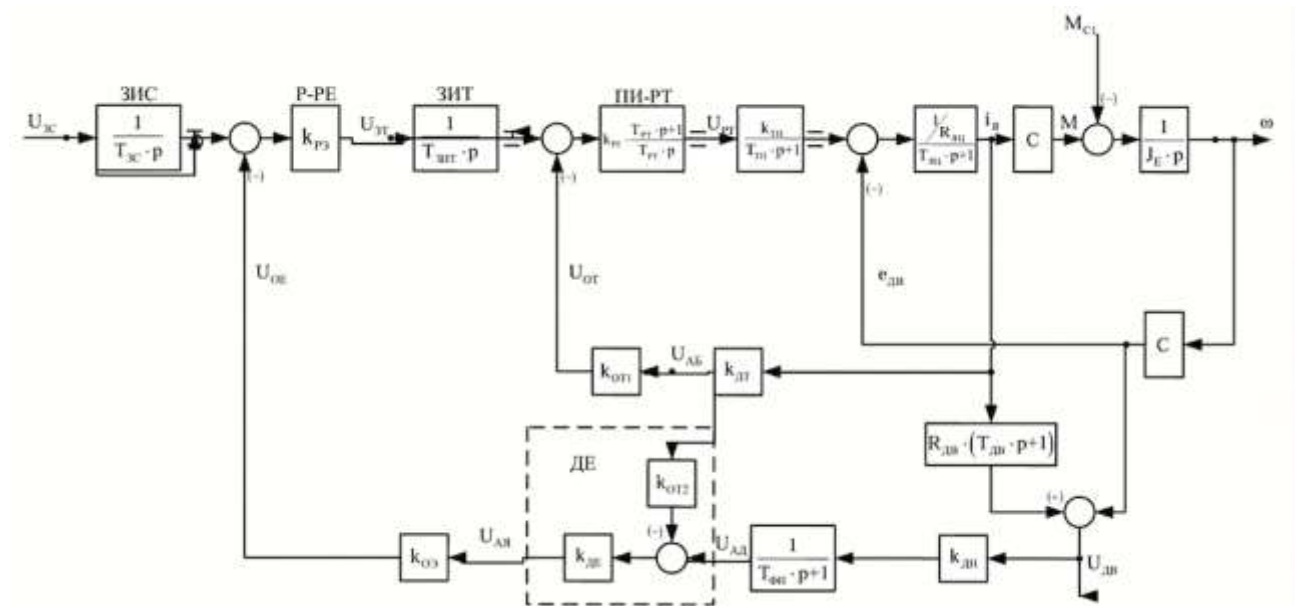


Рис. 2.8. Структурна схема нелінійної САУ РЕП безперервний перетворювач

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

2.9.1 Розрахунок перехідних процесів та визначення динамічних показників якості нелінійної САУ РЕП перетворювач безперервний

Оцінку перехідних характеристик нелінійної системи управління безперервним перетворювачем виконано на ЕОМ з використанням пакета прикладних програм Matlab. Метод чисельного моделювання, що застосовується, дозволяє детально досліджувати реакції приводу на типові впливи. Програмний комплекс дозволяє оперативно змінювати параметри ланок системи оптимізації її структури. Отримані в ході моделювання графіки представлені на рис. 2.10-2.13, служать базисом для визначення динамічної точності та швидкодії РЕП. Схема набору моделі відображена рис.2.9.

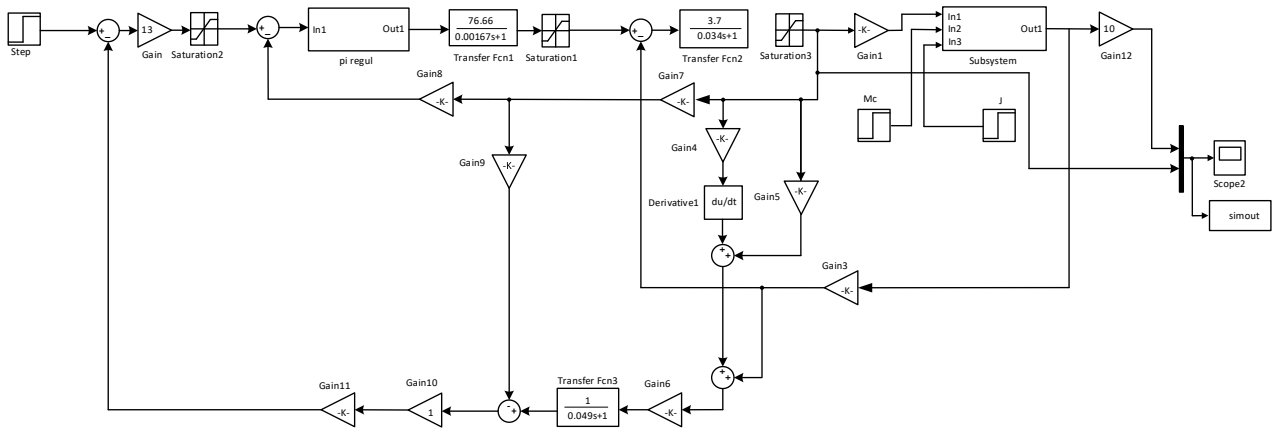


Рис. 2.9. Схема набору у програмному середовищі Matlab

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

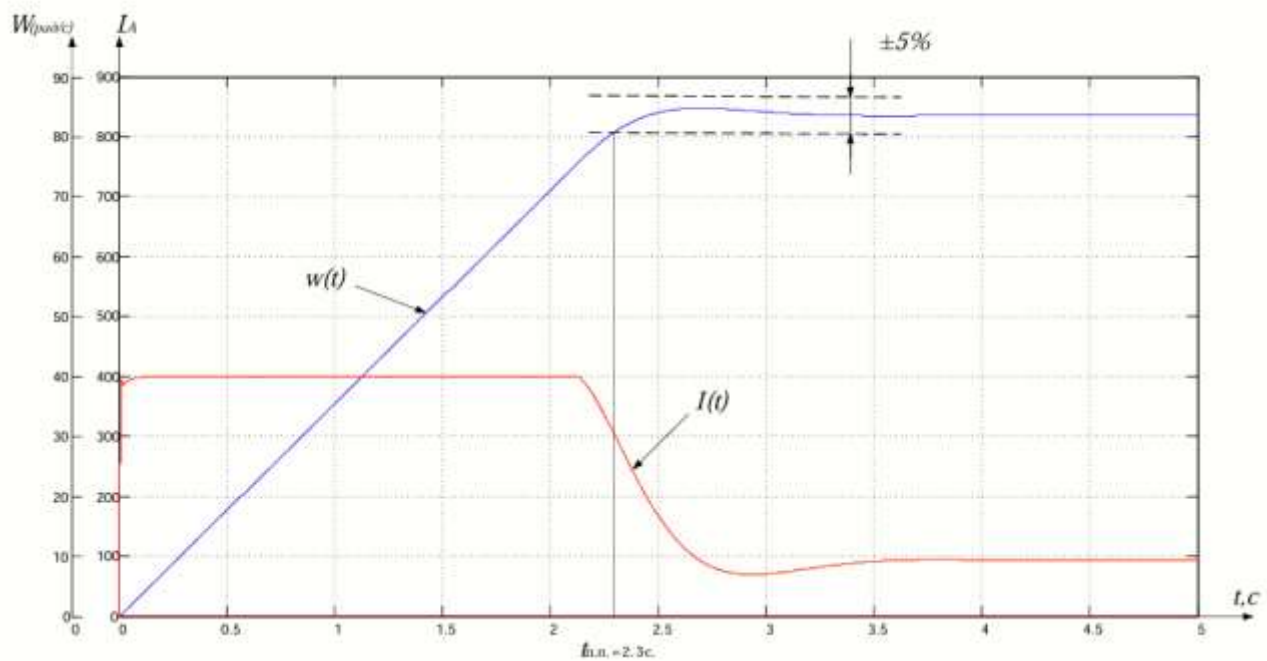


Рис. 2.10. Перехідні процеси пуск без задатчика інтенсивності

$$U_H = 10V; \omega_H = 86,35 \text{ рад/с}; I_{\text{макс}} = 402A; M_C = 449 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

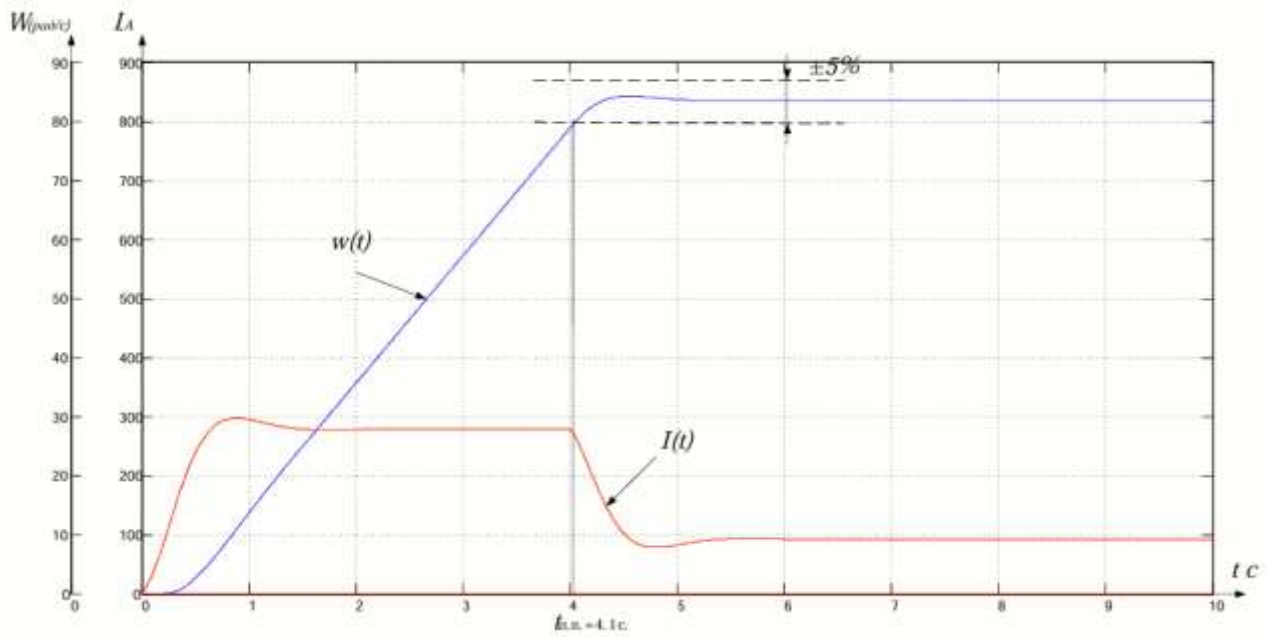


Рис. 2.11. Перехідні процеси пуск із задатчиком інтенсивності

$$U_H = 10V; \omega_H = 86,35 \text{ рад/с}; I_{\text{макс}} = 402A; M_C = 449H \cdot \text{м}.$$

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

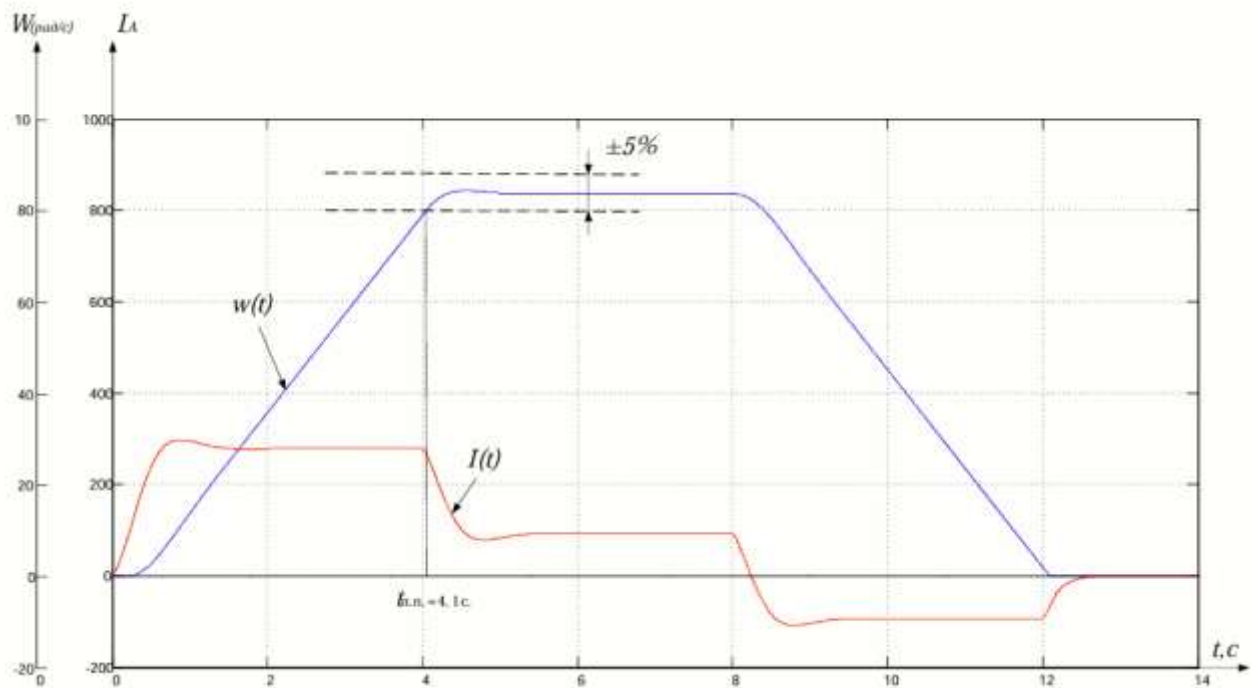


Рис. 2.12. Перехідні процеси пуск із задатчиком інтенсивності

$$U_H = 10V; \omega_H = 86,35 \text{ рад/с}; I_{\text{макс}} = 402A; M_C = 449H \cdot \text{м}.$$

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

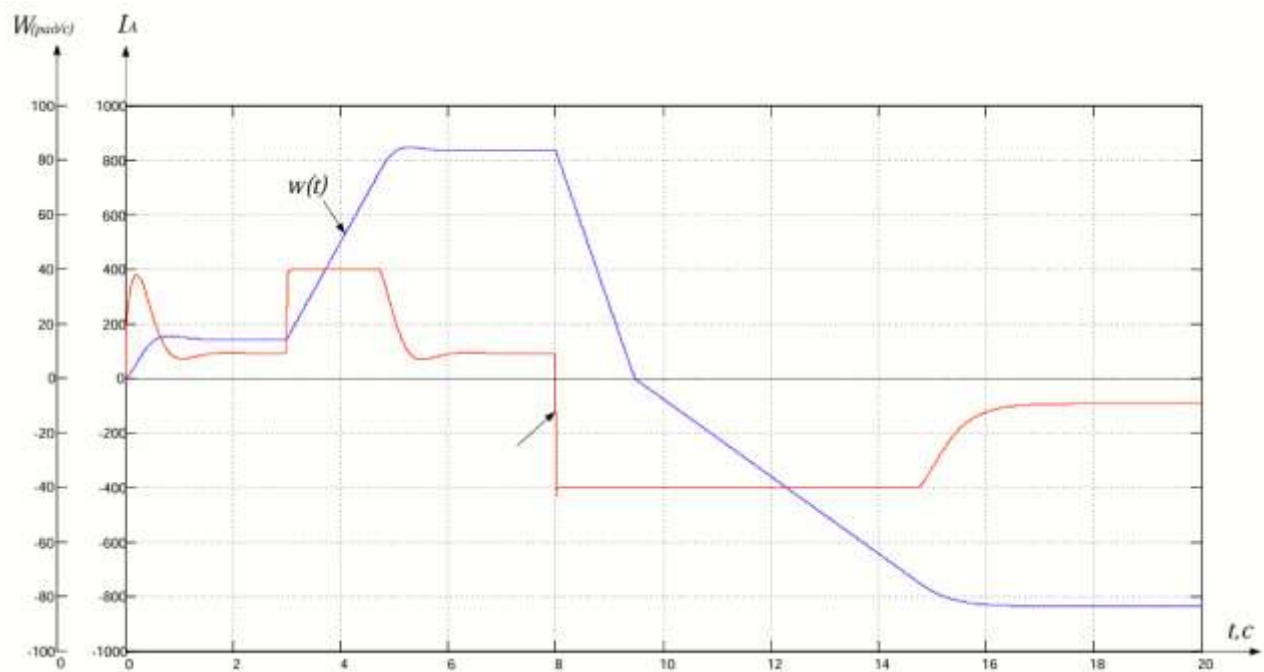


Рис. 2.13. Перехідні процеси пуск на зниженій швидкості

$U_n = 2$ В; перехід на номінальну швидкість $U_n = 10$ В; реверс $U_n = -10$ В;
 $\omega_n = 86,35$ рад/с; $I_{\text{макс}} = 402$ А; $M_c = 449$ Н·м

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

2.10 Розрахунок статичних робочих характеристик

У електроприводі реалізований принцип регулювання швидкості валу через зміну напруги якорного ланцюга за умови $P = \text{const}$. Внаслідок цього електромеханічні та механічні характеристики системи повністю збігаються за своєю структурою. На рис.2.14 наочно продемонстровані відповідні криві при різних значеннях напруги, що підводиться.

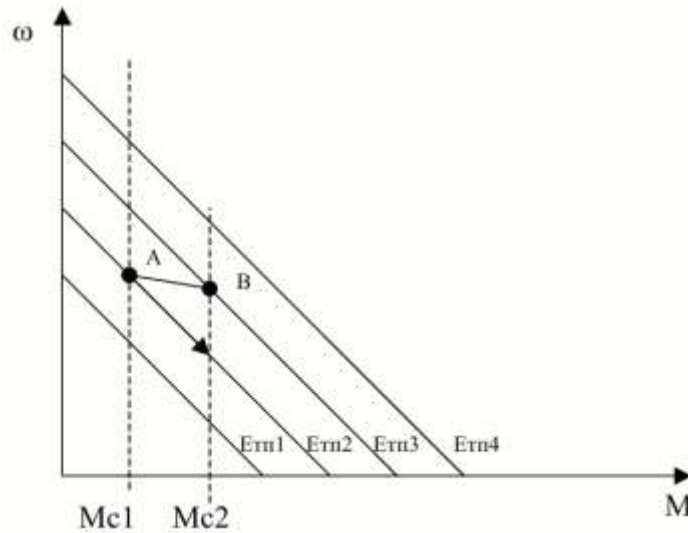


Рис. 2.14. Механічні характеристики електродвигуна при регулюванні напруги на якорі

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Структурна схема силових ланцюгів для режиму стабілізації швидкості наведено на рис.2.15.

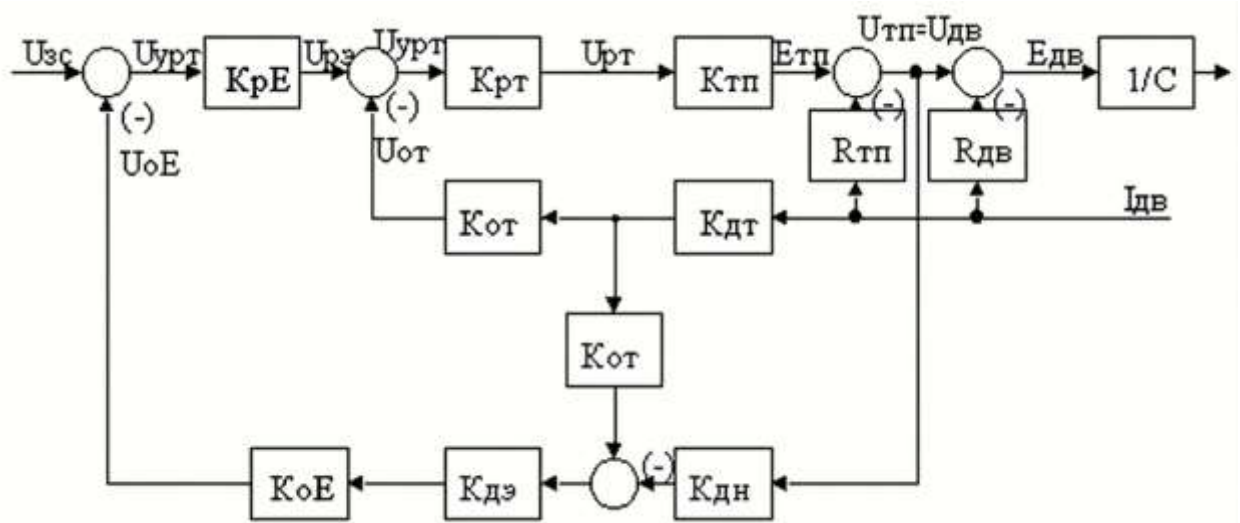


Рис. 2.15. Структурна схема силових ланцюгів для режиму стабілізації швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Процес навантаження двигуна супроводжується падінням оборотів і зростанням напруги на виході регулятора ЕРС. Як тільки сигнал досягає межі $10/K_{pe}$, настає насичення регулятора, і контур регулювання ЕРС фактично вимикається. Стабілізація швидкісних показників припиняється і подальша поведінка приводу диктується виключно контуром зворотного зв'язку по струму. Схема, що описує роботу системи у режимі підтримки струму, представлена рис. 2.16.

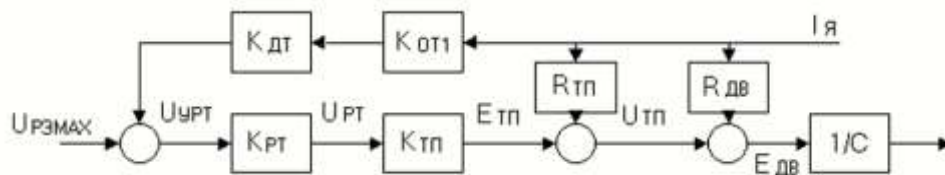


Рис. 2.16. Структурна схема силового каналу електроприводу для режиму стабілізації струму
Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Таблиця 2.10

Розрахунок електромеханічних характеристик електроприводу

$U_{зс}, В$	$\omega_0, рад/с$	$\omega_n, рад/с$
1	8,4	7,94
5	42	41,54
10	84	83,54

Графіки електромеханічних характеристик наведено на рис. 2.17. Графіки розраховані та побудовані за допомогою прикладної програми Маhtcad 12.

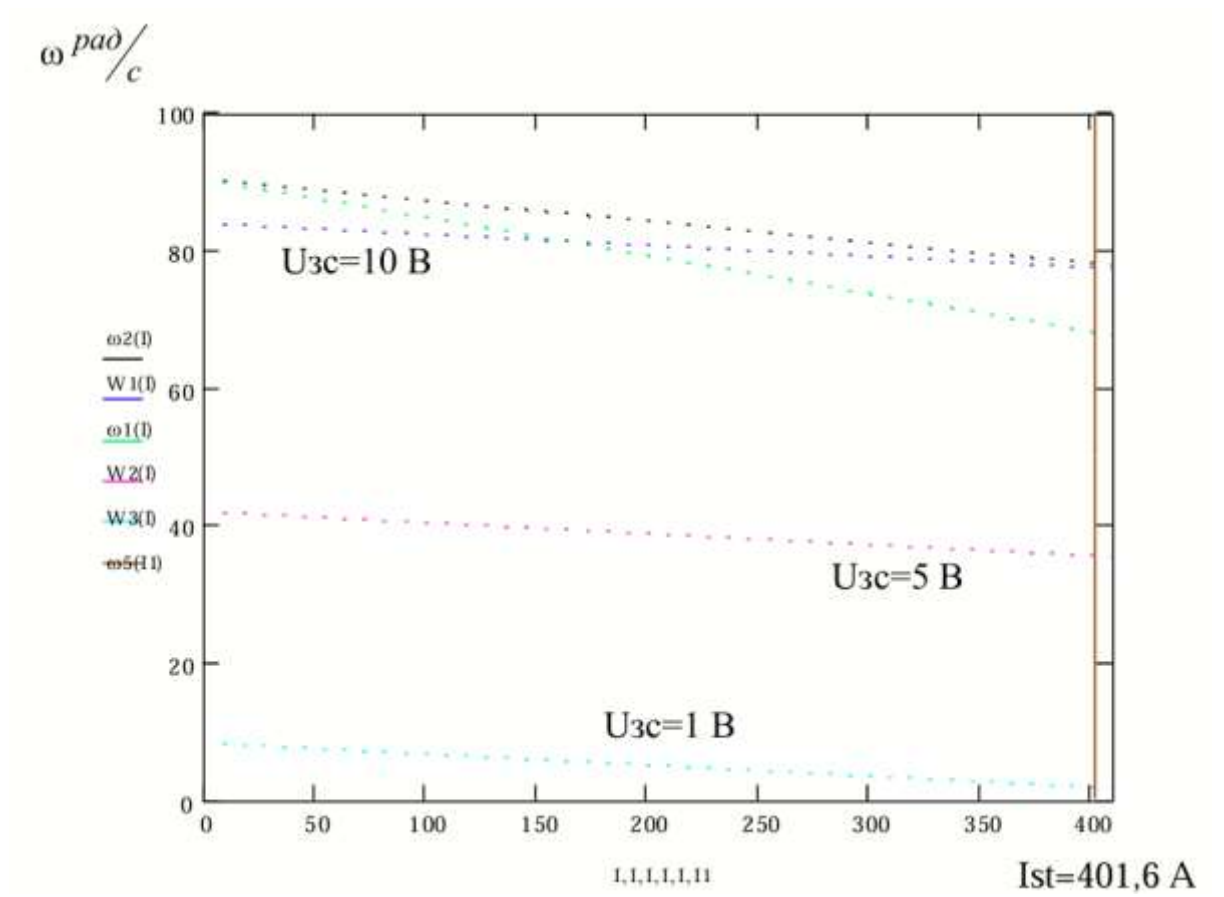


**Рис. 2.17. Електромеханічні характеристики при
різній напрузі на якорі двигуна**

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

2.11 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації сталевозу

2.11.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Метою охорони праці у випускній роботі є системний аналіз виробничих ризиків, що з дослідженням електротехнічного комплексу сталевоза. Електропривод переміщення, спроектований на базі серії ЕПУ1-2, експлуатується за умов безпосередньої близькості до виконавчих механізмів. Живлення 380 В подається за захищеними тунелями. Функціональні обов'язки персоналу включають діагностику, налагодження та поточний ремонт як електричної, так і механічної складової системи.

У процесі пусканалагоджувальних робіт джерелами підвищеної небезпеки виступають не тільки струмопровідні частини під напругою, а й механічні переміщення сталевозу. Небезпека електричного струму характеризується відсутністю зовнішніх ознак загрози, що потребує впровадження надійних технічних засобів захисту та суворої регламентації дій персоналу.

Виробничі потужності конвертерного цеху зосереджені у закритому корпусі, що поєднує завантажувальний, конвертерний та розливний прольоти, а також відділення підготовки шихти та міксерну ділянку. Допоміжні підрозділи, включаючи ділянки підготовки виливниць та обслуговування сталерозливних ковшів, винесені до відокремлених будівель у безпосередній близькості від основного цеху. Головний корпус із конвертерами вантажопідйомністю 350 тонн включає шість спеціалізованих прольотів. Внутрішня логістика та транспортування продуктів плавки (сталі та шлаку) реалізована через систему поперечних залізничних колій, прокладених під конвертерними установками. Компонування обладнання та зонування ділянок виконано з дотриманням вимог промислової безпеки та сучасних санітарно-гігієнічних стандартів.

Діяльність персоналу електротехнічних служб пов'язана з впливом комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів (ОПФ та ВПФ). До групи небезпечних факторів належать ризики отримання механічних травм, ураження електричним струмом, а також загрози спалахів та вибухів. У

категорію шкідливих факторів включені підвищений рівень шуму та вібрацій, несприятливий мікроклімат та недостатність освітлення робочих зон. Окрему категорію становлять термічні ризики.

Зокрема, під час проведення паяльних робіт обов'язковою умовою є наявність локальної витяжної вентиляції, що запобігає перевищенню гранично допустимої концентрації (ГДК) парів свинцю, встановленої на рівні 0,01 мг/м³.

Захист персоналу від механічних пошкоджень, ймовірність яких висока через насиченість цеху обладнанням, базується на строгому дотриманні регламентів ДСТУ. Заходи включають встановлення захисних огорож, систем активної сигналізації та розміщення попереджувальних знаків та плакатів.

2.11.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників

З погляду електробезпеки виробниче приміщення класифікується як приміщення із підвищеною небезпекою. Наявність трансформаторної підстанції та специфіка обладнання створюють умови, за яких можливе одночасне торкання людиною заземлених металоконструкцій будівлі та корпусів електротехнічних пристроїв. Згідно з уточненими даними цех може бути віднесений до категорії особливо небезпечних, що накладає жорсткі вимоги до експлуатації верстата з приводом, що проектується.

З метою мінімізації ризиків під час обслуговування установок застосовується суворо регламентований перелік захисних засобів:

1. Робота з обладнанням напругою понад 1000 В:

Ізолюючі та електровимірювальні кліщі, штанги всіх типів, високовольтні покажчики напруги, спеціалізовані сходи та ізолюючі майданчики для робіт на висоті.

Діелектричні боти і рукавички, захисні комплектуючі, переносні заземлення, діелектричні килими та накладки, а також попереджувальні знаки.

2. Робота з установками напругою до 1000 В:

Діелектричні рукавички, ручний інструмент із ізольованими рукоятками, покажчики напруги та кліщі.

Ізолювальні підставки, боти, діелектричні килимки, тимчасові огорожі та плакати безпеки.

Конструктивне виконання проектного приводу має гарантувати надійну ізоляцію струмопровідних частин та захист від зовнішніх впливів (вологи, пилу). Відповідальність за дотримання цих норм покладається як на безпосередніх виконавців, так і на керівників, які забезпечують організацію безпечного виробничого циклу.

Віброакустичні фактори та захист персоналу

Гігієнічна оцінка вібраційного навантаження у цеху базується на вимогах ДСТУ ГОСТ 12.1.012:2008 «ССБП. Вібраційна безпека. Загальні вимоги» та санітарні норми СН 2.2.4/2.1.8.556–96 («Виробнича вібрація, вібрація в приміщеннях житлових і громадських будинків. Санітарні норми»).

Джерелами локальної та загальної вібрації є більшість одиниць технологічного обладнання. Для мінімізації віброакустичних ризиків застосовується стратегія превентивного технічного обслуговування: регулярна діагностика вузлів, балансування механізмів та своєчасна заміна зношених елементів, які провокують підвищену амплітуду коливань.

Шумовий вплив

Інтенсивний виробничий шум є критичним фактором, що провокує підвищену стомлюваність, зниження концентрації уваги та зростання ймовірності виробничого травматизму. Нормування шумового навантаження відповідно до ГОСТ 12.1.003-2014 здійснюється за двома критеріями: граничним спектром та еквівалентним рівнем звуку. Для робочих зон цеху нормативне значення рівня звукового тиску на середньгеометричній частоті 1000 Гц становить 80 дБ, а допустимий еквівалентний поріг - 85 дБА.

У ситуаціях, коли рівень шуму перевищує встановлені СанПіН 2.2.4.1191-03 значення, застосовується комплекс захисних заходів:

Технічні: звукоізоляція інженерних вузлів, встановлення звукопоглинаючих кожухів на джерела шуму.

Індивідуальні (ЗІЗ): використання антифонів (навушників), берушів та спеціалізованих протишумних касок.

Світлове середовище та системи освітлення

Проектування освітлювальних установок виконано згідно з актуальним СП 52.13330.2016. В електроцеху функціонують чотири незалежні системи освітлення:

Загальне для забезпечення основних робочих процесів.

Аварійне - активується при відключенні основного живлення (становить не менше 10% загальної освітленості).

Евакуаційне – для безпечного виведення персоналу.

Ремонтне - для роботи в умовах обмеженої видимості або важкодоступних місць.

Особливу увагу приділено стабільності напруги: падіння потенціалу найбільш віддаленому світловому приладі має перевищувати 5%. Світильники аварійного контуру виділяються конструктивно чи маркуються спеціальними знаками.

Спеціальні системи освітлення

Евакуаційне освітлення організовано вздовж основних шляхів проходження персоналу, на сходових маршах та в точках розміщення протипожежного інвентарю. Вказівники «Вихід» оснащені вбудованими акумуляторними блоками та мікропроцесорною автоматикою. Це гарантує їх миттєву активацію у разі втрати основного електропостачання, забезпечуючи автономну роботу від власного джерела живлення.

Для проведення сервісних робіт у технічних зонах передбачено ремонтне освітлення. Воно реалізовано за допомогою мобільних світильників, що працюють на безпечній наднизькій напрузі 36 В. Підключення здійснюється через спеціалізовані пости, що об'єднують в одному захищеному корпусі

штепсельну розетку та понижувальний трансформатор 220/36, що відповідає вимогам СП 52.13330.201.

Параметри мікроклімату

Виробничий мікроклімат сприймається як сукупність фізичних чинників середовища, визначальних тепловий стан і емоційний тонус співробітників. У цьому проекті розрахунок параметрів виконано з забезпечення допустимих мікрокліматичних умов. Цей рівень комфорту встановлюється у випадках, коли з техніко-економічних чи технологічних причин досягнення оптимальних величин утруднено.

Хоча допустимі норми можуть викликати тимчасове відчуття теплового дискомфорту та напругу механізмів терморегуляції, вони не мають деструктивного впливу на здоров'я людини протягом восьмигодинної зміни. Для підтримки заданих параметрів у цеху задіяно комплекс інженерних систем:

Кліматичне виконання: цілорічне функціонування припливно-витяжної вентиляції та систем кондиціювання.

Тепловий режим: водяне або повітряне опалення у зимовий період.

Захисні заходи: застосування мобільних теплозахисних екранів у літню пору для нейтралізації надлишкового теплового випромінювання.

Санітарно-гігієнічна безпека повітряного середовища

У технологічних процесах цеху задіяні речовини, що належать до категорії помірно небезпечних (3-й клас небезпеки, ГДК у межах 1–10 мг/м³), такі як бензин, а також азотна та соляна кислоти. Ключовим методом забезпечення промислової безпеки в умовах є ефективна експлуатація систем примусової вентиляції.

Система виробничої вентиляції

Проектування та розрахунок параметрів повітрообміну виконано відповідно до вимог СНіП 2.04.05-91. На об'єкті реалізовано загальнообмінну припливно-витяжну вентиляцію з механічним спонуканням. Розрахункова продуктивність системи гарантує подачу свіжого повітря обсягом щонайменше 60 м³/ч кожного співробітника.

Для підтримки комфортного температурного режиму передбачено такі рішення:

У зимовий період: компенсація тепловтрат за рахунок підігріву припливних мас з використанням повітряно-теплових завіс.

У літній період: охолодження та асиміляція надлишкового тепла через контури припливної вентиляції.

Важливим аспектом екологічної безпеки підприємства є у системі механічної вентиляції фільтраційних модулів. Вони забезпечують очищення повітря, що видаляється від парів кислот і вуглеводнів перед його викидом в атмосферу, мінімізуючи техногенне навантаження на навколишнє середовище

2.11.3 Пожежна безпека

Відповідно до методології ГОСТ Р 22.0.02-94, під надзвичайною ситуацією розуміється дестабілізація нормальних умов життєдіяльності, що спричинила за собою матеріальні втрати або загрозу персоналу. Що стосується розглянутого проекту автоматизації, найбільш ймовірними сценаріями НС є:

Техногенні інциденти (насамперед пожежі та локальні вибухи електроустаткування).

Раптова втрата несучої здатності або обвалення конструкцій.

Небезпечні геофізичні процеси (сейсмічна активність)

Метеорологічні аномалії.

Основним тригером виникнення пожеж є людський чинник, включаючи порушення регламентів експлуатації електроустановок і несправність проводки. У рамках проекту виключено використання вибухопожежонебезпечних, токсичних чи радіоактивних матеріалів, що суттєво знижує категорію ризику об'єкта.

Комплекс заходів щодо забезпечення протипожежного захисту

Згідно з вимогами СНиП 21.01-97, на об'єкті реалізовано наступні інженерні рішення:

Конструктивна вогнестійкість: Несучі вузли ДЕС та огорожувальні елементи відповідають II та III ступеням вогнестійкості. Використані оздоблювальні матеріали мають нормативну межу стійкості до термічного впливу.

Електротехнічна безпека: Вибір перерізів кабельних ліній та комутаційних апаратів (автоматичних вимикачів) виконаний строго за розрахунковими струмами відповідно до ПУЕ. Все обладнання сертифіковано та відповідає характеристикам виробничого середовища.

Активний захист: Передбачено пожежогасіння магістральної мережі через систему гідрантів. Побутові зони укомплектовані пожежними щитами та первинними засобами (пісок, вода, інвентар).

Алгоритм дій персоналу під час займання

При виявленні ознак пожежі відповідальні особи зобов'язані діяти згідно із затвердженим протоколом:

Оповіщення: Негайний виклик пожежної охорони та інформування керівництва.

Евакуація: Пріоритетна організація порятунку людей із використанням усіх доступних виходів.

Технічне управління: Контроль спрацьовування автоматичних систем захисту, знеструмлення агрегатів (крім систем пожежогасіння) та перекриття вентиляційних каналів для запобігання задимленню.

Зустріч підрозділів: Координація розрахунків МНС, що прибувають, надання даних про специфіку об'єкта та найкоротші шляхи до вогнища

ВИСНОВКИ

У рамках даної випускної кваліфікаційної роботи було виконано повний цикл проектування та синтезу системи електроприводу для переміщення сталевозу вантажопідйомністю 215 тонн.

Для забезпечення необхідних динамічних показників та надійності було прийнято систему «тиристорний перетворювач - двигун постійного струму» (ТП-Д). Дана структура у поєднанні з багатоконтурною системою підлеглого регулювання координат дозволяє забезпечити жорсткі статичні характеристики та високу точність позиціонування ковша з розплавленим металом.

Проведений розрахунок та вибір силового обладнання (двигуна та перетворювальної установки) підтвердили працездатність системи у всіх режимах. Побудовані електромеханічні характеристики приводу повністю вписані в область допустимих режимів роботи обладнання, забезпечуючи надійну роботу при максимальних навантаженнях та умовах перевантажувальних циклів.

Розроблене рішення повною мірою відповідає вимогам технічного завдання. Аналіз показав, що область робочих режимів, обмежена граничними значеннями швидкості $\omega = \pm \omega_{\max}$ і струму $I = \pm I_{\text{доп}}$, повністю вписана в діапазон теоретичних механічних характеристик системи "тиристорний перетворювач - двигун" (ТП-Д). Статична точність підтримки швидкості відповідає. На підставі аналізу логарифмічних частотних характеристик (ЛЧХ) було підтверджено, що синтезована система автоматичного управління (САУ) має необхідні запаси стійкості по амплітуді та фазі, а також необхідною смугою пропускання.

Моделювання серед Matlab підтвердило, що час перехідних процесів і величина перерегулювання відповідають технологічним нормам. Система забезпечує плавний пуск та гальмування, що є критично важливим для транспортування рідкої сталі з метою мінімізації коливань дзеркала розплаву та запобігання розбризкуванню.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок. – Офіційне вид. – К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
2. Попович М. Г., Лозинський О. Ю. Теорія електропривода : підручник. – 4-те вид. К. : Каравела, 2019. 528 с.
3. Мазуренко Л. І., Руденко О. В. Напівпровідникові перетворювачі в системах електропривода : навч. посіб. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 230 с.
4. Автоматизація технологічних процесів у металургії : зб. наук. праць. Кривий Ріг : КНУ, 2023. Вип. 12. С. 45–52.
5. Математичне моделювання електромеханічних систем у металургійному виробництві : монографія / В. М. Федорів та ін. Дніпро : НТУ «ДП», 2022. – 195 с.
6. Інструкція з експлуатації електрообладнання сталевоза г/п 215 т : Технічна документація цеху. – Кривий Ріг : ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», 2024. – 45 с.
7. Чернов Є.О. Промислова електроніка та перетворювальна техніка : підручник. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 280 с
8. Островерхов М.Я., Пижов В.М. Моделювання електромеханічних систем в Simulink.- К.: ВД «Стилос», 2008. - 528 с.
9. Смирнітський Б.В. Автоматизований електропривод типових промислових механізмів/Б.В. Смирнітський. - Харків, ХДПУ, 1998. - 380 с.
10. Єсаков В.П. Електроустаткування та електропривод промислових установок. Київ: Вища школа, 1981. - 247 с.
11. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія і практика) / За редакцією М.Г.Поповича, В.В.Кострицького: навчальний посібник. – К.:КНУТД, 2008. – 408 с.
12. Гандзюк М. П. Основи охорони праці : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський. – 6-те вид. – К. : Каравела, 2018. – 384 с.

13. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник / В. Ц. Жидецький. – Львів : Афіша, 2019. – 350 с.
14. Качан С. О. Цивільний захист : навч. посіб. / С. О. Качан, С. М. Шмиг. – К. : Кондор, 2020. – 240 с.
15. Охорона праці в галузі електротехніки : навч. посіб. / О. В. Кулаков та ін. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 215 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок
141-11д-2026врб
Автор
141-11д-2026врб

Науковий керівник / Експерт
Модло Є

ІД документа
334133418

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації
STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

Назва підрозділу
STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

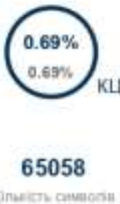
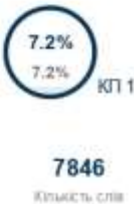
ЗВІТ

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.



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		26
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		47

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копія 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			Копія тексту
#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКОВАНИХ ФРАГМЕНТІВ	
1	ММКВ.013324.000 ПЗ Мокрій С.С. 6/13/2025	95 (1.21 %)	

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

Я, *Якімов Павло Сергійович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота «Електропривод механізму пересування сталевозу вантажопід'ємністю 215т конверторного цеху» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недоволену 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. 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 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 з умовами такого розміщення.

Дата 01.06.2026

Підпис