

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)

Наумов Віталій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.

Регульований електропривод приймального рольгангу стана 1250»

(повна назва теми)

за матеріалами

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

К.Т.Н., доцент

-

Чорний О.П.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

(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)

Наумов Віталій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Регульований електропривод приймального рольгангу стана 1250

керівник кваліфікаційної роботи к.т.н., доцент Чорний О.П.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06»04.2026 р. № 239-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 – асинхронний електропривод приймального рольгангу стана 1250.

Характер навантаження – повторно-короткочасний (S3), з переважанням динамічних моментів і постійним статичним моментом опору ($M_c = \text{const}$), з частими пусками, гальмуваннями та реверсами.

Тип системи електроприводу: рід струму – змінний, електродвигун постійного струму (ДПС); комплектний тиристорний електропривод серії КТЕ, тиристорний перетворювач частоти – нереверсивний (або реверсивний за потреби), напруга змінного струму 380 В, відхилення напруги мережі +10 %, - 15 %, частоти мережі 50 Гц ± 2 %.

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 Кінематична схема

2 Функціональна схема

3 Структурна схема

4 Принципова електрична схема

5 Результати моделювання

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

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

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)

Наумов В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Чорний О.П.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Наумов В. В. «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Регульований електропривод приймального рольгангу стана 1250» – Бакалаврська робота. – Кривий Ріг, 2026. 79 с., 24 рис., 11 табл., 13 джерел.

Об'єкт дослідження – регульований електропривод приймального рольганга.

Предмет дослідження – режими роботи, статичні та динамічні характеристики регульованого реверсивного електропривода приймального рольганга стана 1250, а також системи керування його координатами.

Мета роботи – розробка та дослідження системи регульованого електропривода приймального рольганга, яка забезпечує високу надійність, необхідну динаміку перехідних процесів та узгодженість роботи з головним приводом стана в умовах важких ударних навантажень.

У роботі розроблено модернізовану систему автоматизованого електропривода приймального рольганга стана 1250 на базі реверсивного тиристорного перетворювача та двигуна постійного струму з дворівневим контуром підпорядкованого регулювання. Автором виконано синтез ПІ-регуляторів швидкості та струму, що дозволило оптимізувати перехідні процеси та мінімізувати динамічні ударні навантаження в трансмісії при частих реверсах. Результати імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink підтвердили високу динамічну точність системи та стабільність швидкості руху заготовок під час дії критичних навантажень. Впровадження цієї системи підвищує надійність обладнання, скорочує час простоїв металургійної лінії та забезпечує зниження питомих витрат електроенергії.

Ключові слова: приймальний рольганг, автоматизований електропривод, прокатно-металургійне виробництво, система підпорядкованого регулювання, тиристорний перетворювач, частотно-регульований привід, імітаційне моделювання, динамічні навантаження, програмований логічний контролер.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Аналіз технологічного процесу	9
1.2 Кінематична схема механізму приймального рольганга	13
1.3 Режим роботи та вимоги до електроприводу	15
1.4 Обґрунтування вибору типу електроприводу та аналіз приводного двигуна	18
1.5 Обґрунтування функціональної схеми та вибір основних елементів системи	19
1.5.1 Функціональна схема електроприводу	19
1.5.2 Функціональна схема перетворювальної частини електропривода	21
1.6 Висновки до аналітичної частини	23
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	24
2.1 Вибір електрообладнання та розрахунок параметрів елементів силового ланцюга	24
2.1.1 Вибір електродвигуна	24
2.1.2 Вибір комплектного регульованого електроприводу та його силових елементів	33
2.1.3 Вибір силового трансформатора	35
2.1.4 Визначення розрахункових параметрів трансформатора	36
2.1.5 Вибір та розрахунок згладжуючого реактора	37
2.1.6 Вибір реактора, що згладжує	38
2.1.7 Вибір автоматичних вимикачів	39
2.1.8 Розрахунок параметрів силового ланцюга	41
2.1.9 Перевірка області існування електромеханічних характеристик електропривода	42
2.2 Розрахунок електромеханічних характеристик системи УВ-Д	45
2.3 Структурна схема силового каналу САУ	49

	7
2.4 Синтез лінеаризованих структур САУ РЕП	50
2.4.1 Методика проектування лінеаризованих структур САУ	50
2.4.2 Лінеаризована структура САУ РЕПВ	51
2.5 Налаштування контурів САУ електроприводу	53
2.6 Розрахунок статичних характеристик РЕП та похибки швидкості при зміні навантаження	62
2.7 Структурна схема нелінійної САУ РЕП	66
2.8 Розрахунок перехідних процесів	68
2.9 Система захисту та сигналізації електроприводу	69
2.10 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації приймального рольгангу	71
2.10.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів під час експлуатації рольгангу обтискного цеху	71
2.10.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників	72
2.10.3. Пожежна безпека та санітарія	75
ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

ВСТУП

У сучасній металургії обтискні стани (блємінги) залишаються ключовою ланкою в ланцюжку отримання прокату. Стан 1250 є високопотужним агрегатом, продуктивність якого залежить від чіткої роботи допоміжного обладнання. Приймальний рольганг - це критичний вузол, що працює в екстремальних умовах: постійні реверси, ударні навантаження під час посадки багатотонних зливків і високі температури. Модернізація та проектування надійного електроприводу для даного механізму необхідні для мінімізації простоїв та забезпечення ритмічності роботи всього цеху. Специфіка приймального рольганга стану 1250 вимагає застосування електроприводу, що регулюється, здатного ефективно працювати в перехідних режимах.

Вибір на користь сучасної системи керування обґрунтований такими технічними факторами.

Необхідно забезпечити жорстке обмеження моментів та струмів при різких пусках та реверсах, що захищає механічну частину (редуктори, вали роликів) від передчасного зношування.

Точне регулювання швидкості рольгангу дозволяє узгодити подачу зливка зі швидкістю обертання кліток валків, виключаючи пробуксовку і динамічні удари в момент захоплення металу.

Заміна застарілих систем управління на сучасні напівпровідникові перетворювачі та мікропроцесорні контролери (або блоки УБСР) підвищує ККД установки та спрощує діагностику обладнання.

Застосування одного потужного двигуна на секцію роликів обумовлено необхідністю розподілу високого статичного навантаження, що виникає, коли вага всього зливка зосереджений на обмеженій ділянці рольгангу.

Метою даного проекту є розробка ефективного реверсивного електроприводу приймального рольгангу стану 1250, що забезпечує необхідну точність управління, високу надійність електромеханічної системи та стабільність технологічного процесу в умовах обтискного виробництва.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз технологічного процесу

Для нинішнього етапу розвитку металургії характерні висока інтенсивність випуску продукції, широке використання засобів механізації та комплексне впровадження автоматизованих систем управління процесами. Збільшення швидкості деформації металу та підвищення якісних характеристик прокату стали можливими завдяки масовому застосуванню прогресивних електроприводів. У нинішніх виробничих комплексах спостерігається нерозривний зв'язок між конструктивним виконанням агрегатів, технологією обробки та інтелектуальними системами керування.

Крім безпосередньої деформації у валках, виробничий цикл включає безліч супутніх етапів. Ключовою ланкою у забезпеченні безперервності потоку є рольганги. Ці роликові конвеєри визначають загальну пропускну спроможність лінії; збій у роботі навіть одного такого вузла призводить до зниження ефективності всього стану.

Функціональні особливості та конструкція рольгангів

Рольганги забезпечують переміщення заготовок на всіх стадіях: від подачі до робочої кліті до транспортування до правильних машин, ножиць або установок зачистки. Габарити та маса цих систем можуть досягати 40-60% від сумарної ваги всього обладнання цеху. Вибір конфігурації приводу рольганга безпосередньо впливає його вартість і експлуатаційну надійність, тому вимагає детального аналізу режимів роботи.

Залежно від розташування в технологічному ланцюжку виділяють:

Робочі рольганги: інтегровані безпосередньо в зону кліті для подачі та прийому металу. Транспортні рольганги: виконують сполучну функцію між основними та периферійними вузлами табору.

Інженерні рішення щодо організації приводу поділяються на два типи:

Індивідуальний: кожен ролик оснащується незалежним двигуном.

Груповий: кілька роликів (від 3 до 10 і більше) об'єднуються загальним кінематичним зв'язком з одним двигуном.

Групове виконання найбільше ефективно для обтискних ділянок (блюмінгів), де обладнання піддається циклічним реверсивним навантаженням. У початковій фазі прокатки, коли довжина зливка невелика, основне навантаження може концентруватися на єдиному ролику. Груповий привід у таких умовах дозволяє використовувати двигуни меншої сумарної потужності, що суттєво знижує капітальні та експлуатаційні витрати.

Технологічний процес ділянки

Зі сталеплавильного цеху гарячі зливки на залізничних платформах доставляються до нагрівальних колодязів, які розташовані в початку обтискного цеху. Посадка злитків у нагрівальні колодязі є спеціальними кліщовими кранами. Нагрівання злитків здійснюється в рекуперативних нагрівальних колодязів до температури 1300 °С. Нагрівальні колодязі складаються з 12 груп, по чотири осередки у кожній групі. Нагріті зливки витягуються тим самим краном з осередків нагрівальних колодязів і кладуться на візки злитковозів по дві.

Доставка злитків до приймального рольгангу здійснюється за допомогою злитковозів автоматичної кільцевої злиткоподачі. У кільці передбачають роботу чотирьох злитковозів. Приймальний рольганг є допоміжним обладнанням стану 1250 і складається із чотирьох секцій. При доставці злитків з першої групи нагрівальних колодязів, а також при виході з ладу пристроїв кільцевої злиткоподачі здійснюється безпосередньо кліщовим краном на приймальний рольганг. Доставка злитків здійснюється по одному. При доставці злитків з другої групи здійснюється злитковозами працюючими в човні. При доставці злитків з третьої групи і далі здійснюється злитковозами при роботі злиткоподачі по кільцю. З приймального рольгангу зливки транспортуються за допомогою підвідників і робочих рольгангів до кліті 1250 де відбувається обтискання металу. План розташування устаткування ділянки представлений рис. 1.1.

Управління рольгангами може здійснюватися як у ручному, так і в автоматичний режим. Ручний режим здійснюється оператором посту управління (ПУ-2) за

допомогою ключів керування. Ручний режим передбачає транспортування злитків по рольгангу, що підводить, в одному напрямку зі швидкістю 2 м/с, а також передбачений реверс при заборюванні та для повернення остиглих злитків у нагрівальні колодязі. Автоматика рольгангів під керуванням програмованого контролера, "FESTO" забезпечує автоматичний режим 2, 3, 4 секцій приймального рольгангу.

Автоматичний режим роботи забезпечує:

1) відправлення злитків з другої секції приймального рольгангу:

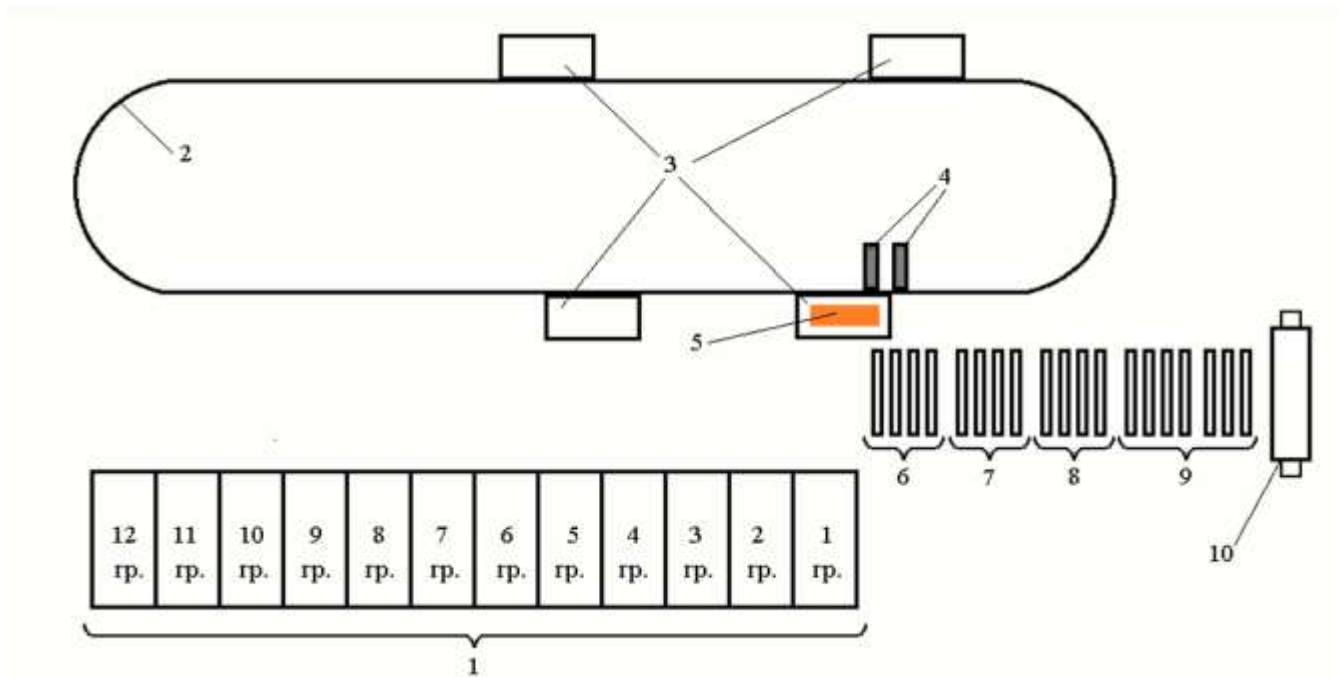
- Оператором ПУ-2 натисканням кнопки відправки;
- при русі зіштовхувача назад;
- включенням першої секції приймального рольгангу;

2) пересування злитків по прийомних рольгангах, де злиток очікує прокатки, за умови, що на шляху проходження злитків рольганги вільні;

3) розстановку злитків через рольганг у разі "щільної" прокатки з наступною автоматичною відправкою з місця очікування принаймні звільнення рольгангу;

4) зупинку рольгангу після проходження зливка.

У найважчому режимі працює друга та четверта секція приймального рольганга при доставці по два зливки злитковозом з другої групи нагрівальних колодязів. Злитковоз зупиняється навпроти другої (четвертої) секції приймального рольганга, зіштовхувачем стикається один злиток на ролики, що не обертаються. Потім включається друга секція приймального рольганга натисканням кнопки відправки та метал транспортується до наступної секції приймального рольгангу протягом 2,5 секунд. Можливе пробуксування роликів по металу протягом однієї секунди при буксируванні сьомого ролика під нерухомим зливком. Далі зіштовхувачем стикається другий злиток через 5 секунд, включається рольганг під час руху зіштовхувача назад або натисканням кнопки надсилання. Після проходження зливка по рольгангу, аналогічно першому зливку, час паузи для доставки наступних злитків 25 секунд.



1 – нагрівальні колодязі; 2 – кільцева злиткоподача; 3 – злитковоз; 4 – зіштовхувач; 5 – злиток; 6 – приймальний рольганг; 7 - підводить рольганг; 8 - розкочування рольганг; 9 – робочий рольганг; 10 - кліть 1250

Рис. 1.1. План розміщення обладнання ділянки

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

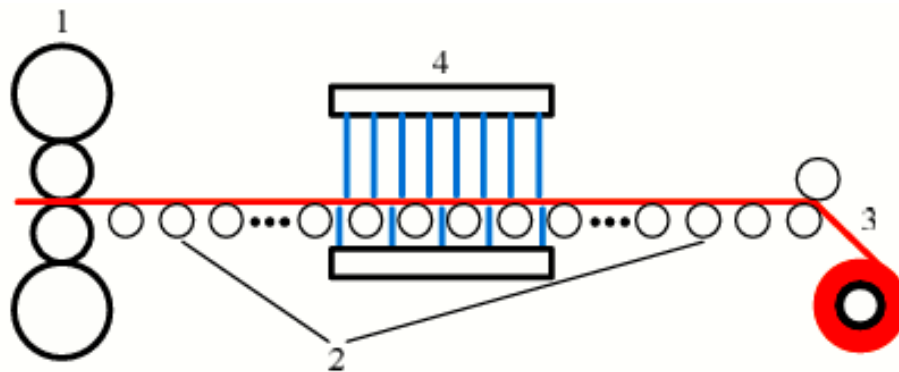
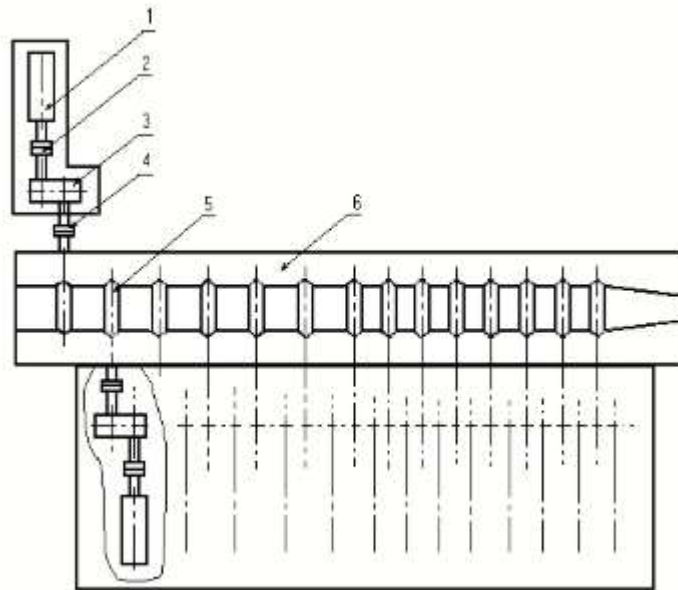


Рис. 1.2. Спрощена структура відвідного рольгангу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]



1 – електродвигун; 2 – зубчаста муфта; 3 – циліндричний редуктор; 4 – зубчаста муфта; 5 – ролик; 6 – рама рольгангу

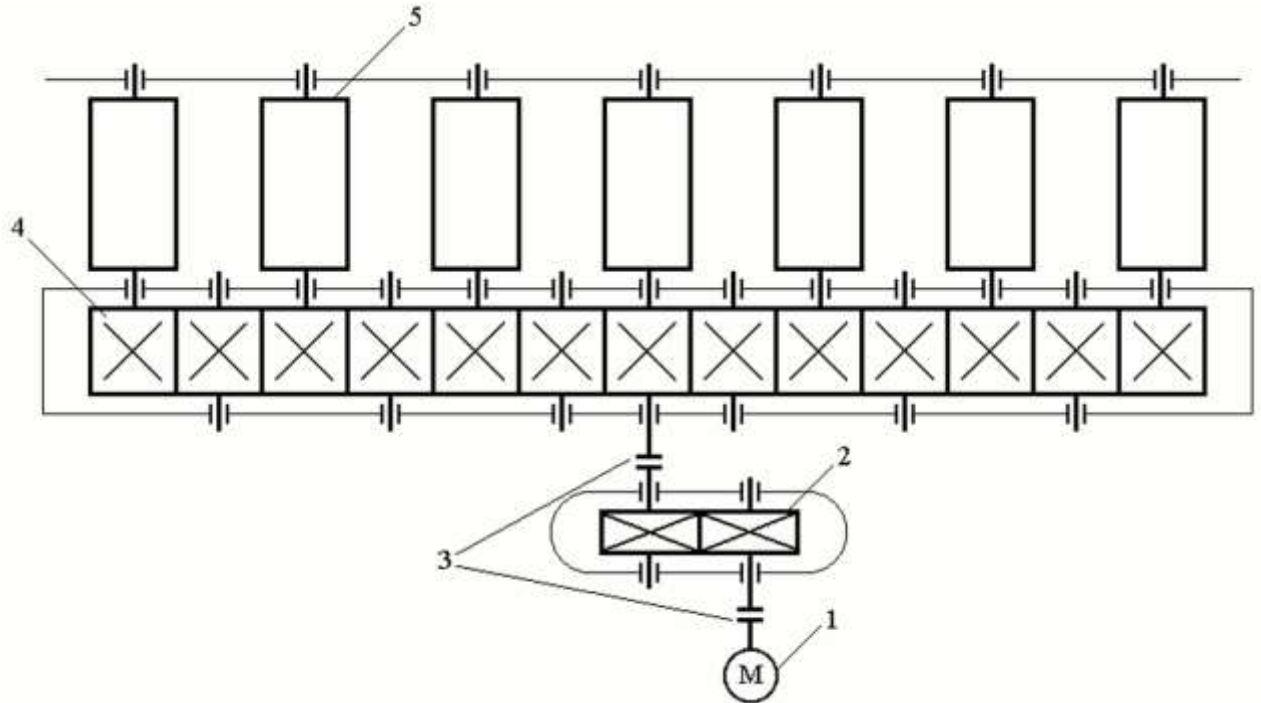
Рис. 1.3. Загальний вид рольгангу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

1.2 Кінематична схема механізму приймального рольганга

Приймальний рольганг приймає злиток від злитковозу і передає на підводний рольганг, який транспортує його до робочого рольгангу перед кліттю. Ролики цього рольгангу приймають удари під час перекидання на них зливків, і тому їх роблять цільнокованими. Кінематична схема приймального рольгангу наведена на рис.1.4. Використовується секція з груповим електроприводом, що працює повторно-короткочасному режимі. Секція складається з семи роликів, що мають загальний привід від електродвигуна потужністю 110 кВт (500 об/хв) через редуктор з передавальним числом $i=7,65$, проміжні циліндричні шестерні та шпинделі (типу подовжених зубчастих муфт) та трансмісійний вал. Ролики змонтовані на конічних роликових підшипниках. Для сприйняття значних ударних навантажень при подачі зливка масою 13,5 тонн на рольганг злитковозом, а безпосередньо колодязевим кліщовим краном передусмотрена амортизація опор роликів з допомогою тарілчастих пружин.

Електропривод секції груповий, оскільки приймальний рольганг працює у важкому режимі, з частими пусками та великими навантаженнями. Для приймального рольгангу довжина злитка близька до величини кроку рольганга, внаслідок чого на один ролик припадає майже вся вага металу, прокатується.



1 – електродвигун; 2 - циліндричний одноступінчастий редуктор; 3 – муфта; 4 - розподільний редуктор; 5 - ролик

Рис. 1.4. Кінематична схема електроприводу приймального рольгангу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Опис схеми:

Електродвигун (1) - джерело механічної енергії (як правило, двигун постійного струму або асинхронний з ЧП). Циліндричний одноступінчастий редуктор (2) - служить для первинного зниження частоти обертання та збільшення крутного моменту. Муфта (3) - сполучний елемент між валами (може бути зубчастою або пальцевою для компенсації перекосів). Розподільний редуктор (4)- специфічний вузол групового приводу, що передає крутний момент від одного двигуна на кілька роликів секції одночасно. Ролик (5) - виконавчий орган, що безпосередньо контактує з металом. Кінематичний ланцюг приводу приймального рольгангу (рис. 1.4) організовано за груповим принципом.

Обертальний момент від електродвигуна (1) передається через одноступінчастий циліндричний редуктор (2) і сполучну муфту (3) на розподільчий механізм (4). Цей вузол дозволяє синхронно рухати групу роликів (5), забезпечуючи рівномірне переміщення зливка по секції. Така конструкція відрізняється підвищеною надійністю в умовах ударних навантажень, характерних для завантаження металу на стан 1250.

Технічна характеристика елементів кінематичної схеми приймального рольганга представлена таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

**Технічна характеристика елементів кінематичної схеми приймального
рольганга**

Параметр	Величина
Вага металу, що транспортується, т	13,5
Маса одного ролика, кг	8280
Кількість роликів	7
Довжина бочки ролика, мм	1200
Крок роликів, мм	800
Діаметр бочки ролика, мм	600
Діаметр цапфи ролика, мм	260
Передавальне число редуктора	7,65
ККД зубчастої передачі	0,8
Окружна швидкість на бочках ролика, м/с	2
Моменти інерції, зведені до валу двигуна, кг·м ² :	
- незавантаженого рольганга	63
- завантаженого рольганга злітком	95
Режим роботи	повторно-короткочасний
Кількість вмикань на годину	120

1.3 Режим роботи та вимоги до електроприводу

У металургійному виробництві велика увага приділяється надійності та безперебійній роботі електроустаткування. Простой прокатних станів завдає великих збитків металургійним підприємствам. Тому вимоги до елементів електроприводу рольгангу надзвичайно високі. Це зумовлено специфічними умовами експлуатації цього механізму. Всі ці особливості впливають із широкого діапазону існуючих режимів експлуатації та навантажень з усіма

можливими варіантами, як, наприклад, повторно короткочасна та уривчаста робота, робота в режимі частих пусків та гальмування.

Як електродвигуни рольгангів повинні застосовуватися спеціальні електричні машини, що враховують особливості роботи даного механізму. Найважливішою особливістю рольгангових двигунів є високі пускові моменти та м'яка механічна характеристика моменту, що обертає.

М'яка механічна характеристика забезпечує плавну зміну швидкості при пусках і гальмуваннях, так як при різких і нерівномірних прискореннях може відбуватися буксування (прослизування) роликів щодо металу, що транспортується.

Електродвигун повинен відповідати можливим під час експлуатації перевантаженням, які при заклинюванні виробу, що прокочується, можуть призвести до тривалого режиму (тривалістю до чотирьох хвилин) короткого замикання електродвигуна при номінальній напрузі живлення.

Оцінюючи особливих умов експлуатації рольганга слід враховувати дуже важкі навколишні умови. Електродвигуни часто піддаються не тільки сильним механічним ударам і струсам, але і сильному тепловому випромінюванню розжареного виробу, що прокочується, а так само мінливим впливам пилу і вологості. Перетворювач повинен забезпечувати швидке перебіг перехідних процесів, регулювання швидкості. Крім того, система керування електроприводом повинна забезпечувати рівноприскорені процеси при розгоні та гальмуванні.

Для сучасного металургійного електроприводу характерне широке використання автоматизації технологічних процесів. Ускладнення технологічних процесів, збільшення швидкостей їхнього протікання та необхідність точного виконання цих процесів неможливе без застосування електронної обчислювальної техніки. Тому електропривод повинен бути пристосований до роботи в комплексній системі автоматизації всього прокатного стану.

Вибір роду струму та системи управління електроприводом визначається технологічним процесом, режимом роботи та вимогами до електроприводу. Технологічні та технічні вимоги можуть бути задоволені застосуванням різних систем електроприводу. Тому основною умовою попереднього вибору типу струму є надійність та економічні показники.

З опису робочого механізму слід, що рольганг має індивідуальний привід. До його переваг можна віднести можливість заміни двигуна без зупинки рольгангу та можливість роботи рольгангу при виході з ладу одного або кількох двигунів. Аналіз технічних вимог показує, що електродвигуни повинні мати великий пусковий момент при невеликій потужності самого електродвигуна і м'якою механічною характеристикою. Тому як електродвигуни рольгангів повинні застосовуватися спеціальні електричні машини, що враховують особливості роботи даного механізму.

Як індивідуальний привод рольгангів зазвичай застосовуються двигуни постійного струму невеликої потужності. Застосування асинхронних двигунів було утруднено через складність та дорожнечу системи управління електроприводом. Однак з розвитком мікропроцесорної техніки з'явилися асинхронні частотно-регульовані електроприводи, що за всіма показниками не поступаються електроприводам постійного струму, а за деякими показниками статичних і динамічних характеристик, що перевершують електроприводи постійного струму. За надійністю електродвигуни постійного струму сильно поступаються асинхронним короткозамкнутим двигунам, особливо у важких умовах роботи рольгангу. Застосування асинхронних короткозамкнених електродвигунів також вигідне і з економічного погляду. Ціна на асинхронний двигун менша за ціну на двигуни постійного струму тієї ж потужності. Не проводячи детальний аналіз всіх параметрів порівняння двигунів різного роду струму, ясно, що найбільш актуальним і перспективним є застосування електроприводу, спеціальних рольгангових двигунів змінного струму з короткозамкненим ротором. Метою модернізації рольгангу є підвищення його

продуктивності та якості продукту, що випускається за рахунок поліпшення статичних і динамічних характеристик електроприводу рольгангу.

1.4 Обґрунтування вибору типу електроприводу та аналіз приводного двигуна

Вибір системи електроприводу та типу двигуна для приймального рольгангу здійснюється на підставі аналізу технологічних вимог та специфіки роботи виконавчого механізму.

Приймальний рольганг функціонує в повторно-короткочасному режимі (S3), який характеризується:

- високою частотою пуско-гальмівних операцій і реверсів;
- необхідністю значної перевантажувальної здатності для форсованого розгону і гальмування роликів з масивним злитком;
- вимогою до точного регулювання кутової швидкості.

Для реалізації зазначених завдань у цьому проекті обрано електродвигун постійного струму (ДПС) краново-металургійної серії. Вибір ДПС обумовлений низкою його експлуатаційних переваг перед асинхронними машинами:

- висока перевантажувальна здатність:
- коефіцієнт допустимого навантаження ДПТ досягає $2,5 \div 4,0$, у той час як у асинхронних двигунів він рідко перевищує $2,0 \div 2,5$.

Мала інерційність: двигун постійного струму має реверсивний привод.

Ефективне гальмування: електричне гальмування двигунів постійного струму реалізується технічно простіше і забезпечує більш високі показники точності зупинки.

Глибина регулювання: можливість плавної зміни частоти обертання в широкому діапазоні.

Надійність управління: комутаційна апаратура надійністю.

Порівняльний аналіз систем управління

Для живлення та регулювання координат обраного двигуна були розглянуті три типи перетворювачів:

Система «Генератор – Двигун» (Г-Д):

незважаючи на плавність регулювання та відсутність перешкод у мережі, сьогодні вважається застарілою. Її головні недоліки - низький ККД, громіздкість (наявність машинних агрегатів, що обертаються), висока шумність і складність в обслуговуванні.

Система «Транзисторний перетворювач-Двигун»: має відмінну швидкодію і високу ККД (до 98 %). Однак застосування в потужних приводах обмежено граничною потужністю сучасної елементної бази транзисторів. Незважаючи на генерацію вищих гармонік в мережу, ТП-Д забезпечує:

- максимальний ККД і високу компактність обладнання;
- відсутність рухливих частин та інерційності перетворювача;
- спрощену процедуру автоматизації та резервування;
- тривалий міжремонтний інтервал.

Як конкретне технічне рішення доцільно використовувати комплектний тиристорний електропривод серії КТЕ. Дана серія повністю задовольняє жорстким вимогам до статичних та динамічних показників якості регулювання, що висуваються в обтискних цехах.

1.5 Обґрунтування функціональної схеми та вибір основних елементів системи

1.5.1 Функціональна схема електроприводу

У сучасній металургійній промисловості для управління допоміжними механізмами станів, що вимагають високої точності та динаміки, найефективніше застосування автоматизованого електроприводу постійного струму. У роботі розглядається система «Тиристорний перетворювач - Двигун» (ТП-Д) із замкнутими контурами регулювання координат. Функціональна схема

реверсивного електроприводу приймального рольгангу представлена рисунку 1.5. Нижче наведено опис основних вузлів і принципів їх взаємодії.

Силова частина системи представлена електродвигуном (М) постійного струму із незалежним збудженням. Забезпечує необхідні тягові характеристики та має високу перевантажувальну здатність.

Тиристорний перетворювач (UZ) виконує функції регульованого випрямляча. Реверсивне виконання та трифазна мостова схема дозволяють змінювати напрямок обертання і плавно регулювати напругу на якорі.

Трансформатор (Т) узгоджує напругу мережі живлення з номінальними параметрами двигуна і забезпечує гальванічну розв'язку силового ланцюга.

Згладжуючий дросель (LD) обмежує пульсації випрямленого струму, що запобігає надмірному нагріванню двигуна та покращує умови роботи щітково-колекторного вузла.

Захисні апарати (QF1, QF2): Автоматичні вимикачі, що забезпечують захист обладнання від надструмів при коротких замиканнях та тривалих технологічних навантаженнях.

Система автоматичного регулювання (САР) - це управління приводом побудовано за принципом підлеглого регулювання. Система включає два основні контури: внутрішній (контур струму) та зовнішній (контур ЕРС або швидкості). Контур струму призначений для обмеження максимального струму якоря та забезпечення необхідного моменту. Включає регулятор струму і датчик струму (UA), сигнал на який надходить з шунта RS. Контур ЕРС відповідає за стабілізацію швидкості обертання роликів. Зворотний зв'язок реалізується непрямым методом через датчик напруги (UV1) та датчик ЕРС (UV2).

Задатчики інтенсивності (AI1, AI2). Ці вузли формують необхідний темп зміни швидкості та струму. Вони виключають різкі ривки при пуску та реверсі, що захищає механічні передачі рольгангу (редуктори та муфти) від поломок.

Логіка управління:

Команди управління (пуск, зупинка, напрямок) подаються оператором з поста ПУ-2 через безконтактний командоапарат (SA). Система автоматики на

базі контролера забезпечує блокування (шунтування) регуляторів за відсутності сигналів керування або в аварійних ситуаціях, що гарантує безпеку експлуатації.

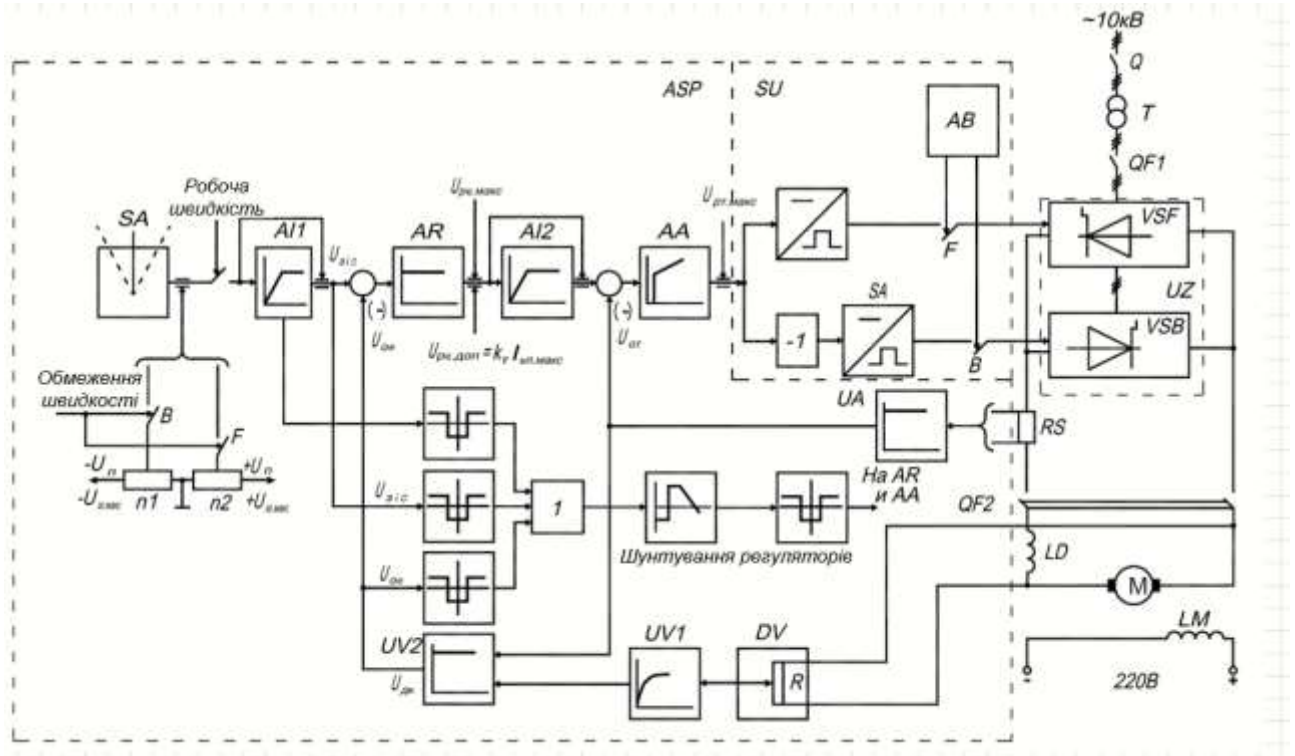


Рис. 1.5. Функціональна схема електропривода приймального рольганга стана 1250

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

1.5.2 Функціональна схема перетворювальної частини електропривода

На рисунку 1.6 наведена детальна функціональна схема перетворювального агрегату, що забезпечує живлення та керування двигуном приймального рольганга. Він генерує шість послідовностей імпульсів, необхідних відкриття тиристорів випрямних мостів «Вперед» (VSF) чи «Назад» (VSB).

Сформовані імпульси проходять через блоки посилення (А-Г та А-В) перед подачею на керуючі електроди тиристорів. Кут зсуву імпульсів щодо синусоїди напруги живлення визначається величиною керуючої напруги U_y . Для синхронізації роботи системи з промисловою мережею на вхід блоку АТ через перешкодадавлюючий фільтр (Z) подається опорна напруга $U_{оп}$.

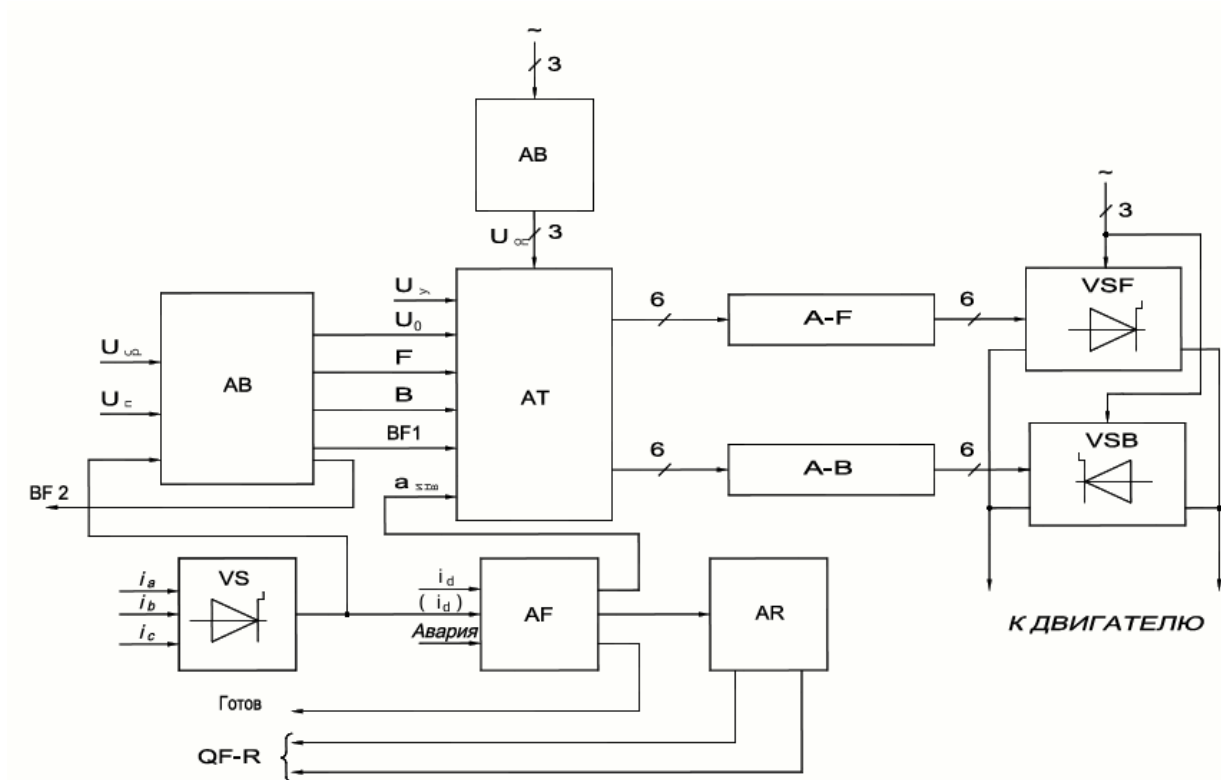


Рис. 1.6. Функціональна схема перетворювальної частини електроприводу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Логічне управління реверсом:

Вибір активного тиристорного моста (ЛПЗ). Робота ЛПЗ базується на аналізі двох параметрів: Полярності входної напруги управління. Фактичного значення струму навантаження (I_d).

Алгоритм перемикання мостів: ЛПЗ формує команди на вибір відповідного моста і коригує полярність напруги початкового кута запалювання тиристорів. При зміні напрямку руху пристрій виробляє сигнал безструмової паузи (BF1), на час якої імпульси управління знімаються з обох мостів для виключення виникнення коротких замикань між ними. Супутній сигнал BF2 забезпечує коректне відключення сигналу завдання струму період комутації.

У випадку аварійних ситуацій сигнал $U_{ср}$ (зрив імпульсів) миттєво блокує роботу обох випрямлячів. «Аварія» від зовнішньої схеми управління станом. При спрацьовуванні захисту вузол AF через блок прискореного відключення (AR) впливає на незалежний розчіплювач (R) головного автоматичного вимикача QF,

розриваючи силовий ланцюг. Водночас система знімає сигнал готовності приводу і переводить керуючі імпульси тиристорів в інверторний режим для безпечного гасіння енергії, запасеної в індуктивності двигуна.

1.6 Висновки до аналітичної частини

Розглянуто технологічний процес роботи обтискного стану 1250 та визначено критичну роль приймального рольгангу як сполучної ланки у потоковому виробництві злитків.

Встановлено, що робота даного механізму пов'язана з важкими умовами експлуатації: високими температурами, ударними навантаженнями та частими реверсивними режимами.

Вибраний двигун постійного струму має необхідну перевантажувальну здатність ($2,5 \div 4,0$) і високі динамічні характеристики для роботи в повторно-короткочасному режимі.

Вивчено функціональні схеми силової частини та системи імпульсно-фазового управління. Обґрунтовано застосування двоконтурної системи підпорядкованого регулювання координат з використанням сучасних логічних пристроїв та захистів, що забезпечує надійність та точність управління механізмами рольгангу. Сформульовані технологічні вимоги та обрана структура електроприводу є фундаментом для подальших інженерних розрахунків. У наступному розділі на підставі отриманих даних буде проведений детальний розрахунок потужності електродвигуна та перевірка його здатності навантаження для забезпечення безперебійної роботи стану 1250.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір електрообладнання та розрахунок параметрів елементів силового ланцюга

2.1.1 Вибір електродвигуна

Для забезпечення роботи приймального рольгангу стану 1250 здійснимо перевірочний розрахунок краново-металургійного двигуна постійного струму серії Д із незалежним збудженням. До установки вибираємо двигун типу Д814.

Машини серії Д спеціально спроектовані для експлуатації у важких умовах металургійного виробництва. Вони призначені для приводу допоміжних механізмів, що працюють у повторно-короткочасному режимі (S3) з високою частотою включень. Переваги обраного двигуна:

- широкий діапазон регулювання частоти обертання;
- висока механічна міцність та стійкість до вібраційних навантажень;
- підвищена здатність перевантаження, необхідна для компенсації динамічних ударів при посадці зливка на рольганг.
- захищене виконання, що допускає роботу в умовах високої запиленості та вологості, характерних для обтискних цехів.

Основні технічні характеристики електродвигуна Д814 систематизовані та представлені нижче в таблиці 2.1.



Рис. 2.1. Електродвигун Д814

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Таблиця 2.1.

Технічні дані електродвигуна типу Д814

Найменування	Позначення	Значення
Тип	-----	Д814
Номінальна потужність, кВт	P _н	110
Номінальна напруга якоря, В	U _н	440
Номінальний струм якоря, А	I _н	274
Номінальна частота обертання, об/хв	n _н	500
Збудження	-----	незалежне
Номінальний струм збудження, А	I _{в.н.}	5,2
Номінальна напруга збудження, В	U _{в.н.}	220
Момент інерції двигуна, кг·м ²	J _{дв}	10,25
Повторно-короточасний режим	-----	ПВ=40%
Опір якоря двигуна при 20° С, Ом	R _{оя}	0,032
Опір додаткових полюсів двигуна при 20° С, Ом	R _{д.п.}	0,021
Номінальний обертальний момент, Н·м	M _н	2100
Допустимий коефіцієнт перевантажувальної здатності двигуна	λ _{дв}	2,8

Перевірочний розрахунок двигуна рольгангу за методикою [5].

Для визначення сумарного навантаження на електродвигун приводу рольгангу необхідно обчислити такі складові статичних моментів опору:

Момент холостого ходу: опір обертання самих роликів без навантаження.

Момент транспортування: зусилля, що витрачається на переміщення металу на поверхні роликів.

Момент буксування: опір, що виникає під час прослизання роликів щодо нерухомого або уповільненого металу.

Статичний момент холостого ходу рольгангу, приведений до валу приводного двигуна, характеризує опір обертанню механізмів без навантаження.

Дана величина розраховується за таким виразом:

$$M_{xp} = \frac{m_p \cdot g \cdot Z_p \cdot d_{\psi} \cdot \mu_{\psi}}{2 \cdot i \cdot \eta_x}, \quad (2.1)$$

де $m_p = 8280$ кг маса одного ролика рольганга, кг;

g - прискорення вільного падіння ($9,81 \text{ м/с}^2$);

$Z_p = 7$ - кількість роликів у секції рольгангу з груповим типом електроприводу;

$d_{\text{ц}} = 600 \text{ мм}$ - діаметр цапфи роликів;

$\mu_{\text{ц}} = 0,01$ - коефіцієнт тертя, вибирається з урахуванням температурного впливу металу, що транспортується, на підшипники згідно з довідковими даними (наприклад, за таблицею 20 у джерелі [2]).

$i = 7,65$ - передатне число редуктора;

$\eta_x = 0,8$ - коефіцієнт корисної дії (ККД) редуктора при роботі на холостому ходу, рекомендується коригувати ККД при малих навантаженнях. Якщо при навантаженні до 75 % від номіналу значення ККД зберігається стабільним, то при зниженні до 5–10 % (що характерно для холостого ходу) слід зменшувати розрахунковий ККД вдвічі: $\eta_x = 0,5 \cdot \eta_n = 0,5 \cdot 0,8 = 0,4$

$$M_{\text{xp}} = \frac{8280 \cdot 9,81 \cdot 7 \cdot 0,26 \cdot 0,01}{2 \cdot 7,65 \cdot 0,4} = 246,3 \text{ Н} \quad (2.2)$$

Облік внутрішніх втрат в електродвигуні

При розрахунку загального статичного моменту холостого ходу необхідно брати до уваги не тільки опір механічної частини рольгангу, а й внутрішні втрати в приводному двигуні.

Власний момент холостого ходу електродвигуна визначається за наступною залежністю:

$$M_{\text{xp}} = \frac{8280 \cdot 9,81 \cdot 7 \cdot 0,26 \cdot 0,01}{2 \cdot 7,65 \cdot 0,4} = 246,3 \text{ Н} \quad (2.3)$$

Облік внутрішніх втрат в електродвигуні

При розрахунку загального статичного моменту холостого ходу необхідно брати до уваги не тільки опір механічної частини рольгангу, а й внутрішні втрати в приводному двигуні.

Власний момент холостого ходу електродвигуна визначається за наступною залежністю:

$$M_{x.d.} = (0,05 - 0,1) \cdot M_n = 0,1 \cdot 2100 = 210 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.4)$$

де $M_n = 2100 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – номінальний обертовий момент двигуна;

Таким чином, повний момент холостого ходу рольганга дорівнює:

$$M_x = M_{x.p} + M_{x.d.} = 246,3 + 210 = 456,3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.5)$$

Визначення моменту транспортування металу

При переміщенні вантажу (зливка або прокату) з швидкістю, що встановилася, виникають додаткові навантаження, які значно перевищують втрати холостого ходу. Основними факторами збільшення статичного моменту є Підвищене тертя в підшипниках: викликане впливом ваги (сили тяжіння) металу, що транспортується, на цапфи роликів. Тертя кочення: виникає у місці контакту роликів з поверхнею металу. Момент транспортування, наведений до валу приводного двигуна, визначається за такою формулою:

$$M_{tr} = \frac{m_m \cdot g \cdot \left(\frac{d_u}{2 \cdot \mu_u} + f \right)}{i \cdot \eta_{tr}}, \quad (2.6)$$

де m_m - маса металу (зливка або прокату), що припадає на одну секцію рольганга, кг;

f - коефіцієнт тертя кочення металу по поверхні роликів (для гарячого прокату приймається рівним 0,15 см);

η_{tr} - коефіцієнт корисної дії (ККД) механічної передачі при роботі під навантаженням.

Оскільки процес транспортування зливка по роликах зазвичай викликає лише незначне збільшення статичного навантаження на електропривод у порівнянні з режимом холостого ходу, в інженерних розрахунках допустимо прийняти рівність коефіцієнтів корисної дії: $\eta_{tr} = \eta_x = 0,4$. При такому припущенні розрахункова формула:

$$M_{тр} = \frac{13500 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{0,26}{2 \cdot 0,01} + 0,15 \cdot 10^{-2} \right)}{7,65 \cdot 0,4} = 123,5 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.7)$$

Повний момент опору при переміщенні металу, наведений до валу електродвигуна, складається з усіх складових статичних навантажень, що діють у системі транспортування вантажу:

$$M_{СТ} = M_x + M_{ТР} = 456,3 + 123,5 = 579,8 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.8)$$

Визначення моменту буксування роликів

Розрахунок моменту буксування необхідний перевірки вибраного електродвигуна з його перевантажувальної здатності. Привід рольганга повинен розвивати зусилля, достатнє для того, щоб при зупиненому або заклинив металі ролики могли прокручуватися (буксувати). Це гарантує захист двигуна від виходу з ладу при стопорінні металу.

Момент буксування роликів, наведений до валу двигуна, розраховується за таким виразом:

$$M_{б} = \frac{m_n \cdot g \cdot (d_p \cdot \mu_{б} + d_{ц} \cdot \mu_{ц})}{2 \cdot i \cdot \eta_n}, \quad (2.9)$$

де d_p - діаметр ролика, м;

$\mu_{б}$ - коефіцієнт тертя ковзання при буксуванні. Відповідно до методики [5] (табл. 13), для контакту гарячої сталі з поверхнею роликів приймається значення $\mu_{б} = 0,3$.

η_n - номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) редуктора приводу.

$$M_{б} = \frac{13500 \cdot 9,81 \cdot (0,6 \cdot 0,3 + 0,26 \cdot 0,01)}{2 \cdot 7,65 \cdot 0,8} = 2014 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.10)$$

Повний статичний момент при буксуванні роликів по металу, наведений до валу електродвигуна, розраховується як сума моменту тертя ковзання та моменту власних втрат двигуна на холостому ході:

$$M_{сб} = M_x + M_б = 456,3 + 2014 = 2470,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для визначення експлуатаційних можливостей устаткування слід проаналізувати, як ЕРС двигуна змінного струму впливає його здатність витримувати надлишкові навантаження

Відношення

$$\frac{M_{макс}}{M_n} = \frac{2470}{2100} = 1,176,$$

менше коефіцієнта перевантаження двигуна

$\Lambda = 2,8$, тобто двигун підходить за перевантажувальній здатності.

Перевірка двигуна по нагріву

Тривалість пускових режимів електроприводу рольганга визначається параметрами вхідної напруги трансформатора та динамічними характеристиками системи.

$$t_n = \frac{J_{з2} \cdot \omega_{расч}}{M_n - M_{см}} = \frac{105,25 \cdot 51}{2520 - 579,8} = 2,5 \text{ с} \quad (2.11)$$

де момент інерції електропривода зі завантажувальним рольгангом буде складати:

$$J_{з2} = J_{МЕХ2} + J_{ДВ} = 95 + 10,25 = 105,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.12)$$

Розрахуємо розрахункову кутову швидкість обертання двигуна:

$$\omega_{расч} = \frac{V}{r_p} \cdot i = \frac{2}{0,3} \cdot 7,65 = 51 \text{ рад / с} \quad (2.13)$$

M_n – середній пусковий момент двигуна; для розгону рольгангу зі заготівкою приймаємо: $M_n = 1,2 \cdot M_{н} = 1,2 \cdot 2100 = 2520 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

$r_p = 0,3 \text{ м}$ – радіус ролику.

Розрахуємо час гальмування електропривода рольгангу:

$$t_m = \frac{J_1 \cdot \omega_{расч}}{M_m + M_x} = \frac{73,25 \cdot 51}{1680 + 456,3} = 1,75c \quad (2.14)$$

Момент інерції рольганга без метала буде дорівнювати:

$$J_{\Sigma 1} = J_{MEK1} + J_{ДВ} = 63 + 10,25 = 73,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.15)$$

M_T – середній гальмовний момент двигуна; для гальмування незавантаженого рольгангу приймаємо:

$$M_T = 0,8 \cdot M_H = 0,8 \cdot 2100 = 1680 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Використовуючи данні про технологічний цикл та значення моментів опору, формуємо навантажувальну діаграму приймального рольгангу, представлену на рисунку 2.2. З її допомогою виконується розрахунок еквівалентного моменту на валу двигуна, що необхідно для перевірки теплового режиму електричної машини:

$$M_{\Sigma} = \sqrt{\frac{M_x^2 \cdot t_1 + M_{\Sigma 1}^2 \cdot t_2 + M_{\Sigma 2}^2 \cdot t_3 + M_{\Sigma 3}^2 \cdot t_4 + M_{\Sigma 4}^2 \cdot t_5 + M_{\Sigma 5}^2 \cdot t_6 + M_{\Sigma 6}^2 \cdot t_7 + M_{\Sigma 7}^2 \cdot t_8 + M_{\Sigma 8}^2 \cdot t_9 + M_{\Sigma 9}^2 \cdot t_{10}}{\frac{1+\beta}{2} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10})}} = \sqrt{\frac{2520^2 \cdot 2,5 + 579,8^2 \cdot 2,5 + 2470,3^2 \cdot 1 + 456,3^2 \cdot 1,2 + 1680^2 \cdot 1,5 + 2520^2 \cdot 2,5 + 579,8^2 \cdot 2,5 + 2470,3^2 \cdot 1 + 456,3^2 \cdot 1,2 + 1680^2 \cdot 1,5}{\frac{1+0,5}{2} \cdot (2,5 + 2,5 + 1 + 1,2 + 1,5 + 2,5 + 2,5 + 1 + 1,2 + 1,5)}} = 1900 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.16)$$

У розрахунковій формулі параметри $t_1 \div t_{10}$ позначають тимчасові відрізки кожного циклу навантаження згідно з діаграмою (с).

Коефіцієнт $\beta = 0,5$ відображає погіршення тепловіддачі електродвигуна під час пауз у роботі [5].

Розрахуємо еквівалентна тривалість включення:

$$ПВ_{\Sigma} = \frac{\sum t_p}{t_{\Sigma}} \cdot 100\% = \frac{\sum t_p}{\sum t_p + \sum t_o} \cdot 100\% = \frac{1,5 + 2,5 + 1 + 1,2 + 1 + 1,5 + 2,5 + 1 + 1,2 + 1}{1,5 + 2,5 + 1 + 1,2 + 1 + 5 + 1,5 + 2,5 + 1 + 1,2 + 1 + 2,5} \cdot 100\% = 32,4\% \quad (2.17)$$

де $t_{\Sigma} = 21,9$ - час цикла, області с;

$t_o = 7,5$ - час паузи, с.

Еквівалентна потужність двигуна:

$$P_e = M_e \cdot \omega_{\text{розр.}} = 1900 \cdot 51 = 96900 \text{ Вт} \approx 97 \text{ кВт} \quad (2.18)$$

Виконуємо вибір двигуна за каталогом, зіставляючи розрахункову потужність з номінальною за стандартного значення ПВ = 40%

$$P_k = P_z \cdot \sqrt{\frac{ПВ_z}{ПВ_k}} = 97 \cdot \sqrt{\frac{32,4}{40}} = 87,3 \text{ кВт} \quad (2.19)$$

Необхідна потужність двигуна, отримана розрахунковим шляхом, зіставляється з паспортними характеристиками машин, що серійно випускаються, для підбору оптимального типорозміру:

$$P_{\text{расч}} = P_k \cdot K_z = 1,2 \cdot 87,3 = 104,7 \text{ кВт} \quad (2.20)$$

Для компенсації різниці між прийнятою розрахунковою моделлю та фактичними умовами експлуатації обладнання вводиться коефіцієнт запасу K_z . Враховуючи характер навантаження, вибираємо значення $K_z = 1,2$.

Умова нагрівання для приводу злитковозів виконується, що свідчить про коректний вибір двигуна Д814. Дана машина змінного струму придатна для роботи у складі приймального рольгангу, забезпечуючи необхідний запас за потужністю та стійкістю до перевантажень у заданому режимі роботи.

На підставі проведених розрахунків встановлено, що електродвигун Д814 задовольняє критеріям нагріву та перевантажувальної здатності. Це дозволяє рекомендувати його до застосування в електроприводі приймального рольгангу стану 1250 для стабільного транспортування металу.

Розрахункові параметри двигуна

При визначенні характеристик електроприводу враховуються параметри двигуна, зокрема активний опір ланцюгів за нормальної (кімнатної) температури

$$R_{\text{дв}} = R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} = 0,032 + 0,021 = 0,053 \text{ Ом.} \quad (2.21)$$

Для більш точного аналізу характеристик приводу розраховується активний опір обмоток двигуна нагрітому стані. Цей параметр враховує зміну провідності матеріалів при досягненні робочої температури, що встановилася.

$$R_{\text{дв.гор}} = 1,36 \cdot R_{\text{дв}} = 1,36 \cdot 0,053 = 0,072 \text{ Ом.} \quad (2.22)$$

Розрахуємо номінальну кутову швидкість:

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 500}{60} = 52,35 \text{ рад/с} \quad (2.23)$$

Розрахуємо коефіцієнт ЕРС ($\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$) та електромагнітного моменту ($\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}$):

$$c = \frac{U_H - I_H \cdot R_{\text{дв.гор}}}{\omega_H} = \frac{440 - 274 \cdot 0,072}{52,35} = 8,036 \quad (2.24)$$

Розрахуємо максимальну ЕРС двигуна:

$$E_{\text{дв.макс}} = c \cdot \omega_H = 8,036 \cdot 52,35 = 420,68 \text{ В} \quad (2.25)$$

Розрахуємо максимальний струм двигуна при допустимому навантаженні:

$$I_{\text{дв.макс}} = 2,8 \cdot I_H = 2,8 \cdot 274 = 767,2 \text{ А} \quad (2.26)$$

Розрахуємо індуктивність двигуна:

$$L_{\text{дв}} = \gamma \cdot \frac{U_H}{I_H \cdot p \cdot \omega_H} = 0,3 \cdot \frac{440}{274 \cdot 2 \cdot 52,35} = 0,0046 \text{ Гн} \quad (2.27)$$

где $p=2$ - число пар полюсов электродвигателя;

γ - коэффициент, принятый равным 0,3.

де $p=2$ – кількість пар полюсів електродвигуна;

γ – коефіцієнт 0,3.

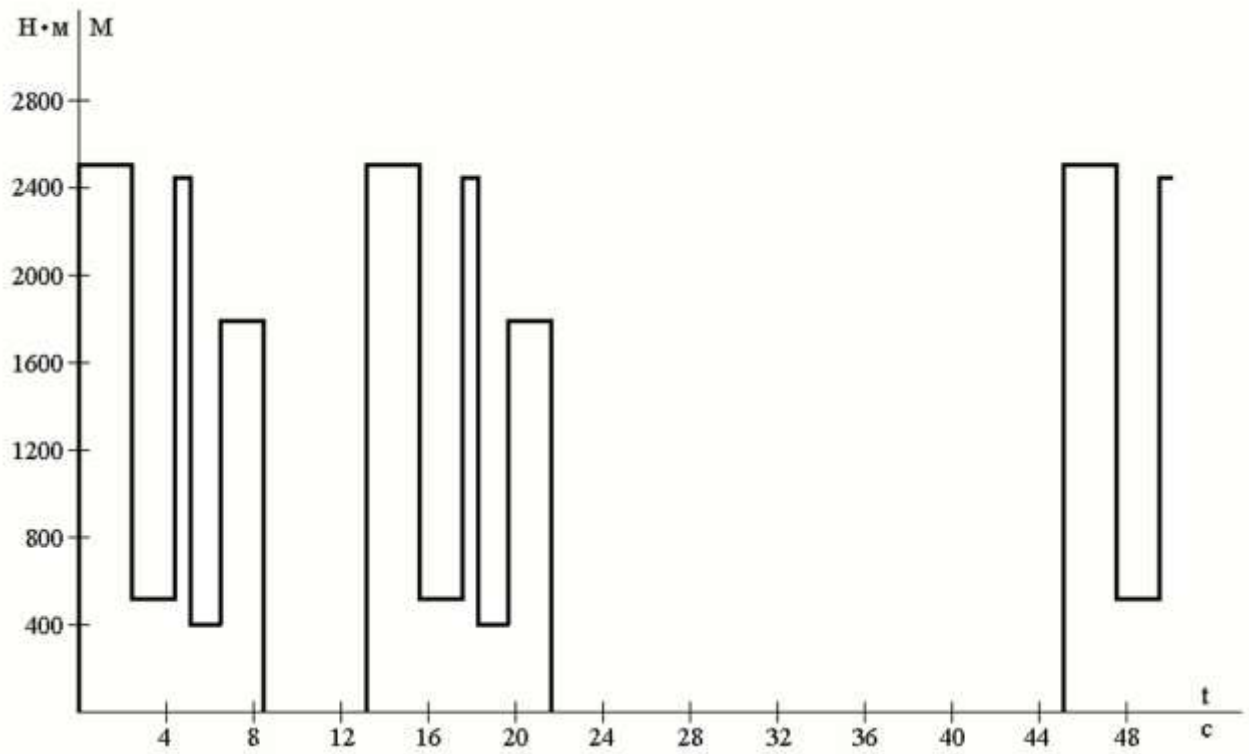


Рис. 2.2. Графічне представлення навантажувальної діаграми приймального рольгангу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Графічне представлення навантажувальної діаграми приймального рольганга дозволяє наочно оцінити чергування періодів пуску, руху, що встановився, і пауз, що необхідно для перевірки двигуна по нагріванню.

Розрахуємо постійну часу електродвигуна:

$$T_{дв} = \frac{L_{дв}}{R_{дв.гор}} = \frac{0,0046}{0,072} = 0,064 \text{ с} \quad (2.28)$$

2.1.2 Вибір комплектного регульованого електроприводу та його силових елементів

Для забезпечення живлення та управління швидкістю обертання обраного електродвигуна постійного струму серії Д814 прийнятий до встановлення комплектний тиристорний електропривод серії КТЕ. Вибір тиристорного

перетворювача здійснюється на підставі зіставлення його паспортних даних з розрахунковими параметрами. Основні умови вибору зводяться до наступних критеріїв: За струмом:

Номінальний випрямлений струм перетворювача ($I_{дн}$) повинен бути більшим або дорівнює номінальному струму ($I_{н.д.}$) обраного двигуна $I_{дн} \geq I_{н.д.}$

За напругою:

Номінальне повинно бути узгоджено з номінальною напругою електродвигуна $U_{н.д} \approx U_{дн}$

$$U_{дн} = (U_{дв} + 20) = 460B$$

За перевантажувальною здатністю:

Максимально допустимий струм перетворювача в перехідних режимах повинен перевищувати пікове значення струму двигуна при заданому технологічному циклі роботи рольгангу: $I_{д.макс} \geq I_{д.макс}$.

Вибір та технічні характеристики перетворювача На підставі проведених розрахунків та умов експлуатації для керування двигуном вибирається реверсивний комплектний тиристорний електропривод типу КТЕ-320/460-УХЛ4. Дана установка характеризується роздільним управлінням групами вентилів та природним повітряним охолодженням. Силова частина перетворювача виконана за трифазною бруківкою схемою випрямлення. Вибраний електропривод задовольняє основним умовам узгодження параметрів системи «тиристорний перетворювач - двигун» ($U_{дн} \geq U_{н.д}$ і $I_{дн} \geq I_{н.д}$).

При тривалісті:

$$U_{дн} = 460B, I_{дн} = 320A, I_{д.макс} = 2.25 \cdot 320 = 720A$$

Технічні дані КТЕ-320/440-132-1-УХЛ4 представлені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Технічні дані КТЕ-320/440-132-1-УХЛ4

Величина	Значення
Номінальний струм перетворювача, А	320
Номінальна напруга перетворювача, В	460
Коефіцієнт корисної дії, %	94
Коефіцієнт потужності	0,85
Асиметрія керуючих імпульсів, ел.град.	±3
Величина струму уставки максимального струмового захисту, А	860
Діапазон регулювання U_d , %	0–100
Відхилення живильної мережі від номінального значення:	
- для високої напруги, %	±10
- для низької напруги, %	+10, -15
Діапазон регулювання швидкості обертання двигуна	25:1
Статична похибка підтримання швидкості обертання, %	4
Похибка відпрацювання заданої швидкості не більше, %	0,3
Час реверсу струму якоря, мс	30
Обмеження повного струму при заданому рівні з похибкою не більше, %	10
Межі регулювання обмеження темпу наростання в якорі двигуна, А/с	(40-100)I _н
Діапазон вимірювання керуючого сигналу, В	±10
Діапазон фазового керування, ел.град.	170
Дрейф фазової характеристики при зміні температури навколишнього середовища від 1 до 40°C, ел.град.	±4
Залежність кута регулювання від напруги керування	лінійна
Жорсткість обмежувальної характеристики, В	±0,5
Діапазон регулювання:	
- мінімального кута, ел.град	5–90
- максимального кута, ел.град	90–175
- кута узгодження, ел.град	5–175
Тривалість вихідних імпульсів, мс	0,45–0,1

2.1.3 Вибір силового трансформатора

Для електропостачання силових ланцюгів реверсивних тиристорних перетворювачів, що працюють за трифазною бруківкою схемою випрямлення, застосовуються спеціалізовані перетворювальні трансформатори. Їхні параметри за вторинною напругою узгоджені з номінальними характеристиками випрямляча та електродвигуна.

Враховуючи технічні параметри обраного електроприводу приймального рольгангу, до встановлення приймається сухий двообмотувальний

трансформатор типу ТСЗП-400/10 УЗ (табл.2.3). Це обладнання призначене для підключення первинної обмотки до мережі високої напруги 10 кВ.

Таблиця 2.3

Технічні данні трансформатора

Тип трансформатора	Мережева обмотка		Вентильна обмотка		Перетворювач		Втрати		Напруга короткого замикання ук, %	Струм холостого ходу Іх.х, %
	Потужність, кВт	Напруга, кВ	Напруга, В	Струм, А	Напруга, В	Струм, А	Холостого ходу Вт	Короткого замикання Вт		
ТСЗП-400/10 УЗ	364	10	410	514	460	630	1600	4500	5,3	2,5
З'єднання обмоток трансформатора Δ/Δ-0										

2.1.4 Визначення розрахункових параметрів трансформатора

Для проведення подальшого аналізу та імітаційного моделювання системи у MATLAB необхідно розрахувати параметри еквівалентної схеми заміщення перетворювального трансформатора. Всі наступні обчислення виконуються виходячи з умови з'єднання вторинної (вентильної) обмотки в «зірку».

$$I_{2\phi} = I_{2.3} = 514 \text{ A},$$

$$U_{2\phi} = \frac{U_{2.3}}{\sqrt{3}} = \frac{410}{\sqrt{3}} = 236.7 \text{ В} \quad (2.29)$$

Розрахуємо активний опір трансформатора на фазу:

$$R_{тр.ф.} = \frac{\Delta P_{кз}}{m_2 \cdot I_{2\phi.н.}^2} = \frac{4500}{3 \cdot 514^2} = 0,0057 \text{ Ом} \quad (2.30)$$

Розрахуємо повний опір трансформатора на фазу:

$$Z_{тр.ф.} = \frac{U_{к.з. \%} \cdot U_{2\phi.н.}}{100 \cdot I_{2\phi.н.}} = \frac{5,3 \cdot 236,7}{100 \cdot 514} = 0,0245 \text{ Ом} \quad (2.31)$$

Розрахуємо реактивний опір трансформатора на фазу:

$$Z_{mp.\phi.} = \frac{U_{к.з.\%} \cdot U_{2\phi.н.}}{100 \cdot I_{2\phi.н.}} = \frac{5,3 \cdot 236,7}{100 \cdot 514} = 0,0245 \text{ Ом} \quad (2.32)$$

Розрахуємо індуктивність обмоток трансформатора на фазу:

$$L_{mp.\phi.} = \frac{X_{mp.\phi.}}{\omega_c} = \frac{0,0238}{314} = 0,076 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.34)$$

де $\omega_c = 314 \text{ рад/с}$ - кутова частота живлення мережі.

2.1.5 Вибір та розрахунок згладжуючого реактора

При живленні електродвигуна постійного струму від тиристорного перетворювача (ТП) у якірному ланцюзі, крім постійної складової, протікають змінні складові струму. Їх величина залежить від кута управління перетворювачем та параметрів навантаження. Пульсації струму призводять до додаткового нагрівання двигуна, погіршення умов комутації на колекторі і зниження жорсткості механічних характеристик через розширення зони переривчастих струмів. Для обмеження змінних складових струму та поліпшення експлуатаційних характеристик двигуна в якірний ланцюг включається реактор, що згладжує (дросель). Його застосування дозволяє забезпечити безперервність струму в ширшому діапазоні навантажень та покращити використання двигуна по моменту.

Індуктивність реактора, що згладжує, вибирається виходячи з двох основних умов:

Забезпечення режиму безперервного струму: зона переривчастих струмів при роздільному управлінні не повинна перевищувати мінімального значення струму навантаження, що зазвичай приймається на рівні $0,1 I_{дв.н.}$. Обмеження пульсацій струму: величина пульсацій струму в номінальному режимі повинна знаходитися в межах $P1(\%)=2-7 \%$.

Номінальний струм реактора обираємо з умови:

$$I_{\partial p.н} \geq \frac{\lambda_{\partial s} \cdot I_{\partial s}}{\lambda_{\partial p}} = \frac{2,8 \cdot 274}{3} = 255,7 A. \quad (2.35)$$

Розрахуємо індуктивність якірного ланцюга з умови обмеження зони переривчастих струмів на рівні $0,1 \cdot I_{дв.н.}$:

$$L_{KH1} = \frac{1}{\omega} \cdot k_{ср.макс} \cdot \frac{E_{d0}}{I_{д.ср}} = \frac{1}{314} \cdot 0,093 \cdot \frac{553,9}{27,4} = 0,006 Гн, \quad (2.36)$$

де при $\alpha=90^\circ$:

$$k_{ср.макс} = \left(1 - \frac{\pi}{m_n} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m_n}\right) \cdot \sin \alpha = \left(1 - \frac{\pi}{6} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\pi}{6}\right) \cdot \sin 90^\circ = 0,093, \quad (2.37)$$

$$I_{д.ср} < 0,1 \cdot I_{дв.н.} = 0,1 \cdot 274 = 27,4 A$$

Розрахуємо індуктивність дроселя:

$$L_{\partial p1} = L_{кн1} - 2 \cdot L_{мр.ф} - L_{\partial s} = 0,006 - 2 \cdot 0,076 \cdot 10^{-3} - 0,0046 = 0,001248 Гн. \quad (2.38)$$

Розрахуємо індуктивність якірного ланцюга з умови пульсації струмів на рівні 5 %:

$$L_{кн2} = \frac{E_{d(1)} \cdot 100}{m_n \cdot \omega_c \cdot P(1)\% \cdot I_{дн}} = \frac{134,4 \cdot 100}{6 \cdot 314 \cdot 5 \cdot 274} = 0,00522 \text{ Гн}, \quad (2.39)$$

$$E_{d(1)} = \frac{E_{d0}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2 \cdot m_n}{(m_n^2 - 1)} = \frac{553,9}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2 \cdot 6}{(6^2 - 1)} = 134,4 B \quad (2.39)$$

Розрахуємо індуктивність дроселя:

$$L_{\partial p2} = L_{кн2} - 2 \cdot L_{мр.ф} - L_{\partial s} = 0,00522 - 2 \cdot 0,076 \cdot 10^{-3} - 0,0046 = 0,000467 Гн. \quad (2.40)$$

2.1.6 Вибір реактора, що згладжує

На підставі розрахункових параметрів силового ланцюга та характеристик обраного двигуна до установки приймається реактор, що згладжує серії ФРОС-65/0,5 УЗ. Фільтрові однофазні однострижневі реактори серії ФРОС з природним

повітряним охолодженням призначені для тривалої роботи в ланцюгах випрямленого струму з напругою до 500 В. Конструкція даних реакторів забезпечує високу стабільність параметрів: індуктивність знижується не більше ніж на 10% від номінального значення навіть при кратках.

Технічні характеристики реактора, що згладжує, наведені в таблиці 2.4:

Таблиця 2.4

Параметри реактора типу ФРОС-65/0,5УЗ

Найменування параметра	Позначення	Розмірність	Значення
Номінальний струм	$I_{p.n}$	А	320
Індуктивність	L_p	мГн	1,0
Маса	m	кг	82
Активний опір	R_p	Ом	0,0045

2.1.7 Вибір автоматичних вимикачів

Автоматичні вимикачі призначені для захисту електричних установок від струмів короткого замикання та перевантаження, а також від неприпустимих знижень напруги. Крім того, вони використовуються для нечастих оперативних включень та відключень силових ланцюгів електроприводу.

У системі тиристорного перетворювача КТЕ-320/440-132-1УХЛ4 автоматичні вимикачі встановлюються як на стороні змінного струму (для захисту мережі живлення та трансформатора), так і на стороні постійного струму (для захисту якірного ланцюга двигуна). Технічні характеристики автоматичних вимикачів наведені в таблиці 2.5:

Таблиця 2.5

Технічні дані автоматичних вимикачів

Параметри	Автоматичний вимикач на стороні змінного струму	Автоматичний вимикач на стороні постійного струму
Тип	A3756Б	A3795П
Нульовий розчепивач	380 В, 50 Гц	380 В, 50 Гц
Незалежний розчепивач	—	=110 В
Електромагнітний привід	380 В, 50 Гц	380 В, 50 Гц
Номінальна напруга головного ланцюга	380 В, 50 Гц	=440 В
Номінальний струм головного ланцюга	400 А	400 А
Уставка	1500 А	2500 А

Розрахуємо параметри перетворювача

Визначення середньої випрямленої ЕРС перетворювача Середнє значення випрямленої ЕРС тиристорного перетворювача при заданому куті управління визначається за регулювальною характеристикою. Величина ЕРС на виході випрямляча залежить від кута відкриття тиристорів і параметрів мережі живлення. Для реверсивного електроприводу середня випрямлена ЕРС при куті $\alpha=0$ розраховується за формулою:

$$E_{d0} = k_{U_{2Л}} \cdot U_{2Л} = 1,351 \cdot 410 = 553,9 \text{ В} \quad (2.41)$$

Розрахуємо коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача (max):

$$k_{\text{тп}} = \frac{\pi \cdot k_{\text{уо}} \cdot E_{d0}}{2 \cdot U_{\text{оп.макс}}} = \frac{3,14 \cdot 0,475 \cdot 553,9}{10} = 174 \quad (2.42)$$

де $k_{\text{уо}} = 0,475$ – коефіцієнт передачі керуючого органу на вході СИФУ;

$2 \cdot U_{\text{оп.макс}} = 10 \text{ В}$ – розмах лінійної опорної напруги на вході СИФУ;

Розрахуємо постійну часу тиристорного перетворювача, яка обумовлена середнім значенням часу запізнення:

$$T_{\text{тп}} = \frac{0,5}{m_a \cdot f_c} = \frac{0,5}{6 \cdot 50} = 0,00167 \text{ с} \quad (2.43)$$

де $m_a = 6$ – кількість пульсів перетворювача;

$f_c = 50 \text{ Гц}$ – частота струму мережі.

2.1.8 Розрахунок параметрів силового ланцюга

Розрахуємо опір силового ланцюга перетворювача:

$$R_{ТП} = 2 \cdot R_{тр.ф.} + R_{\kappa} = 2 \cdot 0,0057 + 0,0227 = 0,0341 \text{ Ом} \quad (2.44)$$

де опір за рахунок комутації струмів тиристорів:

$$R_{\kappa} = \frac{m_b \cdot X_{тр.ф.}}{K_{cx} \cdot \pi} = \frac{6 \cdot 0,0238}{2 \cdot \pi} = 0,0227 \text{ Ом} \quad (2.45)$$

$m_b = 6$ – кількість пульсів схеми перетворювача.

Розрахуємо опір силового ланцюга двигуна буде дорівнювати:

$$R_{ц.дв} = R_{дв.гор} + R_p + 0,1 \cdot R_{дв.гор} = 0,072 + 0,0045 + 0,1 \cdot 0,072 = 0,0837 \text{ Ом} \quad (2.46)$$

Розрахуємо опір силового ланцюга буде дорівнювати:

$$R_{яц} = R_{ТП} + R_{ц.дв} = 0,0341 + 0,0837 = 0,1178 \text{ Ом} \quad (2.47)$$

Розрахуємо індуктивність силового ланцюга перетворювача:

$$L_{ТП} = 2 \cdot L_{тр.ф.} = 2 \cdot 0,758 \cdot 10^{-4} = 1,516 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.48)$$

Розрахункове значення індуктивності силового ланцюга:

$$L_{яц} = L_{дв} + 2L_{тр.н.} + L_{ор} = 0,0046 + 2 \cdot 0,076 \cdot 10^{-3} + 0,001 = 0,005752 \text{ Гн} \quad (2.49)$$

Розрахуємо електромагнітну постійну часу силового ланцюга:

$$T_{\tau} = T_{яц} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}} = \frac{5,752 \cdot 10^{-3}}{0,1178} = 0,0488 \text{ с} \quad (2.50)$$

Розрахуємо електромагнітну постійну часу електроприводу рольгангу без металу:

$$T_{м1} = \frac{J_{звс1} \cdot R_{яц}}{C^2} = \frac{73,25 \cdot 0,1178}{8,036^2} = 0,1336 \text{ с} \quad (2.51)$$

Розрахуємо електромагнітну постійну часу електроприводу завантаженого злитками рольгангу :

$$T_{м2} = \frac{105.25 \cdot 0.1178}{8.036^2} = 0.192c \quad (2.52)$$

Розрахуємо відношення електромеханічної та електромагнітної постійних часу приводу:

$$\frac{T_{м1}}{T_{яц}} = \frac{0.1336}{0.0488} = 2.738 \quad (2.53)$$

$$\frac{T_{м2}}{T_{яц}} = \frac{0.192}{0.0488} = 3.934 \quad (2.54)$$

Отриманні параметри підтверджують вплив ЕРС двигуна на процеси у контурі струму.

2.1.9 Перевірка області існування електромеханічних характеристик електропривода

Перевірка полягає в підтвердженні того, що обраний комплектний електропривід забезпечує роботу двигуна у всіх необхідних режимах навантаження і швидкості. Граничні характеристики перетворювача, що відповідають граничним кутам управління (α_{min} й α_{max}), повинні повністю перекривати задану область роботи приводу у всіх режимах управління та навантаження. Задана площа електромагнітних характеристик електроприводу розташована у 4 квадрантах та обмежена швидкістю $\pm\omega_{еп.макс} = 51$ рад/с та струму $\pm I_{еп.макс} = 720$ А.

Для даної системи значення мінімального кута управління визначається так:

$$\alpha_{min} \leq \arccos\left(\frac{C \cdot \omega_{max} + I_{дв.н} \cdot R_{яц}}{k_{UC} \cdot E_{d0}}\right) = \arccos\left(\frac{8.036 \cdot 51 + 274 \cdot 0.1178}{0.9 \cdot 553.9}\right) = 27.52^\circ \quad (2.55)$$

де $k_{uc} = 0,9$ – коефіцієнт, що враховує можливе зниження мережі.

Приймаємо $\alpha_{min} = 25^\circ$.

Максимальне значення ЕРС тиристорного перетворювача при куті $\alpha_{min} = 25^\circ$ дорівнює:

$$\begin{aligned}\alpha_{МАКС} &\leq \arccos\left(\frac{2 \cdot R_{ТП} \cdot I_{ЭП.МАКС}}{k_{UC} \cdot E_{d0}} - \cos \delta\right) = \\ &= \arccos\left(\frac{2 \cdot 0,0341 \cdot 720}{0,9 \cdot 553} - \cos 5^\circ\right) = 153 \text{ ел.град.}\end{aligned}\quad (2.56)$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 1,8 + 3 = 4,8^\circ; \quad (2.57)$$

Кут, який відповідає часу поновлення якості вентиля, t_e , град.;

$t_e = 100$ мкс – час поновлення якості вентиля;

$\delta_2 = 3^\circ$ - граничне допустиме значення асиметрії імпульсів управління;

Приймаємо $\delta = 5^\circ$

Приймаємо $\alpha_{МАКС} = 155$ ел.град.

$$\delta_1 = \frac{180 \cdot \omega_c \cdot t_e}{\pi} = \frac{180 \cdot 314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{\pi} = 1,8^\circ \quad (2.58)$$

При α_{min} розраховується та будується електромеханічна характеристика системи перетворювач-двигун (характеристика І рис.2.3):

$$\omega_{ДВ}(I_{дв}) = \frac{1}{C} (k_{UC} \cdot E_{d0} \cdot \cos \alpha_{min} - R_{яц} \cdot I_{дв}) = \frac{1}{8,036} (0,9 \cdot 553,9 \cdot \cos 25^\circ - 0,1178 \cdot I_{ДВ}) \quad (2.58)$$

В табл.2.6 зведені результати розрахунку.

Необхідно розрахувати та побудувати електромеханічну характеристику при роботі струмопідводящої групи у режимі інвертування (характеристика ІІ рис.2.3):

$$\begin{aligned}\omega_{ДВ}(I_{дв}) &= \frac{1}{C} (k_{UC} \cdot E_{d0} \cdot \cos \delta + (R_{ТП} - R_{ц.ДВ}) \cdot I_{дв}) = \\ &= \frac{1}{8,036} \cdot (0,9 \cdot 553,9 \cdot \cos 5^\circ + (0,0341 - 0,0837) \cdot I_{дв})\end{aligned}\quad (2.59)$$

Згідно з розрахунковими даними з таблиці 2.6 і характеристиками на рис.2.3, розімкнений контур електроприводу ефективно забезпечує заданий режим роботи. Це підтверджується здатністю системи утримувати робочі параметри в межах норми при коливаннях або зникненні струму

Таблиця 2.6

Дані автоматичної розрахунку пропускання електромеханічних характеристик

Характеристики	I		II		III	
$I_{дв}, A$	0	720	0	-720	0	-720
$\omega_{дв}, \text{pac/c}$ при $\kappa_c = 0,9$	56,22	45,66	61,8	68,67	56,22	62,47
$\omega_{дв}, \text{pac/c}$ при $\kappa_c = 1,0$	62,47	51,92	66,24	73,1	66,78	73,02

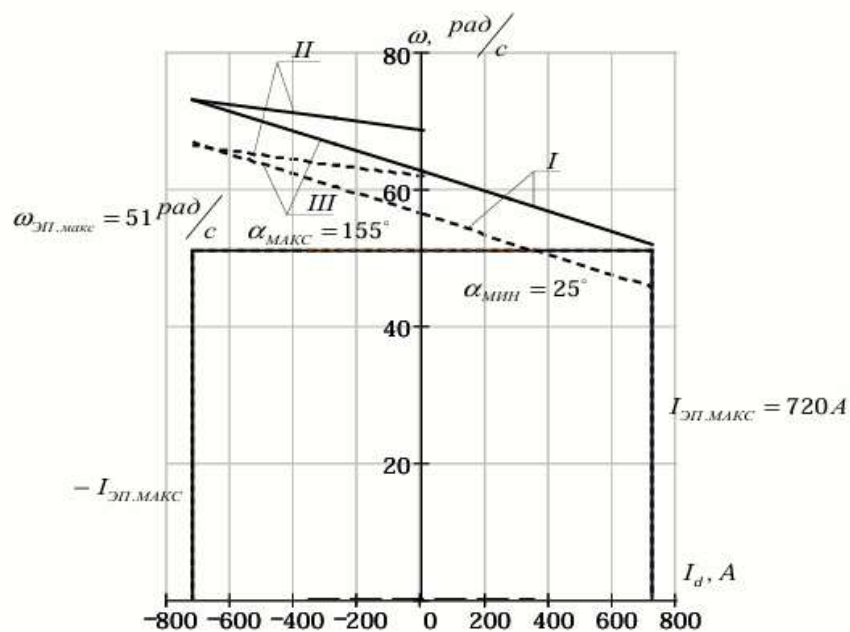


Рис. 2.3. Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ) розімкнутої системи регульованого електроприводу, виконаного за схемою ТП-Д

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

На рис.2.3 представлені логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ) розімкнутої системи регульованого електроприводу, виконаного за схемою ТП-Д. Суцільними лініями позначені електромеханічні характеристики, що визначають межі заданої сфери функціонування. Дані графіки дозволяють оцінити статичні та динамічні показники системи у встановлених режимах роботи.

2.2 Розрахунок електромеханічних характеристик системи УВ-Д

Далі розглянемо режими роботи системи «керований випрямляч - двигун». Зміна швидкості обертання валу електродвигуна в цій системі реалізується шляхом регулювання напруги, що підводиться до нього. Кінематична схема та конструктивні особливості вузлів (включаючи підшипникові опори) забезпечують досягнення необхідних динамічних показників при заданому навантаженню:

$$\omega = \frac{E_d - I_d \cdot R_{\text{нц}} - \Delta U_s}{c}, \quad (2.59)$$

Де $E_d = E_{d0} \cdot \cos(\alpha)$ - максимальне середнє значення випрямленої ЕРС в режимі безперервного струму;

$\alpha =$ - кут відкриття (включення) тиристорів, що відрховується від точки їх природної комутації; та дотримання технологічних вимог (наприклад, при прокатуванні листів) необхідно визначити залежність кута керування від швидкості.

ΔU_s – пряме падіння напруги на тиристорі.

Шляхом ряду аналітичних перетворень отримаємо вираз для знаходження кута α як функції швидкості обертання. Відповідні графічні залежності та структурна схема двоконтурної системи регулювання представлені на рисунку нижче.

$$\alpha(\omega) = \arccos\left(\frac{\omega \cdot c + I_d \cdot R_{\text{яц}} + \Delta U_{\text{е}}}{E_{\text{д0}}}\right). \quad (2.60)$$

Щоб побудувати електромеханічні характеристики електроприводу приймального рольгангу в області безперервного струму, застосуємо розрахункове рівняння, що результує. Цей метод дає змогу визначити ключові коефіцієнти системи. Результати моделювання представлені малюнку, де показані межі зони стабільної роботи приводу як безперервних струмів.

$$\omega(I) = \frac{E_{\text{д0}} \cdot \cos(\alpha(\omega)) - I \cdot R_{\text{яц}} - \Delta U_{\text{е}}}{c}. \quad (2.61)$$

Аналіз роботи приводу в зоні переривчастих струмів

Теоретичні характеристики електроприводу мають лінійний характер, однак у реальних умовах експлуатації при малих навантаженнях виникає зона переривчастих струмів. Ширина цієї області прямо пропорційна величині кута регулювання α . Дане явище пояснюється тим, що в певні моменти часу миттєве значення випрямленої напруги перетворювача стає нижче проти-ЕРС двигуна. Відповідно до рівняння рівноваги, струм у разі прагне змінити напрям. Однак через односторонню провідність вентилів струм падає до нуля, стаючи уривчастим. При значних навантаженнях великий запас електромагнітної енергії ланцюга згладжує ці просідання, забезпечуючи режим безперервного струму. Кордоном між цими станами є режим початково-безперервного струму, параметри якого залежать від кута керування α і параметрів схеми.

Розрахунок характеристик у зоні уривчастих струмів виконується шляхом знаходження кута управління, що відраховується від початку позитивної напівхвилі фазної ЕРС. Це дозволяє математично описати поведінку електроприводу в режимах малих навантажень та побудувати графік залежності швидкості від моменту з урахуванням вентиляльних властивостей перетворювача.

$$\theta_0(\alpha) = \frac{180}{\pi} \cdot \left(\alpha(\omega) + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m_{\text{е}}} \right) \right). \quad (2.62)$$

Розрахуємо ЕРС в залежності від кута управління α в зоні преривистих струмів:

$$e(\alpha) = \cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \frac{\sin\left((\theta_0(\alpha) - \theta) \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \sin\left((\theta_0(\alpha) + \lambda - \theta) \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot e^{\frac{\lambda \cdot \pi}{180} \cot\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right)}}{1 - e^{\frac{\lambda \cdot \pi}{180} \cot\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right)}} \quad (2.63)$$

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

У даному розрахунку параметр λ , що становить 60° , визначає тривалість провідного стану тиристорів вентильного перетворювача. Кут θ характеризує фазовий зсув (відставання) струму якоря щодо прикладеної напруги. Це викликано наявністю індуктивності якірної ланцюга $L_{яц}$. Величина кута θ обчислюється за наступною залежністю:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\omega_0 \cdot L_{яц}}{R_{яц}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (2.64)$$

Розрахуємо струм у відносних одиницях в зоні струмів:

$$i(\alpha) = \frac{m_s}{2 \cdot \pi} \left(\cos\left(\theta_0(\alpha) \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \cos\left((\lambda + \theta_0(\alpha)) \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \lambda \cdot \frac{\pi}{180} \cdot e_{sp}(\alpha) \right), \quad (2.65)$$

Характеристики режиму переривчастого струму можна побудувати в $\omega = f(I)$ за виразом:

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

$$I(\alpha) = i(\alpha) \frac{\sqrt{2} \cdot U_n \cdot \cos\left(\theta_0(\alpha) \cdot \frac{\pi}{180} - \frac{\pi}{2}\right)}{R_{яц}}. \quad (2.66)$$

Варіювання кута відкриття тиристорів α (в межах від 0 до 180°) і кута провідності λ (від 0 до 60°) в розрахункових формулах дозволяє сформувати сімейство електромеханічних характеристик для області переривчастих струмів.

Результати моделювання системи УВ-Д, виконаного у програмному середовищі MathCad, наведено на рисунку 2.4.

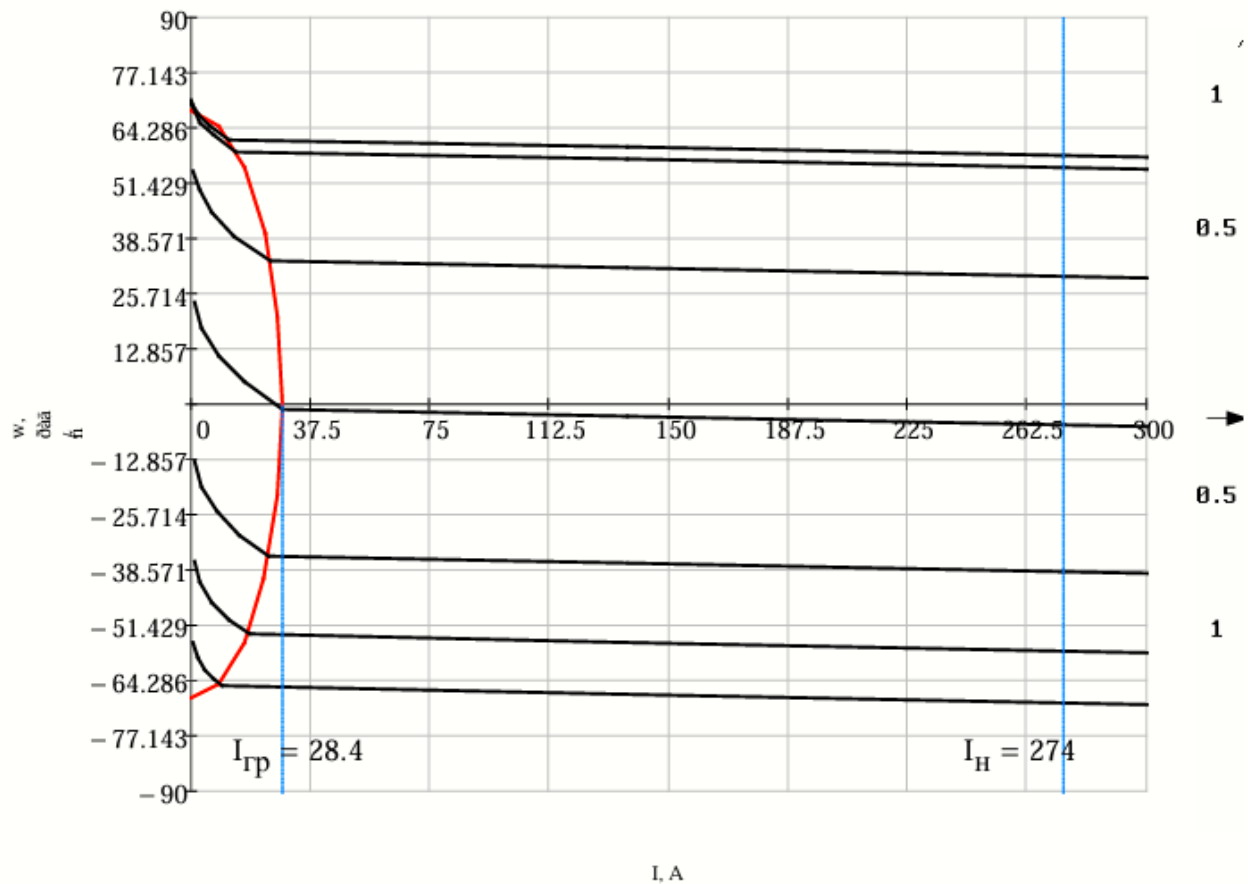


Рис. 2.4. Електромеханічні характеристики системи з роздільним керуванням

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Побудова граничної характеристики можливе на основі рівнянь швидкості та струму, що описують роботу приводу в області переривчастих струмів. Для цього приймається фіксоване значення кута провідності $\lambda = 60$ при одночасному варіюванні кута регулювання α . Аналіз представлених графічних залежностей показує, що ставлення максимального граничного струму до номінального становить:

$$\frac{I_{\text{дгрмах}}}{I_{\text{дн}}} = \frac{28,4}{274} = 0,104$$

2.3 Структурна схема силового каналу САУ

На рис. 2.5 представлено структурну схему силового каналу автоматизованої системи управління (САУ) типового електроприводу приймального рольгангу. Дана схема включає систему імпульсно-фазового управління (СИФУ) і силовий перетворювач, що забезпечує живлення двигуна. Функціональні особливості роботи каналу та технічні параметри всіх елементів схеми систематизовані та наведені у таблиці 2.7.

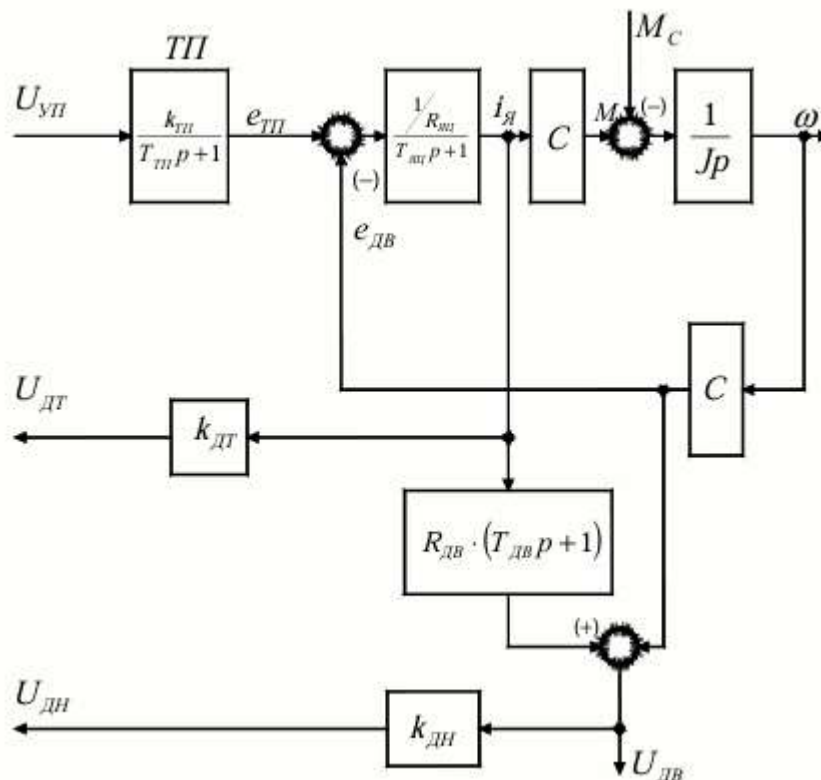


Рис. 2.5. Структурна схема силового каналу електроприводу приймального рольганга стану 1250

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

Проведемо розрахунок передачі датчику струму:

$$k_{ДТ} = \frac{U_{ДТ.МАКС}}{I_{МАКС}} = \frac{10}{800} = 0,0125 \text{ В/А}, \quad (2.67)$$

де $U_{ДТ.МАКС} = 10 \text{ В}$ та $I_{МАКС} = 800 \text{ А}$ – максимальне значення вихідної напруги та вихідного струму при налаштування датчика:

$$k_{дн} = \frac{U_{дн.макс}}{U_{макс}} = \frac{10}{500} = 0,02 \quad (2.68)$$

де $U_{дн.макс} = 10$ В та $I_{макс} = 500$ А – максимальне значення вихідної напруги та вихідного струму при налаштування датчика.

У цій таблиці систематизовано розрахункові та паспортні дані основного обладнання електроприводу, включаючи параметри силового перетворювача та електродвигуна.

Таблиця 2.7

**Технічні параметри елементів силового каналу системи
"перетворювач-двигун"**

$k_{тп}$	$R_{яц},$ Ом	$C,$ $\frac{В \cdot с}{рад}$	$J_{э1},$ $\frac{кг \cdot м^2}{м^2}$	$J_{э2},$ $\frac{кг \cdot м^2}{м^2}$	$T_{тп},$ с	$T_{яц},$ с	$k_{дт},$ $\frac{В}{А}$	$k_{дн}$	$R_{дв.гор},$ Ом	$T_{дв},$ с	$L_{яц},$ Гн	$M_x,$ Н · м	$M_c,$ Н · м	$M_{сб},$ Н · м
174	0,1178	8,036	73,25	105,25	0,00167	0,0488	0,0125	0,02	0,072	0,064	0,005752	456,3	579,8	2470,3

2.4 Синтез лінеаризованих структур САУ РЕП

2.4.1 Методика проектування лінеаризованих структур САУ

У сучасній інженерній практиці найбільш потрібні системи регульованого електроприводу (РЕП) постійного струму з тиристорними перетворювачами (ТП). Як правило, такі системи будуються за багатоконтурним принципом з використанням послідовних коригувальних ланок.

Ключовою метою синтезу САУ є динамічна оптимізація, під якою передбачається розрахунок параметрів системи, що гарантують досягнення необхідних динамічних показників. Якщо структурна організація САУ та характеристики її силової та механічної частин вже визначені, процес синтезу фокусується на параметруванні коригувальних ланцюгів. Враховуючи

багатоваріантність вирішення цього завдання, пріоритет надається методам, що поєднують простоту реалізації та наочність. Найкраще цим критеріям відповідають підходи, що базуються на аналізі логарифмічних частотних характеристик (ЛЧХ).

На стадії попереднього проектування САУ застосовуються методи аналізу лінійних систем та лінеаризовані моделі їх компонентів. Виходячи із заданих критеріїв якості регулювання, формуються бажані частотні характеристики всієї системи та параметри відповідних регуляторів. При розробці багатоконтурних електроприводів з послідовною корекцією найбільшого поширення набули методи налаштування на «модульний оптимум» (технічний оптимум) і «симетричний оптимум».

2.4.2 Лінеаризована структура САУ РЕПВ

Лінеаризована структура САУ РЕПВ тих випадках, коли до показників точності та швидкодії електроприводу не пред'являються жорсткі вимоги замість класичного датчика швидкості (тахогенератора) доцільно використовувати зворотний зв'язок по ЕРС двигуна. Такий підхід дозволяє спростити конструкцію системи, унеможлививши механічні вузли сполучення з тахогенератором. Популярність схем зі зворотним зв'язком по ЕРС обумовлена їх експлуатаційною надійністю, простотою апаратної реалізації і можливістю ефективного лімітування струму через обмеження вихідного сигналу відповідного регулятора. Дана конфігурація має певну статичну похибку за швидкістю. При математичному моделюванні тиристорний перетворювач представляється як інерційного ланки першого порядку з еквівалентної малої постійної часу $T_{п}$.

Захист силової ланцюга від перевантажень по струму реалізується шляхом фіксації вихідної напруги регулятора ЕРС на заданому рівні. Це забезпечує стабільну межу обмеження струму у всіх режимах роботи. При синтезі параметрів САУ зазвичай не враховують вплив внутрішнього негативного зворотного зв'язку по ЕРС двигуна. Відповідно до теорії автоматичного

управління, таке припущення є коректним тільки за умови значного перевищення електромеханічної постійної часу над постійною часу якірного ланцюга $T_m/T_{яц} > 1$. Структурна схема САУ РЕП приємного рольгангу представлена на рис.2.6. В схемі позначено: РЕ – регулятор ЕРС; РТ – регулятор струму.

Передаточна функція:

$$W(p)_{em} = \frac{K_m}{T_m \cdot p + 1} \quad (2.69)$$

Передаточна функція електродвигуна:

$$W(p)_{de} = \frac{C}{R_{su} \cdot (T_m p + 1) \cdot Jp} \quad (2.70)$$

Передаточна функція фільтра на виході датчика напруги:

$$W(p)_{\phi H} = \frac{1}{T_{\phi H} \cdot p + 1} \quad (2.71)$$

Параметр T_m фактично відображає запізнення, що вноситься фільтрами струмового контуру, блоками СІФУ та силовою частиною перетворювача. При математичному моделюванні чисельний показник цієї постійної часу знаходять як суму малих постійних часу окремих компонентів САУ. Такий підхід дозволяє уявити складні елементи як спрощених апериодических ланок першого порядку, що цілком достатньо для первинного аналізу динаміки.

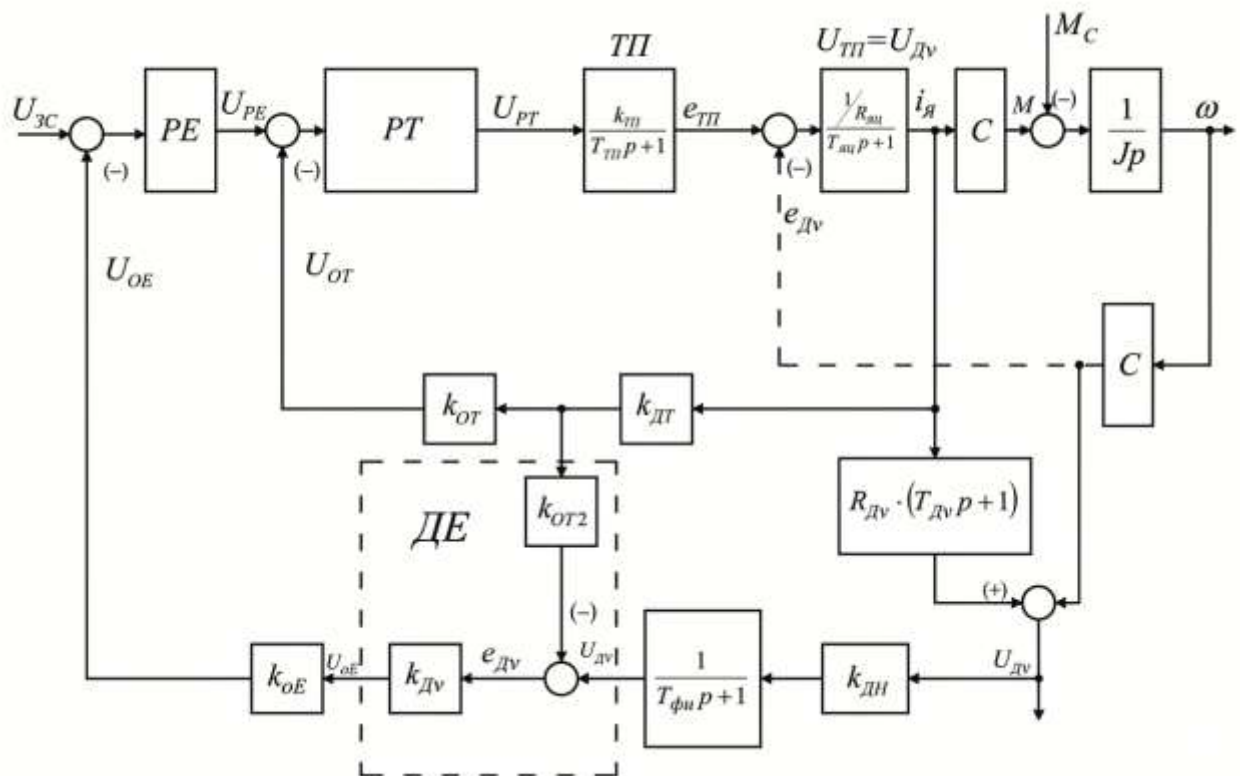


Рис. 2.6. Структурна схема лінералізованого САУ РЕП приймального рольганга стану 1250

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

2.5 Налаштування контурів САУ електроприводу

Методологію проектування багатоконтурних систем автоматизованого керування регульованими електроприводами (САУ РЕП) детально опрацьовано для лінійних моделей. Процес синтезу виходить з використання класичних структур підлеглого регулювання. При розрахунку параметрів допускається нехтування впливом внутрішнього зворотного зв'язку по ЕРС двигуна (на рис. 10 цей зв'язок позначена пунктирною лінією).

У рамках цієї роботи досліджувана система наводиться до стандартного двоконтурного виду підлеглого регулювання. Вона включає:

зовнішній контур регулювання швидкості (або ЕРС) з пропорційним регулятором (П-РЕ);

внутрішній контур регулювання струму із пропорційно-інтегральним регулятором (ПІ–РТ).

Оптимізація внутрішнього контуру струму

Внутрішній контур, що відповідає за стабілізацію та регулювання струму якоря, складається з регулятора струму та об'єкта управління.

До складу об'єкта регулювання даного контуру входять:

- статичний тиристорний перетворювач;
- електричний ланцюг якоря двигуна;
- датчик струму (вузли зворотного зв'язку).

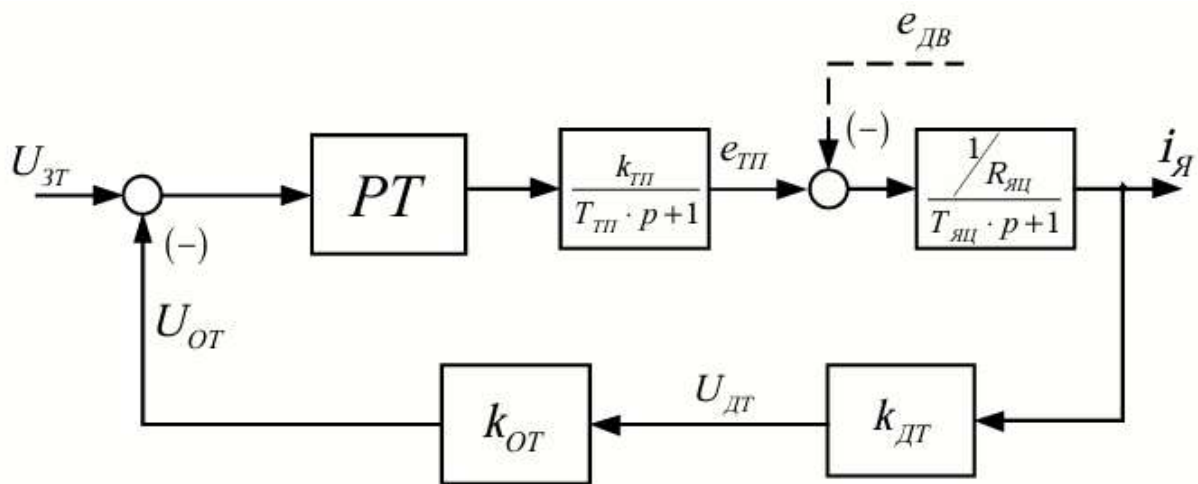


Рис. 2.7. Структурна схема контуру регулювання струму

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

Контур струму необхідно настроїти на модульний оптимум (М0).

Мала постійна часу в контурі струму: $T_{\mu T} = T_{ТП} = 0,00167$.

Приймаємо ПІ-регулятор з передавальною функцією

$$W(p)_{PT} = \kappa_{PT} \cdot \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p} \quad (2.72)$$

Розрахунок необхідного значення коефіцієнта зворотного зв'язку струму двигуна виконується на підставі наступного виразу:

$$k_T = \frac{U_{3T. \text{МАКС}}}{I_{Я. \text{МАКС}}} = \frac{10}{720} = 0,0139 \text{ В/А}. \quad (2.73)$$

Постійна часу регулятора струму: $T_{РТ} = T_{ЯЦ} = 0,0488 \text{ с}$.

Розрахуємо коефіцієнт посилення регулятора струму:

$$k_{РТ} = \frac{T_{ЯЦ} \cdot R_{ЯЦ}}{k_{ТП} \cdot k_T \cdot \alpha \cdot T_{\mu T}} = \frac{0,0488 \cdot 0,1178}{174 \cdot 0,0139 \cdot 2 \cdot 0,00167} = 0,712 \quad (2.74)$$

де $\alpha_t = 2$ – коефіцієнт оптимізації по МО.

Коефіцієнт входного ланцюга зворотнього зв'язку регулятора струму:

$$k_{ОГ1} = \frac{k_T}{k_{ДГ}} = \frac{0,0139}{0,0125} = 1,112 \quad (2.75)$$

Передавальна функція замкнутого оптимізованого контуру струму по управлінню має вигляд:

$$\begin{aligned} W(p)_{Т.ЗАМ} &= \frac{1/k_T}{\alpha_M \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1} = \frac{1/k_T}{\alpha_M \cdot T_{\mu T}^2 \cdot p^2 + \alpha_M \cdot T_{\mu T} p + 1} = \\ &= \frac{1/0,0139}{2 \cdot 0,00167^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,00167 \cdot p + 1} = \frac{71,94}{5,578 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 3,34 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}. \end{aligned} \quad (2.76)$$

На підставі передавальної функції оптимізованого замкнутого контуру струму в програмному середовищі Matlab було виконано моделювання перехідних процесів (див. рис. 2.8).

В результаті розрахунку були отримані наступні теоретичні показники якості регулювання для замкнутого струмового контуру:

Статична (усталена) помилка $\Delta I_{уст} = 0$;

Максимальне перерегулювання $\sigma = 4,3 \%$;

Час першого узгодження:

$$t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,00167 = 0,006847 \text{ с};$$

Тривалість перехідного процесу при подачі ступінчастого керуючого

$$t_{py2}^{(5)} = 0,006847 \text{ с};$$

Частотні характеристики (смуга пропускання по модулю та фазі).

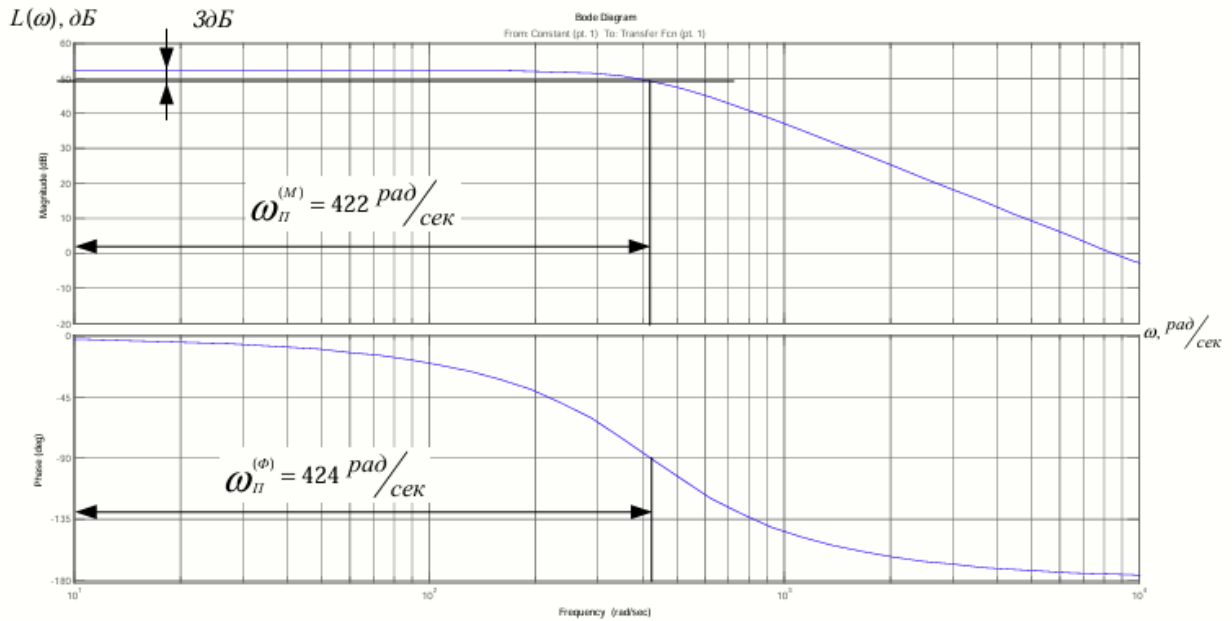


Рис. 2.8. ЛЧХ замкнутого контуру струму

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

$$\omega_n^{(M)} = \omega_n^{(\phi)} = \frac{0,71}{T_{\mu m}} = \frac{0,71}{0,00167} = 425,15 \text{ рад/с} \quad (2.77)$$

$$f_n^{(M)} = f_n^{(\phi)} = \frac{\omega_n^{(\phi)}}{2\pi} = \frac{425,15}{2\pi} = 67,67 \text{ Гц} . \quad (2.78)$$

По ЛЧХ замкнутого контуру струму знаходимо значення частоти пропускання контуру.

$$\omega_n^{(M)} = \omega_n^{(\phi)} = 10^{2,625} = 422 \text{ рад/с} \quad (2.79)$$

$$f_n^{(M)} = f_n^{(\phi)} = \frac{\omega_n^{(\phi)}}{2\pi} = \frac{422}{2\pi} = 67,163 \text{ Гц} . \quad (2.80)$$

Контур ЕРС

Для електроприводів із постійним потоком збудження, до яких не висуваються жорсткі вимоги щодо точності стабілізації швидкості, доцільно використовувати систему зі зворотним зв'язком за ЕРС.

Визначення величини ЕРС у таких системах реалізується непрямым методом: підсумовуванням сигналу, пропорційного напрузі на затискачах двигуна, із сигналом струмової компенсації. Останній пропорційний падінню напруги на активному опорі якоревого ланцюга. Структурна організація такого контуру представлена на рисунку 2.9 а.

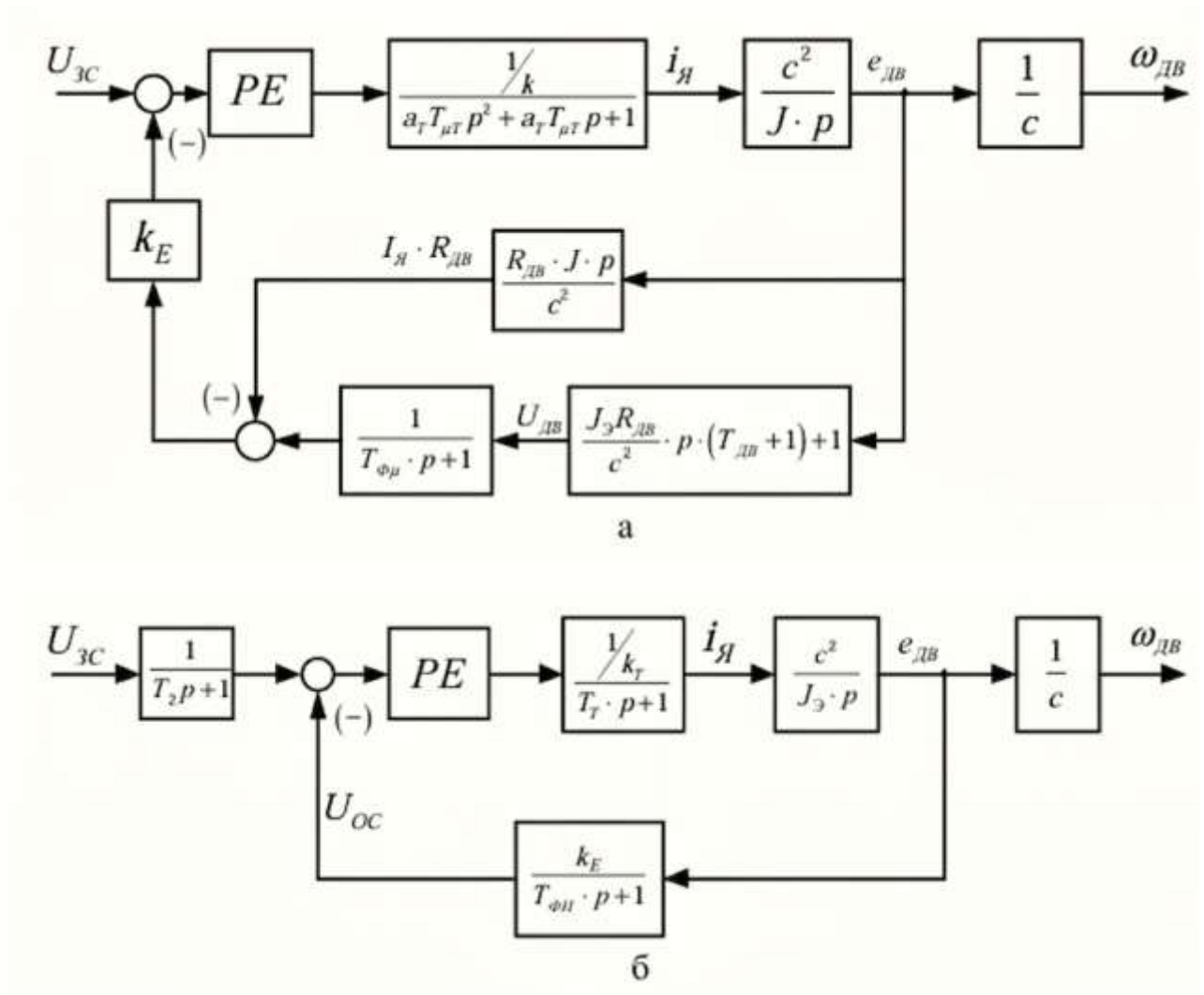
При апроксимації замкнутого внутрішнього контуру струму усіченою передавальною функцією та виконанні умови компенсації:

$$k_{OT2} = \frac{R_{дв} \cdot k_{дн}}{k_{дт}} = \frac{0,072 \cdot 0,02}{0,0125} = 0,1152. \quad (2.81)$$

Структурна схема трансформується до вигляду, зображеного на рисунку 2.9 б.

У даній моделі приймається рівність постійних часу фільтра і двигуна:

$T_{фн} = T_{дв}$. Наявність інерційної ланки в ланцюзі зворотного зв'язку обумовлює необхідність установки аналогічної ланки на вході системи з постійною часу $T_2 = T_{дв}$. Це технічне рішення дозволяє мінімізувати динамічне перерегулювання струму при відпрацюванні керуючих сигналів.



а - вихідна структура; б - спрощена (перетворена) схема

Рис. 2.9. Структурна схема контуру керування ЕРС

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

Оптимізація контуру ЕРС за технічним оптимумом можлива завдяки наявності в його структурі інтегратора. У даній конфігурації РЕП використовується П-регулятор, передавальна функція якого дозволяє досягти необхідних показників якості регулювання швидкості та напруги.

$$W(\rho)_{PЗ} = K_{PЗ}, \quad (2.82)$$

Коефіцієнт посилення регулятора ЕРС

$$K_{\mu\omega} = \frac{J_{\omega 2} \cdot K_T}{K_{\omega} \cdot c^2 \cdot \alpha_{\omega} \cdot T_{\mu\omega}} = \frac{105,25 \cdot 0,0139}{0,0238 \cdot 8,036^2 \cdot 2 \cdot 0,0674} = 7,061 \quad (2.83)$$

$$K_{\omega} = \frac{U_{\omega, \text{МАКС}}}{E_{\text{ДВ.МАКС}}} = \frac{10}{420,68} = 0,0238 \quad (2.84)$$

Коефіцієнт зворотнього зв'язку по ЕРС.

Мала постійна часу контуру ЕРС:

$$T_{\mu\omega} = T_T + T_{\Phi H} = 0,00334 + 0,064 = 0,0674 \text{ с} \quad (2.85)$$

$$T_T = \alpha_T \cdot T_{\mu T} = \alpha_T \cdot T_{TH} = 2 \cdot 0,00167 = 0,00334 \text{ с} \quad (2.86)$$

Еквівалентна постійна часу оптимізованого контуру струму;

$\alpha_e = 2$ – коефіцієнт оптимізації по МО контуру ЕРС.

Коефіцієнт передачі вхідного ланцюга зворотнього зв'язку регулятора по ЕРС.

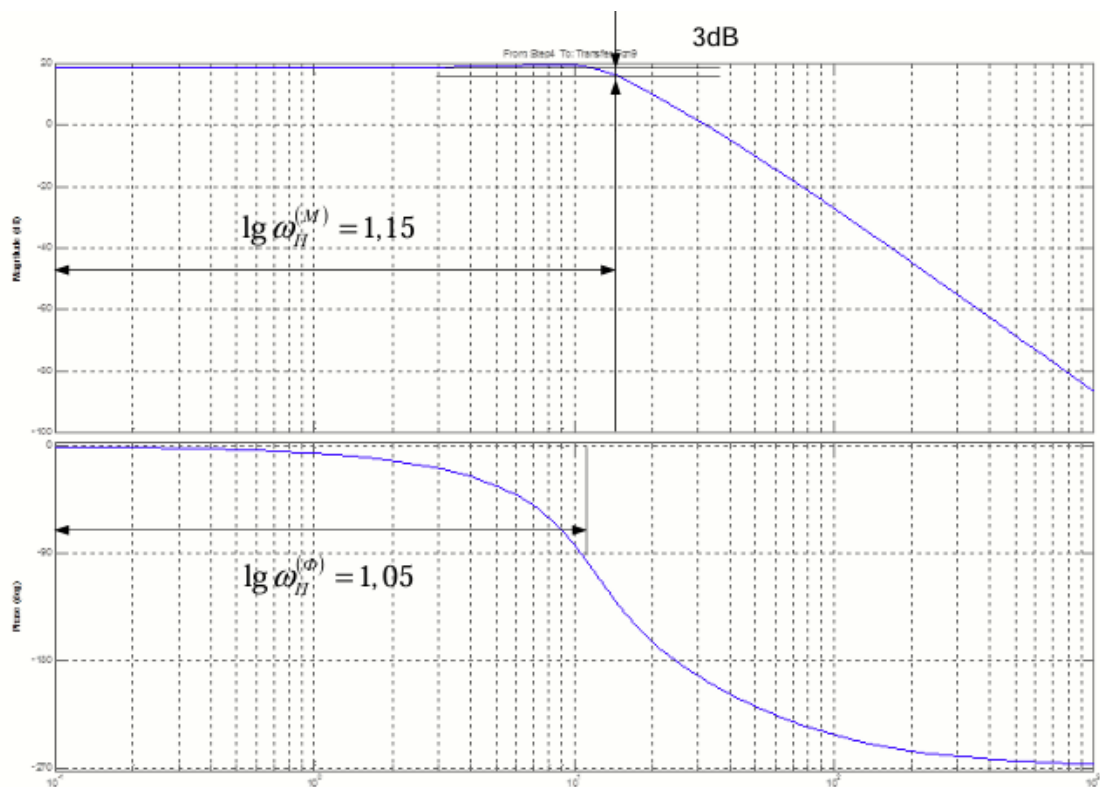
$$K_{\omega\omega} = \frac{K_{\omega}}{K_{\text{ДЭ}} \cdot K_{\text{ДН}}} = \frac{0,0238}{1 \cdot 0,02} = 1,19, \quad (2.87)$$

де $K_{\text{де}} = 1$ - коефіцієнт передачі датчика ЕРС.

Для аналізу динамічних властивостей системи визначимо передавальні функції оптимізованого контуру ЕРС. Роз'єднана система описується виразом для типового контуру з П-регулятором. При цьому замкнута структура, що включає вхідний фільтр для узгодження постійних часу, дозволяє отримати бажану залежність швидкості двигуна від керуючого сигналу. Математична модель замкнутого контуру має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W(p)_{PA3} &= \frac{1}{\alpha_3 \cdot T_{\mu 3} \cdot p \cdot (T_T \cdot p + 1) \cdot (T_{\Phi H} \cdot p + 1)} \approx \\
 &\approx \frac{1}{\alpha_3 \cdot T_{\mu 3} \cdot p \cdot [(T_T + T_{\Phi H}) \cdot p + 1]} \\
 W(p)_{Y.3AM} &= \frac{\frac{1}{k_3 \cdot C}}{\alpha_3 \cdot T_{\mu 3} \cdot p \cdot (T_T \cdot p + 1) \cdot (T_{\Phi H} \cdot p + 1) + 1} \approx \\
 &\approx \frac{\frac{1}{k_3 \cdot C}}{\alpha_3 \cdot T_{\mu 3} \cdot p \cdot [(T_T + T_{\Phi H}) \cdot p + 1] + 1}
 \end{aligned} \tag{2.88}$$

Очікуються показники якості контуру з фільтром на вході: $\sigma = 4,3 \%$ - перерегулювання; $0,276 \text{ с}$ - час першого входження в 5% зону й час перехідного процесу: $10,53 \text{ рад/с}$ (рис.2.10)



а - вихідна структура; б - спрощена (перетворена) схема

Рис. 2.10. ЛАЧХ замкнутого контуру ЕРС

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = 10^{1,15} = 14,13 \text{ рад/с}$$

$$f_{\Pi}^{(M)} = \frac{\omega_{\Pi}}{2\pi} = \frac{14,13}{6,283} = 2,25 \text{ Гц}$$

$$\omega_{\Pi}^{(\phi)} = 10^{1,05} = 11,22 \text{ рад/с} \quad (2.89)$$

$$f_{\Pi}^{(\phi)} = \frac{\omega_{\Pi}}{2\pi} = \frac{11,22}{6,283} = 1,79 \text{ Гц}$$

Очікувані показники якості регулювання контуру ЕРС за керуючим впливом:

При налаштуванні зовнішнього контуру на технічний (модульний) оптимум із використанням П-регулятора та фільтра на вході теоретичні показники якості перехідного процесу становлять:

$$\Delta\omega_{y,уст} = 0;$$

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

$\sigma = 4,3 \%$ - перерегулювання;

0,22 с - час першого входження в 5 % зону

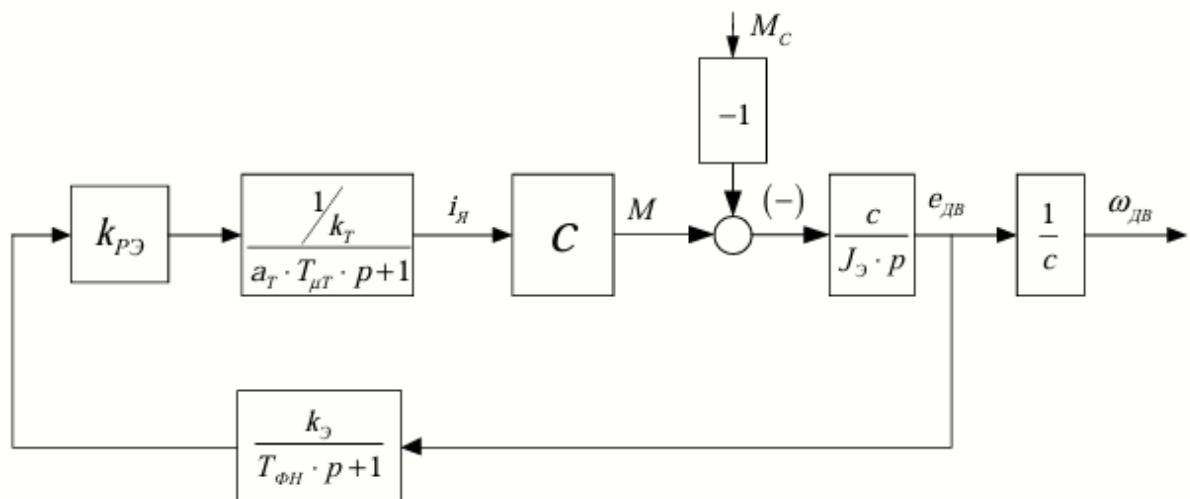


Рис. 2.11. Структурна схема контуру ЕРС по обуренню

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

$$W(p)_{B.3AM} = \frac{\frac{\alpha_{\varepsilon} \cdot T_{\mu\varepsilon}}{J_{\varepsilon 2}} \cdot (T_T \cdot p + 1) \cdot (T_{\Phi H} \cdot p + 1)}{\alpha_{\varepsilon} \cdot T_{\mu\varepsilon} \cdot p \cdot (T_T \cdot p + 1) \cdot (T_{\Phi H} \cdot p + 1) + 1} \quad (2.90)$$

$$\begin{aligned} W(p)_{B.3AM} &= \frac{\frac{2 \cdot 0,0674}{105,25} \cdot (0,00334 \cdot p + 1) (0,064 \cdot p + 1)}{2 \cdot 0,0674 \cdot p \cdot (0,00334 \cdot p + 1) (0,064 \cdot p + 1) + 1} = \\ &= \frac{2,737752 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 + 8,62464 \cdot 10^{-5} \cdot p + 0,00128076}{2,8814848 \cdot 10^{-5} \cdot p^3 + 9,077432 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 0,1348 \cdot p + 1} \end{aligned} \quad (2.91)$$

$$\Delta \omega_{B.YCT} = \frac{\alpha_{\varepsilon} \cdot T_{\mu\varepsilon}}{J_{\varepsilon}} \cdot \Delta M_C. \quad (2.92)$$

$$\Delta M_C = M_{ДВ.Н} = 2100 H \cdot m$$

$$\Delta \omega_{B.YCT} = \frac{2 \cdot 0,0674}{105,25} \cdot 2100 = 2,69 \text{ рад/с} \quad (2.93)$$

2.6 Розрахунок статичних характеристик РЕП та похибки швидкості при зміні навантаження

Структурна схема електроприводу для режиму стабілізації (ЕРС) наведена на рис. 2.12.

$$\begin{aligned}
U_{PЭ} &= k_{PЭ} (U_{3C} - U_{OЭ}) ; \\
U_{OЭ} &= k_{Э} \cdot E_{ДВ} (U_{3C} - U_{OЭ}) ; \\
U_{PT} &= k_{OУ.PT} \cdot (U_{PЭ} - U_{OT}) ; \\
E_{ТП} &= k_{ТП} \cdot U_{PT} ; \\
E_{ДВ} &= E_{ТП} - R_{ЯЦ} \cdot I ; \\
\omega &= E_{ДВ} / C ,
\end{aligned} \tag{2.94}$$

Вирішивши систему рівняння відносно ω знайдемо рівняння для статичної електромагнітної характеристики привода в режимі стабілізації швидкості:

$$\begin{aligned}
\omega(I) &= \frac{k_{ТП} \cdot k_{OУ.PT} \cdot k_{PЭ}}{1 + k_{ТП} \cdot k_{OУ.PT} \cdot k_{PЭ} \cdot k_{Э}} \cdot \frac{U_{3C}}{c} - \frac{R_{ЯЦ} \cdot I}{c} \cdot \frac{1 + \frac{k_{ТП} \cdot k_{OУ.PT} \cdot k_T}{R_{ЯЦ}}}{1 + k_{ТП} \cdot k_{OУ.PT} \cdot k_{PЭ} \cdot k_{Э}} \\
\omega(I) &= \frac{174 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 7,061}{1 + 174 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 7,061 \cdot 0,0238} \cdot \frac{U_{3C}}{8,036} - \frac{0,1178 \cdot I}{8,036} \cdot \frac{1 + \frac{174 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0,0139}{0,1178}}{1 + 174 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 7,061 \cdot 0,0238} = \\
&= \omega_0(U_{3C}) - \Delta\omega(I) = 5,228 \cdot U_{3C} - 0,0103 \cdot I .
\end{aligned} \tag{2}$$

Статична похибка по управлінню:

$$\Delta\omega_{УСТ} = \omega_{3АД} - \omega_{УСТ} = \frac{U_{3C}}{k_{Э} \cdot c} - 5,228 \cdot U_{3C} = 0 . \tag{2.96}$$

$$\Delta H = \frac{\omega_0(U_{3C}) - \omega(I_{ДВ.Н})}{\omega_0(U_{3C}) + \omega(I_{ДВ.Н})} \cdot 100\% = \frac{\Delta\omega(I_{ДВ.Н})}{\omega_0(U_{3C}) + \omega(I_{ДВ.Н})} \cdot 100\% \tag{2.97}$$

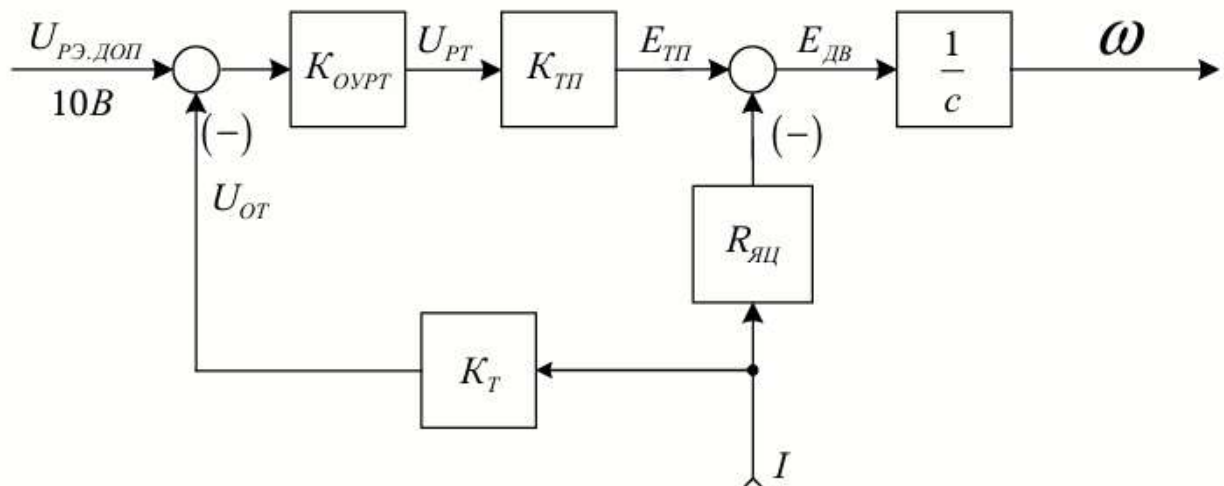


Рис. 2.14. Структурна схема електроприводу для режиму стабілізації струму

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

Схема, наведена на рис.2.14 можна описати рівняннями:

$$\begin{aligned}
 U_{РТ} &= (U_{PЭ.ДОП} - U_{OT}) \cdot K_{ОУ.РТ}; \\
 U_{OT} &= K_T \cdot I; \\
 E_{ТП} &= K_{ТП} \cdot U_{РТ}; \\
 I &= \frac{E_{ТП} - E_{ДВ}}{R_{ЯЦ}}; \\
 E_{ДВ} &= C \cdot \omega.
 \end{aligned} \tag{2.98}$$

$$I(\omega) = \frac{k_{ОУ.РТ} \cdot k_{ТП}}{R_{ЯЦ} + k_{ОУ.РТ} \cdot k_{ТП} \cdot k_T} \cdot U_{PЭ.ДОП} - \frac{C \cdot \omega}{R_{ЯЦ} + k_{ТП} \cdot k_{ОУ.РТ} \cdot k_T}. \tag{2.99}$$

$$\begin{aligned}
 I(\omega) &= \frac{2 \cdot 10^4 \cdot 174}{0,1178 + 2 \cdot 10^4 \cdot 174 \cdot 0,0139} \cdot U_{PЭ.ДОП} - \frac{8,036 \cdot \omega}{0,1178 + 174 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0,0139} = \\
 &= I(\omega=0) - \Delta I(\omega) = 71,942 \cdot U_{PЭ.ДОП} - 1,661 \cdot 10^{-4} \cdot \omega.
 \end{aligned}$$

$$\Delta\omega = \frac{\Delta I(\omega_{\text{ЭП.МАКС}})}{I(\omega = 0)} \cdot 100\% . \quad (2.100)$$

Таблиця 2.8

Статична характеристика приводу

$U_{3C}, \text{В}$	$\omega, \text{рад}/\text{с}$			$\Delta n, \%$
	$I = 0 \text{ А}$	$I_{\text{ДВ.Н}} = 274 \text{ А}$	$I_{\text{ЭП.МАКС}} = 720 \text{ А}$	
10	52,286	49,465	44,875	2,772
8	41,829	39,008	34,418	3,489
6	31,371	28,551	23,961	4,706
4	20,914	18,094	13,503	7,23
2	10,457	7,637	3,046	15,586

Таблиця 2.9

Статична характеристика приводу в режимі стабілізації струму

$\omega, \text{рад}/\text{с}$	0	$\omega_{\text{ЭП.МАКС}} = \text{рад}/\text{с}$	$\Delta n, \%$
$I, \text{А}$	719,998	719,99	$1,177 \cdot 10^{-3}$

Електромеханічні характеристики електроприводу представлені на рис. 2.15.

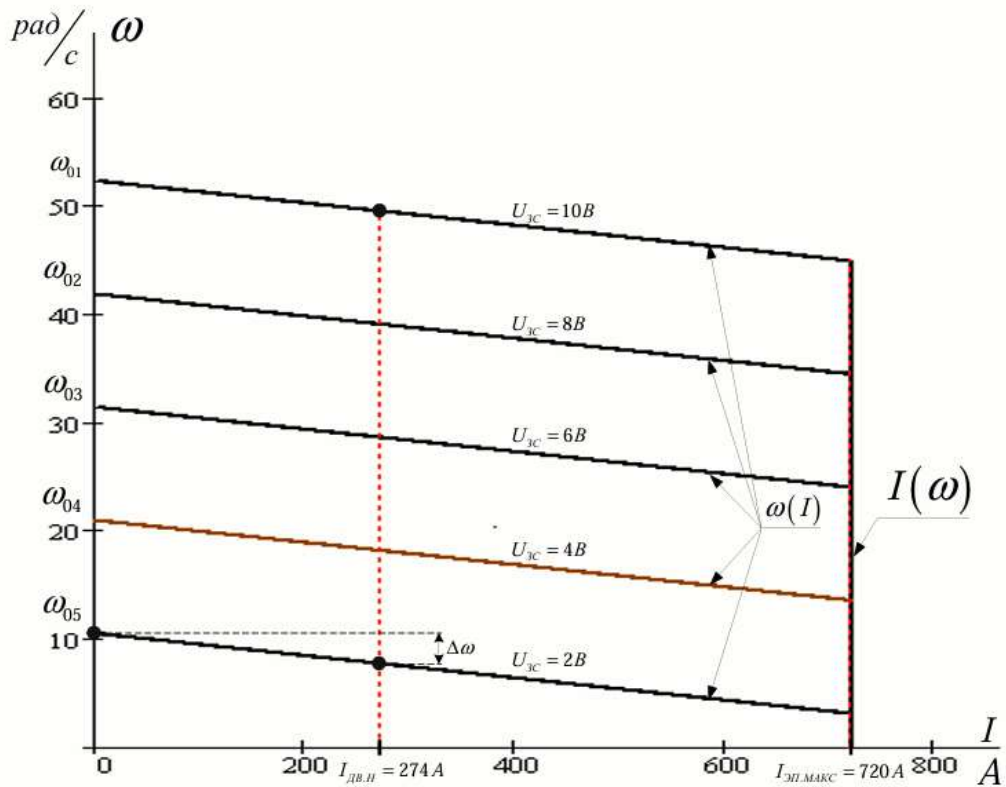


Рис. 2.15. Електромеханічні характеристики електроприводу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

2.7 Структурна схема нелінійної САУ РЕП

Під час дослідження роботи контуру в режимі навантаження було виявлено наявність статичної похибки ($\Delta E_{ст} \neq 0$). Оскільки обрана схема САУ з ПІ-регулятором не забезпечує астатизму щодо збурювального впливу, швидкість (ЕРС) двигуна змінюватиметься пропорційно моменту опору. Це характерна особливість обраного методу налаштування для даного типу механізмів.

Структурна схема нелінійної САУ електроприводу

Основними нелінійностями схеми електроприводу є:

- насичення регуляторів $U_{ре макс} = 10 \text{ В}$, $U_{рт макс} = 10 \text{ В}$;
- насичення тиристорного перетворювача, що викликане обмеженням мінімального кута управління,

2.8 Розрахунок перехідних процесів

Налаштування контурів САУ електроприводу

Методологія синтезу багатоконтурних систем автоматичного керування (САУ) регульованим електроприводом (РЕП) детально розроблена для лінійних моделей. Процес проектування базується на використанні типових структур підпорядкованого регулювання. При розрахунку параметрів допускається нехтування впливом внутрішнього зворотного зв'язку по ЕРС двигуна (на структурних схемах цей зв'язок зазвичай позначається пунктирною лінією).

У рамках даної роботи досліджувана система зводиться до стандартної двоконтурної конфігурації підпорядкованого регулювання, яка включає:

- зовнішній контур регулювання ЕРС з пропорційним регулятором (П–РЕ);
- внутрішній контур регулювання струму з пропорційно-інтегральним регулятором (ПІ–РТ).

Оптимізація внутрішнього контуру струму

Внутрішній контур, що відповідає за регулювання струму якоря, включає в себе регулятор струму та об'єкт керування, до складу якого входять:

- тиристорний перетворювач (ТП);
- якорний ланцюг електродвигуна;
- датчик струму (вузли зворотного зв'язку).

На основі передавальної функції замкнутого оптимізованого контуру струму в програмному середовищі Matlab було виконано моделювання, результати якого показали такі показники якості: стаціонарна похибка $\Delta I_{уст} = 0$; максимальне перерегулювання $\sigma = 4,3\%$; час першого узгодження

$$t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu m} = 0,006847 \text{ с};$$

смуга пропускання за модулем і фазою відповідає необхідним нормам швидкодії.

Схема набору наведена на рис.2.17. Діаграми цикла роботи електроприводу приймального рольгангу наведена на рис.2.17.

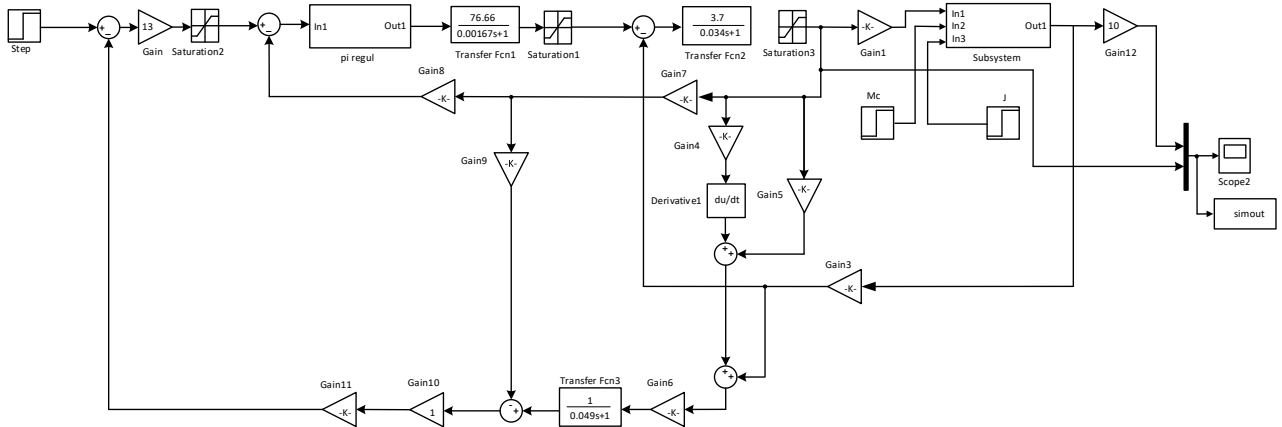


Рис. 2.17. Схема набору в програмне середовище Matlab

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

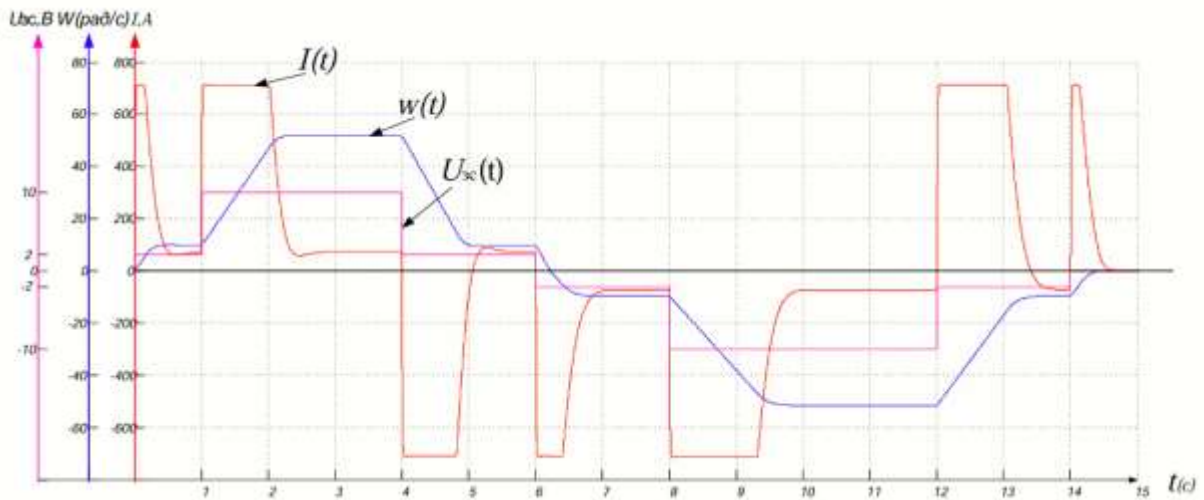


Рис. 2.18. Діаграми цикла роботи електроприводу приймального рольгангу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [9]

2.9 Система захисту та сигналізації електроприводу

Комплексна система захисту та сигналізації призначена для забезпечення безвідмовної роботи тиристорного електроприводу та оперативного інформування персоналу про стан обладнання. Вона виконує функції аварійного відключення при спрацьовуванні різних видів захистів, попереджувальної

сигналізації при несправностях, а також контролює готовність приводу до пуску та блокує несанкціоновані дії оператора.

Система захисту та сигналізації (СЗС) електроприводу приймального рольгангу реалізує такі функції:

- захист від внутрішніх коротких замикань у перетворювачі;
- миттєве відключення струму при перевищенні пікового значення струму;
- захист при порушеннях у мережі власних потреб;
- запобігання аварійним режимам при перекиданні або прориві інвертора;
- захист тиристорів від теплового перевантаження (за середньоквадратичним струмом);
- захист при недопустимому зниженні або повному зникненні напруги живлення;
- обмеження максимальної напруги на якорі електродвигуна;
- захист від тривалого перевантаження двигуна (перевищення заданого струму протягом більше 20 секунд при стоянці під струмом);
- моніторинг справності джерел живлення системи управління;
- контроль максимально допустимої швидкості обертання вала двигуна.

Комплексна система захисту та сигналізації забезпечує безперебійну роботу РЕП приймального конвеєра та інформує персонал про поточний стан агрегату. Основні види реалізованих систем захисту:

Електричні: від внутрішніх коротких замикань, перевищення миттєвого значення струму та перевантаження тиристорів за середньоквадратичним струмом;

Мережеві: при аномаліях у мережі власних потреб та неприпустимому зниженні силової напруги;

Режимові: від перекидання інвертора, перевищення напруги на якорі та перевищення допустимої швидкості обертання.

Система блокувань виключає:

Увімкнення приводу за наявності активного аварійного сигналу або неправильного складання схеми;

Подачу напруги на двигун, що вже обертається.

При спрацьовуванні будь-якого захисту формується диференційований світловий сигнал з функцією запам'ятовування першопричини несправності. Додатково передбачена індикація положення автоматичних вимикачів і готовності приводу до роботи.

2.10 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації приймального рольгангу

2.10.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів під час експлуатації рольгангу обтискного цеху

Експлуатація приймального рольгангу в умовах обтискного цеху пов'язана з впливом комплексу негативних факторів, зумовлених як технологічним процесом (транспортування гарячого металу), так і роботою механічного та електричного обладнання.

Фізичні небезпечні та шкідливі фактори

Рухомі машини та механізми:

Основну небезпеку становлять обертові ролики рольгангу, вали двигунів та з'єднувальні муфти. Небезпека посилюється за відсутності або несправності захисних кожухів, що може призвести до зачеплення одягу або травмування персоналу.

Підвищена температура поверхонь і повітря:

Транспортований метал (злитки, блюми) має температуру до 1100–1250°C. Інтенсивне теплове випромінювання (інфрачервоний вплив) призводить до перегріву організму (гіпертермії), а випадковий контакт з металом або нагрітими частинами рольгангу викликає важкі термічні опіки.

Підвищений рівень шуму та вібрації:

Робота потужних електродвигунів, редукторів та удари металу об ролики створюють широкосмуговий шум, що перевищує допустимі норми (80 дБА).

Тривалий вплив призводить до розвитку професійної тугоухості та підвищеної стомлюваності.

Небезпека ураження електричним струмом:

Оскільки рольганг приводиться в дію системою «тиристорний перетворювач — двигун постійного струму», існує ризик ураження струмом у разі пробією ізоляції на корпус, несправності заземлення або випадкового дотику до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою.

Хімічні шкідливі фактори. Запиленість та загазованість: Під час переміщення гарячого металу відбувається інтенсивне утворення окалини (пил оксидів заліза). Крім того, при згорянні технологічних мастил у повітря робочої зони можуть виділятися продукти горіння та аерозолі масел, що мають подразнювальну та токсичну дію на органи дихання.

Психофізіологічні фактори. Напруженість і важкість праці: Робота оператора та обслуговуючого персоналу характеризується високою концентрацією уваги, емоційними навантаженнями через відповідальність за дороге обладнання та монотонністю візуального спостереження за рухом металу.

Таблиця 2.10

Шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Фактор	Джерело виникнення
Інфрачервоне випромінювання	Гарячий прокат (злитки)
Механічний шум	Редуктори, двигуни, удари металу
Електричний струм	Електропривід, шафи управління

2.10.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Для мінімізації ризиків під час експлуатації рольгангу передбачаються такі заходи: Технічні: встановлення захисних екранів від теплового випромінювання, огороження обертових частин муфт і валів, облаштування звукоізолюючих кабін для операторів.

Електробезпека: обов'язкове заземлення (занулення) корпусів двигунів і станин рольгангу, використання системи блокувань (описаних у розд. 2.9).

ЗІЗ: забезпечення персоналу спецодягом з вогнестійких тканин (сукно), використання захисних окулярів зі світлофільтрами

Для забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації рольгангу обтискного цеху впроваджується комплекс захисних заходів, розділений на кілька рівнів.

Технічні засоби колективного захисту

Захист від теплового випромінювання:

Встановлення стаціонарних відбивних екранів (сталеві листи з повітряним прошарком або водоохолоджувані панелі) уздовж лінії рольгангу в місцях постійного перебування персоналу. Це дозволяє знизити інтенсивність інфрачервоного опромінення на 50–70%.

Застосування повітряного обдування робочих місць операторів, що знаходяться поблизу зон транспортування гарячого прокату.

Захист від механічних травм:

Усі обертові частини (з'єднувальні муфти, виступаючі кінці валів двигунів) повинні бути закриті суцільними металевими кожухами, пофарбованими у попереджувальний жовтий колір.

Встановлення захисних бортів уздовж рольгангу для запобігання можливому падінню злитків або блюмів з роликів.

Боротьба з шумом і вібрацією:

Використання віброізолюючих опор при монтажі електродвигунів і редукторів.

Розміщення постів управління в звукоізованих кабінах з подвійним склінням, що забезпечують рівень шуму всередині не більше 65 дБА.

Електробезпека. Захисне заземлення та занулення:

Усі неструмопровідні частини електрообладнання (корпуси двигунів постійного струму, шафи ТП, пульт управління) підлягають обов'язковому

приєднанню до загальноцехового контуру заземлення. Опір заземлюючого пристрою не повинен перевищувати 4 Ом.

Система блокування та сигналізації:

Впровадження передпускової звукової та світлової сигналізації, що попереджає про початок руху роликів.

Встановлення кнопок «Аварійна зупинка» по всій довжині рольгангу з кроком не більше 10 метрів для екстреної зупинки приводу.

Автоматичне блокування ввімкнення приводу при відкритих дверцятах шаф управління або знятих захисних кожухах.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Персонал, що обслуговує рольганг, в обов'язковому порядку забезпечується:

Спецодягом: костюми з вогнестійких тканин (наприклад, сукно або тканини з просоченням типу Proban), що захищають від іскор та теплового випромінювання.

Захистом органів зору: окуляри з інфрачервоним фільтром (тип Г-1, Г-2) для захисту сітківки ока від «засліплення» гарячим металом.

Захистом органів слуху: протишумові навушники або вкладиші при виконанні робіт поза кабіною управління.

Спецвзуттям: черевики з металевим підноском і термостійкою підошвою.

Організаційні заходи

Навчання та допуск: проведення первинного та повторних інструктажів, навчання за програмою «Електробезпека» (група не нижче III для ремонтного персоналу).

Режим праці: встановлення регламентованих перерв під час роботи в умовах підвищених температур та дотримання питного режиму (підсолена газувана вода для компенсації сольового обміну).

Планово-попереджувальний ремонт (ППР): регулярний контроль стану ізоляції кабелів та перевірка затягування болтових з'єднань заземлення.

2.10.3. Пожежна безпека та санітарія

Розробка системи пожежної безпеки на ділянці рольгангу

Пожежна безпека (ПБ) забезпечується комплексом організаційних заходів та технічних засобів, спрямованих на унеможливлення виникнення пожежі та обмеження її наслідків.

Категоризація приміщень та аналіз пожежної небезпеки

Обтискний цех належить до категорії Г (помірна пожежна небезпека) згідно з НПБ, оскільки в ньому знаходяться негорючі речовини в гарячому або розпеченому стані. Однак наявність мастильних систем та кабельних трас створює локальні зони категорії В (пожежонебезпечні).

Основні джерела займання:

Перегрів підшипників і редукторів при заклинюванні роликів.

Короткі замикання в силових кабелях електродвигунів.

Потрапляння розжареної окалини або частинок металу на змащені поверхні або ганчір'я.

Система запобігання пожежі (технічні заходи)

Автоматичне відключення (Захист): Використання струмового відсікання та теплових реле в шафах управління (розд. 2.9) для миттєвого знеструмлення приводу при перевантаженнях, запобігаючи загорянню ізоляції.

Застосування негорючих матеріалів: Використання кабелів з індексом нг-LS (не підтримують горіння, з низьким димовиділенням) та вогнестійких коробів для прокладки трас.

Ізоляція ГСМ: Регулярне очищення станини рольгангу від скупчень масла та окалини. Встановлення піддонів під редукторами для уникнення розливу масла на підлогу цеху.

Система протипожежного захисту (засоби гасіння)

На ділянці приймального конвеєра має бути передбачена така схема розміщення засобів пожежогасіння:

Первинні засоби пожежогасіння:

Вуглекислотні вогнегасники (типу ОУ-5 або ОУ-8): Розміщуються поблизу шаф тиристорних перетворювачів і пультів управління. Вуглекислота не пошкоджує електроніку і не проводить струм.

Порошкові вогнегасники (типу ОП-10): Для гасіння загорянь розлитого масла або твердих матеріалів.

Ящики з піском і протипожежні щити: Розташовуються на вході в зону обслуговування рольгангу.

Стаціонарні системи:

У кабельних тунелях і підпільних каналах під рольгангом повинна бути передбачена автоматична установка пожежогасіння (АУП) — порошкова або газова.

Розміщення внутрішніх пожежних кранів (ПК) з діаметром рукава 50 мм у доступних зонах (на відстані не більше 20 м від будь-якої точки рольгангу).

Схема оповіщення та евакуації

Пожежна сигналізація: Встановлення оптичних димових або теплових датчиків у місцях прокладення кабелів та в кабіні оператора.

Світлова індикація: Встановлення показчиків «ВИХІД», що живляться від мережі аварійного освітлення.

Шляхи евакуації: Схеми евакуації повинні бути вивішені на видних місцях. Проходи вздовж рольгангу повинні бути вільні від сторонніх предметів і мати ширину не менше 1,0 м.

Розроблена схема пожежної безпеки мінімізує ризики виникнення пожеж та забезпечує швидку локалізацію вогню, що гарантує збереження дорогого електрообладнання та безпеку персоналу

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтування структури: Спроектовано двоконтурну систему підпорядкованого регулювання із зовнішнім контуром ЕРС та внутрішнім контуром струму, що є оптимальним рішенням для механізмів, які не потребують прецизійного підтримання швидкості.

2. Синтез та оптимізація: Виконано динамічний синтез регуляторів (ПІ-регулятор струму та П-регулятор ЕРС) з використанням налаштування на технічний (модульний) оптимум, що забезпечує високу швидкодію при мінімальному перерегулюванні.

3. Показники якості: Моделювання в середовищі MATLAB підтвердило ефективність обраних налаштувань: перерегулювання в контурах склало 4,3%, а статична похибка по керуючому впливу зведена до нуля.

4. Статичні характеристики: Встановлено, що використання П-регулятора ЕРС призводить до наявності статичної похибки при зміні моменту навантаження ($\Delta E_{ст} \neq 0$), що повністю відповідає технологічним вимогам до експлуатації рольгангів.

5. Надійність і захист: Розроблено комплексну систему захистів і блокувань, включаючи миттєве відключення струму, захист від перевантажень і контроль напруги, що гарантує безаварійну роботу тиристорного перетворювача і двигуна у важких промислових умовах.

6. Практична значущість: Застосування лінеаризованих моделей на етапі попереднього синтезу в поєднанні з імітаційним моделюванням нелінійної системи дозволило з високою точністю визначити параметри обладнання, необхідні для реального впровадження на виробництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Клепіков В.Б. Енерго- та ресурсозберігаючі режими керованих електроприводів: навч. посібник. Харків: НТУ «ХП», 2017. 168 с.
2. Мазуренко Л.І., Шибіко О. В. Системи керування електроприводами: підручник. Київ: НТУУ «КП», 2015. 350 с.
3. Попович М.Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ: Либідь, 2007. 656 с.
4. Терешкевич Л. Б. Основи електропривода : навч. посібник. Вінниця: ВНТУ, 2012. 154 с.
5. Шавьолкін О.О. Основи автоматизованого електропривода: навч. посібник. Краматорськ: ДДМА, 2016. 232 с.
6. Приймак Б. Г. Налаштування систем підпорядкованого регулювання електроприводів: навч. посібник. Київ: НТУУ «КП», 2010. 144 с.
7. Лозинський О.Ю., Маляр В. С., Мороз В. І. Системи автоматичного керування електроприводами: підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 380 с.
8. Рудаков В. В. Автоматизований електропривод промислових установок: навч. посібник. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. 190 с.
9. Загірняк М.В., Невзлін В. Б. Електричні машини: підручник. Київ: Знання, 2009. 399 с.
10. Качан Ю. Г. Електропостачання та електрообладнання об'єктів металургійної промисловості: навч. посібник. Запоріжжя: ЗДІА, 2014. 210 с.
11. Геврик Є.О. Охорона праці : навч. посібник. Київ: Ельга, Ніка-Центр, 2012. 672 с.
12. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці: підручник. Львів : Афіша, 2015. 350 с.
13. Катренко Л.О. Охорона праці в галузі: навч. посібник. Суми: Університетська книга, 2017. 544 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-93-2026врб

Автор

141-93-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є.

ІД документу

334168296

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата з'яву

6/4/2026

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

9001

Кількість слів



КЦ

76918

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		27
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		9

Джерела

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

10 найдовших фразКолір тексту

НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

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

Я, Наумов Віталій Володимирович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Регульований електропривод приймального рольгангу стана 1250» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений. 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